



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Influência da Adesividade Agregado/Betume no Desempenho de uma Mistura Betuminosa

Maria Manuel Araújo Sá Maia

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof.^a Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida
Coorientador: Doutor Fernando da Conceição Gonçalves Martinho

Covilhã, outubro de 2018

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação representa o fim de uma etapa essencial da minha vida, o que não seria possível sem o apoio, colaboração e dedicação de várias pessoas e entidades, às quais desejo expressar os meus agradecimentos.

Em primeiro lugar à minha orientadora, Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida pelo apoio incondicional, encorajamento, disponibilidade e claro pela amizade e momentos de boa disposição ao longo deste trabalho.

Ao Doutor Fernando Martinho, por todo o seu conhecimento transmitido e ajuda.

À Universidade da Beira Interior, nomeadamente ao Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) pelo contributo na minha formação e pelos meios e condições colocados à disposição na realização desta dissertação.

A todos os docentes que marcaram o meu percurso universitário e me transmitiram todo o seu conhecimento para poder chegar a esta etapa.

À CEPSA Portuguesa, em particular à Eng^a Teresa Carvalho, pelos betumes fornecidos e pelo seu contributo na realização deste trabalho.

À empresa JRS, em particular ao Eng^o Ruy Nunez, pelo fornecimento das fibras celulósicas.

Ao Sr. Félix, Técnico do laboratório do DECA, pela grande ajuda e apoio na execução do trabalho experimental e por todos os momentos de boa disposição e humor.

A todos os meus amigos, que de alguma maneira transmitiram motivação necessária.

À minha família, em especial aos meus pais, irmã e avós, por me acompanharem ao longo da vida e me terem dado força e condições para a minha formação.

Por último, mas não menos importante, ao Tiago, por todo o apoio, motivação e compreensão. Agradeço-lhe toda a paciência que teve comigo durante o estudo experimental e principalmente a ajuda, nos momentos mais difíceis no decorrer dos ensaios.

A todos um muito obrigada!

RESUMO

As administrações de estradas em todo o mundo têm tomado consciência, ao longo das últimas décadas, da importância de alargar o ciclo de vida dos materiais constituintes das diferentes camadas dos pavimentos rodoviários. Um dos principais problemas verificados nos pavimentos rodoviários é a formação de cavados de rodeira, que surgem devido ao acentuado crescimento do volume de tráfego rodoviário e da sucessiva passagem de rodados de veículos pesados, em especial, em zonas com velocidades baixas. A existência de cavados de rodeira, agravam as condições de conforto e segurança dos utentes na circulação rodoviária, uma vez que favorecem a acumulação de água sobre a superfície do pavimento, reduzindo a aderência pneu/pavimento, podendo originar fenómenos de hidroplanagem.

Esta dissertação tem como principal objetivo, o estudo de formulação de misturas betuminosas a aplicar em camadas de desgaste, com vista a melhorar a adesividade entre o agregado e o betume e, conseqüentemente, aumentar a resistência à deformação permanente.

Estudaram-se quatro misturas diferentes, três delas misturas tradicionais que diferem no tipo de fíler e na curva granulométrica, e a quarta, uma mistura descontínua, com a adição de um promotor de adesividade, na forma de fibras celulósicas impregnadas com uma amina.

No estudo de formulação de cada mistura, analisaram-se algumas propriedades, tais como baridade e porosidade. O ensaio *Marshall* realizou-se com o intuito de determinar o teor ótimo de betume para cada tipo de mistura. Posteriormente, realizou-se o ensaio de afinidade entre agregado e ligante, o ensaio de sensibilidade à água e, por último, o ensaio *wheel tracking*, para a avaliação da resistência à deformação permanente.

Dos resultados obtidos, verificou-se no ensaio de afinidade entre agregado e ligante, que a adição do promotor de adesividade, sob a forma de fibras celulósicas impregnadas com uma amina, contribuiu para um aumento de 10 % da superfície de agregado coberta com betume, relativamente aos agregados sem a utilização deste promotor. No ensaio de sensibilidade à água, as misturas com fíler granítico apresentam o valor mais baixo de ITSR (70 %), sendo as misturas com fíler calcário as que apresentam o maior valor de ITSR (93 %). Quanto aos resultados do ensaio *wheel tracking*, verificou-se que a utilização do fíler calcário traduz uma melhoria no comportamento face à deformação permanente das misturas betuminosas. A mistura com promotor de adesividade revelou o melhor resultado médio na análise deste parâmetro.

Palavras-chave

Adesividade; Deformação permanente; Fibras celulósicas; Fíler, Misturas betuminosas.

Abstract

Over the past few decades, road administrations around the world have become aware of the importance of extending the life cycle of materials that make up the different layers of road pavements. One of the main problems encountered in road pavements is the formation of rut depth due to increase in the volume of road traffic and the successive passage of heavy vehicle, especially in areas with low speeds. The existence of rut depth makes the conditions of comfort and safety of road users decrease, favoring the water accumulation on the pavement surface, reducing tire / pavement friction, which can lead to hydroplaning phenomena.

The main objective of this dissertation is to study bituminous mixtures design to be applied in surface layers to improve the affinity between aggregate and bitumen and, consequently, to increase resistance to permanent deformation.

Four different mixtures were studied, three of them traditional mixtures, differing in the type of filler and in aggregates grading curve, and the fourth, a discontinuous mixture, with the addition of an affinity promoter in the form of cellulosic fibers impregnated with an amine.

In the bituminous mixtures design, some properties, such as bulk density and porosity, were analyzed. The Marshall test was carried out with the purpose of determining the optimum bitumen content for each type of mixture. Subsequently, was performed the affinity between aggregate and bitumen test, the water sensitivity test and, finally, the wheel tracking test, for the evaluation of resistance to permanent deformation.

From the results obtained, it was found that in affinity between aggregate and bitumen test, the addition of the affinity promoter, in the form of cellulosic fibers impregnated with an amine, contributed to a 10% increase in the aggregate surface covered with bitumen, relative to the aggregates without the use of this promoter. In the water sensitivity test, the mixtures with granitic filler present the lowest ITSR value (70%), and the mixtures with limestone filler are the ones with the highest ITSR value (93%). Regarding the results of the wheel tracking test, it was verified that the use of the limestone filler translates an improvement in the behavior against the permanent deformation of the bituminous mixtures. The mixture with affinity promoter showed the best average result in the analysis of this parameter.

Keywords

Affinity; Bituminous mixtures; Cellulosic fibers; Fíler; Permanent deformation

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento temático	1
1.2 Objetivos do estudo	1
1.3 Organização do trabalho desenvolvido	2
CAPÍTULO 2 - Adesividade entre Agregado e Betume	3
2.1 Introdução.....	3
2.2 Betumes	4
2.2.1 Betumes tradicionais	4
2.2.2 Betumes modificados.....	5
2.3 Tipos de filer	6
2.3.1 Fileres recuperados em central.....	7
2.3.2 Fileres comerciais naturais	7
2.3.3 Fileres comerciais artificiais.....	8
2.4 Tipos de promotor de adesividade	9
2.4.1 Aditivos orgânicos.....	9
2.4.2 Aditivos químicos	10
2.4.3 Espuma de betume	10
2.4.4 Outros aditivos.....	11
CAPÍTULO 3 - Misturas betuminosas para camadas de desgaste	13
3.1 Introdução.....	13
3.2 Misturas tradicionais	13
3.3 Misturas descontínuas	16
3.3.1 Vantagens da utilização das misturas SMA	17
CAPÍTULO 4 - Trabalho experimental	19
4.1 Introdução.....	19
4.2 Caracterização dos materiais utilizados.....	19
4.2.1 Agregados e fileres.....	19
4.2.2 Ligante betuminoso	23
4.2.3 Fibras celulósicas	24
4.3 Formulação das misturas betuminosas	25
4.3.1 Composição de agregados.....	25
4.3.2 Estimativa da quantidade inicial de betume	28

4.3.3	Teor ótimo de betume	29
4.4	Ensaio de caracterização das misturas betuminosas	34
4.4.1	Afinidade agregado/betume	34
4.4.3	Sensibilidade à água	37
4.4.4	Deformação Permanente.....	41
CAPÍTULO 5 - Considerações finais		49
5.1	Conclusões.....	49
5.2	Trabalhos futuros.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		51
ACERVO NORMATIVO		55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Esquema de central de produção de fíler comercial (Teixeira, 2015)	8
Figura 2.2: Sasobit® (Kefei et al., 2016)	10
Figura 2.3: Aditivo Rediset™ WMX (Benta et al., 2015)	10
Figura 2.4: Produção de espuma de betume numa camara de expansão (adaptado de Jenkins, 2000)	11
Figura 2.5: Aditivo Viatop plus AD 10®	12
Figura 3.1: Mistura descontínua a) sem fibras; b) e c) com fibras (Martinho et al., 2013)	16
Figura 4.1 a) Brita 1; b) Bago de arroz.....	20
Figura 4.2 Pó de pedra	20
Figura 4.3 a) Fíler granítico; b) Fíler calcário	20
Figura 4.4: Análise Granulométrica dos agregados utilizados	21
Figura 4.5: AccuPyc™ 1330 Gas Pycnometer	23
Figura 4.6: Fibras celulósicas com promotor de adesividade, Viatop plus AD 10®	24
Figura 4.7: Curva Granulométrica para as misturas ACFG e ACFC	26
Figura 4.8: Curva Granulométrica para a mistura AC14 UBI	27
Figura 4.9: Curva Granulométrica para a mistura SMA11-F	28
Figura 4.10: Deformação Marshall e Estabilidade Marshall das misturas AC 14 UBI.....	33
Figura 4.11: Deformação Marshall e Estabilidade Marshall das misturas SMA 11-F	33
Figura 4.12: a) Parcela de agregado com a respetiva garrafa; b) Grupos de brita separados em 3 parcelas	35
Figura 4.13: a) Agitador horizontal rotativo; b) Agitador com as garrafas, durante o ensaio .	35
Figura 4.14: Grau de revestimento das partículas (EN 12591:2009)	36
Figura 4.15: Percentagem de revestimento do agregado sem aditivo após 6 horas e 24 horas	36
Figura 4.16: Percentagem de revestimento do agregado com aditivo após 6 horas e 24 horas	37
Figura 4.17: Aspeto de agregados após ensaio de afinidade agregado/betume	37
Figura 4.18: a) Pesagem do provete seco; b) Pesagem do provete saturado; c) Colocação dos provetes a vácuo em água.....	39
Figura 4.19: Provetes deformados depois do ensaio à sensibilidade	39
Figura 4.20: Resultados do Ensaio de Sensibilidade à Água	40
Figura 4.21: Tipos de rotura (EN 12697-23)	40
Figura 4.22: Rotura dos provetes dos 4 tipos de misturas	41
Figura 4.23: Zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista, 1999)	42
Figura 4.24: a) Material a aquecer na estufa; b) Mistura dos materiais na misturadora elétrica;	43
Figura 4.25: a) Compactação da mistura; b) Lajeta após compactação	43

Figura 4.26: a) colocação da lajeta no carrinho; b) Colocação do pneu sobre a lajeta.....	45
Figura 4.27: a) Lajeta após ensaio; b) Pormenor da rodeira na lajeta.....	45
Figura 4.28: Deformação Permanente da mistura ACFG.....	46
Figura 4.29: Deformação Permanente da mistura ACFC.....	46
Figura 4.30: Deformação Permanente da mistura AC14 UBI.....	47
Figura 4.31: Deformação Permanente da mistura SMA11-F.....	47

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Requisitos dos betumes de pavimentação (adaptado do CETO)	4
Tabela 2.2: Propriedades dos fileres (adaptado de Teixeira, 2015)	7
Tabela 3.1: Requisitos do fuso granulométrico para AC 14 surf	14
Tabela 3.2: Requisitos do fuso granulométrico para AC 14 surf (BBr) e AC 10 surf (mBBr)	15
Tabela 3.3: Requisitos do fuso granulométrico para PA 12,5 (BBd)	15
Tabela 3.4: Requisitos do fuso granulométrico para as misturas SMA	17
Tabela 4.1: Massa Volúmica dos agregados utilizados	22
Tabela 4.2: Massa Volúmica dos fileres	23
Tabela 4.3: Características do betume 50/70	23
Tabela 4.4: Características do granulado	24
Tabela 4.5: Percentagem de agregados para as misturas ACFG e ACFC	25
Tabela 4.6: Percentagem de agregados para as misturas AC14 UBI	26
Tabela 4.7: Percentagem de agregados para a mistura SMA11-F	27
Tabela 4.8: Percentagem de betume inicial para a mistura AC14 UBI e SMA11-F	29
Tabela 4.9: Formulação de cada mistura para a percentagem de betume estudado	29
Tabela 4.10: Baridade máxima teórica	30
Tabela 4.11: Baridade média das misturas	31
Tabela 4.12: Porosidade média das misturas	32
Tabela 4.13: Requisitos das propriedades das misturas segundo CETO	32
Tabela 4.14: Formulação final das misturas betuminosas	34
Tabela 4.15: Resultados do Ensaio de Sensibilidade à Água	39
Tabela 4.16: Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental (Freire, 2002)	42
Tabela 4.17: Baridade e Porosidade média das lajetas	44
Tabela 4.18: Comparação entre as características das lajetas e dos provetes cilíndricos	44
Tabela 4.19: Resultados do ensaio de Deformação Permanente das misturas betuminosas ...	48

LISTA DE ACRÓNIMOS

ACFC	Asphalt Concrete Fíler Calcário
ACFG	Asphalt Concrete Fíler Granítico
BB	Betão Modificado com borracha
BBd	Betão Betuminoso Drenante
BBr	Betão Betuminoso rugoso
CETO	Caderno de Encargos Tipo Obra da Infraestruturas de Portugal, ex-Estradas de Portugal
D	Diâmetro do Provette
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
EAPA	European Asphalt Pavement Association
EN	European Standard
EP	Estradas de Portugal
H	Altura do Provette
HL	<i>Hidrated Lime</i>
ITS	Resistência à tração em compressão diametral
ITS _d	valor médio da resistência à tração indireta dos provetes “a seco”;
ITS _w	valor médio da resistência à tração indireta dos provetes “imersos”;
ITSM	Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta
mBBr	Micro-betão betumino rugoso
P	Resistência máxima média
PA	Porous Asphalt

P_b	Percentagem de betume em relação ao peso total da mistura
PMB	<i>Polymer modified bitumens</i>
PRD_{air}	Média proporcional da profundidade de rodeira
RD_{air}	Profundidade média da rodeira
SMA	<i>Stone Mastic Asphalt</i>
UBI	Universidade da Beira Interior
V_m	Porosidade
VMA	Vazios na mistura de agregados
WTS	<i>Wheel Tracking Slope</i>
WTS_{air}	Taxa de deformação média para o procedimento B
ρ_{bssd}	Baridade saturada com superfície seca do provete
ρ_w	Massa volúmica da água à temperatura de ensaio
P_{mc}	Baridade máxima teórica da mistura betuminosa

CAPÍTULO 1 - Introdução

1.1 Enquadramento temático

As administrações de estradas em todo o mundo têm tomado consciência, ao longo das últimas décadas, da importância de alargar o ciclo de vida dos materiais que fazem parte das diferentes camadas dos pavimentos rodoviários, criando programas de apoio ao estudo e desenvolvimento de novas tecnologias. Esta preocupação tem o objetivo de aumentar a durabilidade dos pavimentos, pois quanto maior a sua vida útil, menos recursos serão gastos na sua conservação e reabilitação.

Um dos principais problemas verificados nos pavimentos rodoviários é a formação de cavados de rodeira, que surgem devido ao acentuado crescimento do volume de tráfego rodoviário e da sucessiva passagem de rodados de veículos pesados, em especial, em zonas com velocidades baixas. A existência de cavados de rodeira, agravam as condições de conforto e segurança dos utentes na circulação rodoviária, uma vez que favorecem a acumulação de água sobre a superfície do pavimento, reduzindo a aderência pneu/pavimento, podendo originar fenómenos de hidroplanagem. Assim, torna-se fundamental que as características funcionais e estruturais de um pavimento se prolonguem ao longo do tempo.

A diminuição do desempenho das misturas betuminosas depende, essencialmente, da perda de adesividade entre o agregado e betume originando a sua desagregação. A adesividade entre o agregado e betume é uma característica complexa que depende de vários fatores, nomeadamente, da natureza dos agregados, do envelhecimento do betume e da presença de água.

Neste trabalho, foi avaliado o comportamento das misturas betuminosas para diferentes composições granulométricas, utilizando diferentes tipos de fíler e, ainda, o uso de promotores de adesividade.

1.2 Objetivos do estudo

Este estudo incide na avaliação da influência da adesividade entre o agregado e o betume no desempenho de misturas betuminosas, a aplicar em camadas de desgaste. Pretende dar-se a conhecer os principais fatores que influenciam a adesividade, como por exemplo o tipo de betume, tipo de fíler e a adição de promotores de adesividade. Estes fatores contribuem para melhorar a durabilidade e o desempenho da mistura face à deformação permanente, à sensibilidade à água e à afinidade entre agregado e betume.

Assim, na presente dissertação estudou-se a melhor formulação para uma mistura tradicional, do tipo AC 14 surf, e a melhor formulação para uma mistura descontínua, do tipo SMA com adição de fibras celulósicas impregnadas com uma amina. Para este estudo foram considerados os requisitos presentes no Caderno de Encargos Tipo Obra da Infraestruturas de Portugal, ex-Estradas de Portugal (CETO) e a norma *EN 13108-5:2006 Bituminous mixtures - Material specifications - Part 5: Stone Mastic Asphalt*.

1.3 Organização do trabalho desenvolvido

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, cuja organização e conteúdo se sumaria nesta secção.

No primeiro capítulo, faz-se um breve enquadramento ao tema, descrevendo os principais objetivos da dissertação e uma síntese da organização do trabalho.

No capítulo 2, apresenta-se um estado de arte sobre a adesividade entre agregado e betume. Expõe-se os diferentes fatores que influenciam esta temática, como o tipo de betume, sendo este tradicional ou modificado, o tipo de fíler, recuperado em central, natural ou artificial e a adição de promotores de adesividade, orgânicos, químicos, espuma de betume ou outros aditivos utilizados.

No capítulo 3, explicam-se os diferentes tipos de misturas betuminosas a aplicar em camadas de desgaste. Descrevem-se, em primeiro lugar, as misturas tradicionais e os seus diferentes tipos, tendo em conta o betão betuminoso utilizado e os seus fusos preconizados no CETO. Em segundo lugar, descreve-se uma mistura descontínua, do tipo SMA, os fusos preconizados na norma *EN 13108-5* e as suas vantagens comparativamente às misturas tradicionais.

No capítulo 4, descreve-se o trabalho experimental realizado. Começa-se com uma caracterização dos agregados utilizados nas misturas, bem como o seu estudo de composição. Com o objetivo de encontrar a melhor formulação das misturas betuminosas, estima-se a quantidade inicial de betume e escolhe-se o teor ótimo de betume, tendo em conta a baridade, a porosidade e o ensaio *Marshall*. Por fim, as misturas são caracterizadas através do ensaio de afinidade entre o agregado e betume, ensaio de sensibilidade à água e ensaio de resistência à deformação permanente.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões da presente dissertação e algumas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - Adesividade entre Agregado e Betume

2.1 Introdução

Atualmente, Portugal tem registado temperaturas muito altas durante o Verão, favoráveis ao aparecimento de anomalias nos pavimentos rodoviários, resultantes do processo de envelhecimento das misturas betuminosas. Este envelhecimento acelerado provoca mudanças nas propriedades das misturas betuminosas, tais como, a fraca aderência de agregados ao betume e o aumento da rigidez e viscosidade do betume, verificando-se os primeiros impactos na camada de desgaste.

O ligante das misturas betuminosas é um material viscoelástico e as suas propriedades dependem da temperatura do pavimento, logo, com as variações de temperatura, este material vai sofrer alterações, nomeadamente, tornando-se mais duro, influenciando o seu desempenho. O endurecimento consequente da mistura betuminosa, por envelhecimento do betume, leva à perda de flexibilidade, adesividade e diminuição da capacidade de suportar ações provenientes do tráfego. Uma das principais anomalias que surge nas camadas betuminosas é o aparecimento de cavados de rodéiras resultantes das deformações permanentes (Simões, 2016).

Assim, torna-se necessário estudar o comportamento das misturas betuminosas á deformação permanente. Esta patologia é influenciada por vários fatores, como a temperatura, o tipo de betume, o tipo de tráfego, a natureza e a granulometria do agregado e a adesividade entre o agregado e o betume, sendo as duas últimas, alvo de estudo neste trabalho.

A maior parte dos problemas de adesividade verificados na mistura betuminosa da camada de desgaste, ocorre com a utilização de agregados com carácter ácido, de natureza siliciosa. Assim, é comum considerar-se que o betume apresenta maior afinidade a agregados calcários, vulgarmente considerados de carácter básico, do que a agregados granitoídes, de carácter ácido (Judele, 2011).

Contudo, a presença de muitos agregados graníticos nas misturas betuminosas, sem qualquer problema de desprendimento, e outras misturas com agregados de outras origens, como por exemplo de origem calcária em que se verifica o desprendimento, leva à conclusão que nem só a origem do agregado é responsável pela perda de adesividade em presença de água, existindo outros fatores importantes neste fenómeno. A maior ou menor adesividade entre o agregado e o betume não depende apenas da natureza dos agregados, mas também da viscosidade e composição química do betume, verificando que um agregado pode apresentar boa adesão a

um determinado betume e má adesão a um outro betume de diferente origem (Herrero et al., 2009).

2.2 Betumes

Os betumes são hidrocarbonetos obtidos através da destilação do crude (ou de outras origens) e possuem características particulares que conferem coesão e trabalhabilidade às misturas betuminosas (Teixeira, 2015). É um material praticamente não volátil e impermeável à água, muito viscoso e quase sólido à temperatura ambiente (CEPSA, 2014). O betume tem a capacidade de envolver os agregados, ligando-os e protegendo-os dos agentes externos, garantindo uma maior durabilidade dos pavimentos (Teixeira, 2015). As propriedades mais importantes para a caracterização dos betumes são a penetração e a temperatura de amolecimento. No entanto, podem ser avaliadas outras propriedades dos betumes referentes às suas características de desempenho mecânico (Branco *et al.*, 2008).

Existem diferentes tipos de betume, os betumes tradicionais, com uma utilização mais corrente e os betumes modificados.

2.2.1 Betumes tradicionais

O comportamento do betume varia com a temperatura e por essa razão é necessário escolher, para cada tipo de mistura betuminosa, o betume ideal, compatível com as características do pavimento. Em Portugal, nas misturas betuminosas a quente utilizam-se betumes de pavimentação, como por exemplo, betumes com classe de penetração 35/50 e 50/70 (CEPSA, 2014). Para além destes, existe ainda o betume duro, betume 10/20, utilizado em misturas betuminosas de alto módulo.

O betume 35/50, comparativamente ao betume 50/70, possui valores de penetração mais baixos e uma menor resistência ao fendilhamento por baixas temperaturas. No entanto, possui menor suscetibilidade às deformações permanentes por efeito de temperaturas elevadas (Fazaeli *et al.*, 2012). No CETO são especificados os requisitos dos betumes de pavimentação, que podem ser observados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Requisitos dos betumes de pavimentação (adaptado do CETO)

Propriedades	Referência normativa	Unidade	35/50	50/70	10/20
Penetração a 25 °C	EN 1426	0,1 mm	35 - 50	50 - 70	10 - 20

Propriedades	Referência normativa	Unidade	35/50	50/70	10/20
Temperatura de amolecimento	EN 1427	° C	50 - 58	46 - 54	60 - 76
Penetração retida	EN 1426	%	≥ 53	≥ 50	≥ 55
Aumento da temperatura de amolecimento - severidade 2	EN 1427	° C	≤ 11		≤ 10
Variação em massa	EN 12607-1	%	≤ 0,5		
Temperatura de inflamação	EN ISO 2592	° C	≥ 240	≥ 230	≥ 245
Viscosidade Cinemática a 135°	EN 12595	mm ² /s	≥ 370	≥ 295	≥ 700
Solubilidade	EN 12592	%	≥ 99,0		

2.2.2 Betumes modificados

De forma a conferir uma maior coesão e tenacidade à mistura betuminosa, bem como melhorar a resistência à fadiga e às deformações permanentes, os betumes podem ser modificados pela adição de polímeros, borracha e asfaltos naturais. Estes aditivos aumentam a viscosidade do betume a elevadas temperaturas, diminuem a suscetibilidade térmica e a fragilidade a baixas temperaturas (CEPSA, 2014). Podem ter ainda uma melhoria nos sistemas funcionais, como por exemplo a drenabilidade superficial, a geração de ruído e a aderência e regularidade superficial (Menezes, 2008).

- Betumes modificados com polímeros (PMB)

Os betumes modificados com polímeros obtêm-se por mistura física, mediante a simples dispersão do polímero no ligante, ou por reação química (CEPSA, 2014). Os tipos de betume mais utilizados são os betumes modificados com polímeros, quer de plastómeros, que melhoram as propriedades do ligante a altas temperaturas, como também a partir de elastómeros, que apresentam melhorias a altas e baixas temperaturas, conferindo coesão e elasticidade ao betume (CEPSA, 2014).

Os betumes modificados são recomendados para misturas betuminosas descontínuas, onde se incluem as misturas abertas, pois este tipo de betume é menos suscetível ao envelhecimento, contribuindo para a durabilidade da mistura (Teixeira, 2015). No entanto, este envelhecimento dos betumes modificados devido à oxidação bem como degradação do polímero, ocorre durante o fabrico, transporte e colocação da mistura betuminosa durante o primeiro ano de serviço (Lu *et al.*, 2010).

Segundo o CETO, existem diferentes tipos de betumes modificados com polímeros, tais como, PMB 10/40-65, PMB 25/55-65, PMB 45/80-55 e PMB 65/105-80, com a designação PMB (*polymer modified bitumens*) seguida da classe de penetração e da temperatura mínima de amolecimento.

- Betumes modificados com borracha (BB)

Este tipo de betume modificado é um ligante obtido através da adição de granulado de borracha. Quando a adição é feita diretamente no betume, denomina-se por via húmida e o resultado é uma mistura betuminosa homogénea (Menezes, 2008). Existe ainda outra forma de adição, sendo esta durante o fabrico da mistura betuminosa, ao mesmo tempo que os agregados são envolvidos com o betume, denominando-se por via seca (Teixeira, 2015).

Os betumes modificados com borracha apresentam menores valores de rigidez a baixas temperaturas e maiores valores a elevadas temperaturas, contribuindo assim para o menor risco de fendilhamento por baixas temperaturas e de deformações permanentes. De acordo com estudos realizados por Victoria & Estébanez em 2009, com betumes do tipo 50/70 de várias origens, com e sem borracha, concluiu-se que os betumes com borracha possuem propriedades reológicas superiores aos betumes sem borracha.

Os betumes modificados com borracha podem ser de três tipos, BBA - alta percentagem de borracha, igual ou superior a 18%, levando a um betume de alta viscosidade; BBM - média percentagem de borracha, entre 10 a 14%, levando a um betume com viscosidade média e por último BBB - baixa percentagem de borracha, igual ou inferior a 8%, levando a um betume de baixa viscosidade (Teixeira, 2015; CETO, 2014).

2.3 Tipos de fíler

Uma mistura betuminosa, bem como o seu desempenho, é influenciada essencialmente pelas características dos fileres. A norma NP EN 13043:2004/AC:2010 Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação, define fíler como “todo o material granular, de origem natural, artificial ou reciclada, cuja maior parte passa no peneiro de 0,063 mm, que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades”. Nesta norma podem ainda encontrar-se os requisitos para vários tipos de agregados, nomeadamente para o fíler. Estes requisitos estão divididos em requisitos geométricos, físicos e químicos.

As propriedades dos fileres mais importantes que afetam as misturas betuminosas são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Propriedades dos fileres (adaptado de Teixeira, 2015)

Propriedades físicas/geométricas	Propriedades químicas
Granulometria	Solubilidade das partículas em água
Teor de água	Plasticidade das partículas
Massa Volúmica	Atividade das partículas argilosas
Vazios entre as partículas	pH da suspensão em água
Superfície específica	Análise química elementar

Assim, os dois principais objetivos da utilização do fíler são, juntamente com o betume, contribuir para a adesão e rigidez adequadas das misturas betuminosas e para a apropriada distribuição granulométrica da mistura de agregados.

Em Portugal utilizam-se fileres comerciais, produtos obtidos nas indústrias próprias e materiais obtidos nas centrais betuminosas. Os fileres comerciais mais utilizados são de origem natural, resultantes da britagem e moagem da rocha calcária. Os fileres comerciais de origem artificial, por exemplo a cal hidráulica, o cimento Portland e a cal hidratada têm uma utilização mais restrita (Teixeira, 2015).

2.3.1 Fileres recuperados em central

É nas centrais betuminosas, através de um tambor secador, que os agregados são secos e aquecidos. Este tambor secador possui um filtro de mangas que impede que as partículas de menor dimensão sejam lançadas para a atmosfera. O material retido no filtro constitui um fíler natural, denominado fíler recuperado e tem características similares aos agregados utilizados numa mistura betuminosa. Esse fíler poderá ser reintroduzido no fabrico de uma mistura betuminosa (Teixeira, 2015).

Por outro lado, os fileres também podem ser recuperados da lavagem dos agregados. Exemplo desta situação é o fíler granítico utilizado no trabalho experimental apresentado no capítulo 4.

2.3.2 Fileres comerciais naturais

Os fileres comerciais naturais usados em misturas betuminosas resultam da britagem e moagem de rocha, essencialmente de origem calcária (Teixeira, 2015).

O seu processo de fabrico inicia-se com a extração da rocha, seguida de britagem. Após esta fase inicia-se a moagem do material. A Figura 2.1 representa um esquema de central de produção deste material.

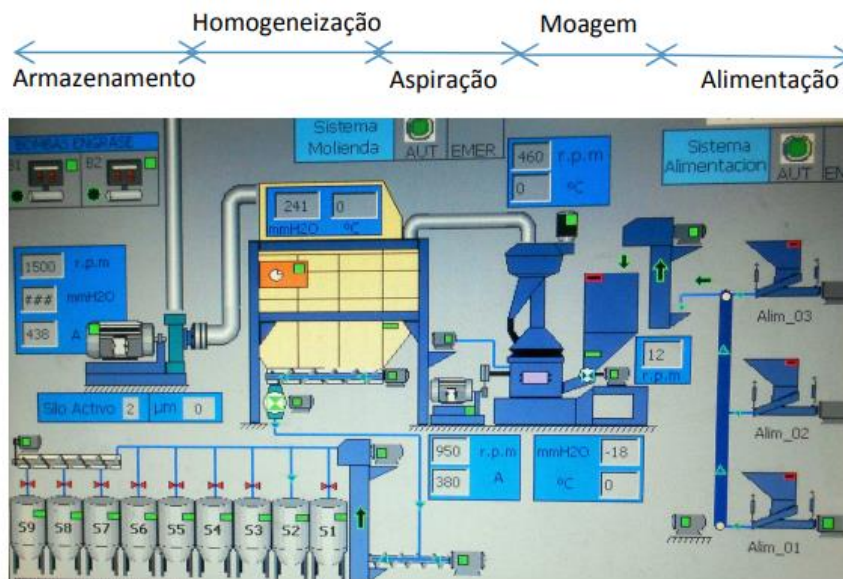


Figura 2.1: Esquema de central de produção de filer comercial (Teixeira, 2015)

2.3.3 Fileres comerciais artificiais

Em Portugal, existem vários fileres comerciais artificiais utilizados na produção de misturas betuminosas tais como, a cal hidráulica, a cal hidratada e o cimento Portland.

- Cal hidráulica e cal hidratada

A cal hidráulica é um ligante constituído por hidróxidos de cálcio e forma-se quando o óxido de cálcio reage com a água. Consoante a quantidade de água utilizada, pode ainda formar-se um hidrato seco (pó seco), uma pasta (pasta de cal) ou um líquido leite de cal (suspensão seca em água). Existem três tipos de cal hidráulica, HL 2; HL 3,5 e HL 5, representando os números associados à sigla, o valor mínimo da resistência mecânica à compressão, aos 28 dias de idade, expressa em mega Pascal (Teixeira, 2015).

A cal hidratada é um ligante constituído por óxidos de cálcio ou hidróxidos de cálcio, que endurece lentamente ao ar por reação com o dióxido de carbono. O seu endurecimento realiza-se quando, numa primeira fase, existe a evaporação da humidade em excesso e, numa segunda fase, quando se dá a recarbonatação, uma reação química muito lenta, ao ar (Miranda, 2009).

No trabalho experimental apresentado no capítulo 4, foi utilizado uma cal hidráulica, com a designação comercial MARTINGANÇA HL5 da empresa SECIL.

- Cimento Portland

A norma NP EN 197-1:2012, Cimento - Parte 1 Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes, define cimento Portland como “um ligante hidráulico, material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que ganha presa e endurece por meio de reações de hidratação e que, após o endurecimento, mantém a sua capacidade resistente e estabilidade mesmo debaixo de água”.

Existem vários tipos de cimento Portland: tipo I, II, III, IV e V. O cimento tipo I é essencialmente composto por clínquer, cerca de 95 a 100% (NP EN 197-1:2012), enquanto aos restantes, para além do clínquer, lhes são juntados outros aditivos.

Os cimentos possuem classes de resistência: 32,5; 42,5 e 52,5 MPa que caracterizam a resistência mecânica à compressão, aos 28 dias de idade. Se este acréscimo acontecer de forma mais rápida, os cimentos são designados “R”, se acontecer de forma mais lenta designa-se por “N”.

Podem ser usados como fíler em misturas betuminosas, mas numa percentagem limitada, para não rigidificarem em demasia o mástique betuminoso.

2.4 Tipos de promotor de adesividade

2.4.1 Aditivos orgânicos

Os aditivos orgânicos são constituídos maioritariamente por ceras orgânicas e amidas gordas e são incorporados nas misturas betuminosas para reduzir a viscosidade do betume. Este tipo de aditivo deve ser selecionado de maneira cuidadosa para que o ponto de fusão seja superior às temperaturas de serviço, de modo a que a deformação permanente e fragilidade da mistura betuminosa a baixas temperaturas seja menor. Estes aditivos oferecem uma redução de temperatura de 20 °C e 30 °C, ao mesmo tempo que também melhoram a resistência à deformação do betume modificado (EAPA, 2010). Os produtos mais comuns são produzidos a partir do gás natural, como o caso do *Sasobit*[®], apresentado na figura 2.2. Existem ainda outros aditivos como o *Asphaltan-B*, que é uma mistura de ceras obtidas por extração com solvente a partir de lenhite ou carvão castanho, o *Thiopave*[™], uma tecnologia que utiliza um enxofre melhorado (Martinho, 2014).



Figura 2.2: Sasobit® (Kefei et al., 2016)

2.4.2 Aditivos químicos

A principal característica dos aditivos químicos é a modificação da interface microscópica dos agregados e betume, que mesmo a baixas temperaturas, entre 85 e 140 °C, melhoram a adesividade sem alterar o desempenho da mistura betuminosa. Estes aditivos são adicionados ao ligante durante o processo de fabrico embora haja também técnicas de adição através de uma emulsão betuminosa (Martinho, 2014).

Os produtos, como o caso do *Rediset™ WMX* (apresentado na figura 2.3) e *Cecabase® RT*, incluem um conjunto de tensoativos e promotores de adesividade. O aditivo designado por *Evotherm™* é utilizado na forma de emulsão.



Figura 2.3: Aditivo Rediset™ WMX (Benta et al., 2015)

2.4.3 Espuma de betume

Este aditivo caracteriza-se essencialmente pela redução da viscosidade do betume. Forma-se pela introdução de pequenas quantidades de água no betume quente, que após se transformar em vapor de água, aumenta o volume do betume e reduz a sua viscosidade por um curto

período. Esta expansão do betume permite o revestimento dos agregados a temperaturas mais baixas (EAPA, 2010).

Existem duas técnicas de formação de espuma de betume, espuma de betume com minerais sintéticos ou naturais e espuma de betume por injeção de água, representada esquematicamente na

Figura 2.4. A primeira técnica tem como base a utilização de zeólitos e a segunda técnica é conseguida sob a forma de spray no betume quente ou pela adição de agregados finos húmidos (Ferreira, 2009).

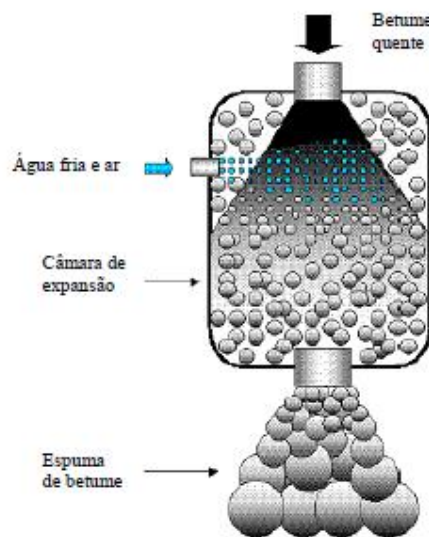


Figura 2.4: Produção de espuma de betume numa camara de expansão (adaptado de Jenkins, 2000)

2.4.4 Outros aditivos

Existem diversos aditivos com diferentes propriedades e funções destinados a melhorar as propriedades das misturas betuminosas.

Por exemplo, os aditivos com a designação comercial Viatop[®], dispõem de diferentes tipos de fibras celulósicas, cada grupo com uma função diferente. Os aditivos Viatop premium[®] e Viatop 66[®] proporcionam uma durabilidade superior às misturas betuminosas. O aditivo Viatop plus C 25[®] proporciona uma compactação melhorada e o aditivo Viatop plus CT 40[®] proporciona reduções nas temperaturas de fabrico/compactação.

No trabalho experimental, descrito no capítulo 4, foi utilizado um outro aditivo com a designação comercial de Viatop plus AD 10[®], constituído por fibras celulósicas impregnadas com betume 50/70 e um promotor de adesividade. Este aditivo apresenta diversas vantagens, como a redução do envelhecimento e a melhoria do comportamento da mistura betuminosa a longo

prazo. O ponto fulcral deste trabalho, está relacionado com a melhoria de adesividade entre a superfície do agregado e o betume. A Figura 2.5 representa o aditivo Viatop plus AD 10[®] e os seus constituintes (fibras celulósicas, betume 50/70 e o promotor de adesividade).

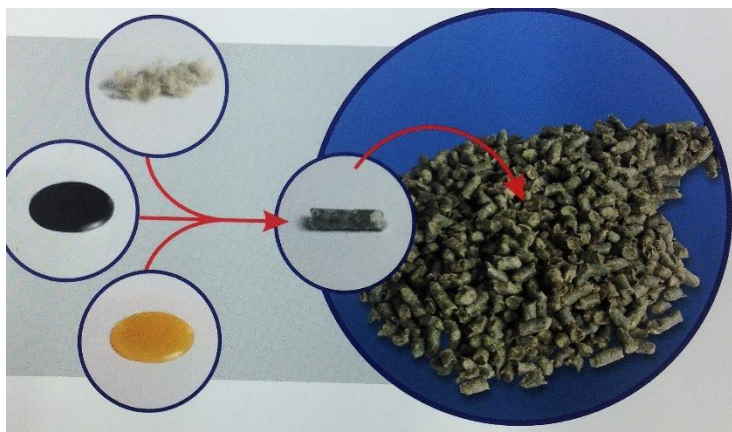


Figura 2.5: Aditivo Viatop plus AD 10[®]

CAPÍTULO 3 - Misturas betuminosas para camadas de desgaste

3.1 Introdução

As misturas betuminosas são normalmente constituídas por um conjunto de materiais granulares doseados de forma ponderal ou volumétrica, misturados numa central com uma quantidade de ligante. Depois da mistura, esses materiais são transportados, espalhados e compactados, formando assim uma camada de pavimento (Branco *et al.*, 2008).

Existem três tipos de misturas betuminosas, as misturas betuminosas a frio, onde são utilizados materiais constituintes à temperatura ambiente, as misturas betuminosas a quente que se produzem utilizando materiais aquecidos previamente e as misturas betuminosas temperadas, fabricadas a temperaturas intermédias. Apesar das misturas betuminosas a frio serem caracterizadas pela facilidade de manipulação, as misturas mais usadas em pavimentação de estradas são as misturas betuminosas a quente, pois possuem menores probabilidades de insucesso e melhor qualidade final (Sardão, 2012).

Neste trabalho foi estudada uma mistura betuminosa a quente tradicional, a aplicar na camada de desgaste.

A camada de desgaste, a primeira da estrutura de um pavimento, está sujeita à ação do tráfego e dos agentes atmosféricos. É responsável por assegurar as características funcionais da superfície e garantir a circulação com conforto e segurança.

Dentro do grupo das misturas betuminosas a quente existem misturas tradicionais e misturas descontínuas.

3.2 Misturas tradicionais

Segundo o CETO, na rubrica 14.03.2.4 - Camada de desgaste, existem diferentes tipos de misturas betuminosas utilizados em camadas de desgaste, podendo ser divididas consoante a classificação do tipo de betão betuminoso. Assim, surgem o betão betuminoso, Betão betuminoso rugoso (BBr) e micro-betão betuminoso rugoso (mBBr) e Betão betuminoso drenante (BBd).

- Betão betuminoso

Nesta categoria a mistura betuminosa mais utilizada em camadas de desgaste é a AC 14 surf, com o agregado cuja dimensão máxima é de 14 mm. É uma mistura caracterizada por baixa permeabilidade, resistente à ação abrasiva do tráfego e mais adequada para vias com elevadas velocidades de circulação e climas chuvosos (CEPSA, 2014). Normalmente esta camada é aplicada com espessuras entre 4 e 6 cm.

Segundo o CETO, no quadro 14.03.2l, podemos consultar os requisitos do fuso granulométrico para a camada de desgaste, dos vários tipos de misturas betuminosas.

Na Tabela 3.1 observamos o fuso granulométrico para a mistura AC 14 surf.

Tabela 3.1: Requisitos do fuso granulométrico para AC 14 surf

Peneiros Serie Base + Serie 2 (mm)	AC 14 surf Rubrica 14.03.2.4.1
	Percentagem acumulada do material passado
20	100
14	90 - 100
10	67 - 77
4	40 - 52
2	25 - 40
0,5	11 - 19
0,125	6 - 10
0,063	5 - 8

- Betão betuminoso rugoso (BBr) e micro-betão betuminoso rugoso (mBBr)

As misturas rugosas AC 10 surf (mBBr), com o agregado cuja dimensão máxima é de 10 mm, e a mistura AC 14 surf (BBr), proporcionam camadas de desgaste com uma excelente macrot textura, melhorando a segurança da circulação com o pavimento molhado. Destinam-se a tráfegos elevados (CEPSA, 2014). Este tipo de camada apresenta espessuras inferiores, entre 2,5 e 3,5 cm, pelo que a sua contribuição para a resistência estrutural do pavimento pode considerar-se desprezável (Branco *et al.*, 2008).

Na Tabela 3.2 observamos o fuso granulométrico para a mistura AC 14 surf (BBr) e AC 10 surf (mBBr).

Tabela 3.2: Requisitos do fuso granulométrico para AC 14 surf (BBr) e AC 10 surf (mBBr)

Peneiros Serie Base + Serie 2 (mm)	AC 10 surf (mBBr) Rubrica 14.03.2.4.3	AC 14 surf (BBr) Rubrica 14.03.2.4.4
	Percentagem acumulada do material passado	Percentagem acumulada do material passado
20	-	100
14	100	90 - 100
10	90 - 100	62 - 78
4	27 - 39	30 - 44
2	22 - 32	22 - 30
0,5	15 - 25	12 - 21
0,125	-	7 - 13
0,063	7 - 11	4 - 9

- Betão betuminoso drenante (BBd)

O betão betuminoso drenante, PA 12,5 (BBd), designado por *Porous asphalt* com o agregado cuja dimensão máxima é de 12,5 mm, é caracterizado por eliminar ou reduzir problemas de hidroplanagem dos veículos em tempo de chuva, pois a drenagem é feita no interior da camada superficial (Branco *et al.*, 2008). Possuem ainda menor resistência aos efeitos abrasivos do tráfego (CEPSA, 2014). Este tipo de mistura destina-se exclusivamente a ser aplicada em camadas de desgaste e é normalmente aplicada com espessuras de 4 cm. A drenagem da água é feita no interior da camada superficial até às bermas, ao contrário do que ocorre nas camadas mais fechadas, nas quais o escoamento ocorre à superfície (Branco *et al.*, 2008).

Na Tabela 3.3 observamos o fuso granulométrico para a mistura PA 12,5 (BBd).

Tabela 3.3: Requisitos do fuso granulométrico para PA 12,5 (BBd)

Peneiros Serie Base + Serie 2 (mm)	PA 12,5 (BBd) Rubrica 14.03.2.4.1
	Percentagem acumulada do material passado
20	100
14	90 - 100
10	55 - 75
4	12 - 30
2	11 - 18
0,5	-
0,125	-
0,063	2 - 5

3.3 Misturas descontínuas

As misturas descontínuas, onde se enquadram as misturas betuminosas do tipo *Stone Mastic Asphalt (SMA)*, utilizadas em camadas de desgaste são caracterizadas por misturas de agregados de granulometria descontínua e por quantidade de ligante elevada. Segundo a norma EN 13108-5, a mistura betuminosa SMA é uma mistura composta por um esqueleto de agregado grosso (“stone”), coberto por betume como ligante (“mástique”).

Este tipo de misturas é caracterizado pela elevada percentagem de agregado grosso que forma o esqueleto mineral. Os vazios no esqueleto são preenchidos por betume modificado e agregados finos. Não é recomendada a utilização da SMA em espessuras muito superiores a 4,0 cm, devido a possível ocorrência de escoamento do ligante e maior probabilidade de formação de rodeiras (Fonseca, 2011).

De forma a reduzir o risco de escoamento do ligante, mas também para melhorar as propriedades das misturas betuminosas, torna-se necessário a aplicação de aditivos, por exemplo fibras celulósicas (Batista *et al.*, 2012). As misturas SMA proporcionam melhores características às camadas betuminosas, como altas prestações mecânicas, segurança, conforto de uso e, simultaneamente, maior durabilidade (Martinho *et al.*, 2013). A Figura 3.1 apresenta um esquema do escoamento nas misturas sem fibras e com fibras.

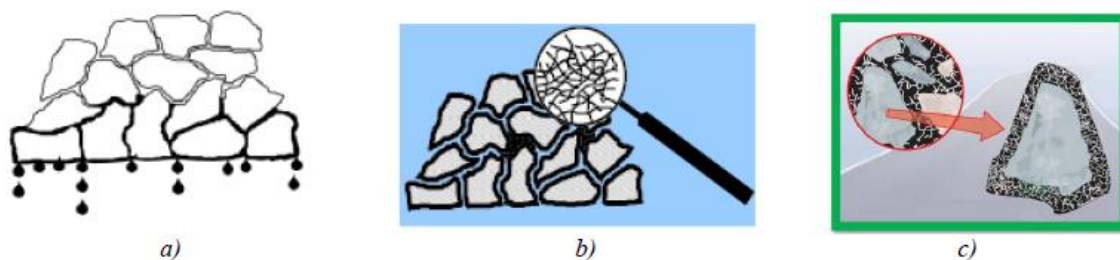


Figura 3.1: Mistura descontínua a) sem fibras; b) e c) com fibras (Martinho *et al.*, 2013)

Na Tabela 3.4 observamos o fuso granulométrico para as diferentes misturas SMA, segundo a norma EN 13108-5.

Tabela 3.4: Requisitos do fuso granulométrico para as misturas SMA

Peneiros Serie Base + Serie 1 (mm)	SMA 8	SMA 11	SMA 16
	Percentagem acumulada do material passado	Percentagem acumulada do material passado	Percentagem acumulada do material passado
16	100	100	100
11,2	100	90 - 100	90 - 100
2	25 - 35	20 - 35	15 - 30
0,063	7 - 10	5 - 13	5 - 12

3.3.1 Vantagens da utilização das misturas SMA

Uma das vantagens mais importantes da mistura SMA é a resistência à deformação permanente. Devido às percentagens elevadas de betume, esta mistura traduz um melhor comportamento à fadiga e à resistência ao fendilhamento, mesmo a baixas temperaturas (Blazejowski, 2011; Martinho *et al.*, 2013).

Devido à sua granulometria descontínua, apresenta valores de porosidade reduzidos, o que contribui para uma boa resistência ao envelhecimento (Carvalho, 2016).

Com a presença de fibras celulósicas e maiores quantidades de fíler, a adesividade da mistura SMA é melhorada (Blazejowski, 2011).

A macrotextura da camada e a microtextura dos agregados de maior dimensão, permite uma boa resistência à derrapagem e consequente diminuição do *spray*, originado pelo tráfego em dias de chuva. Proporciona também um nível razoável de atenuação de ruído (Nunn, 1994).

Desta forma, a mistura SMA apresenta uma maior durabilidade tendo em conta as misturas tradicionais, existindo uma menor manutenção e custos associados (Vargas-Nordcbeck, 2007).

CAPÍTULO 4 - Trabalho experimental

4.1 Introdução

Este trabalho pretende estudar o desempenho de uma mistura betuminosa para aplicação na camada de desgaste em estradas rurais e municipais de baixo tráfego, tendo por base uma mistura betuminosa produzida para este efeito, pela central betuminosa Cruchinho & Filhos, localizada na Capinha, concelho do Fundão. Desta forma, analisando a formulação fornecida pela central betuminosa, e tendo em conta os agregados utilizados nessa mistura, considerada como mistura de referência, definiram-se várias alternativas para o melhoramento do seu desempenho.

Na mistura de referência, o fíler utilizado é produzido na pedreira da Capinha, sendo de origem granítica, proveniente da lavagem dos agregados. Por essa razão esta mistura foi denominada de ACFG (Asphalt Concrete Fíler Granítico). Na primeira alternativa definida, na tentativa de melhorar a adesividade e coesão entre os agregados e o ligante, apenas se substituiu o fíler granítico por fíler calcário, dando origem à mistura denominada ACFC (Asphalt Concrete Fíler Calcário). Na segunda alternativa, optou-se por focar o estudo na correção da curva granulométrica da mistura betuminosa, de modo a cumprir o fuso preconizado pelo CETO. Esta correção deu origem a uma nova mistura denominada AC14 UBI na qual foi utilizado fíler calcário. Na terceira alternativa, e de forma a aumentar a durabilidade e adesividade entre agregados e ligante, optou-se pela adição de fibras celulósicas no estudo de composição desta mistura, e, simultaneamente, pela utilização de uma mistura descontínua do tipo Stone Mastic Asphalt (SMA). Esta alternativa deu origem a uma mistura denominada SMA11-F.

4.2 Caracterização dos materiais utilizados

4.2.1 Agregados e fileres

No presente trabalho experimental utilizaram-se quatro tipos de agregados, sendo eles a brita 1 (brita 5/15), o bago de arroz, o pó de pedra e o fíler granítico, todos provenientes da pedreira da Capinha explorada pela empresa Cimpor Agregados, localizada no concelho do Fundão. Foi, ainda, utilizado o fíler calcário com a designação comercial de MARTINGANÇA HL5, da empresa SECIL, com o objetivo de melhorar a coesão entre agregados e ligante. Nas figuras seguintes são apresentados os agregados.

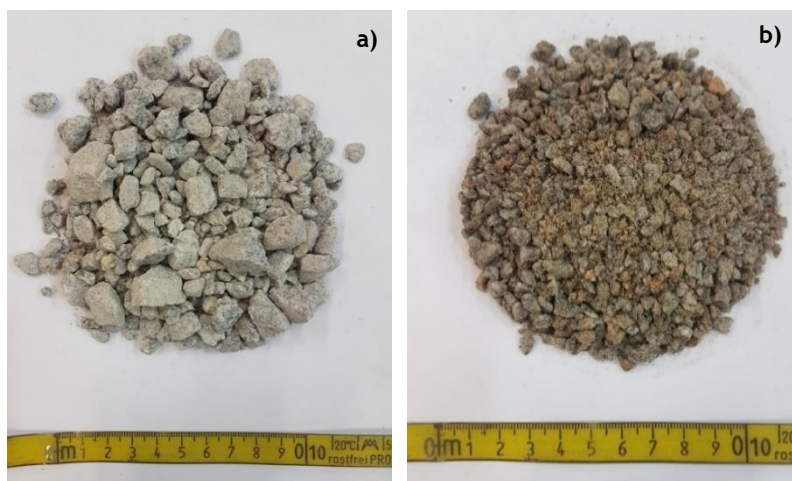


Figura 4.1 a) Brita 1; b) Bago de arroz



Figura 4.2 Pó de pedra

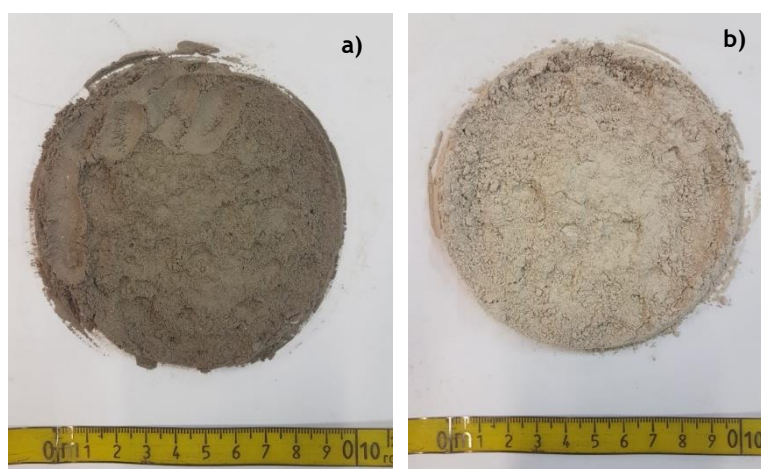


Figura 4.3 a) Fíler granítico; b) Fíler calcário

- Análise Granulométrica

A análise granulométrica dos agregados foi realizada tendo em conta a norma NP EN 933-1:2012, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração. Primeiramente, os agregados foram colocados nos peneiros e estes num agitador durante um período de cinco minutos. Seguidamente pesou-se cada peneiro, obtendo-se a percentagem de material retido em cada um. Desta forma, com o auxílio de uma folha de cálculo, calculou-se a percentagem de material passado cuja curva granulométrica é expressa na figura seguinte.

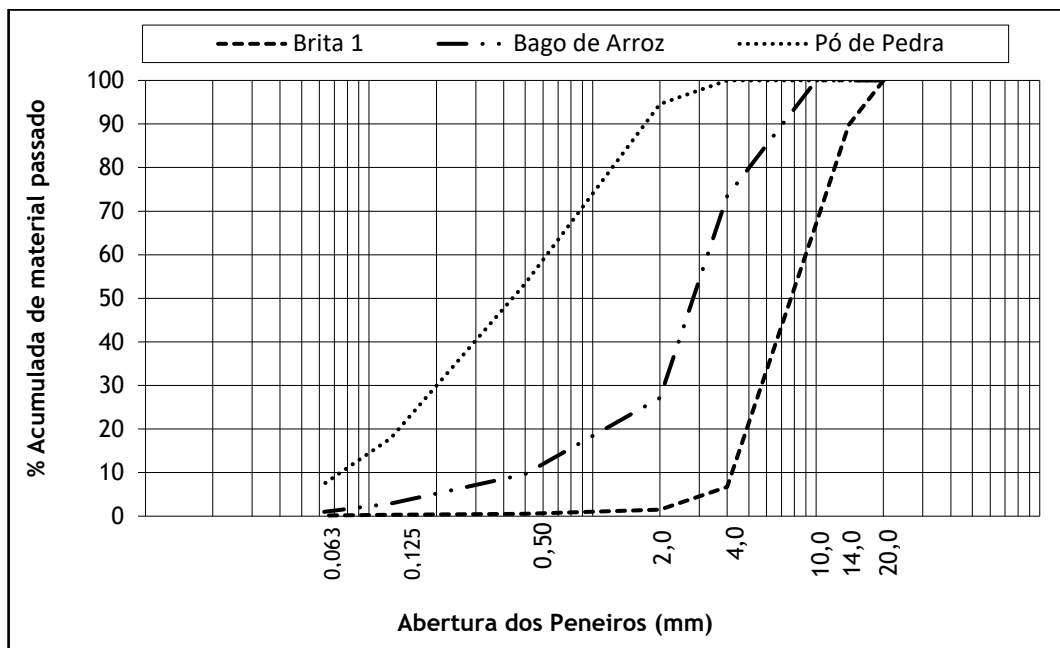


Figura 4.4: Análise Granulométrica dos agregados utilizados

- Massa volúmica

De acordo com a norma NP EN 1097-6:2003, Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água, foi possível determinar a massa volúmica dos agregados.

A massa volúmica da brita 1 foi realizada recorrendo-se ao método de pesagem hidrostática com cesto de rede metálica.

Depois de o ensaio ter sido realizado recorreu-se à expressão (1.1).

$$\rho = \frac{M_1}{M_1 + M_2 - M_3} \times \rho_w \quad (1.1)$$

Em que:

ρ - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca [kg/m³];

ρ_w - massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/ m³];

M_1 - massa do agregado saturado com superfície seca [kg];

M_2 - massa do cesto + agregado saturado, imerso em água [kg];

M_3 - Massa do cesto vazio, imerso em água [kg].

A massa volúmica do pó de pedra, do bago de arroz e do fíler granítico foi realizada utilizando o balão volumétrico, cujo resultados foram obtidos através da expressão (1.2).

$$\rho = \frac{P_1}{P_1+P_2-P_3} \times \rho_w \quad (1.2)$$

Em que:

ρ - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca [kg/ m³];

ρ_w - massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/ m³];

M_1 - massa do agregado saturado com superfície seca [kg];

M_2 - massa do balão + agregado saturado, com água até ao traço de referência [kg];

M_3 - Massa do balão, com água até ao traço de referência [kg].

Na Tabela 4.1 apresentam-se os resultados obtidos para a massa volúmica dos agregados.

Tabela 4.1: Massa Volúmica dos agregados utilizados

Agregados	Massa Volúmica [kg/m ³]
Brita 1	2600
Bago de arroz	2600
Pó de pedra	2500

Considerando a especificação do LNEC E64-1968, E376-1993 e E377-1993, a massa volúmica do fíler calcário foi determinada através do picnómetro de hélio (AccuPyc™ 1330 Gas Pycnometer). Realizaram-se três medições, sendo o valor final da massa volúmica, o resultado da média.



Figura 4.5: AccuPyc™ 1330 Gas Pycnometer

Tabela 4.2: Massa Volúmica dos fileres

Filer	Massa Volúmica [kg/m ³]
Filer granítico	2630
Cal Hidráulica	2760

4.2.2 Ligante betuminoso

O ligante betuminoso utilizado foi o betume 50/70, fornecido pela CEPESA Portuguesa S.A. Na Tabela 4.3 apresentam-se as características do betume.

Tabela 4.3: Características do betume 50/70

Ensaio	Método	Resultado	Limites		Unidade
			Min	Max	
Penetração 25°C, 100gr, 5 seg	EN 1426	59	50	70	0,1 mm
Ponto de amolecimento	EN 1427	47	46	54	°C

A massa volúmica deste betume, cedida pelo fornecedor, é igual a 1040 kg/m³. A temperatura de fabrico da mistura e compactação recomendadas são, respetivamente, 151 a 157 °C e 142 a 146 °C.

4.2.3 Fibras celulósicas

De forma a aumentar a adesividade entre agregados e ligante e a durabilidade da mistura betuminosa utilizam-se fibras Viatop plus AD 10[®], formadas por fibras naturais de celulose, betume 50/70 e promotor de adesividade.



Figura 4.6: Fibras celulósicas com promotor de adesividade, Viatop plus AD 10[®]

Tabela 4.4: Características do granulado

Características do granulado	
Aspeto	Grânulos cilíndricos
Conteúdo de fibras	83%
Conteúdo de promotor de adesividade	7%
Conteúdo de betume	10%
Comprimento médio dos grânulos	2 a 8 mm
Diâmetro/espessura médio dos grânulos	3 a 5 mm
Densidade aparente	450 a 550 g/l
Análise granulométrica <3,55mm	Max. 7%

4.3 Formulação das misturas betuminosas

Tendo em vista a formulação das misturas betuminosas da camada de desgaste, considerou-se uma mistura AC 14 surf, para as misturas ACFC e AC14 UBI. Apresenta-se na Tabela 3.1 o fuso recomendado pelo CETO, para a mistura AC 14 surf.

Para a mistura SMA11, considerou-se o fuso preconizado pela norma europeia *EN 13108-5*, que se apresenta na Tabela 3.4.

4.3.1 Composição de agregados

Conhecidas as diferentes granulometrias dos agregados procedeu-se à definição das misturas. A primeira mistura com fíler granítico (ACFG), considerada a de referência, foi ao encontro da formulação usada pela central betuminosa. Com o objetivo de avaliar a influência da natureza do fíler utilizado, procedeu-se à definição de uma segunda mistura, onde apenas se variou o tipo de fíler, substituindo o fíler granítico por fíler calcário (ACFC) mantendo, desta forma, a mesma composição.

Na Tabela 4.5 apresentam-se as percentagens de cada agregado utilizado nas misturas ACFG e ACFC.

Tabela 4.5: Percentagem de agregados para as misturas ACFG e ACFC

Mistura	Brita 1 [%]	Bago de arroz [%]	Pó de Pedra [%]	Fíler [%]	Total [%]
ACFG/ ACFC	39.1	17.2	41.8	1.9	100

Na Figura 4.7 podemos observar o fuso AC14 surf preconizado no CETO e a curva correspondente à formulação das misturas ACFG e ACFC.

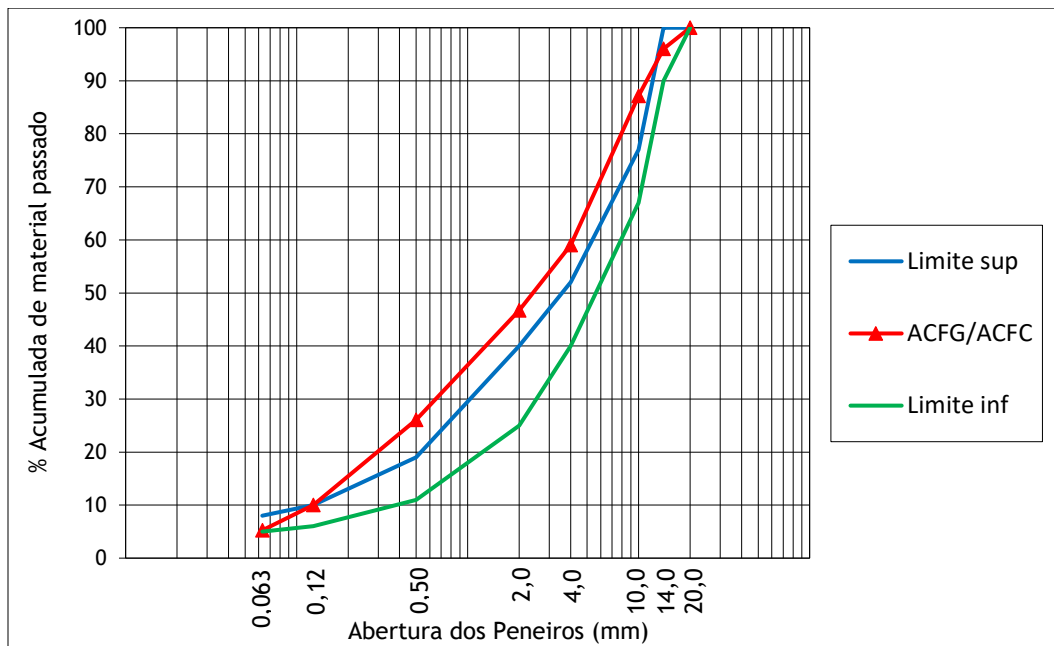


Figura 4.7: Curva Granulométrica para as misturas ACFG e ACFC

Podemos concluir que esta formulação não cumpre os limites impostos pelo CETO. Assim, surgiu a necessidade de retificação da curva das misturas dando origem à mistura AC14 UBI. Na Tabela 4.6 apresenta-se o estudo de composição de agregados desta mistura, na qual foi utilizado um filer calcário.

Tabela 4.6: Percentagem de agregados para as misturas AC14 UBI

Mistura	Brita 1 [%]	Bago de arroz [%]	Pó de Pedra [%]	Filer [%]	Total [%]
AC14 UBI	55	23	17	5	100

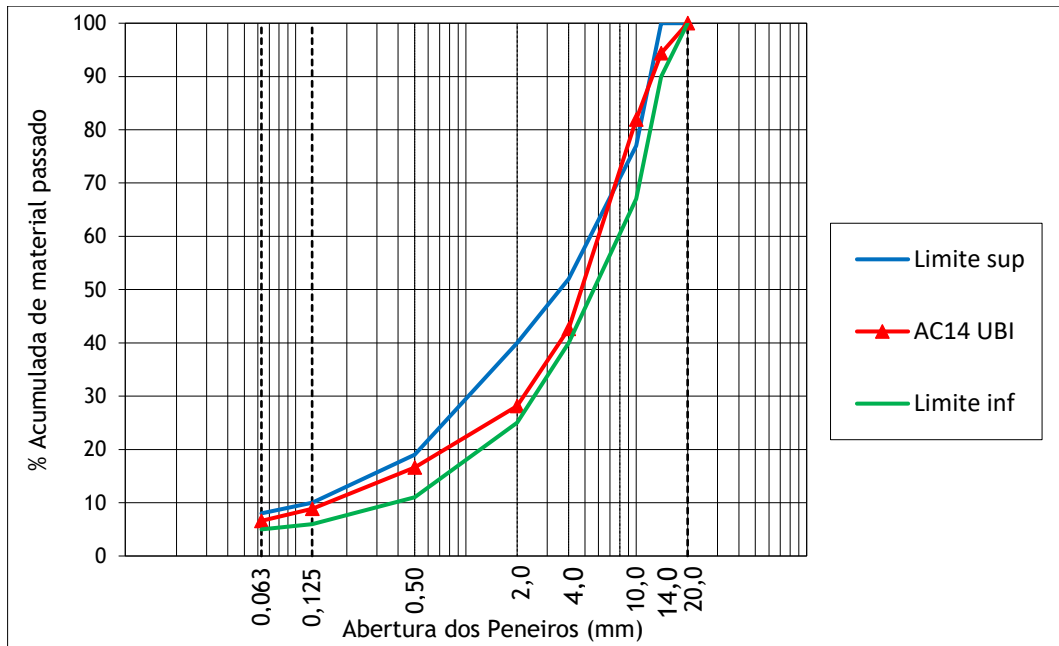


Figura 4.8: Curva Granulométrica para a mistura AC14 UBI

Na tentativa de melhorar o desempenho da mistura betuminosa optou-se pela utilização de um promotor de adesividade, na forma de fibras celulósicas impregnadas com uma amina (Viatop plus AD 10[®]) e ainda utilizar uma mistura descontínua do tipo SMA11. Na Tabela 4.7 apresenta-se o estudo de composição da mistura SMA11-F.

Tabela 4.7: Percentagem de agregados para a mistura SMA11-F

Mistura	Brita 1 [%]	Bago de arroz [%]	Pó de Pedra [%]	Fíler [%]	Total [%]
SMA11-F	44	32	16	8	100

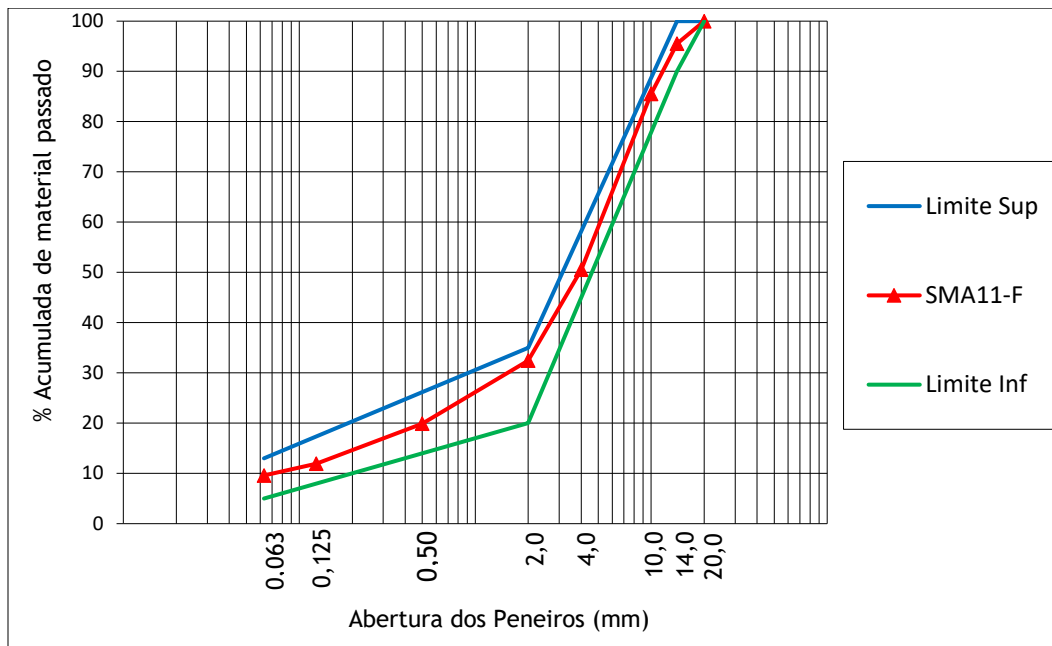


Figura 4.9: Curva Granulométrica para a mistura SMA11-F

4.3.2 Estimativa da quantidade inicial de betume

Para as misturas betuminosas AC14 UBI e SMA11-F foi necessário calcular a quantidade inicial de betume, segundo a expressão (1.3).

$$P_b = 0,035 \times A + 0,045 \times B + K \times C + F \quad (1.3)$$

Em que:

P_b - 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 retido no peneiro 0,075 mm;

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

K - constante, 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% passados no peneiro 0,075 mm

$K = 0,20$ para $\leq 5\%$ passados no peneiro 0,075 mm

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

Na Tabela 4.8 apresentam-se as quantidades iniciais de betume para cada tipo de mistura.

Tabela 4.8: Percentagem de betume inicial para a mistura AC14 UBI e SMA11-F

Mistura	Quantidade inicial de betume [%]
AC14 UBI	5,3
SMA11-F	5,8

4.3.3 Teor ótimo de betume

Determinadas as formulações para as misturas betuminosas, tendo em conta os agregados e percentagem inicial de betume, procedeu-se à preparação de provetes com a variação de $\pm 0,5$ % da percentagem de betume estabelecida inicialmente. Para a escolha do teor ótimo tem-se em conta a baridade, porosidade e Ensaio Marshall.

Produziram-se quatro tipos de misturas, a primeira, sendo a de referência (ACFG), com fíler granítico; a segunda (ACFC) com fíler calcário; a terceira, proveniente da alteração do fuso, (AC14 UBI) e a quarta, (SMA11-F) com adição de 0,3 % de fibras celulósicas impregnadas com um promotor de adesividade.

Na Tabela 4.9 apresentam-se as formulações com as respetivas percentagens de betume.

Tabela 4.9: Formulação de cada mistura para a percentagem de betume estudado

Misturas	Betume [%]	Brita 1 [%]	Bago de arroz [%]	Pó de Pedra [%]	Fíler Calcário [%]	Total [%]
AC14 UBI	5,8	51,8	21,7	16,0	4,7	100
	5,3	52,1	21,8	16,1	4,7	100
	4,8	52,4	21,9	16,2	4,8	100
SMA11-F	5,3	41,7	30,3	15,2	7,6	100
	5,8	41,4	30,1	15,1	7,5	100
	6,3	41,2	30,0	15,0	7,5	100

- baridade máxima teórica

A baridade máxima teórica foi calculada através do método matemático, presente na norma NP EN 12697-5:2014 - Misturas betuminosas. Método de ensaio para misturas betuminosas a quente. Parte 5: Determinação da baridade máxima. + Errata 1 de 2015, de acordo com a expressão (1.4).

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\left(\frac{pa1}{\rho a1}\right) + \left(\frac{pa2}{\rho a2}\right) + \dots + \left(\frac{pb}{\rho b}\right)} \quad (1.4)$$

Nota: $\rho a1 + \rho a2 + \dots + \rho b = 100\%$

Onde:

ρ_{mc} - baridade máxima teórica da mistura betuminosa [kg/m^3];

$pa1$ - percentagem do agregado 1 na mistura [%];

$\rho a1$ - massa volúmica do agregado 1 [kg/m^3];

$pa2$ - percentagem do agregado 2 na mistura [%];

$\rho a2$ - massa volúmica do agregado 2 [kg/m^3];

pb - percentagem do ligante na mistura [%];

ρ_b - massa volúmica do ligante [kg/m^3].

Tabela 4.10: Baridade máxima teórica

Misturas	Betume [%]	Baridade Máxima Teórica [kg/m^3]
AC14 UBI	5,8	2380
	5,3	2400
	4,8	2420
SMA11-F	5,3	2380
	5,8	2370
	6,3	2350

- Baridade

Para o cálculo da baridade foi necessária a produção de provetes. Começou-se por colocar os agregados, betume e os moldes na estufa a 160°C , por um período de 60 minutos. De seguida pesaram-se as quantidades de cada agregado, perfazendo um total de 1200 g.

Depois de retirar os moldes da estufa, untaram-se os mesmos com óleo e colocou-se um filtro de papel. Imediatamente foi colocada a mistura e outro filtro de papel no topo do molde. A compactação, segundo a norma *EN 12697-30:2012, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 30: Specimen preparation by impact compactor*, realizou-se no compactador de impacto, disponível no laboratório do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), aplicando 50 pancadas em cada face do provete. Após 4 horas, desmoldaram-se os provetes.

A baridade foi determinada segundo a norma *EN 12697-6:2012, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens, procedure B: Bulk density - SSD*, de onde provém a expressão (1.5) sendo os resultados apresentados na Tabela 4.11.

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \times \rho_w \quad (1.5)$$

Onde:

ρ_{bssd} - baridade saturada com superfície seca do provete [kg/m^3];

M1 - massa do provete seco [kg];

M2 - massa do provete saturado, imerso em água [kg];

M3 - massa do provete saturado com superfície seca [kg];

ρ_w - massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/m^3].

Tabela 4.11: Baridade média das misturas

Misturas	Betume [%]	Baridade média [kg/m^3]
AC14 UBI	5,8	2280
	5,3	2300
	4,8	2310
SMA11-F	6,3	2310
	5,8	2330
	5,3	2300

- Porosidade

Depois de determinada a baridade e baridade máxima teórica, foi possível calcular a porosidade das misturas betuminosas. Desta forma recorreu-se à norma *EN 12697-8:2003, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*, da qual surge a expressão (1.6).

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad (1.6)$$

Em que:

V_m - porosidade da mistura [%];

ρ_m - baridade máxima teórica da mistura [kg/m^3];

ρ_b - baridade do provete [kg/m^3].

Segundo CETO, os valores definidos para a porosidade para uma mistura do tipo AC 14 surf, estão compreendidos entre 3 % e 6 %. Para a mistura do tipo SMA 11, estes valores estão compreendidos entre 2 % e 5 %.

Na Tabela 4.12 apresentam-se os valores obtidos experimentalmente para a porosidade.

Tabela 4.12: Porosidade média das misturas

Misturas	Betume [%]	Porosidade média [%]
AC14 UBI	5,8	4,3
	5,3	4,0
	4,8	4,7
SMA11-F	5,3	2,3
	5,8	1,8
	6,3	2,3

Como se pode verificar, a mistura AC14 UBI cumpre os requisitos estabelecidos para a porosidade em todas as percentagens de betume. Em uma das percentagens de betume usadas na mistura SMA 11-F, a porosidade está ligeiramente abaixo do limite inferior (2%).

- Ensaio Marshall

Por último, realizou-se o ensaio Marshall, tendo em conta a norma *EN 12697-34:2012, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test*. Na

Tabela 4.13 estão definidos os requisitos para o ensaio *Marshall*, de acordo com o CETO.

Tabela 4.13: Requisitos das propriedades das misturas segundo CETO

Requisitos/Propriedades	Caderno de Encargos AC 14 surf	SMA11
Estabilidade Marshall [kN]	7,5 - 15 *	7,5 - 17,5 *
Deformação Marshall [kN]	2 - 4	2 - 4

(*) Para granitóides, o limite superior é elevado para 21 kN

Os provetes utilizados para a realização deste ensaio foram os mesmos utilizados para a determinação das propriedades anteriormente descritas. O seu principal objetivo é quantificar a resistência mecânica e deformação de uma mistura betuminosa.

Primeiramente, os provetes foram postos no banho maria, a 60°C, cerca de 50 minutos sendo depois retirados um a um e colocados na prensa de compressão Marshall.

Na Figura 4.10 e Figura 4.11 podemos observar deformação e estabilidade Marshall das misturas AC14 UBI e SMA11-F, respetivamente.

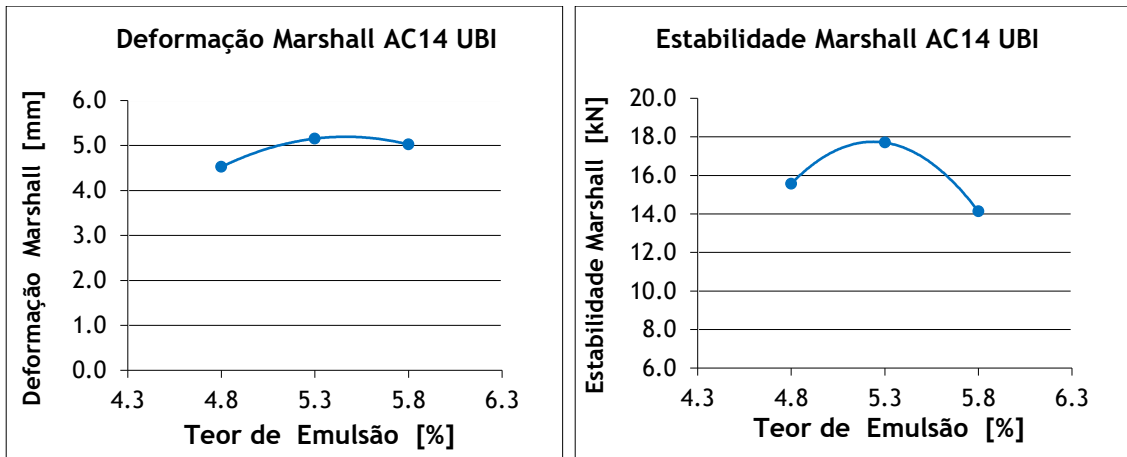


Figura 4.10: Deformação Marshall e Estabilidade Marshall das misturas AC 14 UBI

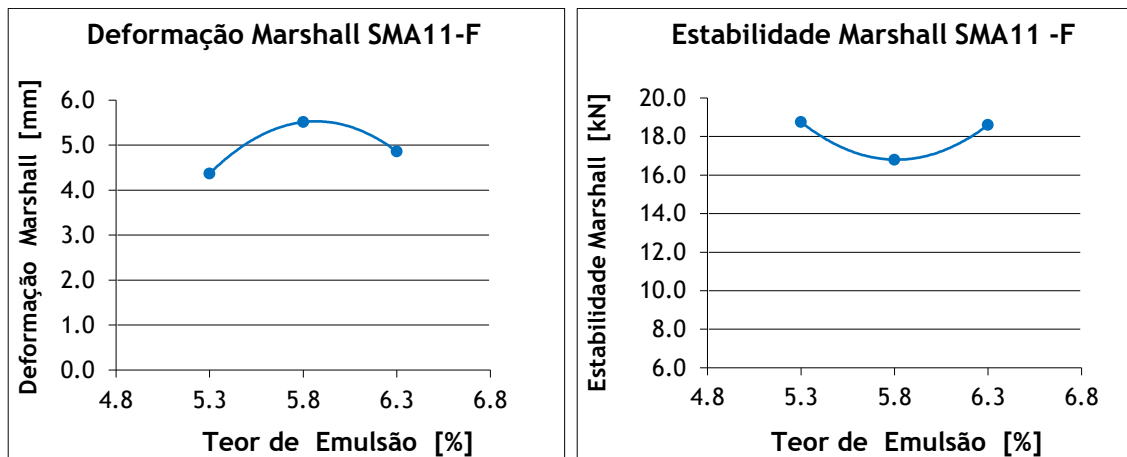


Figura 4.11: Deformação Marshall e Estabilidade Marshall das misturas SMA 11-F

Como se pode verificar, os resultados da deformação, avaliada no ensaio Marshall, para as misturas AC14 UBI e SMA11-F, não cumprem os limites preconizados no CETO, sendo os resultados inconclusivos. No entanto, de acordo com a observação visual efetuada às misturas com diferentes percentagens de betume, optou-se por escolher o teor ótimo de betume de 5,3% para a AC14 UBI e 5,8 % para a SMA11-F.

Para as misturas betuminosas ACFG e ACFC o teor ótimo de betume foi indicado pela central betuminosa, tendo sido utilizado 5,1%. Para estas misturas, e de acordo com o estudo de composição, foram produzidos provetes com o objetivo de proceder à sua caracterização.

Na Tabela 4.14 observa-se a formulação final das misturas betuminosas, com as percentagens em relação ao peso total da mistura.

Tabela 4.14: Formulação final das misturas betuminosas

Misturas	Betume [%]	Brita 1 [%]	Bago de arroz [%]	Pó de Pedra [%]	Fíler Calcário [%]	Fibras celulósicas [%]
AC14 UBI	5,3	64,4	11,4	14,2	4,7	-
SMA11-F	5,8	41,4	30,1	15,1	7,5	0,3

4.4 Ensaios de caracterização das misturas betuminosas

4.4.1 Afinidade agregado/betume

A norma europeia *EN 12697-11:2012, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen* descreve o ensaio de afinidade entre o agregado e o betume através do registo visual da superfície de agregado coberta com betume. No entanto, este ensaio também pode ser utilizado como ferramenta no estudo de formulação de uma mistura betuminosa no sentido de procurar um betume com maior adesividade a um determinado agregado ou vice-versa, prever o desempenho de diferentes promotores de adesividade e prever a sensibilidade à água da mistura betuminosa.

A norma *EN 12697-11* especifica os procedimentos para a determinação da afinidade entre o agregado e betume. Desta forma, de modo a determinar a adesividade prepararam-se dois conjuntos de amostras. O primeiro grupo, “sem aditivo” consiste em envolver cerca de 600 g de agregado grosso, neste caso a brita 5/15, em betume até este agregado estar totalmente envolvido. O segundo grupo, “com aditivo” consiste na adição de fibras celulósicas à mesma quantidade de agregado e betume.

De seguida cada grupo de agregado é dividido em três parcelas e cada uma delas é transferida para garrafas, que posteriormente encher-se-ão de água destilada. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.



Figura 4.12: a) Parcela de agregado com a respetiva garrafa; b) Grupos de brita separados em 3 parcelas

O ensaio inicia com a colocação das 6 garrafas na máquina giratória, com uma velocidade de rotação de $60 \text{ min}^{-1} \pm 10 \%$ e acaba ao fim de $6 \text{ h} \pm 15 \text{ min}$. Depois deste período, regista-se a superfície de agregado coberta com betume e volta-se a ligar o agitador até perfazer as 24 horas de ensaio. No final, volta-se a registar a percentagem final.



Figura 4.13: a) Agitador horizontal rotativo; b) Agitador com as garrafas, durante o ensaio

A afinidade é expressa pelo registo visual da superfície de agregado coberta com betume, em percentagem da superfície total de agregado, após a influência da ação de agitação mecânica na presença de água. A Figura 4.14 exemplifica a percentagem do grau de revestimento do agregado.

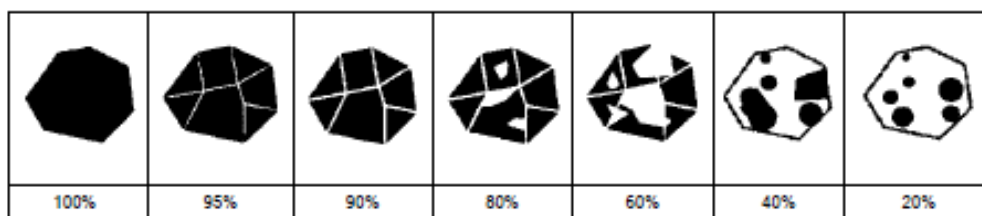


Figura 4.14: Grau de revestimento das partículas (EN 12591:2009)

4.4.2 Resultados obtidos

Relativamente ao grupo “sem aditivo”, verifica-se através da observação da Figura 4.15, que após 6 horas de ensaio a percentagem de revestimento é igual a 77% e após as 24 horas é igual a 43%.

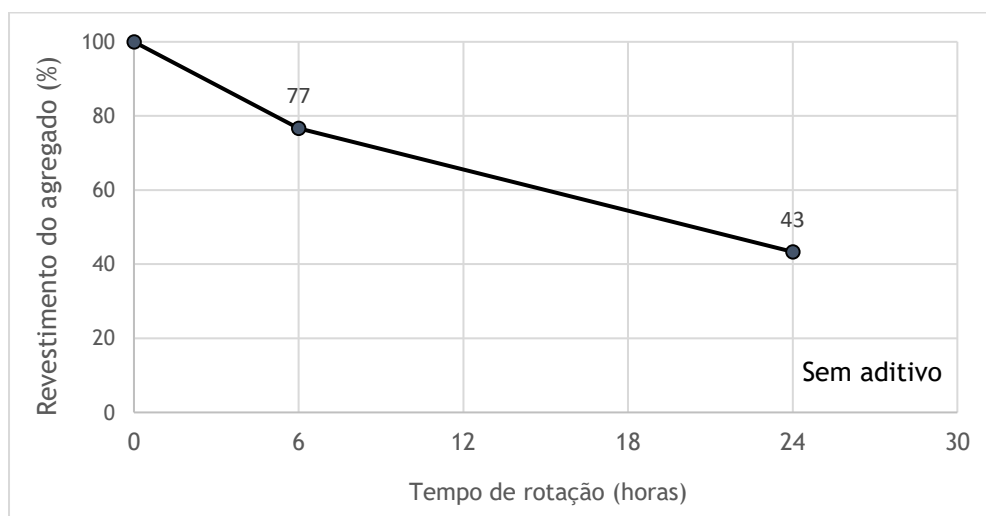


Figura 4.15: Percentagem de revestimento do agregado sem aditivo após 6 horas e 24 horas

Relativamente ao grupo “com aditivo”, verifica-se através da observação da Figura 4.16, que após 6 horas de ensaio a percentagem de revestimento é igual a 78% e após as 24 horas é igual a 53%.

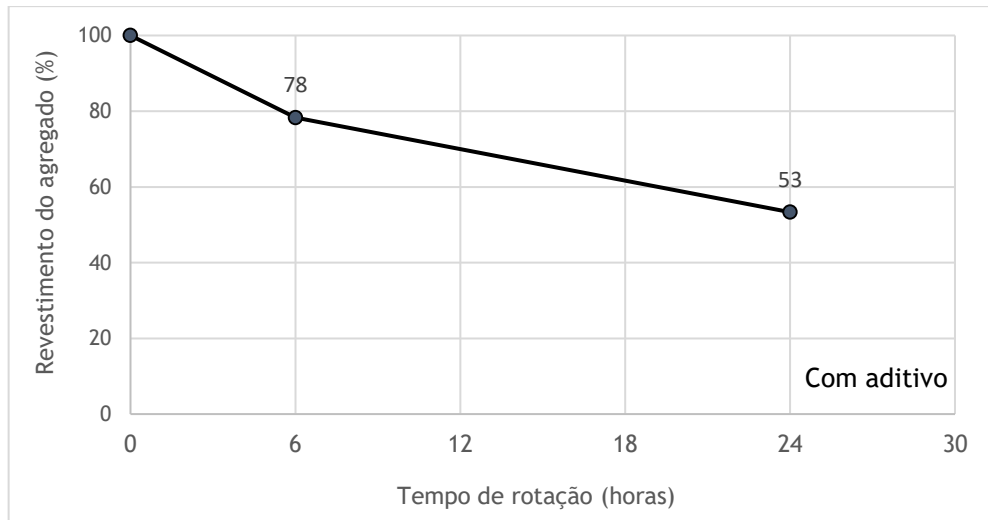


Figura 4.16: Percentagem de revestimento do agregado com aditivo após 6 horas e 24 horas

Pela análise dos resultados pode concluir-se que ao fim de 6 horas a diferença da percentagem de revestimento do agregado com betume não é significativa. No entanto, ao fim de 24 horas verifica-se que a mistura com aditivo apresenta valores superiores em cerca de 10 %, confirmando o efeito do promotor de adesividade. Esta realidade pode ser confirmada através da Figura 4.17.

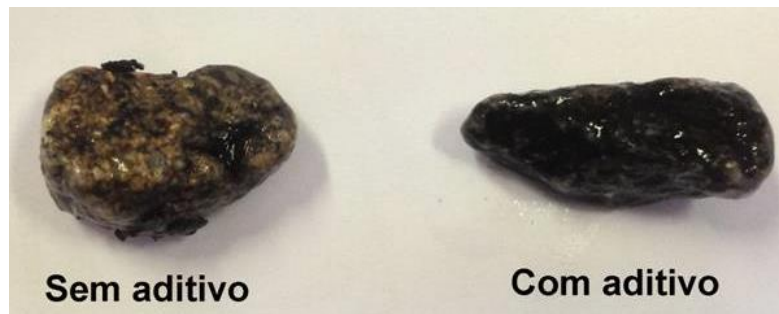


Figura 4.17: Aspeto de agregados após ensaio de afinidade agregado/betume

4.4.3 Sensibilidade à água

A caracterização da sensibilidade à água das misturas betuminosas foi realizada tendo em conta a norma EN 12697-12:2008, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. Este ensaio tem como objetivo comparar os valores médios de resistência à tração em compressão diametral através de dois grupos de provetes cilíndricos. Estes foram produzidos de forma análoga à dos provetes produzidos para o ensaio *Marshall*, com cerca de 100 mm de diâmetro. Separaram-se os seis provetes de cada mistura em dois grupos, tendo em conta as baridades semelhantes.

O primeiro grupo de provetes, “a seco”, foi condicionado a $20 \pm 5^\circ\text{C}$ e o segundo grupo, “imersos”, submetido a um banho-maria a $40 \pm 1^\circ\text{C}$, durante um período de 68 a 72 horas. Posteriormente ao banho-maria, o grupo dos provetes “imersos” foi colocado a vácuo e mantido a uma pressão absoluta de $6,7 \pm 0,3$ kPa durante trinta minutos.

Após o condicionamento dos provetes às temperaturas mencionadas anteriormente, e antes de realizar o ensaio, o grupo dos provetes “imersos” foram colocados em água a 15°C e o grupo dos provetes “a seco” foram postos numa câmara de cura a 15°C , durante duas horas.

Assim, de seguida, os grupos de provetes foram ensaiados à compressão diametral, com a aplicação de uma carga a velocidade constante de 50 ± 2 mm/min, o preconizado na norma *EN 12697-23:2003, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimen.*

A resistência conservada em tração indireta (*ITSR - Indirect Tensile Strength Ratio*) é obtida através da expressão (1.6).

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (1.6)$$

Onde:

ITSR - resistência conservada em tração indireta [%];

ITS_w - valor médio da resistência à tração indireta dos provetes “imersos”;

ITS_d - valor médio da resistência à tração indireta dos provetes “a seco”.

Para os dois grupos de provetes, a resistência à tração indireta (*ITS - Indirect Tensile Strength*) é dada pela expressão (1.7).

$$ITS = \frac{2P}{\pi D H} \quad (1.7)$$

Onde:

ITS - resistência à tração indireta [kPa];

P - resistência máxima média [kN];

D - diâmetro do provete [mm];

H - altura do provete [mm]



Figura 4.18: a) Pesagem do provete seco; b) Pesagem do provete saturado; c) Colocação dos provetes a vácuo em água



Figura 4.19: Provetes deformados depois do ensaio à sensibilidade

Na Tabela 4.15 e na Figura 4.20, apresentam-se os resultados da resistência à tração indireta e da resistência conservada em tração indireta, para as diferentes misturas betuminosas.

Tabela 4.15: Resultados do Ensaio de Sensibilidade à Água

Misturas betuminosas	% betume	ITS [kPa]		ITSR [%]
		ITS _d	ITS _w	
ACFG	5,1	1570	1100	70
ACFC	5,1	1250	1160	93
AC14 UBI	5,3	1600	1370	86
SMA11-F	5,8	1620	1340	83

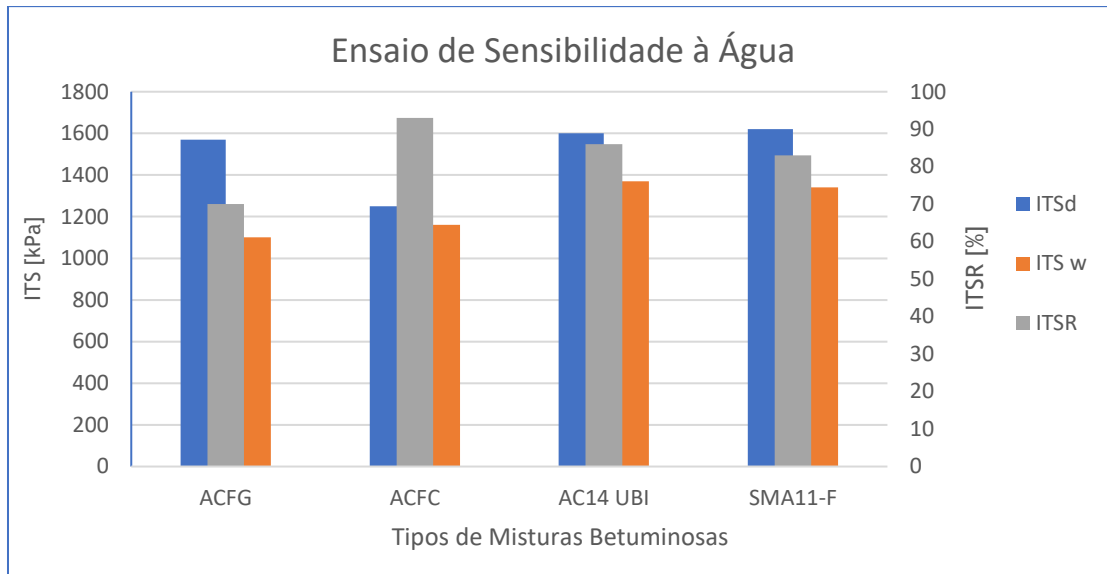


Figura 4.20: Resultados do Ensaio de Sensibilidade à Água

Como podemos observar, os provetes “a seco” obtiveram resultados de resistência à tração indireta superiores aos provetes imersos o que podemos concluir que a água tem efeito negativo sobre os mesmos.

O CETO não referencia qualquer requisito para o ensaio de sensibilidade à água, no entanto o PG-3 (OC 29/2011) refere um valor de resistência conservada superior a 85 % para misturas betuminosas a quente aplicadas em camadas de desgaste. As misturas betuminosas a quente com fíler granítico apresentam o valor mais baixo de ITSR de 70 %. A substituição do fíler granítico pelo fíler calcário apresentou o maior valor de ITSR, 93 %.

No ensaio de resistência à tração indireta, a norma EN 12697-23 classifica os provetes ensaiados de três formas, tendo em conta a sua rotura. A Figura 4.21 indica os tipos de rotura.

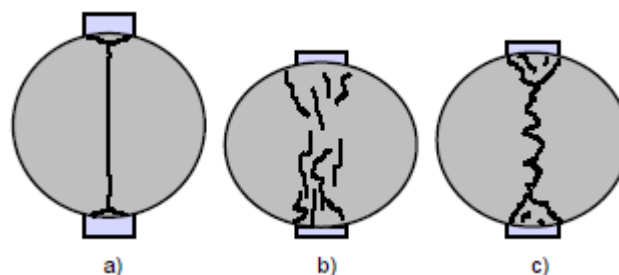


Figura 4.21: Tipos de rotura (EN 12697-23)

A classificação para cada tipo de rotura define-se como:

- a) “Rotura de tensão clara” - O provete quebra claramente ao longo de uma linha diametral, exceto possivelmente para pequenas secções triangulares perto das tiras de carregamento;
- b) “Deformação” - Provete sem uma linha de rotura claramente visível;
- c) “Combinação” - Provete com uma linha de rotura limitada e áreas deformadas perto das tiras de carregamento.



Figura 4.22: Rotura dos provetes dos 4 tipos de misturas

Através da observação da Figura 4.22 conclui-se que o tipo de rotura verificado nos provetes é do tipo a) Rotura de tensão clara.

4.4.4 Deformação Permanente

Com o objetivo de estudar a caracterização mecânica e o desempenho das diferentes misturas betuminosas realizou-se o ensaio para quantificar a deformação permanente, *wheel tracking test*. Assim, realizou-se duas lajetas para cada tipo de mistura betuminosa. Utilizaram-se

moldes de 30x30x4cm tendo em conta a norma europeia *EN 12697-22:2003, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Laboratory mixing.*

A temperatura adotada neste estudo é definida em função das condições climáticas e do tipo de betume. A Figura 4.23 ilustra as diferentes zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista, 1999).

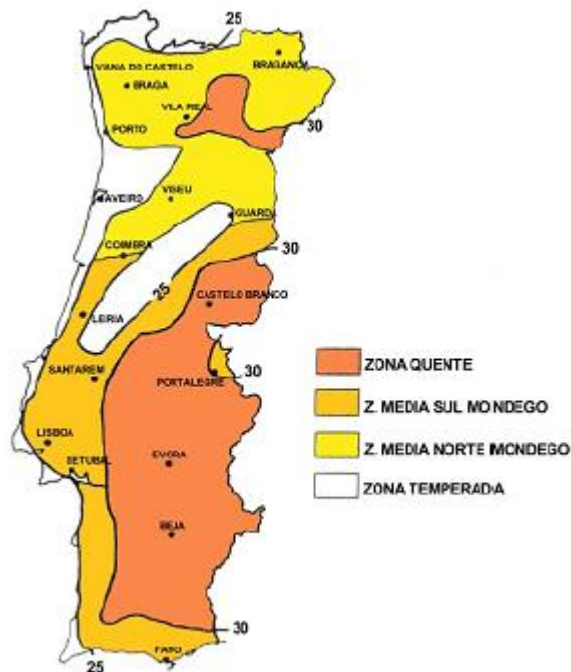


Figura 4.23: Zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista, 1999)

Desta forma, as temperaturas recomendadas para a caracterização da deformação permanente das misturas betuminosas para a camada de desgaste são as indicadas na Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental (Freire, 2002)

Zona Climática	Temperatura
Zona quente	50 °C
Zona média sul do Mondego e zona média norte do Mondego	45 °C
Zona temperada	40 °C

Assim, estando este estudo inserido na zona quente, distrito de Castelo Branco, foi adotada uma temperatura de ensaio de 50 °C.

Tendo em consideração as formulações apresentadas anteriormente produziu-se as lajetas de acordo com a norma europeia *EN 12697-35:2004, Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing*.

A mistura ACFG e ACFC com o teor de betume igual a 5,1%, a mistura AC14 UBI com o teor de betume igual a 5,3% e a mistura SMA11-F com o teor de betume de 5,8%.

Quer na produção e compactação das lajetas teve-se em atenção as temperaturas recomendadas pelo fornecedor de betume. As figuras seguintes apresentam o esquema de produção e compactação das lajetas.



Figura 4.24: a) Material a aquecer na estufa; b) Mistura dos materiais na misturadora elétrica; c) Colocação da mistura no molde;



Figura 4.25: a) Compactação da mistura; b) Lajeta após compactação

Antes da realização do ensaio, as lajetas foram colocadas à temperatura ambiente durante sete dias. Foi determinada a baridade de acordo com a norma *EN 12697-6:2012*, de onde provém a expressão (1.8).

$$\rho_{\text{bssd}} = \frac{M_1}{(M_3 - M_2)} \times \rho_w \quad (1.8)$$

Onde:

ρ_{bssd} - baridade saturada com superfície seca da lajeta [kg/m^3];

M_1 - massa da lajeta seca [kg];

M_2 - massa da lajeta saturada, imerso em água [kg];

M_3 - massa da lajeta saturada com superfície seca [kg];

ρ_w - massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/m^3].

Na Tabela 4.17 apresenta-se o resultado das baridades médias para cada mistura betuminosa bem como a porosidade, calculada de forma análoga com o a expressão (1.5).

Tabela 4.17: Baridade e Porosidade média das lajetas

Misturas	Percentagem ótima de betume [%]	Baridade média [kg/m^3]	Porosidade média [%]
AC14 UBI	5,3	2350	2,3
SMA11-F	5,8	2220	6,3

Tabela 4.18: Comparação entre as características das lajetas e dos provetes cilíndricos

Misturas	Percentagem ótima de betume [%]	Baridade média [kg/m^3]		Porosidade média [%]	
		Lajetas	Provetes cilíndricos	Lajetas	Provetes cilíndricos
AC14 UBI	5,3	2350	2300	2,3	4,0
SMA11-F	5,8	2220	2330	6,3	1,8

Analisando a Tabela 4.18 verifica-se que, os resultados mais elevados da porosidade correspondem aos menores valores da baridade, tal como era esperado. No entanto, os resultados obtidos para a porosidade das lajetas no caso da mistura SMA11-F, são muito elevados, podendo estar relacionados com a presença das fibras e método de compactação. Desta forma, seria importante a repetição deste ensaio.

Após os sete dias de cura das lajetas iniciou-se o ensaio *wheel tracking*, tendo em conta a norma europeia EN 12697-22:2003, para equipamento pequeno e acondicionado ao ar, procedimento B.

Procedeu-se ao aquecimento prévio da lajeta e do equipamento durante quatro horas, a uma temperatura adotada de 50°C. Nas figuras seguintes observa-se o procedimento do ensaio.



Figura 4.26: a) colocação da lajeta no carrinho; b) Colocação do pneu sobre a lajeta

O ensaio termina ao fim de 10 000 ciclos de carga ou quando a lajeta atinge uma rodeira com profundidade de 20 mm. Na Figura 4.27 apresenta-se uma lajeta ACFC no final do ensaio.

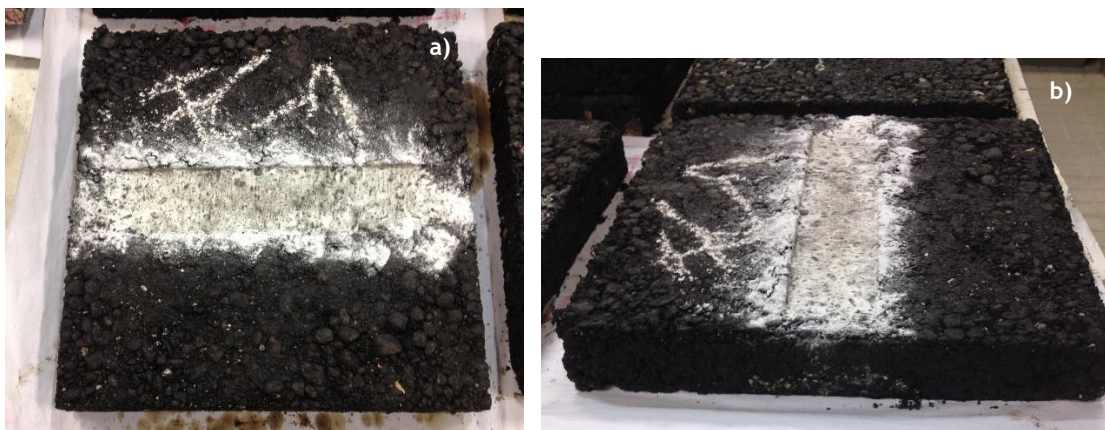


Figura 4.27: a) Lajeta após ensaio; b) Pormenor da rodeira na lajeta

Com a realização do ensaio *wheel tracking* foi possível determinar dois parâmetros para caracterizar as misturas betuminosas, o declive máximo de rodeira - *Wheel Tracking Slope* (WTS_{air}) e a média de profundidade de rodeira (PRD_{air}). Nas figuras seguintes apresentam-se os resultados obtidos no ensaio de deformação permanente para os quatro tipos de misturas.

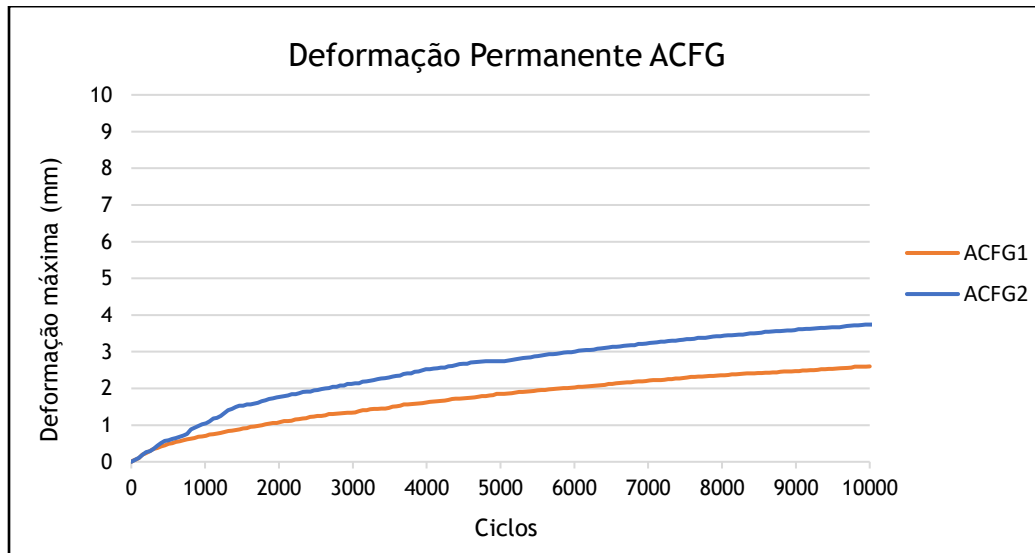


Figura 4.28: Deformação Permanente da mistura ACFG

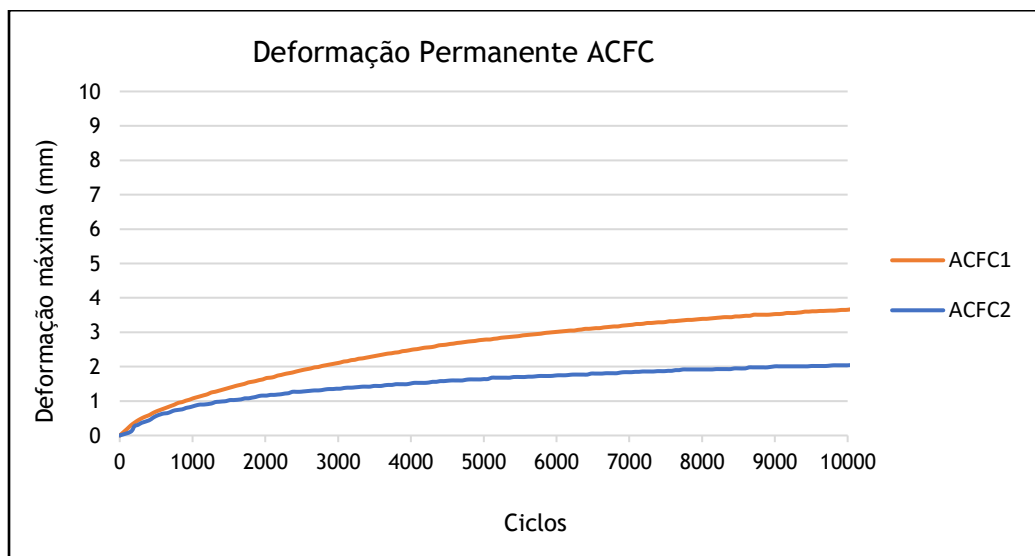


Figura 4.29: Deformação Permanente da mistura ACFC

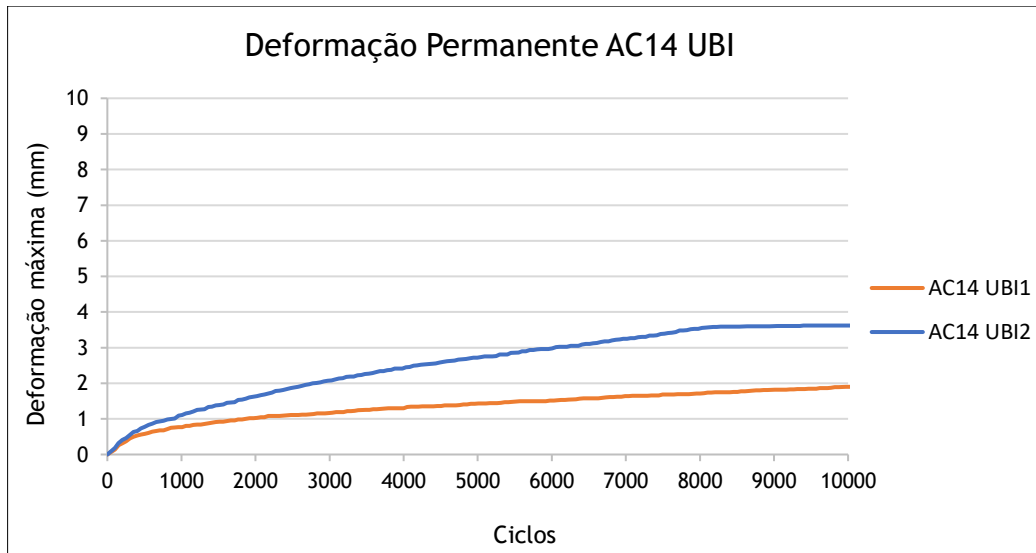


Figura 4.30: Deformação Permanente da mistura AC14 UBI

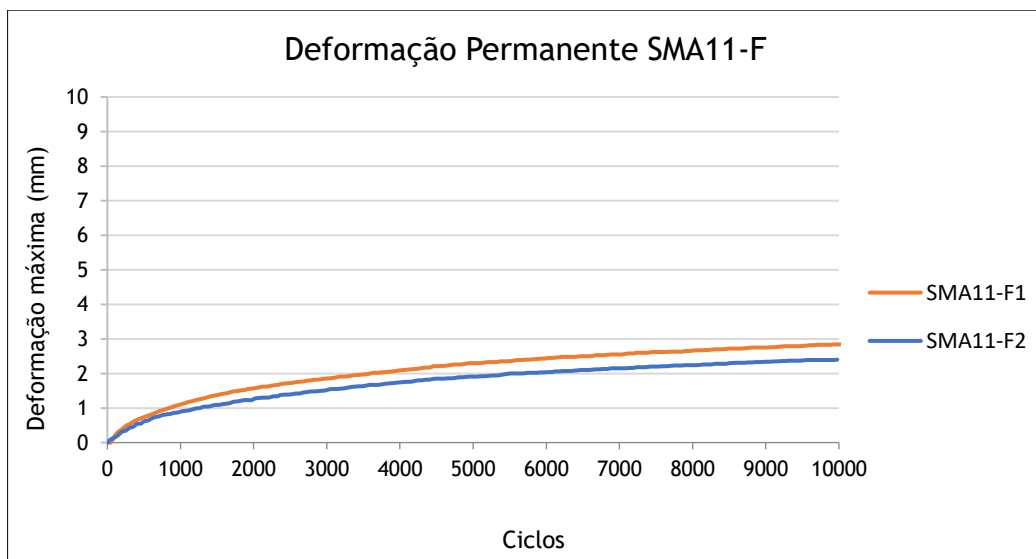


Figura 4.31: Deformação Permanente da mistura SMA11-F

Na Tabela 4.19, podemos analisar a média da percentagem da profundidade de rodeira (PRD_{air}), a média da profundidade de rodeira (RD_{air}) e os resultados médios do declive máximo de rodeira - *Wheel Tracking Slope* (WTS_{air}).

Tabela 4.19: Resultados do ensaio de Deformação Permanente das misturas betuminosas

Misturas	Betume [%]	PRD _{air} [%]	RD _{air} [mm]	WTS _{air} [mm/10 ³ ciclos]
ACFG	5,1	7,9	3,17	0,18
ACFC	5,1	6,8	2,72	0,12
AC14 UBI	5,3	6,9	2,75	0,14
SMA11-F	5,8	6,5	2,62	0,11

Através da análise das figuras 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31 e da Tabela 4.19 conclui-se que o valor médio de profundidade de rodeira para a mistura ACFG é de 3,17 mm. A mistura ACFC obteve um valor médio de profundidade de rodeira de 2,72 mm. Para a mistura AC14 UBI registou-se um valor médio de profundidade de rodeira de 2,75 mm e por último a mistura SMA11-F obteve 2,62 mm de valor médio de profundidade de rodeira.

De facto, apenas a mudança do filer granítico para o filer calcário traduz-se numa melhoria na deformação permanente. A mistura AC14 UBI apresentou o melhor resultado individual (AC 14 UBI2), com 1,90 mm de deformação máxima. A mistura SMA11-F, mesmo tendo percentagens maiores de finos, é a mistura que apresenta melhores resultados, mais similares entre as duas amostras ensaiadas.

CAPÍTULO 5 - Considerações finais

5.1 Conclusões

O principal objetivo deste trabalho era avaliar a adesividade entre o agregado e betume de uma mistura betuminosa a aplicar numa camada de desgaste, bem como a caracterização da sua sensibilidade à água e do seu comportamento à deformação permanente. Desta forma, pretendia-se comparar o desempenho mecânico de misturas betuminosas com diferentes formulações.

Para a produção das misturas betuminosas foi efetuada uma caracterização prévia dos agregados utilizados, através da análise granulométrica, massa volúmica e baridade. Do estudo de composição das misturas resultou a percentagem de agregado a utilizar. A determinação do teor de betume teve em conta a porosidade e baridade, e os resultados do ensaio *Marshall*. Por último, realizaram-se ensaios de adesividade entre agregado e betume, ensaio de sensibilidade à água e ensaio para avaliação da resistência à deformação permanente.

Os resultados do ensaio de adesividade entre agregado e betume revelam que o grupo com aditivo apresenta uma percentagem superior de agregado coberto com betume, cerca de 53% ao fim de 24 horas. Quanto ao grupo sem aditivo, este apresenta uma percentagem menor de agregado coberto com betume, cerca de 43% ao fim de 24 horas. Concluiu-se que a presença do promotor de adesividade traduz resultados positivos nas misturas betuminosas no que diz respeito à análise deste parâmetro.

No ensaio de sensibilidade à água, a resistência à tração direta (ITS) para os provetes “a seco” é bastante superior comparativamente aos provetes “imersos”, concluindo que a água possui um efeito negativo sobre os mesmos. Relativamente aos valores de resistência conservada em tração indireta (ITSR) conclui-se que a mistura ACFG apresenta o valor mais baixo, cerca de 70%, revelando que esta é a mistura mais suscetível à ação da água. Foi ainda possível classificar a rotura dos provetes, sendo neste estudo, a rotura do tipo “rotura de tensão clara”.

No ensaio *wheel trackingt*, verificou-se uma clara diferença entre os resultados obtidos para as misturas betuminosas. Na mistura ACFC, comparativamente à mistura ACFG, verificaram-se valores menores de profundidade média de rodeira (RD_{air}). A lajeta AC14 UB12 apresentou o melhor resultado individual (1,90 mm) e a mistura SMA11-F apresentou o melhor valor médio (2,62 mm).

Desta forma, com vista a dar resposta ao objetivo principal da dissertação, pode concluir-se que a utilização de um fíler de natureza calcária e a adição de fibras celulósicas contribuem para o aumento do desempenho mecânico das misturas betuminosas, nomeadamente, da resistência à deformação permanente.

A melhoria da adesividade entre agregado e betume, e o conseqüente aumento da resistência à deformação permanente, garante uma maior durabilidade das misturas betuminosas.

5.2 Trabalhos futuros

Nesta secção apresentam-se algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Tendo em conta a realização de um número escasso de provetes para cada mistura, seria pertinente a realização de um maior número de provetes a fim de fazer uma análise multiplicada de modo a comparar e confirmar resultados;
- Sugere-se o prosseguimento dos trabalhos de investigação na área da adesividade entre agregado e betume, abrangendo um maior número de composições de misturas, com utilização de cal hidratada e cal hidráulica permitindo a sua comparação, assim como de misturas para aplicação em diferentes camadas do pavimento;
- Propõe-se, também, o prosseguimento de trabalhos experimentais na área da adesividade entre agregado e betume, realizando extração de carotes de pavimentos aplicados *in situ* de forma a comparar resultados de misturas produzidas em laboratório e em central.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baptista, A.M.C. (1999). “Dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis. Aplicabilidade em Portugal dos métodos existentes”. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, fevereiro.
- Batista, F., Miranda, H., Antunes, M. L., Lanchas, S., Martinho, F. (2012). “Aplicações de Misturas Betuminosas de Elevado Desempenho em Redes Viárias Urbanas”, 2012
- Benta, A.; Duarte, C.; Costa, A.; Cordeiro, T.; Pereira, R. (2015). “Design and performance of a warm high-modulus asphalt concrete”.
- Błażejowski, K. (2011). “Stone Matrix Asphalt - Theory and Practice.” CRC Press-Taylor e Francis Group.
- Branco, F.; Pereira, P.; Santos, L.P. (2008). Pavimentos Rodoviários. Edições Almedina. Coimbra.
- CEPSA (2014). “Manual de Pavimentação”. 3ª Edição., março, 2014.
- EAPA (2010). The use of Warm Mix Asphalt. European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, january.
- Estradas de Portugal, S.A. (2014). Caderno de Encargos Tipo Obra, Capítulo 14.03 - Pavimentação, Características dos materiais. Estradas de Portugal, S.A., Vol. 3, setembro.
- Fazaeli, H.; Behbahani, H.; Amini, A.; Rahmani, J.; Yadollahi, G. (2012). High and low temperature properties of FT-Paraffin-Modified Bitumen.
- Ferreira, C. (2009). “Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas”. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Guimarães, dezembro.
- Fonseca, P. (2011). “Propriedades volumétricas de misturas betuminosas (com e sem fibras)”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, dezembro.
- Freire, A.C. (2002): “Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários”. Tese de Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Faculdade de Ciências e Tecnologia de Coimbra, Coimbra, janeiro.

Herrero, O.; Needham, D.; Wallin, T.; Costa, A., Loma, J. (2009). “Evaluación de la resistencia conservada mediante los nuevos ensayos”. UNE-EN 12697-11 y 12. XV CILA.

Jenkins, K. (2000). “Mix Design Considerations for Cold and Half-Warm Bituminous Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen”. PhD Thesis, Stellenbosch: University of Stellenbosch, South Africa.

Judele, L. (2011). “The mechanism of bitumen adhesion to aggregates the influence of mineralogic nature”. Buletin Institute Politehnic Din IASI Universidade Técnica.

Kefei, L.; Linfei, D.; Jiayu, Z. (2016). “Nanoscale study on water damage for different warm mix asphalt binders”.

Lu, X.; Sandman, B.; Redelius, P. (2010). “Aging Characteristics of polymer modified in porous asphalt pavements”.

Martinho, F. (2014). “Misturas Temperadas com Subprodutos Industriais - Caracterização e Validação Tecnológica”. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa,

Martinho, F., Lanchas, S., Nunez, R., Batista, F., Miranda, H. (2013). “A Experiência Portuguesa em Misturas Betuminosas do Tipo SMA com Fibras Celulósicas.”

Miranda, L. (2009). “Estudo comparativo entre argamassas de revestimento à base de cimento com adição de cal hidráulica e de cal hidratada”. Dissertação de mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, outubro.

Nunn, M.E. (1994), “Evaluation of Stone Mastic Asphalt (SMA): A High Stability Wearing Course Material”, Transport Research Laboratory Project Report 65.

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (OC29/2011). “Artículo 542 - Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso”. Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras, España.

Sardão, E. (2012). “Camadas de desgaste betuminosas com incorporação de seixo britado - Análise de alguns parâmetros relativos ao atrito superficial”. Dissertação de mestrado, Instituto Superior de Coimbra, Coimbra, novembro.

Simões, A. (2016). “Os pavimentos rodoviários em cenários de alterações climáticas: retenção de partículas na superfície de misturas betuminosas”. Dissertação de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, maio.

Teixeira, A. (2015). “Avaliação do impacto de diferentes fileres no desempenho das misturas betuminosas”. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, dezembro.

Vargas-Nordbeck, (2007). “Evaluation of the use of Reclaimed Asphalt Pavements in Stone Matrix Asphalt Mixtures”. Master of Science Thesis, Auburn University.

Victoria, M. M. C.; Estébanez, P. C. (2009). Reologia de los betumes com caucho. IV Jornada Nacional, ASEFMA.

ACERVO NORMATIVO

NP EN 197-1:2012	Cimento - Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes
NP EN 933-1:2012	Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração.
NP EN 1097-6:2003	Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água.
NP EN 13043:2004 /AC:2010	Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação
EN 13108-5:2006	Bituminous mixtures - Material specifications - Par 5: Stone Mastic Asphalt
EN 12591:2009	Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumens.
NP EN 12697-5:2014	Misturas betuminosas. Método de ensaio para misturas betuminosas a quente. Parte 5: Determinação da baridade máxima. + Errata 1 de 2015
EN 12697-6:2012	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.
EN 12697-8:2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens.
EN 12697-11:2012	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen
EN 12697-12:2008	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.

- EN 12697-22:2003 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Laboratory mixing
- EN 12697-23:2003 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.
- EN 12697-34:2012 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test.
- EN 12697-35:2004 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing.