



Universidade de Aveiro

Ano 2023

**RALPH JÚNIOR
VALENTE ALEIXO**

**MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS –
EFEITOS DE UM ADITIVO QUÍMICO NOS
PARÂMETROS MARSHALL**



Universidade de Aveiro
Ano 2023

**RALPH JÚNIOR
VALENTE ALEIXO**

**MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS –
EFEITOS DE UM ADITIVO QUÍMICO NOS
PARÂMETROS MARSHALL**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Pelo incansável apoio, dedico este trabalho à minha mãe, Glória, e à minha irmã, Bruna. "If you going to try, go all the way... Otherwise, don't even start".

o júri

Presidente

Prof. Doutor Miguel Nuno Lobato de Sousa Monteiro de Morais
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

Arguente

Doutor Luís Francisco Amaral da Silva
Supervisor de Infraestruturas, Egis Road Operation Portugal

Orientador

Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta pela sua transmissão de conhecimento e conselhos que foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Não podia deixar de agradecer, uma vez mais, à minha família. À minha mãe e à minha irmã, pelo apoio incondicional. À memória do meu amigo Afonso Pimenta que me acompanhou em grande parte da caminhada. Obrigado.

palavras-chave

Misturas betuminosas, misturas betuminosas temperadas, sustentabilidade ambiental e económica, características volumétricas, parâmetros Marshall

resumo

As misturas betuminosas temperadas caracterizam-se por permitirem baixar significativamente a temperatura de produção e compactação da mistura betuminosa a quente, a mais convencional.

Este estudo pretende caracterizar misturas do tipo AC14 Surf (BB), com e sem aditivo, através da formulação *Marshall*. Esta mistura foi produzida de forma convencional e com betume modificado por um aditivo químico. A mistura padrão, AC14 Surf (BB), foi produzida a 170 °C e compactada a 140 °C. A mistura betuminosa temperada, MBT-3RED, foi produzida a 140 °C e compactada a 130 °C.

Foram avaliados os parâmetros *Marshall* e foi realizada uma análise do impacto da adição de um aditivo químico, Rediset™, no betume denso de penetração nominal 35/50. Comparou-se os resultados de ambas as misturas e discutiram-se os resultados obtidos.

keywords

Bituminous mixtures, warm mix asphalt, environmental and economic sustainability, volumetric characteristics, marshall parameters

abstract

Warm Mix Asphalt is characterized by significantly lowering the production and compaction temperature of the more conventional Hot Mix Asphalt.

This study aims to characterize AC14 Surf (BB) mixtures, with and without Additive, using the *Marshall* formulation. This mixture was produced conventionally and with bitumen modified by a chemical additive. The standard mixture, AC14 Surf (BB), was produced at 170 °C and compacted at 140 °C. The Warm bituminous mixture, MBT-3RED, was produced at 140 °C and compacted at 130 °C.

The *Marshall* parameters were evaluated and the impact of adding a chemical additive, Rediset™, to the 35/50 nominal penetration dense-graded bitumen was analyzed. The results of both mixtures were compared and discussed.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE QUADROS	v
ABREVIATURAS	vii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura do Trabalho	1
2. ESTADO DA ARTE.....	3
2.1. Misturas betuminosas	3
2.2. Interação aditivo-ligante	3
2.2.1. Caracterização dos betumes	4
2.2.2. Penetração a 25 °C	4
2.2.3. Temperatura de Amolecimento	5
2.2.4. Viscosidade cinemática	5
2.2.5. RTFOT – Determinação da Resistência ao Envelhecimento	6
2.3. Ensaio de Caracterização de Misturas Betuminosas.....	6
2.3.1. Máxima Baridade Teórica	6
2.3.2. Porosidade e Grau de Saturação	7
2.3.3. Módulo da Rigidez	7
2.3.4. Sensibilidade à Água	8
2.3.5. Resistência à Deformação Permanente.....	9
2.3.6. Resistência à Fadiga	9
2.4. Misturas Betuminosas Temperadas	11
2.4.1. Evolução/História das Misturas Betuminosas Temperadas.....	11
2.4.2. Tecnologias de produção de Misturas Betuminosas Temperadas	13
2.4.3. Utilização de aditivos orgânicos e químicos	14
2.4.4. Tecnologias de produção de betume espuma	22
2.4.5. Vantagens e Limitações das Misturas Betuminosas Temperadas	23
2.4.5.1. Vantagens ambientais	23
2.4.5.2. Vantagens económicas.....	24
2.4.5.3. Vantagens técnicas.....	25

2.4.5.4.	Vantagens para trabalhadores e envolventes de trabalho	25
2.4.5.5.	Limitações na utilização de Misturas Betuminosas Temperadas	25
2.5.	Considerações sobre a Incorporação de Material Betuminoso Reciclado em Misturas Betuminosas Temperadas	26
3.	CARATERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E FORMULAÇÃO DA MISTURA	29
3.1.	Enquadramento	29
3.2.	Materiais constituintes	29
3.2.1.	Seleção dos agregados e análise granulométrica.....	29
3.2.2.	Massas Volúmicas e Absorção de água.....	34
3.2.3.	Ligante	36
3.2.4.	Aditivo.....	37
3.3.	Formulação da mistura betuminosa – Formulação Marshall.....	37
3.3.1.	Considerações iniciais	38
3.3.2.	Fabrico de provetes e determinação da baridade.....	38
3.3.3.	Ensaio de compressão Marshall	44
3.3.4.	Caraterização volumétrica e percentagem ótima de betume	45
4.	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	53
4.1.	Considerações iniciais.....	53
4.2.	Características Marshall.....	54
4.3.	Considerações Finais	56
5.	CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS	57
5.1.	Conclusões gerais	57
5.2.	Trabalhos futuros	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Constituição de um pavimento rodoviário flexível (Adaptado de Silva, 2006)...	3
Figura 2 - Esquema representativo do ensaio de penetração (Adaptado de Silva, 2006).....	4
Figura 3 – Equipamento e esquematização do ensaio para determinação do ponto de amolecimento pelo método do anel e bola (foto do laboratório NIDIN e adaptado de Picado-Santos et al., 2008).	5
Figura 4 – Representação esquemática do ensaio de flexão (Adaptado de Goh et al., 2007).	8
Figura 5 – Taxa de variação da energia dissipada (RDEC) em função do número de ciclos de carga (Adaptado de Shen & Carpenter, 2007).....	11
Figura 6 - Esquematização dos principais acontecimentos da história das MBT.	13
Figura 7 - Classificação das misturas betuminosas por gama de temperaturas (Adaptado de Caputo et al., 2020).	14
Figura 8 - Mecanismo de transição de fase do Sasobit com o ligante betuminoso (Adaptado de Caputo et al., 2020).....	16
Figura 9 - Aditivo comercial Sasobit® (Adaptado de Sasol, 2018).....	17
Figura 10 - Aditivo químico Rediset™ WMX (Adaptado de Benta et al., 2015).	21
Figura 11 - Curva granulométrica da mistura do tipo AC14 Surf (BB).....	33
Figura 12 - Curva granulométrica efetiva da mistura do tipo AC14 Surf (BB).....	34
Figura 13 - Pesagem dos agregados e do betume pré aquecidos.....	39
Figura 14 - Fabrico da mistura.	39
Figura 15 - Colocação da mistura em moldes.	40
Figura 16 - Compactador de impacto.	40
Figura 17 - Desmoldagem da mistura.....	40
Figura 18 - Preparação e pesagem dos provetes Marshall.	41
Figura 19 - Ensaio de compressão Marshall.....	44
Figura 20 - Determinação da baridade máxima teórica com o picnómetro de vácuo.	45
Figura 21 - Representação gráfica das caraterísticas da mistura betuminosa AC14 Surf (BB) em função da percentagem de betume dos provetes.....	49
Figura 22 - Representação gráfica das caraterísticas da mistura temperada MBT-3RED em função da percentagem de betume dos provetes.	51

Figura 23 - Representação gráfica das características de ambas as misturas em função da percentagem de betume dos provetes. 54

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Calendarização das tarefas.	2
Quadro 2 - Informações sobre alguns aditivos usados no fabrico das MBT (Adaptado de Capitão et al., 2012; D'Angelo et al., 2008; Martinho, 2014; Rubio et al., 2012).	15
Quadro 3 - Redução das emissões com a implementação das MBT (Adaptado de d'Angelo et al., 2008).	24
Quadro 4 - Curva granulométrica da Brita 10/14.	30
Quadro 5 - Curva granulométrica da Brita 4/12.	30
Quadro 6 - Curva granulométrica da Brita B 4/8.	31
Quadro 7 - Curva granulométrica da Brita A 4/8.	31
Quadro 8 - Curva granulométrica da Brita 0/4 (pó de pedra).	32
Quadro 9 - Curva granulométrica do fíler comercial.	32
Quadro 10 - Distribuição granulométrica das frações da mistura e ajuste ao fuso AC14 Surf (BB).	33
Quadro 11 - Massas volúmicas e absorção dos agregados através do método do cesto de rede metálica.	36
Quadro 12 - Massas volúmicas e absorção dos agregados através do método do picnómetro.	36
Quadro 13 - Especificações do betume de penetração nominal 35/50.	36
Quadro 14 - Penetração a 25 °C e temperatura de amolecimento do betume 35/50.	37
Quadro 15 - Limites estabelecidos no CEEP para a mistura do tipo AC14 Surf (BB) (EP, 2014).	37
Quadro 16 - Composição dos provetes Marshall.	38
Quadro 17 - Cálculo da baridade dos provetes Marshall da mistura AC14 Surf (BB).	42
Quadro 18 - Cálculo da baridade dos provetes Marshall da mistura MBT-3RED.	42
Quadro 19 - Características geométricas dos provetes da mistura AC14 Surf (BB).	43
Quadro 20 - Características geométricas dos provetes da mistura MBT-3RED.	43
Quadro 21 - Determinação da máxima baridade teórica da mistura AC14 Surf (BB).	46
Quadro 22 - Determinação da máxima baridade teórica da mistura MBT-3RED.	46
Quadro 23 - Resumo dos valores calculados para a formulação Marshall da mistura AC14 Surf (BB).	47

Quadro 24 - Resumo dos valores calculados para a formulação Marshall da mistura MBT-3RED.....	47
Quadro 25 - Resultados do ensaio de compressão de Marshall da mistura AC14 Surf (BB).	48
Quadro 26 - Resultados do ensaio de compressão de Marshall da mistura MBT-3RED....	48
Quadro 27 - Resumo das características da mistura AC14 Surf (BB) para a percentagem ótima de betume.	50
Quadro 28 - Resumo das características da mistura MBT-3RED para a percentagem ótima de betume.....	52
Quadro 29 - Síntese dos resultados obtidos para a mistura do tipo AC14 Surf (BB) e MBT-3RED.....	53

ABREVIATURAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AEMA – *Asphalt Emulsion Manufacturers Association*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CEEP – *Caderno de Encargos das Estradas de Portugal*

EAPA – *European Asphalt Pavement Association*

FHWA – *Federal Highway Administration*

LEA – *Low Energy Asphalt*

MB – *Mistura betuminosa*

MBQ – *Mistura betuminosa quente*

MBR – *Mistura betuminosa recuperada*

MBT – *Mistura betuminosa temperada*

NAPA – *National Asphalt Pavement Association*

NCHRP – *National Cooperative Highway Research Program*

PV – *Plateau Value*

RAP – *Pavimento asfáltico recuperado*

RDEC – *Ratio of Dissipated Energy Change*

SBS – *Styrene-Butadiene-Styrene (elastómeros)*

SFE - *Surface Free Energy*

SMA – *Stone Mastic Asphalt*

TWG – *Technical Working Group*

VFB – *Grau de saturação do betume*

VMA – *Volume de vazios na mistura de agregados*

WMA – *Warm Mix Asphalt*

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Atualmente a questão ambiental é cada vez mais uma preocupação no setor industrial, dentro do qual se insere a indústria da pavimentação, existindo a necessidade de se estudar alternativas que permitam tornar o setor mais sustentável.

Nesse contexto surgiram as misturas betuminosas temperadas (MBT), que visam reduzir as temperaturas de produção e compactação, sem comprometer as características de desempenho em comparação às misturas betuminosas a quente (MBQ), mais convencionais. Esta redução de temperatura de 20 a 40 °C pode ser conseguida por meio da introdução de aditivos ou por técnicas de produção como o uso de betume-espuma (European Asphalt Pavement Association, 2015).

Aliado a isto, a reciclagem de pavimentos, através do aproveitamento de material proveniente de fresagem, pode ser um bom complemento à eficiência energética das misturas temperadas contribuindo para a sustentabilidade económica e ambiental.

1.2. Objetivos

O presente trabalho pretende contribuir para o aprofundamento dos conhecimentos sobre o comportamento das misturas betuminosas temperadas através da adição de aditivos e sintetizar informação relativamente às suas tecnologias.

A metodologia deste trabalho assenta num estudo experimental de misturas modificadas por um aditivo e na avaliação das suas características volumétricas. Numa última fase, vai realizar-se uma análise comparativa de resultados entre a mistura betuminosa temperada e a mistura betuminosa padrão.

1.3. Estrutura do Trabalho

Para atingir os objetivos deste trabalho, foi necessário começar por sintetizar e analisar os conhecimentos existentes sobre o comportamento das misturas betuminosas (MB).

No Capítulo 1, faz-se uma introdução à temática abordada nesta dissertação, definem-se os seus objetivos, metodologia e apresenta-se a estruturação do trabalho.

No Capítulo 2, aprofundam-se as matérias mais relevantes das misturas betuminosas temperadas incluindo uma nota histórica e evolutiva da tecnologia e dos mecanismos que permitem a redução da temperatura. Este capítulo apresenta ainda, inicialmente, um enquadramento geral sobre as misturas betuminosas e os seus ensaios de caracterização.

No Capítulo 3, são apresentados os constituintes das misturas tratadas no caso de estudo, é apresentada a granulometria da mistura de agregados utilizados, e são apresentados os resultados das características volumétricas de ambas as misturas. No Capítulo 4, procede-se a uma análise comparativa da mistura temperada face à mistura padrão e, por último, apresentaram-se no Capítulo 5 as conclusões deste trabalho.

O Quadro 1 apresenta a calendarização das tarefas realizadas no âmbito da dissertação.

Quadro 1 - Calendarização das tarefas.

Tarefas	2022			2023									
	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Julho	Ago.	Set.	Out.
Tarefa 1													
Tarefa 2													
Tarefa 3													
Tarefa 4													
Tarefa 5													

Na dissertação foram desenvolvidas as seguintes tarefas:

- Tarefa 1 – Pesquisa bibliográfica;
- Tarefa 2 – Escrita do estado da arte;
- Tarefa 3 – Preparação e planeamento da campanha experimental;
- Tarefa 4 – Análise dos resultados obtidos da campanha experimental;
- Tarefa 5 – Escrita da dissertação final.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Misturas betuminosas

Os pavimentos rodoviários devem assegurar segurança e conforto suportando as cargas aplicadas pelos veículos. É assim necessário melhorar o desempenho estrutural e a qualidade funcional dos pavimentos para que estes possam suportar o tráfego mais agressivo.

Os pavimentos flexíveis são constituídos na parte inferior pelas camadas granulares, assentes numa camada de fundação, e por um conjunto de camadas superiores compostas por MB (Picado-Santos et al., 2008; Silva, 2006).

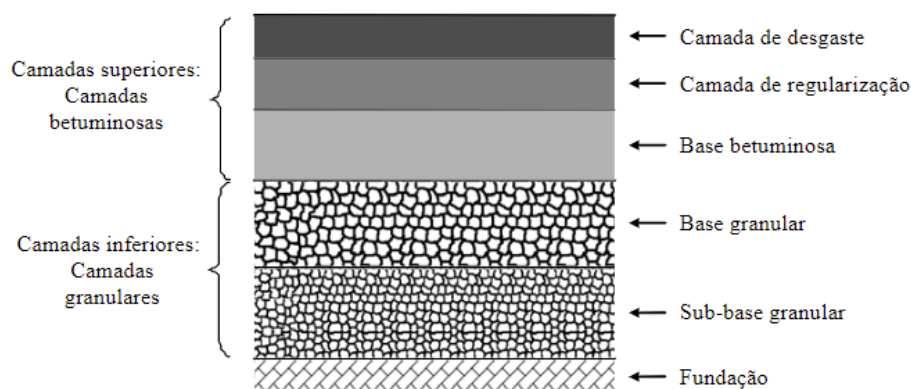


Figura 1 – Constituição de um pavimento rodoviário flexível (Adaptado de Silva, 2006).

Na execução das camadas superiores aplicam-se misturas betuminosas constituídas por materiais granulares que são misturados a uma quantidade pré-determinada de ligante. Estas misturas devem responder às exigências de estabilidade, trabalhabilidade, durabilidade, resistência à fadiga, impermeabilidade e aderência (National Cooperative Highway Research Program, 2011).

No subcapítulo 2.3, faz-se uma apresentação sucinta em relação aos ensaios de caracterização das misturas betuminosas que vão ser realizados na campanha experimental para a realização da dissertação.

2.2. Interação aditivo-ligante

A fim de avaliar as características do aditivo e, particularmente, o seu comportamento com o ligante, é comum realizar, entre outros, os seguintes ensaios: penetração da agulha

a 25 °C de acordo com a Norma EN 1246, temperatura de amolecimento (método do anel e bola) de acordo com a EN 1427, resistência ao endurecimento sob a influência do calor e do ar (método RTFOT) de acordo com a EN 12607-1 e viscosidade cinemática de acordo com a EN 12595.

2.2.1. Caracterização dos betumes

A validação dos betumes é indispensável para garantir que a MB funcione com o comportamento esperado em serviço. Esta verificação está definida em normas europeias e americanas como a ASTM (*American Society for Testing and Materials*) e a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) (Silva, 2006).

As duas propriedades fundamentais para avaliar a viscosidade do betume são os ensaios de penetração a 25°C e o ponto de amolecimento (Picado-Santos et al., 2008).

2.2.2. Penetração a 25 °C

A Norma EN 1426 (*Determination of needle penetration*) especifica os parâmetros para a determinação da penetração a 25 °C, que mede indiretamente a viscosidade do ligante. A consistência do betume é inversamente proporcional ao valor de penetração obtido a partir deste ensaio, ou seja, quanto maior o valor menor será a consistência. Neste ensaio (Figura 2) mede-se a profundidade, em milímetros, de penetração de uma agulha com uma carga de 100g, numa amostra de betume à temperatura de 25 °C, durante 5 segundos (CEN, 2007b).

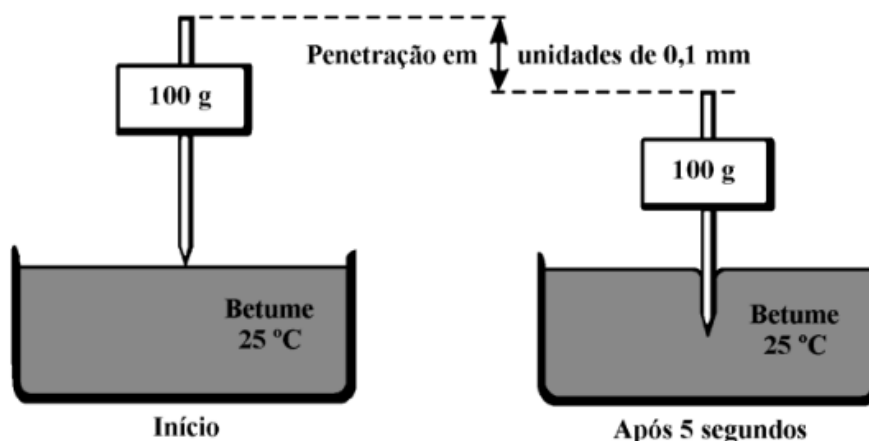


Figura 2 - Esquema representativo do ensaio de penetração (Adaptado de Silva, 2006).

2.2.3. Temperatura de Amolecimento

O ensaio para a determinação do ponto de amolecimento, pelo método do anel e bola, permite classificar o comportamento do betume a temperaturas elevadas. A Norma EN 1427 (*Determination of the softening point - Ring and Ball method*) estabelece os parâmetros para a sua determinação, num intervalo de temperaturas de 28 até 150 °C (CEN, 2007d). Neste ensaio (Figura 3) determina-se a temperatura à qual a amostra de betume, submetida a um aquecimento progressivo e ao peso de uma esfera de aço, atinge uma determinada consistência (Silva, 2006).

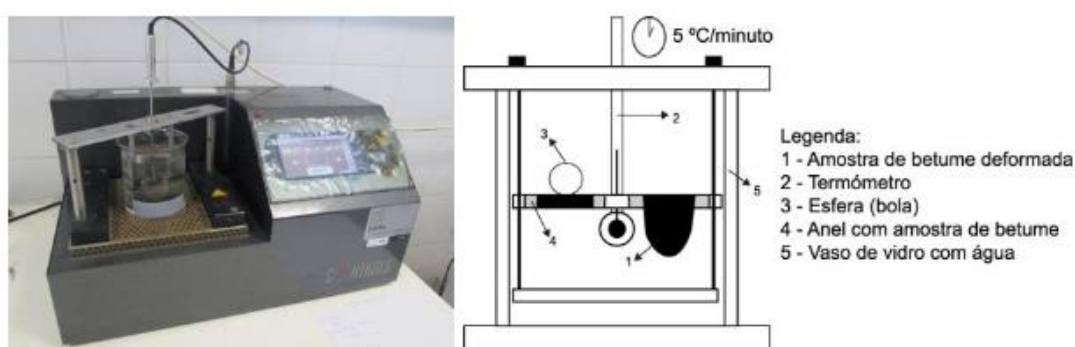


Figura 3 – Equipamento e esquematização do ensaio para determinação do ponto de amolecimento pelo método do anel e bola (foto do laboratório NIDIN e adaptado de Picado-Santos et al., 2008).

2.2.4. Viscosidade cinemática

A viscosidade é uma característica primordial para determinar a forma como o betume se comporta a determinada temperatura (Read et al., 2003). Os parâmetros para a sua determinação são definidos pela Norma EN 12595 (*Determination of kinematic viscosity*).

O ensaio consiste em medir o tempo que uma amostra de betume demora a escoar através de um orifício tubular. Durante o ensaio deve manter-se a temperatura constante, 60 °C (temperatura de serviço máxima) ou 135 °C (temperatura média de produção e espalhamento da mistura).

A viscosidade pode ser determinada a partir da Equação 1, onde c é a constante de calibração do viscosímetro (em mm²/s) e t o tempo medido em segundos (CEN, 2007a).

$$v = c \times t \quad \text{Equação 1}$$

2.2.5. RTFOT – Determinação da Resistência ao Envelhecimento

Este procedimento expõe o betume a condições próximas às de produção na central. É possível prever qual será o endurecimento que o betume sofrerá, durante a sua produção e aplicação, através dos ensaios feitos após o envelhecimento, de penetração e de temperatura de amolecimento (Picado-Santos et al., 2008). É possível estabelecer os parâmetros para a simulação do envelhecimento, por aquecimento e exposição do ar do betume pela Norma EN 12607 – *Determination of the resistance to hardening under the influence of heat and air* (CEN, 2007c).

2.3. Ensaios de Caracterização de Misturas Betuminosas

O dimensionamento dos pavimentos é realizado com base nos critérios de ruína, os quais são divididos no critério de fadiga e no critério de deformação permanente. O primeiro critério corresponde ao fendilhamento excessivo nas zonas mais tracionadas das camadas betuminosas e é controlado pela extensão de tração (ϵ_t) na base da camada. Já o segundo critério representa o assentamento excessivo da camada superficial do pavimento e é controlado pela extensão vertical de compressão (ϵ_{dp}) no topo do leito do pavimento (Picado-Santos et al., 2008).

As MBT, ao contrário das MBQ, implicam a determinação experimental das suas propriedades mecânicas considerando-se ensaios fundamentais e de simulação para prever o seu comportamento mecânico em serviço (Capitão et al., 2004). Estes ensaios tentam reproduzir o estado de tensão e deformação a que o pavimento é sujeito, durante as passagens repetidas dos veículos. É tido em conta a ação da temperatura, o nível de compactação e os períodos de repouso (Silva, 2006).

Os parâmetros para a avaliação das várias características de uma MB estão estabelecidos na Norma EN 12697: *Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt* destacando-se a máxima baridade teórica, o módulo de rigidez, a sensibilidade à água e a resistência à deformação permanente e à fadiga.

2.3.1. Máxima Baridade Teórica

A baridade máxima teórica (ρ_{mv}) é determinada com base na Norma EN 12697-5 (*Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Determination of the maximum density*), através de métodos volumétricos, hidrostáticos e por métodos de

cálculo. Todos estes métodos consistem em determinar o volume de vazios da mistura (VMA) através de diferentes procedimentos. No método volumétrico esse volume é determinado através do deslocamento de água pelo provete num picnómetro, no método hidrostático o volume de vazios da amostra é determinado através da massa seca e depois imersa em água e no método de cálculo determina-se ρ_{mv} a partir da composição e das densidades dos componentes da mistura betuminosa (CEN, 2002).

2.3.2. Porosidade e Grau de Saturação

A determinação da porosidade e do grau de saturação é determinada conforme indicado na Norma EN 12697-8 (*Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Determination of void characteristics of bituminous specimens*).

Esta norma define um procedimento para o cálculo da porosidade (V_m) e da percentagem de vazios no agregado preenchido com ligante (VFB), que é o grau de saturação do ligante. A porosidade é calculada a partir da baridade máxima teórica da mistura e da baridade do provete. O VFB é calculado a partir da percentagem de ligante, da sua massa volúmica, da baridade do provete e dos vazios do agregado mineral (CEN, 2003a).

2.3.3. Módulo da Rigidez

O módulo de rigidez depende da velocidade de circulação dos veículos, da temperatura e do período de carregamento. O seu valor é elevado para baixas temperaturas e curtos períodos de carregamento e reduzido para altas temperaturas e longos períodos de carregamento possibilitando prever o comportamento da mistura à deformação permanente (Capitão et al., 2004; Silva, 2006).

Os parâmetros necessários para a determinação do módulo de rigidez estão definidos pela Norma EN 12697-26 (*Stiffness*), podendo este ser obtido através de ensaios de tração, corte, flexão e ensaios de tração indireta. Estes ensaios tentam reproduzir as tensões que se instalam devido às passagens dos veículos destacando-se o teste de flexão em 4 pontos (Figura 4). É imposta uma flexão periódica nos provetes, sendo-lhes permitida rotação e translação horizontal nos pontos de carga e reação. A força que impõe a deformação é medida em função do tempo e a amplitude do deslocamento aplicado no provete deve ser constante em função do tempo (CEN, 2004).

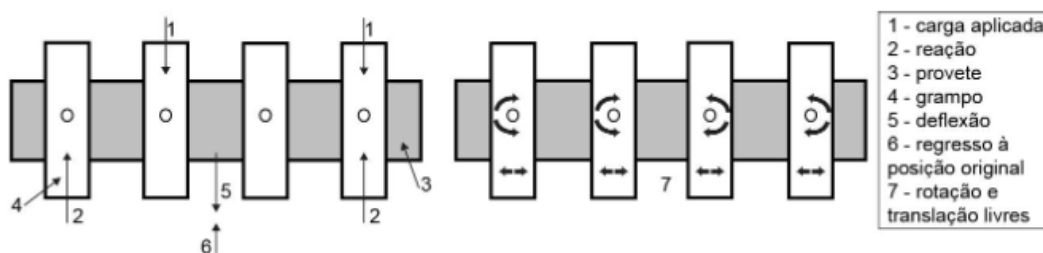


Figura 4 – Representação esquemática do ensaio de flexão (Adaptado de Goh et al., 2007).

Deverão ser seguidos os procedimentos indicados na Norma EN 12697-33 para as amostras produzidas em laboratório sendo que as suas massas e dimensões são medidas com base na EN 12697-29.

O ensaio ocorre na gama de frequências entre 0,1 e 50 Hz, sendo no final repetida a frequência de 0,1 Hz de maneira a verificar que o varrimento não danificou a amostra. O ensaio só se dá por terminado depois de, repetida essa frequência, se verificar que o módulo de rigidez medido inicialmente não difere mais de 3%. Normalmente, na medição do módulo de rigidez inicial, considera-se o valor obtido no centésimo ciclo de maneira a garantir que a amplitude e deformação são constantes (CEN, 2004).

2.3.4. Sensibilidade à Água

Os parâmetros para determinar a sensibilidade de uma MB estão definidos pela Norma EN 12697-12 (*Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*). Neste ensaio os provetes são sujeitos a uma carga diametral, com uma velocidade constante de deslocamento de (50 ± 2) mm/min, até atingirem a rotura. A sensibilidade à água da amostra traduz-se assim pela Equação 2 (CEN, 2003d).

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

Onde,

$ITSR$, é a resistência conservada à tração indireta (%)

ITS_w , é a resistência à tração indireta do subgrupo húmido (kPa)

ITS_d , é a resistência à tração indireta do subgrupo seco (kPa)

2.3.5. Resistência à Deformação Permanente

O ensaio de deformação permanente, também conhecido como ensaio de pista ou “*Wheel-Tracking*”, é definido pela Norma EN 12697-22 (*Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Wheel Tracking*). Este ensaio permite determinar a suscetibilidade que uma MB tem em se deformar sob passagem repetida dos rodados e é avaliada pela profundidade do fosso que se forma após a passagem de uma roda que transmite carga a uma temperatura constante.

Existem três tipos alternativos de dispositivos: os dispositivos de tamanho grande, os extra dispositivos de grande porte onde os provetes são acondicionados ao ar, e os dispositivos de pequeno porte onde os provetes são acondicionados ao ar ou em água. A determinação da deformação permanente difere consoante o dispositivo e determina-se segundo a Equação 3 correspondendo à média de WTS dos provetes (CEN, 2003c).

$$WTS_{AIR\ ou\ W} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad \text{Equação 3}$$

Onde,

WTS_{AIR} e WTS_W são a variação de deformação permanente (mm);

d_{10000} e d_{5000} são a profundidade dos sulcos após 10000 e 5000 ciclos;

2.3.6. Resistência à Fadiga

A resistência à fadiga é a capacidade que a mistura betuminosa tem de resistir a esforços de flexão. Esta só se verifica quando o valor máximo da tensão instalada em cada aplicação de carga é inferior à tensão de rotura da MB (Silva, 2006).

A granulometria, teor e rigidez do betume e o grau de compactação são exemplos de variáveis que afetam a resistência à fadiga da mistura. Este estado de ruína manifesta-se através do fendilhamento na zona de passagem dos rodados sendo que, de maneira a considerar-se este fator no dimensionamento de pavimentos, realizam-se ensaios mecânicos cíclicos de simulação da passagem de veículos pesados (Pais & Palha, 2010). Os parâmetros para determinar a resistência à fadiga da MB estão definidos pela Norma EN 12697-24 (*Bituminous mixtures – Test Methods for Hot Mix Asphalt – Resistance to fatigue*) e são realizados através de ensaios de flexão e de tração direta e indireta.

Nestes ensaios o carregamento pode ser aplicado através de impulsos em tensão ou extensão controlada. Se for em extensão o deslocamento mantém-se constante durante a

variação de carga, sendo que a tensão diminui à medida que a rigidez do material também diminui, se for em tensão a amplitude permanece constante durante a variação de carga sendo que a deformação aumenta consoante a rigidez do material diminui (Pais et al., 2000).

Com o ensaio realizado com tensão controlada a resistência à fadiga é expressa pela relação entre o número de ciclos de carga até à rotura e o nível de tensão aplicado.

$$N_f = a \times \left(\frac{1}{\sigma_t}\right)^b \quad \text{Equação 4}$$

Onde,

a e b são constantes determinadas em laboratório;

A resistência à fadiga pode também ser caracterizada através de ensaios com controlo à extensão.

$$N_f = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^b \quad \text{Equação 5}$$

Onde,

a e b são constantes determinadas em laboratório;

Shen e Carpenter (2007) apresentaram uma metodologia baseada na taxa de variação da energia dissipada (RDEC – *Ratio of Dissipated Energy Change*) para a definição do valor PV (*Plateau Value*) que se correlaciona com a resistência à fadiga.

Na Figura 3 encontra-se a curva “RDEC em função do número de ciclos de carga” que pode ser dividida em três fases (Shen & Carpenter, 2007):

Fase I – ocorre uma diminuição da taxa de variação da energia dissipada;

Fase II – uma percentagem constante de energia traduz-se em dano na amostra;

Fase III – ocorre um aumento drástico do RDEC, que equivale ao momento em que o pavimento entra em ruína dando-se a rotura por fadiga;

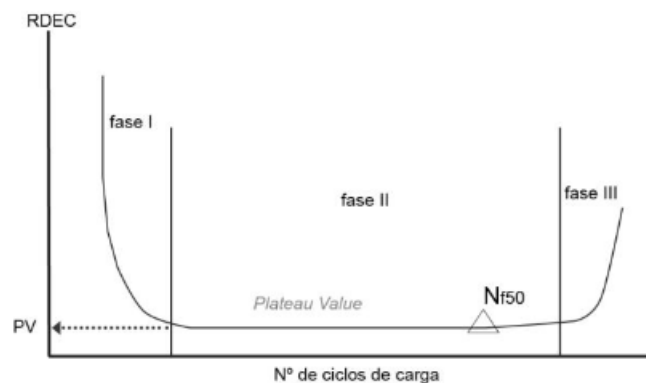


Figura 5 – Taxa de variação da energia dissipada (RDEC) em função do número de ciclos de carga (Adaptado de Shen & Carpenter, 2007).

O valor do RDEC no ponto N_{f50} é definido como o *Plateau Value* e corresponde à redução de 50% do valor de rigidez inicial.

2.4. Misturas Betuminosas Temperadas

O objetivo com as MBT é produzir misturas com características de resistência, durabilidade e desempenho semelhantes às MBQ, utilizando temperaturas de produção mais baixas. Existem importantes benefícios ambientais e de saúde associados à redução das temperaturas de produção e compactação, incluindo menores emissões de gases com efeito de estufa, menor consumo de combustível e menor exposição dos trabalhadores aos fumos gerados durante a pavimentação e produção de asfalto. As temperaturas de produção mais baixas podem também melhorar o desempenho do pavimento reduzindo o envelhecimento do ligante. Este fator proporciona tempo adicional para a compactação da mistura e permite uma compactação melhorada durante a pavimentação em tempo frio. As tecnologias para a produção das MBT foram introduzidas pela primeira vez na Europa no final dos anos 90 como uma medida para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa. Desde então, vários processos de produção das MBT foram desenvolvidos na Europa e nos Estados Unidos (NCHRP, 2011).

2.4.1. Evolução/História das Misturas Betuminosas Temperadas

Usar temperaturas mais baixas para produzir misturas asfálticas não é um conceito novo. Em 1956, o professor Ladis Csanyi, da Universidade de Iowa, deu início ao avanço das tecnologias de formação de espuma em que o processo original consistia em injetar vapor

no betume aquecido. Em 1968, a Mobil Oil na Austrália, adquiriu os direitos de patente da invenção de Csanyi e modificou o processo original adicionando água fria em vez de vapor ao betume quente (Kristjansdottir, 2006; Muthen, 1998).

Em 1977, 1979 e 1981 foi publicado, respetivamente, o manual “*Bitumuls Mix Manual*”, o manual da *Federal Highway Administration* (FHWA) e o manual do *Asphalt Emulsion Manufacturers Association* (AEMA) como uma diretriz prática contendo informações de especificação e produção de misturas estabilizadas por emulsão (Button et al., 2007).

Anos depois, em 1995 (Koenders et al.) da Shell Global Solutions, descreveu um processo inovador de produção das misturas betuminosas temperadas (MBT) que foi testado em laboratório e avaliado em testes de campo em larga escala na Noruega, Reino Unido e Holanda. O trabalho da Shell resultou no desenvolvimento da tecnologia *WAM-Foam*. Em 1997, *Sasobit* começou a ser comercializado na Europa, pela Sasol Wax International, como um auxiliar de compactação de misturas asfálticas (Sasol, 2018).

Já nos anos 2000, o *National Asphalt Pavement Association* (NAPA) juntamente com a FHWA formaram o *Technical Working Group* (TWG), cujo objetivo era avaliar e validar a aplicação das MBT. Em 2004, (Devivere et al.) relataram que a água libertada pelos minerais de zeólitos sintéticos (*Aspha-min*) permitia a expansão do betume resultando no recobrimento dos agregados e numa boa trabalhabilidade da mistura.

Nos anos seguintes, resultado da colaboração entre a FHWA, a AASHTO e a NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*), surgiu a criação do *International Technology Scanning Program* com o objetivo de avaliar os benefícios que as MBT poderiam ter para a rede rodoviária americana. Depois de constatadas as suas vantagens económicas e ambientais o seu desenvolvimento despoletou (D’Angelo et al., 2008).

A Figura 6 esquematiza, cronologicamente, alguns dos principais acontecimentos da evolução das MBT.

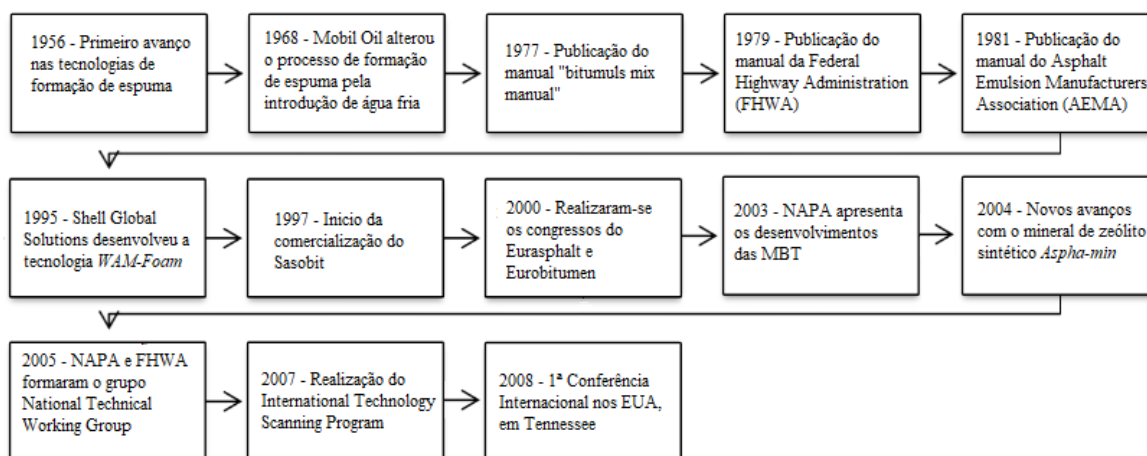


Figura 6 - Esquematização dos principais acontecimentos da história das MBT.

2.4.2. Tecnologias de produção de Misturas Betuminosas Temperadas

As tecnologias de produção de misturas betuminosas podem ser classificadas quanto à sua temperatura de fabrico. A fim de garantir uma adequada trabalhabilidade, a produção das MBQ ocorre a temperaturas elevadas (150-190 °C) enquanto as MBT são fabricadas na gama de temperaturas entre os 100 e 150 °C (EAPA, 2014).

As técnicas mais utilizadas para conseguir esta redução da temperatura e da viscosidade do ligante são: a utilização de aditivos orgânicos, aditivos químicos e técnicas de produção de espuma de betume que envolvem o uso de água ou a adição de aditivos que contêm água (EAPA, 2014).

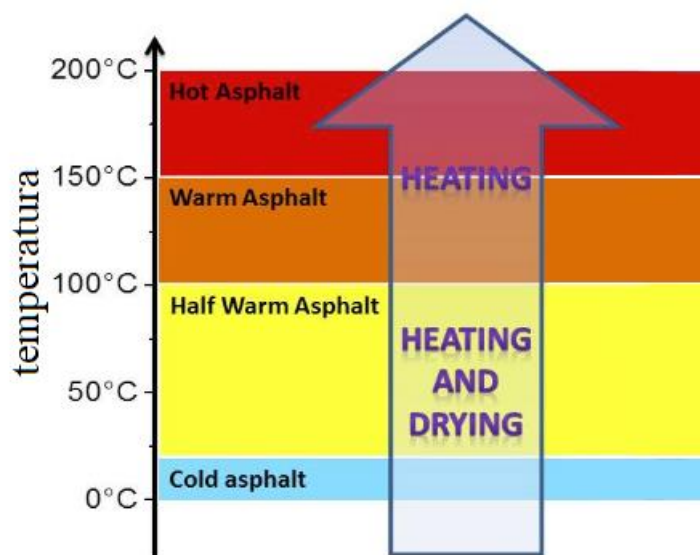


Figura 7 - Classificação das misturas betuminosas por gama de temperaturas (Adaptado de Caputo et al., 2020).

2.4.3. Utilização de aditivos orgânicos e químicos

Apesar da crescente implementação das MBT só a validação dos factos sobre a sua tecnologia contribuirá para a sua aceitação global.

As ceras parafínicas são os aditivos mais usualmente utilizados para melhorar o fluxo e qualidade dos ligantes. Estas ceras são de dois tipos: ceras naturais e ceras sintéticas. A diferença entre estes dois tipos de cera deve-se ao maior comprimento da cadeia de carbono das ceras sintéticas e ao facto da sua estrutura cristalina ser mais fina (FHWA, 2019).

Um bom conhecimento de como e porquê os aditivos funcionam dá uma avaliação realista dos métodos e técnicas a serem utilizados. O Quadro 2 mostra a gama de aditivos comerciais utilizados nas tecnologias de misturas betuminosas temperadas

Quadro 2 - Informações sobre alguns aditivos usados no fabrico das MBT (Adaptado de Capitão et al., 2012; D'Angelo et al., 2008; Martinho, 2014; Rubio et al., 2012).

Aditivos	Produtores	Descrição	Intervalo da taxa de adição	Zonas com maior utilização	Temp. de produção (ou redução) (°C)
ADITIVOS ORGÂNICOS					
<i>Asphaltan A Romanta N</i>	<i>Romanta GmbH</i>	<i>Cera de Montana</i>	<i>1,5 a 2% do peso total de ligante</i>	<i>Alemanha</i>	<i>(20)</i>
<i>Asphaltan B</i>	<i>Romanta GmbH</i>	<i>Cera de Montana refinada + amida de ácido gordo</i>	<i>2 a 4% do peso total da mistura</i>	<i>Alemanha</i>	<i>(20 a 30)</i>
<i>Sasobit</i>	<i>Sasol</i>	<i>Cera Fischer-Tropsch</i>	<i>2,5 a 3% (na Alemanha) e 1 a 1,5% (nos EUA) do peso total de ligante</i>	<i>Europa, África do Sul, EUA</i>	<i>(20 a 30)</i>
<i>Sasolwax Flex</i>	<i>Sasol</i>	<i>Cera Fischer-Tropsch + polímero</i>	<i>ND</i>	<i>Europa, África do Sul, EUA</i>	<i>(≥ 28)</i>
<i>Hyperterm</i>	<i>Coco Asphalt</i>	<i>Derivado de ácido gordo</i>	<i>ND</i>	<i>Canadá</i>	<i>ND</i>
<i>Licomant BS 100</i>	<i>Clariant</i>	<i>Cera de amida de ácido gordo</i>	<i>3% do peso total de ligante</i>	<i>Alemanha</i>	<i>(10 a 15)</i>
<i>SonneWarmix</i>	<i>Sonneborn, Inc.</i>	<i>Hidrocarboneto parafínico</i>	<i>0,5 a 1,5% do peso total de ligante</i>	<i>EUA</i>	<i>(10)</i>
<i>Leadcap</i>	<i>Kict-Kumho</i>	<i>Cera</i>	<i>1,5 a 3% do peso total de ligante</i>	<i>Coreia do Sul</i>	<i>(30)</i>
<i>Astech PER (Hydrogreen)</i>	<i>Engineering Additives LLC</i>	<i>Usado em mist. com altas taxas de MBR</i>	<i>0,5 a 0,75% do peso total de MBR (p/ % elevadas de MBR)</i>	<i>EUA</i>	<i>ND</i>
ADITIVOS QUÍMICOS					
<i>Cecabase RT</i>	<i>Ceca Arkema Group</i>	<i>Composto químico</i>	<i>0,2 a 0,4% do peso total da mistura</i>	<i>França e EUA</i>	<i>120</i>
<i>Rediset WMX</i>	<i>Akzo Nobel</i>	<i>Tensioativo catiónico + aditivo orgânico</i>	<i>1,5 a 2,0% do peso total de ligante</i>	<i>Suécia, Noruega e EUA</i>	<i>126 (≥ 30)</i>
<i>Evotherm DAT</i>	<i>Mead-Westvaco</i>	<i>Composto químico + água</i>	<i>30% do peso total de ligante</i>	<i>França e EUA</i>	<i>85 a 115</i>
<i>Evotherm 3G (REVIX)</i>	<i>Mead-Westvaco</i>	<i>Composto químico "water-free"</i>	<i>ND</i>	<i>EUA</i>	<i>(15 a 27)</i>
<i>Ecoflex (3ELT)</i>	<i>Colas</i>	<i>ND</i>	<i>ND</i>	<i>França</i>	<i>(30 a 40)</i>
<i>Sübit VR</i>	<i>GKG Mineraloel Handel</i>	<i>ND</i>	<i>ND</i>	<i>Alemanha</i>	<i>ND</i>
<i>Iterlow-T</i>	<i>Iterchimica</i>	<i>ND</i>	<i>3 a 7 kg por tonelada de betume</i>	<i>Itália</i>	<i>(20 a 30)</i>

ND = Informação Não Disponível;

Os aditivos orgânicos são principalmente constituídos por ceras e amidas gordurosas e são adicionados na mistura para reduzir a viscosidade do ligante permitindo a redução de temperatura de fabrico e compactação da mistura em cerca de 20 a 30 °C (D'Angelo et al., 2008). A redução da viscosidade do ligante traduz-se num aumento da sua rigidez devido à solidificação das partículas microscópicas que estão distribuídas uniformemente na mistura quando esta arrefece (Rubio et al., 2012). O conceito por detrás deste

fenómeno baseia-se no facto destas ceras terem pontos de fusão abaixo das temperaturas de produção das MBQ. Este tipo de aditivos têm o efeito de revestir com precisão o agregado na mistura, reduzindo assim a sua viscosidade (Calandra et al., 2019).

Um exemplo de um aditivo orgânico é o *Sasobit* que é um hidrocarboneto alifático de cadeia longa e cristalina produzido através do tratamento do carvão quente com vapor na presença de um catalisador pelo processo *Fischer-tropsch* (FT). É geralmente adicionado numa proporção de 2,5 a 3% em relação ao peso total do betume. Vários estudos relatam um aumento na resistência à deformação permanente das MBT produzidas com asfalto modificado pelo *Sasobit* (Capitão et al., 2012).

Sasobit atua na mistura como um modificador de fluxo, facilitando o revestimento dos agregados pelo aglutinante asfáltico. Como esta cera derrete numa gama de temperaturas entre os 85 e os 115 °C, é mais eficaz no ligante asfáltico a temperaturas superiores a 115°C só baixando a sua viscosidade a essas temperaturas (S. Zhang et al., 2016). Durante o processo de arrefecimento, *Sasobit* começa a cristalizar a aproximadamente 90 °C e forma uma estrutura microscópica no betume que confere o efeito de endurecimento, e isto é responsável pela resistência à deformação do betume modificado (Sasol, 2018). Estudos recentes mostram que ceras com longas cadeias de hidrocarbonetos, como o *Sasobit*, combinam com o ligante alterando as suas propriedades físicas como a rigidez e a viscosidade (Srikanth et al., 2019). O mecanismo de transição de fase do *Sasobit* com o ligante betuminosa encontra-se representado na Figura 8.

ESTADO FÍSICO DO SASOBIT QUANDO MISTURADO COM O BETUME

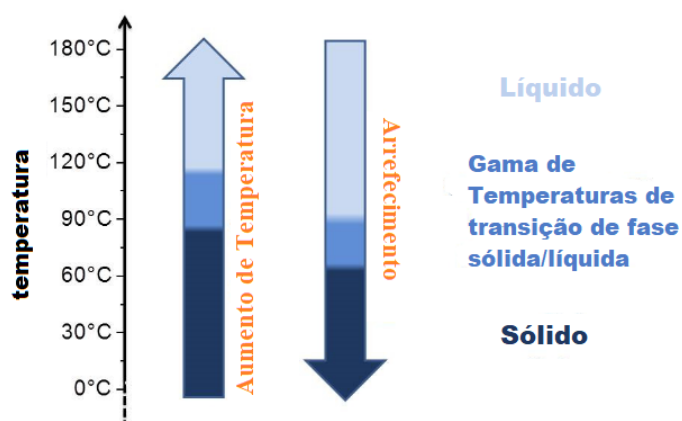


Figura 8 - Mecanismo de transição de fase do *Sasobit* com o ligante betuminoso (Adaptado de Caputo et al., 2020).

A estrutura cristalina das moléculas da cera *Fischer-Tropsch* tem um efeito redutor na fragilidade da estrada, quando pavimentada a baixas temperaturas, devido à formação de

partículas microscópicas no ligante modificado. Outra característica importante do aglutinante asfáltico, que muda devido à adição da cera, é o volume de vazios presentes na mistura. O número e o tamanho dos vazios é reduzido devido à melhoria do fluxo do betume modificado durante os procedimentos de mistura e compactação. Menos vazios resultam numa maior resistência às rotinas induzidas pelas exigências do tráfego no asfalto pavimentado (Hurley & Prowell, 2005).

- Tecnologia *Sasobit*

Várias modificações da tecnologia *Sasobit* têm a capacidade de formar no ligante asfáltico estruturas em grelha de partículas microscópicas, combinando esta característica com a introdução de polímeros na cera obtém-se a possibilidade de atingir certas especificações que não seriam previamente possíveis. Um exemplo disto é a criação de um aditivo chamado *Sasoflex* que é um composto plastómero (*Sasobit*) combinado com um elastómero (um exemplo de um elastómero termoplástico à base de Estireno-Butadieno-Estireno é o *Pavprene* (SBS)) e um agente endurecedor, de reticulação química, patenteado (*Sasolink*). A fração do plastómero (*Sasobit*) reduz a viscosidade da mistura à temperatura de pavimentação e endurece o ligante à temperatura do pavimento em serviço, enquanto a fração do elastómero mantém a flexibilidade a baixas temperaturas (Caputo et al., 2019; Hurley & Prowell, 2005). *Sasobit REDUX* é outra modificação da tecnologia *Sasobit* e funciona usando o mesmo mecanismo de formação de grelha. Reduz de uma forma mais eficaz as temperaturas de fabricação e compactação devido a apresentar um ponto de fusão mais baixo, entre os 72 e 83 °C (Sasol, 2018).

A Figura 9 mostra o aditivo comercial *Sasobit*.

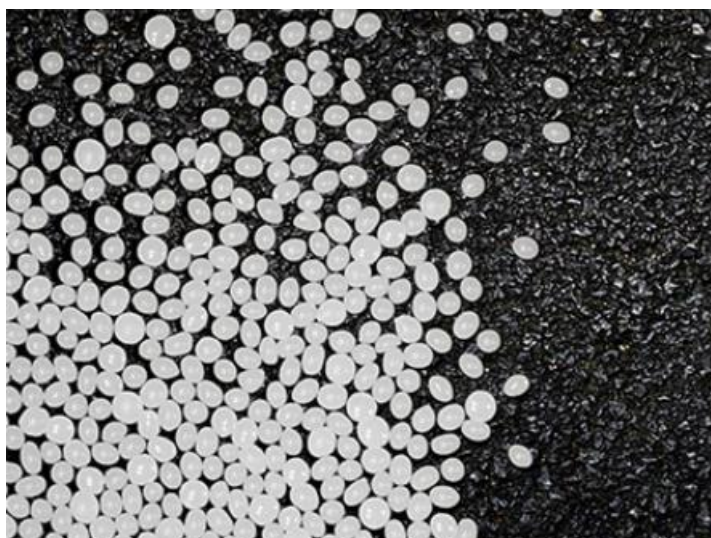


Figura 9 - Aditivo comercial *Sasobit*® (Adaptado de Sasol, 2018).

- *Licomont BS 100*

Outros aditivos orgânicos, como o *Licomont BS 100*, também funcionam com o mesmo mecanismo de redução da viscosidade do ligante. O *Licomont BS 100* é um amida de ácido gordo que atua como um intensificador de viscosidade, apresenta um mecanismo bastante semelhante ao do *Sasobit*. As suas propriedades físicas são ligeiramente diferentes, visto que derrete na gama de temperaturas entre 135 e 140 °C, pelo que se exige temperaturas de produção e compactação ligeiramente superiores às do betume modificado por *Sasobit* (D'Angelo et al., 2008; S. Zhang et al., 2016).

- *Asphaltan B*

O *Asphaltan B* é outra cera comercialmente disponível para facilitar a produção das MBT. A dinâmica da redução da viscosidade do ligante, modificado com *Asphaltan B*, é semelhante à do asfalto modificado com *Sasobit* (FHWA, 2019).

Os aditivos químicos atuam de modo a promover a adesão dos agregados ao betume, melhorando a capacidade do ligante asfáltico revestir as partículas em vez de reduzir a viscosidade do ligante, como no caso dos aditivos orgânicos. Estes aditivos atuam dentro de uma gama de temperaturas entre os 85 e 140 °C sendo possível misturar e compactar a mistura a uma temperatura mais baixa em cerca de 20 a 40 °C (EAPA, 2014).

Como funcionam na interface microscópica do ligante e dos agregados para regular e reduzir as suas forças de fricção são denominados aditivos tensioativos. Esta redução e regulação das forças de fricção facilita a lubrificação entre o ligante e o agregado melhorando a sua aderência.

Da mesma forma que as ceras alguns aditivos químicos, como é o caso do *Rediset* e *Cecabase*, reduzem a viscosidade do ligante enquanto os aditivos químicos emulsionantes (que atuam sob a forma de emulsão), como o *Evotherm*, melhoram a lubrificação na interface agregado/ligante reduzindo os níveis de energia da mistura e a sua temperatura de compactação (Kheradmand et al., 2014; S. Zhang et al., 2016).

Alguns estudos (Ghabchi et al., 2013; NCHRP, 2007) mostraram que o uso de aditivos químicos resultaram em maiores valores do trabalho de adesão e menores valores do trabalho de descolagem estando estes valores relacionados com os parâmetros SFE (*Surface Free Energy*) do ligante e dos agregados. É assim necessário estudar o efeito que, sobretudo os aditivos químicos, exercem sobre os parâmetros SFE visto alterarem a estrutura e as propriedades dos ligantes e dos agregados.

Existem várias abordagens que podem ser utilizadas para avaliar a durabilidade dos pavimentos asfálticos e o potencial dos danos induzidos pela humidade nas MBT sendo

uma das abordagens mais viável a abordagem dos parâmetros SFE (Caputo et al., 2020). Pesquisas anteriores (Habal & Singh, 2017) mostraram que a composição elementar de um ligante asfáltico (Carbono, Nitrogénio, Hidrogénio e Enxofre) está correlacionada com estes parâmetros. O SFE de um material é o trabalho necessário para criar, no vácuo, uma unidade de área de uma nova superfície sendo que um valor alto é desejável para a durabilidade e eficácia do asfalto pavimentado. O SFE compreende três componentes que, combinado em diferentes proporções, produzem o SFE total do material (NCHRP, 2007). A oscilação do valor destes componentes define os parâmetros SFE tais como a energia de coesão, trabalho de adesão, trabalho de descolamento e o rácio de energia.

Os dois parâmetros SFE mais importantes, que são alterados pela aplicação de aditivos químicos, são o trabalho de adesão e o trabalho de descolagem dos agregados. Estes parâmetros são usados para avaliar a durabilidade e a estabilidade da MBT. O primeiro, também conhecido como energia de adesão, é definido como o trabalho necessário para separar o revestimento de ligante asfáltico da superfície do agregado em estado seco (NCHRP, 2007). Um alto valor de adesão implica uma forte ligação entre os componentes da mistura temperada, levando a uma MBT mais durável e menos suscetível à humidade. O trabalho de descolamento, também conhecido como energia de adesão húmida, é outro parâmetro importante ligado à redução da energia do sistema quando o ligante se separa do agregado na presença de água num fenómeno denominado *stripping*. Um baixo valor deste parâmetro é desejável visto que um valor elevado implica um maior potencial para que ocorra *stripping* na presença de água (Ghabchi et al., 2013).

- *Evotherm*

Um dos aditivos químicos mais comuns é o *Evotherm*, que é comercializado como um aditivo de misturas temperadas que promove a adesão e o recobrimento dos agregados sem alterar o desempenho da mistura (NCHRP, 2011). Hurley e Prowell (2006) demonstraram que, a uma determinada temperatura de compactação, a adição de *Evotherm* ao ligante asfáltico aumenta o módulo de resiliência da mistura asfáltica em comparação com misturas convencionais com o mesmo ligante de grau de desempenho. A primeira geração da tecnologia *Evotherm* é uma emulsão conhecida como *Evotherm ET (Emulsion Technology)*. Mais tarde introduziu-se uma tecnologia *Evotherm* de segunda geração, conhecida como *Evotherm DAT (Dispersed Additive Technology)*, onde os aditivos químicos são injetados no asfalto durante a produção na central. A mais recente tecnologia *Evotherm*, conhecida como *Evotherm 3G*, é uma tecnologia que não implica o uso de água permitindo que o aditivo seja misturado com o ligante num terminal

(NCHRP, 2011). O *Evotherm 3G* e o *Evotherm DAT* tornaram o *Evotherm ET* caído em desuso devido à conveniência com que podem ser incorporados na mistura. *Evotherm ET* é uma emulsão à base de água que contém cerca de 70% de ligante asfáltico. A água na emulsão transforma-se em vapor quando misturada com os agregados quentes, contribuindo assim para uma melhor mistura e compactação. Os emulsificantes no *Evotherm* são absorvidos pela superfície do agregado promovendo a adesão entre as superfícies da interface ligante-agregado. É altamente possível que no *Evotherm* as longas cadeias de hidrocarbonetos dos emulsificantes que se estendem além da superfície do agregado sejam responsáveis pelos maiores valores de SFE da interface ligante-agregado (S. Zhang et al., 2016).

A compatibilidade do pH do ligante e dos agregados também é um fator importante que influencia o seu nível de ligação. Como a maioria dos ligantes asfálticos são mais ácidos do que básicos, é recomendável não usar agregados ácidos, como o granito, com um ligante asfáltico que também seja de natureza ácida (Ghabchi et al., 2013). Isso pode resultar numa ligação fraca entre o ligante asfáltico e o agregado e, conseqüentemente, maior suscetibilidade da mistura a danos induzidos pela humidade (Arabani & Hamed, 2011).

Além do efeito dos aditivos químicos, agentes *anti-stripping* (que impedem a perda de ligação entre os agregados e o ligante asfáltico) também podem ser incorporados na mistura para melhorar a sua durabilidade. Eles diminuem a suscetibilidade à humidade da mistura, reduzindo o potencial da humidade interromper a ligação adesiva entre o aglutinante e o agregado. A cal hidratada é um exemplo de um agente *anti-stripping* e provou ser altamente eficaz no fortalecimento da adesão entre o ligante asfáltico e os agregados (Little et al., 2006). Como a cal hidratada é de natureza básica, acredita-se que a sua aplicação nas MBT aumenta as componentes do SFE dos agregados. Esses aumentos nos componentes SFE dos agregados levam a uma melhoria significativa na adesão entre o ligante asfáltico e o agregado ácido (que é mais sensível a danos causados pela humidade). (Hesami et al., 2013) provaram que a energia livre de adesão entre a água e o agregado de granito é muito maior do que entre a água e o agregado de calcário, indicando que a afinidade do granito com a água é maior em comparação com a do calcário.

- *Rediset*

Rediset (Figura 10) é outro aditivo químico que contém surfactantes catiónicos e modificadores de reologia (de natureza orgânica). É um aditivo polifuncional à base de

surfactantes de aminas gordas e polietileno e tem um mecanismo ligeiramente diferente em comparação com outros aditivos químicos pois contém agentes *anti-stripping* incorporados (Banerjee et al., 2012). É considerado um aditivo polifuncional porque funciona reduzindo a fricção interfacial entre o ligante asfáltico e os agregados revestidos, enquanto melhora a trabalhabilidade aumentando a lubrificação e permitindo a mistura e compactação a temperaturas reduzidas (S. Zhang et al., 2016). A parte tensioativa deste produto diminui a tensão superficial do ligante asfáltico e diminui a suscetibilidade à humidade do agregado (Banerjee et al., 2012). A parte orgânica reduz a viscosidade do ligante asfáltico e proporciona um efeito lubrificante para facilitar o revestimento e a compactação (Kheradmand et al., 2014). Também foi relatado que o *Rediset* altera a viscosidade cinemática e dinâmica do ligante. Diminui a viscosidade cinemática do ligante asfáltico a 135 °C (Zaumanis, 2010) e tem um forte efeito sobre a viscosidade dinâmica a 110 °C para um ligante asfáltico duro, como foi demonstrado por (J. Z. Zhang et al., 2012). O uso de *Rediset* também demonstrou ter efeitos semelhantes nos parâmetros SFE, como foi observado com o uso de *Evotherm* (Estakhri et al., 2010).

Cecabase RT é outro aditivo químico que apresenta o mesmo mecanismo de produção nas MBT comparado com o *Rediset* (S. Zhang et al., 2016).



Figura 10 - Aditivo químico *Rediset*™ WMX (Adaptado de Benta et al., 2015).

- *Iterlow*

Iterlow é um aditivo químico líquido que, quando adicionado ao ligante asfáltico, permite a produção das MBT a temperaturas superiores a 120 °C. De acordo com (Hill et al., 2013) os aditivos químicos líquidos atuam geralmente como agentes emulsionantes e contêm grupos de aminas que podem melhorar a resistência à fissuração a baixas temperaturas de serviço e a resistência aos danos causados pela humidade. Tal como outros aditivos

químicos, *Iterlow* melhora a trabalhabilidade da mistura e facilita a pavimentação a temperaturas mais baixas (entre 90 e 120 °C), dependendo do tipo de betume (Estakhri et al., 2010).

Existem ainda outros tipos de aditivos, como é o caso do *VIATOP CT40*, constituído por uma parcela de ceras *Fischer-tropsch* (*Sasobit*) e outra de fibras celulósicas. Em misturas de granulometria descontínua com altas percentagens de betume, como é o caso das misturas do tipo *Stone Mastic Asphalt* (SMA), o uso deste tipo de aditivos torna-se útil quando se pretende, para além da redução da viscosidade do ligante, prevenir o escorrimento de betume (Carvalho, 2016).

2.4.4. Tecnologias de produção de betume espuma

Outra tecnologia de redução da temperatura de produção das misturas betuminosas é a tecnologia de produção de espuma de betume que pode ser realizada em dois processos diferentes: processos à base de água e processos que implicam o uso de aditivos naturais ou sintéticos que contêm água (FHWA, 2019).

As técnicas à base de água consistem em introduzir pequenas quantidades de água no betume aquecido. Quando a água é adicionada ao ligante, transforma-se em vapor resultando num aumento do volume do ligante asfáltico e correspondente redução da viscosidade. Este processo ocorre devido ao facto de que quando um determinado volume de água se transforma em vapor à pressão atmosférica, ele expande-se. Esta expansão do betume resulta num melhor recobrimento dos agregados e trabalhabilidade da mistura asfáltica (Mohd Hasan et al., 2017). É ainda importante referir que, durante a fase de arrefecimento da mistura, como a quantidade de água é residual, o ligante volta ao normal. Durante a compactação da mistura asfáltica em obra a presença desta quantidade de água no betume facilita a sua compactação. Esta técnica pode permitir uma redução da temperatura da mistura asfáltica em cerca de 20 a 40 °C (EAPA, 2014).

Outra técnica é utilizar um mineral como fonte de água, sendo os minerais normalmente utilizados do grupo dos zeólitos. Os zeólitos são silicatos de alumínio hidratado que contém cerca de 20% de água. Ao aquecer o mineral a água é constantemente libertada sem alterar a sua estrutura cristalina (Wozzuk et al., 2017). Esta libertação de água do mineral cria um efeito de espuma controlado, proporcionando uma melhor trabalhabilidade durante um período de 6 a 7 horas (EAPA, 2014). Após a obtenção da espuma de betume, esta pode ser misturada com o agregado a uma temperatura ambiente.

Em alternativa, como relatado por (Van De Ven et al., 2007), o agregado pode ser previamente aquecido a uma temperatura moderada (inferior a 100 °C) para melhorar algumas propriedades das misturas betuminosas.

Nas diferentes tecnologias de redução de temperatura através de espuma de betume à base de água, destaca-se ainda a técnica LEA (*Low Energy Asphalt*) e o WAM-Foam™ uma vez que os procedimentos utilizados são diferentes (Capitão et al., 2012).

Na técnica LEA o agregado grosso é aquecido a cerca de 150 °C e misturado com o betume quente, que geralmente incorpora um aditivo de recobrimento e aderência. Na segunda fase, depois que o agregado grosso é revestido, adiciona-se os agregados finos e húmidos. A humidade destes agregados, que deve ser idealmente 3%, em combinação com o calor é libertada como vapor fazendo com que o betume se espume e aumente o seu volume de modo a poder revestir os agregados. É bem conhecido que a espuma de betume favorece o revestimento dos agregados finos, o que é desejável uma vez que os agregados grossos já estão revestidos (Button et al., 2007; D'Angelo et al., 2008).

WAM-Foam™ é também uma técnica de mistura em duas fases, onde um betume mole e um betume duro são misturados com o agregado em momentos diferentes da produção.

Numa primeira fase o agregado grosso é aquecido a cerca de 130°C e depois revestido com o ligante mole, que é geralmente 20 a 30% do ligante total. Na segunda fase o ligante duro é espumado sobre o agregado previamente revestido pela adição de água fria (Button et al., 2007; NCHRP, 2011).

2.4.5. Vantagens e Limitações das Misturas Betuminosas Temperadas

A literatura classifica as várias vantagens decorrentes da utilização das MBT em 4 grupos distintos: vantagens ambientais, vantagens económicas, vantagens técnicas e vantagens na ótica dos trabalhadores e meio envolvente.

2.4.5.1. Vantagens ambientais

Como foi referido, a diminuição da temperatura na produção das MBT conduz a um menor gasto de energia, assim como a uma redução das emissões de gases poluentes da central de asfalto para a atmosfera.

Segundo a EAPA (2015) e d'Angelo et al. (2008), as reduções de dióxido de carbono (CO₂) são da ordem dos 15 a 40% e as de enxofre (SO₂) na ordem dos 20 a 35%. A

redução de compostos orgânicos voláteis (COV) pode ir até aos 50% e está entre os 10 e os 30% para o monóxido de carbono (CO). Para os óxidos nitrosos (NO_x) a redução pode ser de 20 a 70% e de 25 a 55% para a libertação de poeiras. No Quadro 3 estão resumidas estas reduções comparadas com as misturas a quente.

Quadro 3 - Redução das emissões com a implementação das MBT (Adaptado de d'Angelo et al., 2008).

Gases Poluentes do Ar	Redução comparada com as MBQ
CO ₂	15 a 40%
SO ₂	18 a 35%
NO _x	18 a 70%
CO	10 a 30%
Poeiras	25 a 55%

No que respeita à inclusão de material reciclado nas misturas, pode ser benéfico do ponto de vista ambiental pois visa ao reaproveitamento de resíduos que poderiam não ser tão bem empregues nas misturas a quente. Isto deve-se ao facto do uso de aditivos, nas misturas betuminosas temperadas, baixar a viscosidade do ligante beneficiando o rejuvenescimento do betume que vem incorporado no material reciclado.

2.4.5.2. Vantagens económicas

Em termos de benefícios económicos, as vantagens da produção das MBT variam de acordo com o consumo de energia utilizado durante o processo de produção e o custo de manutenção da central de asfalto. Visto que o consumo de energia aumenta com o aumento da temperatura de fabrico e do teor de água dos agregados, a redução de temperatura na produção das MBT leva a uma redução no consumo de combustível utilizado (Abdullah et al., 2014).

Outro aspeto a salientar, é a utilização de material recuperado nas MBT que contribui para a economia e poupança no transporte, além de ser uma prática ambientalmente mais sustentável (Carvalho, 2016).

2.4.5.3. Vantagens técnicas

Após a modificação do ligante asfáltico com aditivos, a redução da sua viscosidade cria uma melhor trabalhabilidade das misturas a uma temperatura mais baixa. Destaca-se assim a maior flexibilidade na aplicação e no transporte das MBT, as quais, por manterem a sua trabalhabilidade durante mais tempo, poderão ser aplicadas com menores exigências durante a estação fria do ano. Nessa condição climática, o período de arrefecimento da mistura asfáltica é menos acentuado, uma vez que está mais próximo da temperatura ambiente (Abdullah et al., 2014). Com base também nesta razão, o transporte desde a central de produção até ao local de obra poderá ser alongado, trazendo vantagens do ponto de vista da logística das obras (Rubio et al., 2012). A possibilidade de aplicação das MBT durante o período noturno também poderá ser vantajosa, quando se pretende reduzir os prazos de execução, ou no caso de o tráfego rodoviário diurno ser restritivo à realização dos trabalhos (Carvalho, 2016; Vaitkus et al., 2009).

2.4.5.4. Vantagens para trabalhadores e envolventes de trabalho

Esta redução de emissões, na produção das MBT, é bastante benéfica para os trabalhadores que são afetados pela exposição aos fumos produzidos durante a pavimentação asfáltica. A sua menor exposição levará à melhoria das condições de trabalho dos trabalhadores.

Existe uma redução na ordem dos 30 a 50% da libertação de componentes voláteis do betume em relação às misturas a quente. Isto foi possível observar, através de ensaios de monitorização da libertação deste tipo de componentes (Capitão et al., 2012).

Como existe a possibilidade de as distâncias de transporte das MBT serem mais longas, é possível colocar as centrais de produção em locais mais afastados dos aglomerados populacionais. Este aspeto é muito importante para as populações na envolvente pois não ficam expostas a este tipo de gases tóxicos (Abdullah et al., 2014).

2.4.5.5. Limitações na utilização de Misturas Betuminosas Temperadas

O maior inconveniente das MBT é o facto de o investimento inicial ser mais elevado. A aquisição de aditivos será só parcialmente compensada pela poupança de energia e combustíveis consumidos, através das suas baixas temperaturas de produção (Button et

al., 2007; D'Angelo et al., 2008). A compra de aditivos tem algum peso no custo inicial, assim como a necessidade de adaptações na central de produção para algumas das tecnologias, particularmente para as que se baseiam na produção de espuma de betume. No entanto, estudos mais recentes comprovaram que os benefícios económicos e ambientais nem sempre foram devidamente avaliados, contrariando a ideia que o investimento inicial dos aditivos não compensa no panorama geral da produção das MBT. (Almeida-Costa & Benta, 2016) mostraram que o custo máximo obtido na produção das MBT no caso de estudo era economicamente vantajoso. Demonstraram também que as misturas estudadas apresentavam uma redução significativa do consumo de energia e, conseqüentemente redução das emissões de CO₂.

2.5. Considerações sobre a Incorporação de Material Betuminoso Reciclado em Misturas Betuminosas Temperadas

As misturas betuminosas recuperadas (MBR) são produzidas a partir do processamento da fresagem da superfície do pavimento quando atinge o fim da vida útil.

A incorporação de pavimento asfáltico recuperado (RAP) nas misturas betuminosas temperadas pode aumentar os benefícios de sustentabilidade e melhorar a resistência à fadiga das MBT. A sua utilização na concepção da mistura utiliza o agregado e o ligante asfáltico recuperado reduzindo a necessidade de utilizar novos materiais e a quantidade de pavimento antigo que vai para aterro (Lu & Saleh, 2016).

Durante a vida útil do pavimento o ligante no betão asfáltico é oxidado e envelhecido, tornando-o mais rígido. Como nas MBT as temperaturas de mistura são mais baixas e o ligante é menos envelhecido e mais mole do que nas MBQ, ao adicionar e misturar o ligante envelhecido do RAP nas MBT, o ligante do produto final torna-se mais duro face ao ligante da mistura sem incorporação de RAP. As misturas betuminosas temperadas permitem assim adicionar uma elevada proporção de MBR nas misturas asfálticas melhorando a sua resistência ao corte traduzindo-se num aumento da resistência à deformação permanente da mistura (Mallick et al., 2008; Zhao et al., 2013).

Contudo, é importante referir que o aglutinante envelhecido nas MBR torna as misturas mais duras e mais frágeis, o que pode reduzir a fadiga e a resistência à fissuração a baixa temperatura (Guo et al., 2014).

Assim, a conjugação de MBT com a utilização de MBR pode ser benéfico de duas maneiras: 1) a redução da viscosidade pode auxiliar os esforços de compactação e 2) a

diminuição do envelhecimento do ligante, devido às temperaturas de produção mais baixas, compensa o betume envelhecido presente nas MBR (D'Angelo et al., 2008).

Saberi.K et al. (2017) investigaram o uso potencial de fragmentos de borracha e de pavimento asfáltico recuperado, substituindo o agregado natural nas misturas betuminosas temperadas. O objetivo desta investigação foi melhorar o desempenho do pavimento asfáltico e mitigar os impactos ambientais causados pelos pneus usados e pelo pavimento asfáltico envelhecido. Além disso, percentagens de 4 e 5,5% de aditivo orgânico, *Sasobit*, foram empregues nas misturas, incluindo 30 e 60% de RAP, respectivamente. Os resultados desta investigação mostraram que a utilização de uma quantidade elevada de *Sasobit*, juntamente com os fragmentos de borracha, podem melhorar eficazmente as propriedades mecânicas das misturas asfálticas. Esta mistura asfáltica pode ser considerada como um método prático contra o aquecimento global e armazenar materiais residuais como o RAP e pneus em fim de vida. Em comparação com a mistura de controlo, as misturas asfálticas com fragmentos de borracha, incluindo elevadas percentagens de RAP e aditivo *Sasobit*, apresentaram um melhor comportamento contra a suscetibilidade à humidade, fissuração por fadiga e deformação permanente em comparação com as misturas mais convencionais.

Lu e Saleh (2016), investigaram também o desempenho de uma MBT adicionando MBR em diferentes proporções, entre 0 e 70% da massa da mistura. Foram usados dois tipos de aditivos, *Evotherm* e *Sylvaroad*, nas percentagens de 0,5 e 2%, respetivamente. Misturas com o aditivo *Evotherm* com 25% de RAP mostraram melhor resistência à humidade face às misturas com o mesmo aditivo e incorporação de 50 e 70% de RAP.

Este estudo mostrou que a adição de RAP tem um efeito endurecedor nas misturas e melhorou significativamente a resistência ao corte ao mesmo tempo que reduziu a resistência à fadiga das mesmas. Isto indica que a resistência ao corte não é uma preocupação das MBT com a incorporação de RAP enquanto a resistência à fadiga ainda precisa de mais investigação e melhoria.

Foi ainda possível observar que, à medida que se adicionou mais RAP na mistura o conteúdo ótimo de ligante reduziu afetando os resultados da resistência ao corte, da resistência à fadiga e à humidade.

A partir dos resultados deste estudo, para misturas com *Evotherm*, a proporção máxima de RAP a adicionar à MBT deve ser mantida nos 25%. É assim possível concluir, que é necessário aumentar a percentagem de aditivo e ligante para se adicionar maiores proporções de RAP.

Para misturas com o aditivo *Sylvaroad*, a proporção de RAP pode ser adicionada até 70% se a resistência à humidade da mistura for satisfeita e o conteúdo de ligante aumentar para manter uma boa resistência à fadiga. A questão da resistência à humidade das misturas com o aditivo *Sylvaroad* foi inicialmente um problema, ficando resolvido com a adição de *Evotherm* na mistura. Isto permitiu a adição de 70% de MBR sem afetar as características de resistência à fadiga da mistura.

Em forma de conclusão, é necessária mais investigação para se conseguir uma maior adição de MBR sem reduzir o desempenho da MBT sendo recomendado uma investigação mais aprofundada sobre o efeito do conteúdo de ligante nas misturas MBT com incorporação de MBR.

3. CARATERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E FORMULAÇÃO DA MISTURA

3.1. Enquadramento

Nesta fase foram produzidas, em laboratório, misturas betuminosas sem aditivo e com aditivo. Com este trabalho pretende-se avaliar uma mistura betuminosa temperada com aditivo e verificar se esta apresenta melhores, ou iguais, características que a mistura betuminosa padrão.

Ambas as misturas são do tipo AC14 Surf (BB), sendo que a mistura de referência foi denominada por AC14 Surf (BB) e a mistura betuminosa temperada com o aditivo Rediset™ foi denominada por MBT-3RED.

3.2. Materiais constituintes

3.2.1. Seleção dos agregados e análise granulométrica

Os agregados graníticos, utilizados na produção das misturas betuminosas, possuem a seguinte designação granulométrica:

- Brita 10/14 – tamanho nominal entre 10,0 e 14,0 mm;
- Brita 4/12 – tamanho nominal entre 4,0 e 12,0 mm;
- Brita B 4/8 – tamanho nominal entre 4,0 e 8,0 mm;
- Brita A 4/8 – tamanho nominal entre 4,0 e 8,0 mm;
- Brita 0/4 (pó de pedra) – tamanho nominal inferior a 4,0 mm;

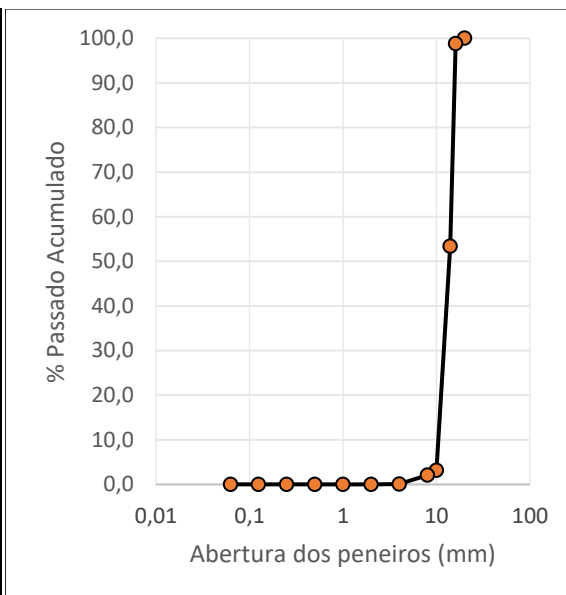
É importante referir que estes agregados encontram-se discriminados de acordo com a sua granulometria, ou seja, dos agregados com partículas de dimensões mais grossas (Brita 10/14) aos agregados com partículas de dimensões mais finas (Brita 0/4).

Foi utilizado um fíler calcário comercial, cuja granulometria é apresentada no Quadro 9. A análise granulométrica dos agregados britados seguiu o procedimento recomendado pela Norma NP EN 933-1, e pela Norma EN 933-10 para o fíler comercial.

No Quadro 4 apresenta-se a curva granulométrica da Brita 10/14.

Quadro 4 - Curva granulométrica da Brita 10/14.

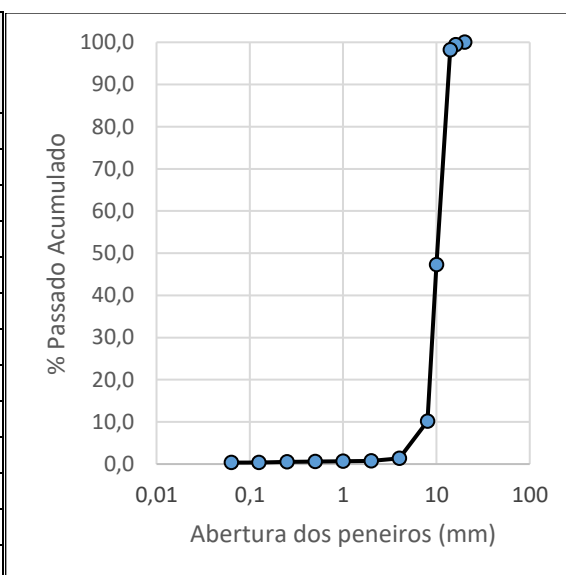
Abertura peneiro	Retido	Retido	Retido Acum.	Passado Acum.
(mm)	(g)	(%)		
20	0,00	0,0	0,0	100,0
16	15,02	1,2	1,2	98,8
14	581,03	45,4	46,6	53,4
10	642,46	50,2	96,8	3,2
8	13,80	1,1	97,9	2,1
4	26,20	2,0	99,9	0,1
2	0,50	0,0	100,0	0,0
1	0,13	0,0	100,0	0,0
0,5	0,13	0,0	100,0	0,0
0,25	0,00	0,0	100,0	0,0
0,125	0,00	0,0	100,0	0,0
0,063	0,00	0,0	100,0	0,0



No Quadro 5 apresenta-se a curva granulométrica da Brita 4/12.

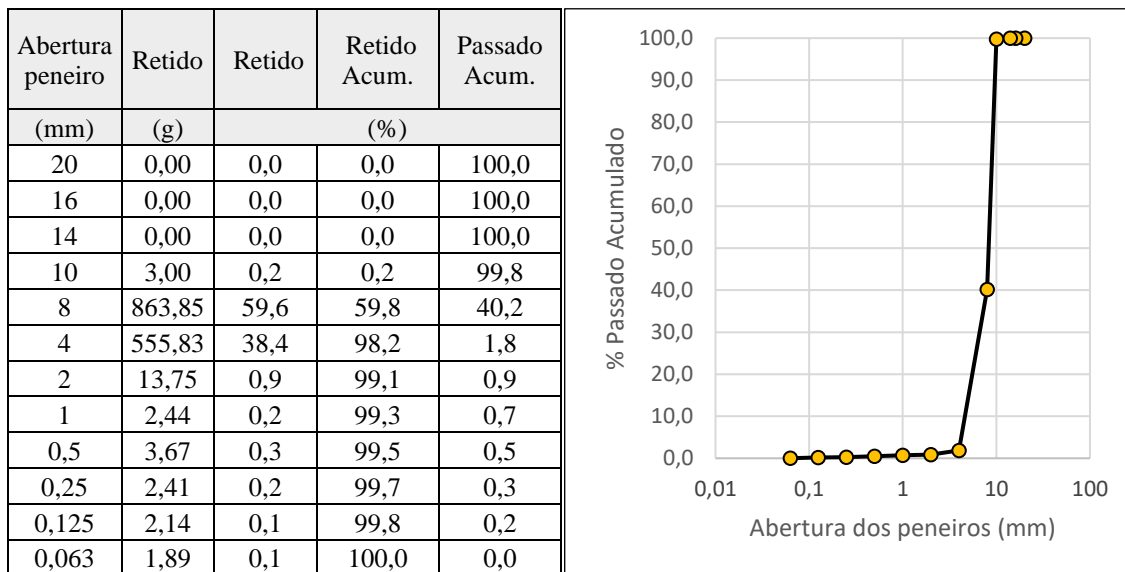
Quadro 5 - Curva granulométrica da Brita 4/12.

Abertura peneiro	Retido	Retido	Retido Acum.	Passado Acum.
(mm)	(g)	(%)		
20	0,00	0,0	0,0	100,0
16	7,42	0,6	0,6	99,4
14	14,38	1,2	1,8	98,2
10	612,30	51,1	52,9	47,1
8	447,31	37,3	90,2	9,8
4	104,90	8,8	99,0	1,0
2	6,66	0,6	99,5	0,5
1	1,45	0,1	99,7	0,3
0,5	0,46	0,0	99,7	0,3
0,25	1,41	0,1	99,8	0,2
0,125	1,28	0,1	99,9	0,1
0,063	0,41	0,0	100,0	0,0



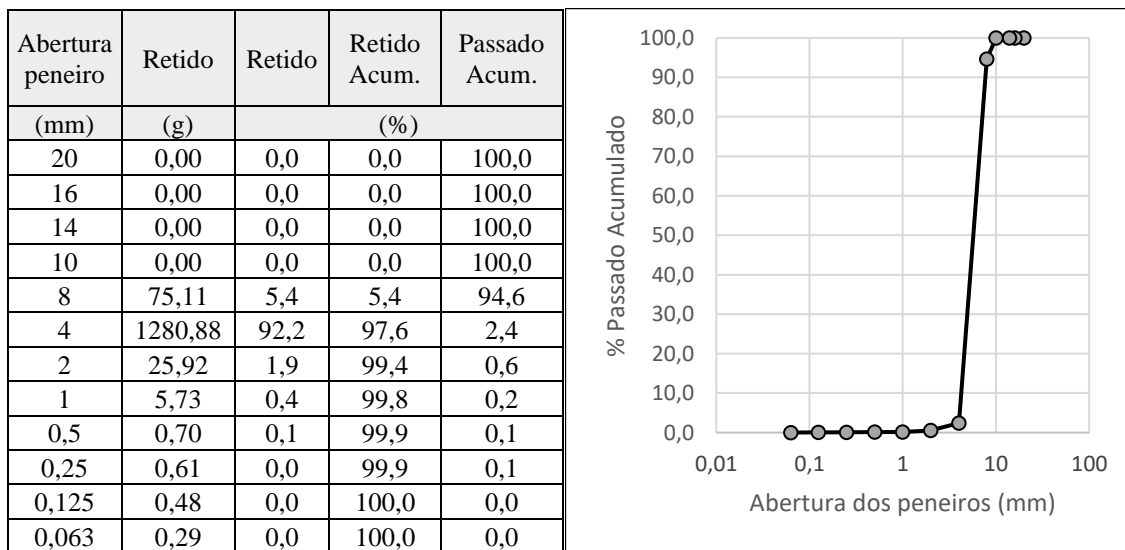
No Quadro 6 apresenta-se a curva granulométrica da Brita B 4/8.

Quadro 6 - Curva granulométrica da Brita B 4/8.



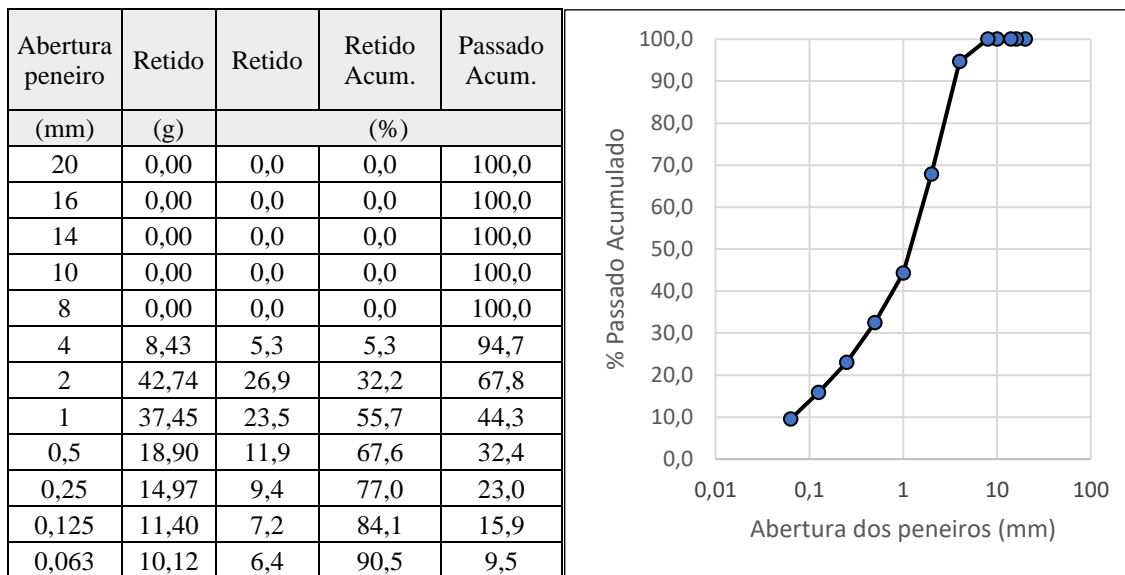
No Quadro 7 apresenta-se a curva granulométrica da Brita A 4/8.

Quadro 7 - Curva granulométrica da Brita A 4/8.



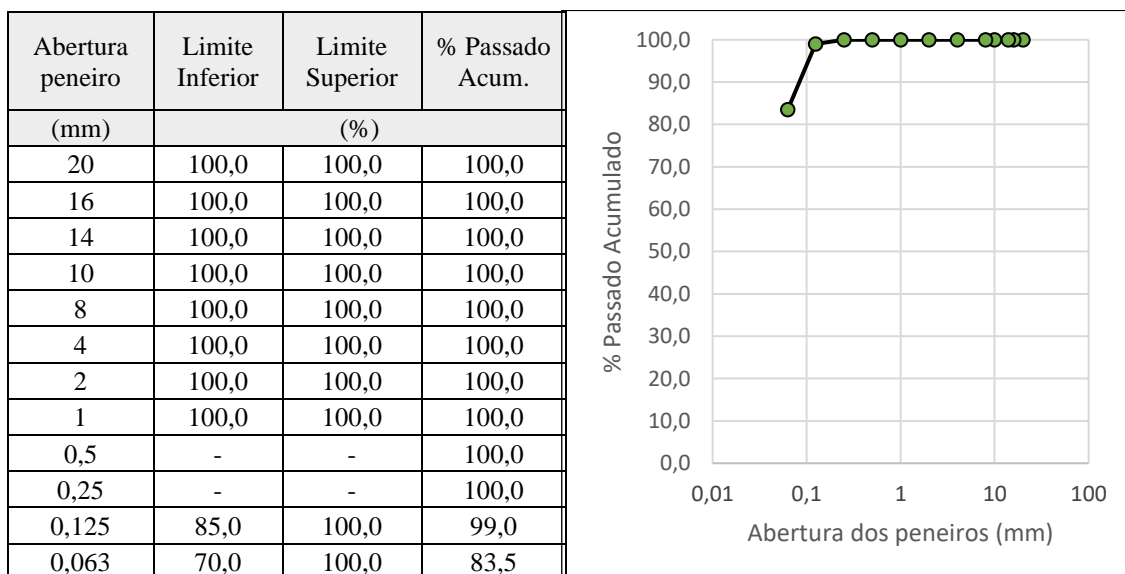
No Quadro 8 apresenta-se a curva granulométrica da Brita 0/4 (pó de pedra).

Quadro 8 - Curva granulométrica da Brita 0/4 (pó de pedra).



No Quadro 9 apresenta-se a curva granulométrica do fíler comercial.

Quadro 9 - Curva granulométrica do fíler comercial.



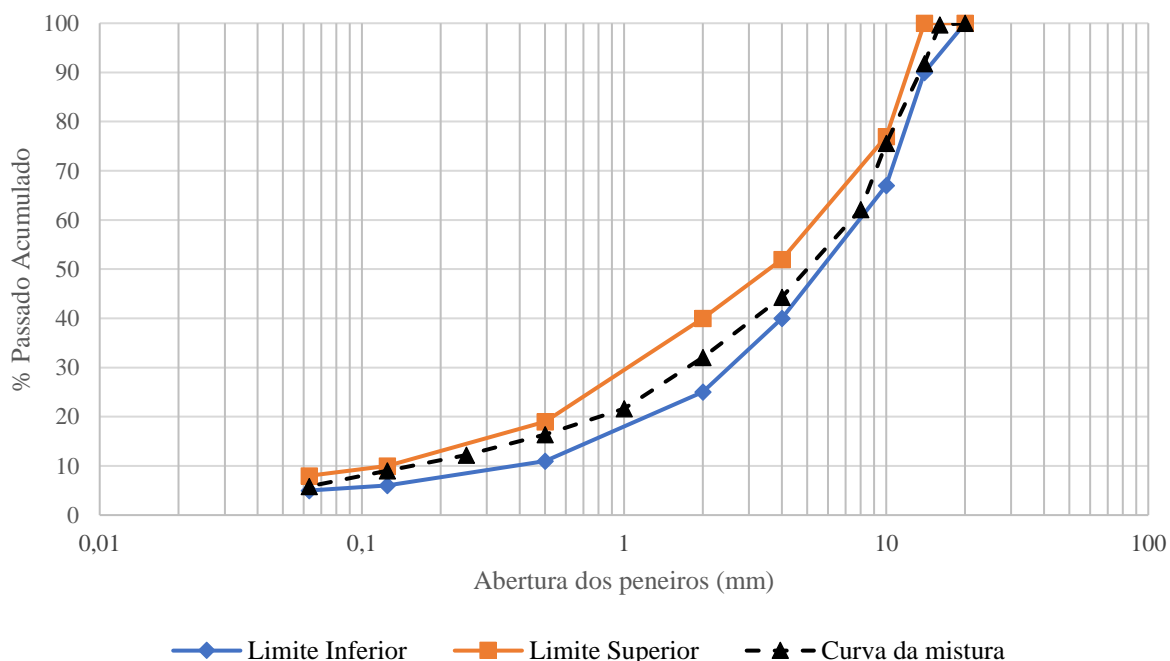
Assumindo as percentagens ponderais de 17% de Brita 10/14, 15% de Brita 4/12, 12% da Brita B 4/8, 10% da Brita A 4/8, 44% de pó de pedra e 2% de fíler comercial, apresenta-se, na Figura 11, a curva granulométrica da mistura. No Quadro 10 encontra-se a distribuição granulométrica das frações da mistura.

Quadro 10 - Distribuição granulométrica das frações da mistura e ajuste ao fuso AC14 Surf (BB).

Abertura Peneiros (mm)	Brita 10/14		Brita 4/12		Brita B 4/8		Brita A 4/8		Pó de pedra		Filler		Curva da mistura	Fuso adotado
	Granu.	17 %	Granu.	15%	Granu.	12%	Granu.	10 %	Granu.	44%	Granu.	2%		
20	100,0	17,0	100,0	15,0	100,0	12,0	100,0	10,0	100,0	44,0	100,0	2,0	100,0	(100-100)
16	98,8	16,8	99,4	14,9	100,0	12,0	100,0	10,0	100,0	44,0	100,0	2,0	99,7	-
14	53,4	9,1	98,2	14,7	100,0	12,0	100,0	10,0	100,0	44,0	100,0	2,0	91,8	(90-100)
10	3,2	0,5	47,1	7,1	99,8	12,0	100,0	10,0	100,0	44,0	100,0	2,0	75,6	(67-77)
8	2,1	0,4	9,8	1,5	40,2	4,8	94,6	9,5	100,0	44,0	100,0	2,0	62,1	-
4	0,1	0,0	1,0	0,2	1,8	0,2	2,4	0,2	94,7	41,7	100,0	2,0	44,3	(40-52)
2	0,0	0,0	0,5	0,1	0,9	0,1	0,6	0,1	67,8	29,8	100,0	2,0	32,1	(25-40)
1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,7	0,1	0,2	0,0	44,3	19,5	100,0	2,0	21,6	-
0,5	0,0	0,0	0,3	0,0	0,5	0,1	0,1	0,0	32,4	14,3	100,0	2,0	16,4	(11-19)
0,25	0,0	0,0	0,2	0,0	0,3	0,0	0,1	0,0	23,0	10,1	100,0	2,0	12,2	-
0,125	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	15,9	7,0	99,0	2,0	9,0	(6-10)
0,063	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	9,5	4,2	83,5	1,7	5,9	(5-8)

*Nota: estes valores são referentes à percentagem acumulada de material passado.

Figura 11 - Curva granulométrica da mistura do tipo AC14 Surf (BB).



Do Quadro 10 e da Figura 11, pode verificar-se que a mistura do tipo AC14 Surf (BB) cumpre os limites granulométricos propostos pelo CEEP (EP, 2014).

Em seguida analisou-se a granulometria efetiva da mistura, ou seja, para a mistura sem betume com 100% de agregados. É possível observar pela Figura 12 que a mistura cumpre, ainda que marginalmente devido à elevada quantidade de partículas de dimensões finas, os limites granulométricos impostos pelo CEEP.

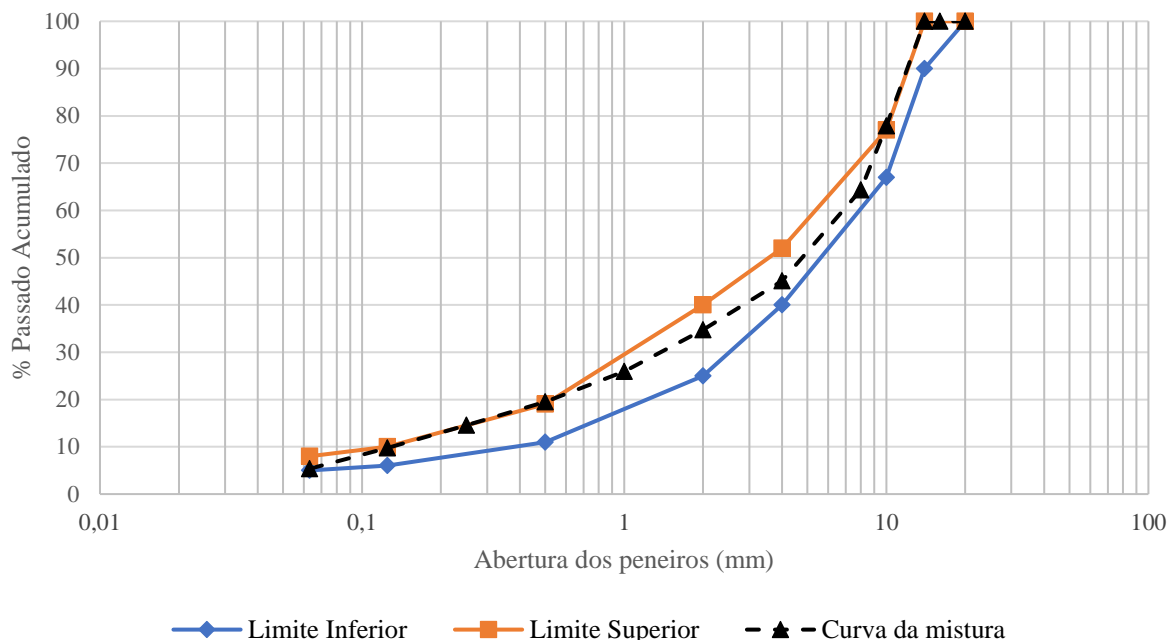


Figura 12 - Curva granulométrica efetiva da mistura do tipo AC14 Surf (BB).

É importante referir que esta fase é igual para ambas as misturas, pois terão a mesma constituição de agregados. A única diferença é que a mistura temperada, apesar de também ter o betume 35/50, este será aditivado com o aditivo Rediset™.

3.2.2. Massas Volúmicas e Absorção de água

A Norma EN 1097-6 estabelece os procedimentos e diretrizes para a determinação das características físicas dos agregados, especificamente a determinação da sua massa volúmica e absorção de água. Esta norma considera dois métodos consoante a dimensão dos agregados: o método do picnómetro e o método do cesto de rede metálica. Em ambos os métodos a massa volúmica das partículas resulta do rácio entre a sua massa e o volume. A massa é determinada através da pesagem do provete saturado com a superfície seca e de uma segunda pesagem do mesmo após secagem em estufa. O volume do provete é obtido a partir da massa de água deslocada, pela redução de massa no método do cesto ou pelas pesagens no método do picnómetro.

Para o cálculo das massas volúmicas das partículas, em g/cm^3 , recorre-se às seguintes expressões:

- Massa volúmica do material impermeável das partículas

$$\rho_a = \frac{M_4}{[M_4 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad \text{Equação 6}$$

- Massa volúmica das partículas secas

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad \text{Equação 7}$$

- Massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{[M_1 - (M_2 - M_3)]/\rho_w} \quad \text{Equação 8}$$

- Absorção de água em percentagem da massa seca

$$WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4} \quad \text{Equação 9}$$

Sendo,

M_1 – Massa do agregado saturado com superfície seca (g);

M_2 – Massa do cesto/picnómetro com o provete de agregado saturado (g);

M_3 – Massa do cesto imerso em água/massa do picnómetro cheio de água (g);

M_4 – Massa do provete no ar, seco em estufa (g);

ρ_w – Massa volúmica da água à temperatura de ensaio, determinada conforme o Anexo D da Norma NP EN 1097-6.

Apesar de a norma indicar o método do picnómetro para partículas de dimensão entre 4 mm e 31,5 mm, refere também que o método do cesto de rede metálica pode igualmente ser usado para esse efeito. Assim, para a Brita A 4/8 e para a Brita 0/4 (pó de pedra), usou-se o método do picnómetro por se tratar de agregados de partículas mais finas e para os restantes agregados usou-se o método do cesto de rede metálica.

No Quadro 11 encontram-se os resultados das massas volúmicas de cada agregado e respetivas absorções obtidas através do método do cesto de rede metálica.

Quadro 11 - Massas volúmicas e absorção dos agregados através do método do cesto de rede metálica.

Agregados	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	p _w	WA ₂₄	ρ _a	ρ _{rd}	ρ _{ssd}
	(g)				(g/cm ³)	(-)	(g/cm ³)		
Brita A 4/8	971,9	715,9	123,6	964,4	0,998	0,778	2,587	2,535	2,555
Brita B 4/8	1324,6	932,1		1314		0,807	2,594	2,541	2,561
Brita 4/12	1146,8	815,3		1126,8		1,775	2,585	2,471	2,515
Brita 10/14	1859,2	1253,7		1837		1,208	2,593	2,515	2,545

No Quadro 12 encontram-se os resultados das massas volúmicas dos agregados mais finos e respetivas absorções obtidas através do método do picnómetro.

Quadro 12 - Massas volúmicas e absorção dos agregados através do método do picnómetro.

Agregados	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	p _w	WA ₂₄	ρ _a	ρ _{rd}	ρ _{ssd}
	(g)				(g/cm ³)	(-)	(g/cm ³)		
Brita 0/4 (pó de pedra)	225,58	754,58	617,53	222,37	0,998	1,444	2,601	2,507	2,543
Brita A - 4/8	332,28	1096,5	893,84	330,15		0,645	2,584	2,542	2,558

3.2.3. Ligante

O ligante asfáltico utilizado para a formulação das misturas betuminosas com e sem aditivo foi o betume convencional de penetração nominal 35/50. Esta escolha justifica-se por ser um dos betumes mais utilizados nas obras de pavimentação em Portugal.

Quadro 13 - Especificações do betume de penetração nominal 35/50.

Caraterísticas	Unidades	Normas	Min.	Máx.
Penetração (25°C)	0,1 mm	EN 1426 (CEN, 2007b)	35	50
Índice de penetração	(-)	NP EN 12591 (IPQ, 2011)	-1,5	0,7
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427 (CEN, 2007d)	50	58
Ponto de fragilidade Fraass		EN 12593 (CEN, 2015)	-	-5
Ponto de inflamação		EN ISO 2592(CEN, 2001)	240	-
Solubilidade	(%)	NP EN 12592 (IPQ, 2016b)	99	-
Resistência ao endurecimento a 163°C - NP EN 12607-1 (IPQ, 2016a)				
Varição de massa (valor absoluto)	(%)	NP EN 12607-1 (IPQ, 2016a)	-	0,5
Penetração retida		EN 1426 (CEN, 2007b)	53	-
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427 (CEN, 2007d)	-	11

Em anteriores trabalhos (Silva, 2016) procedeu-se à determinação, para o mesmo betume facilitado neste trabalho, dos valores da penetração a 25°C e da temperatura de

amolecimento. Como se pode verificar no Quadro 14, ambos os valores se enquadram nos limites estabelecidos pela Norma EN 12591.

Quadro 14 - Penetração a 25 °C e temperatura de amolecimento do betume 35/50.

Propriedades	Norma	Betume 35/50
Penetração a 25°C (0,1 mm)	EN 1426 (CEN, 2007b)	38
Temperatura de amolecimento (°C)	EN 1427 (CEN, 2007d)	57,3

3.2.4. Aditivo

O betume de penetração nominal 35/50 foi modificado com o aditivo Rediset™ que, embora não altere significativamente as características do ligante (Almeida-Costa, 2016), importa referir que tais alterações podem diferir para diferentes tipos de betume, ou mesmo para betumes de diferentes origens.

Este trabalho, por limitação de tempo de execução, centrou-se na avaliação da resposta da mistura betuminosa à introdução do aditivo.

3.3. Formulação da mistura betuminosa – Formulação Marshall

Neste subcapítulo determinam-se, para as diversas percentagens de betume e através da realização de provetes *Marshall*, as principais propriedades das misturas AC14 Surf (BB) e MBT-3RED, tais como: a estabilidade, a deformação, a baridade, a porosidade e o VMA (volume de vazios no esqueleto do agregado). Estas propriedades devem ficar dentro dos limites estabelecidos no CEEP para este tipo de mistura (Quadro 15).

Quadro 15 - Limites estabelecidos no CEEP para a mistura do tipo AC14 Surf (BB) (EP, 2014).

Limites	Estabilidade	Deformação	VMA	Porosidade	Quociente Marshall
	(kN)	(mm)	(%)	(%)	(kN/mm)
Mínimo	7,5	2	14	3	3
Máximo	15	4	-	5	-

Em suma, estes parâmetros das misturas vão ser determinados para cada conjunto de provetes, utilizando o Procedimento A (ρ_{bdry}) da Norma EN 12967-6 (*Bituminous*

mixtures – Test Methods for hot mix asphalt – Determination of bulk density of bituminous specimens) para se obter a porosidade e o volume de vazios na mistura de agregados.

3.3.1. Considerações iniciais

Após a seleção dos agregados e do ligante a utilizar, e estabelecida a curva granulométrica da mistura, procedeu-se à sua formulação em laboratório com vista à determinação do teor de betume que assegura as suas melhores características. Neste caso, escolheu-se o método de *Marshall* com base na Norma EN 12697-34 (*Bituminous mixtures – Test Methods for hot mix asphalt – Marshall Test*). Esta norma define um método de ensaio para a determinação da estabilidade, deformação e quociente *Marshall* de misturas betuminosas, produzidas em conformidade com a EN 12697-35 (*Bituminous mixtures – Test Methods for hot mix asphalt – Laboratory mixing*) e preparadas com o compactador de impacto segundo o método de ensaio definido na Norma EN 12697-30 (*Bituminous mixtures – Test Methods for hot mix asphalt – Specimen preparation, impact compactor*).

3.3.2. Fabrico de provetes e determinação da baridade

Foram executadas 5 conjuntos de 3 provetes para cada percentagem de betume. Estas percentagens fizeram-se variar em 0,5% por conjunto, sendo as percentagens de betume escolhidas de 4,5, 5, 5,5, 6 e 6,5%. No Quadro 16 pode ser consultada a composição dos provetes.

Quadro 16 - Composição dos provetes *Marshall*.

Betume	(%)	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
	(g)		54,0	60,0	66,0	72,0
Agregados	(%)	95,5	95,0	94,5	94,0	93,5
Brita 10/14	(%)	17				
	(g)	194,8	193,8	192,8	191,8	190,7
Brita 4/12	(%)	15				
	(g)	171,9	171,0	170,1	169,2	168,3
Brita B 4/8	(%)	12				
	(g)	137,5	136,8	136,1	135,4	134,6
Brita A 4/8	(%)	10				
	(g)	114,6	114,0	113,4	112,8	112,2
Brita 0/4	(%)	44				
	(g)	504,2	501,6	499,0	496,3	493,7
Filler	(%)	2				
	(g)	22,92	22,8	22,7	22,6	22,4
Total	(g)	1200	1200	1200	1200	1200

Para cada provete utilizou-se uma massa de cerca de 1200g, de modo a produzir provetes cilíndricos com 102 mm de diâmetro e 65 ± 3 mm de altura.

Foi realizada a pesagem e a adição de todos os constituintes da mistura (agregados e ligante), tendo estes sido pré-aquecidos a uma temperatura estabelecida para o tipo de mistura a estudar, que resultou na produção de uma amassadura através do uso de um misturador automático. Posteriormente, colocou-se o material resultante dessa mistura em moldes cilíndricos com 102 mm de diâmetro, procedendo-se à sua compactação com recurso a um compactador de impacto, aplicando 50 pancadas por face, conforme a Norma EN 12697-30.

De forma sucinta e sequencial, os procedimentos da formulação da mistura foram os seguintes:

1. Pesagem e adição de todos os constituintes da mistura.



Figura 13 - Pesagem dos agregados e do betume pré aquecidos.

2. Fabrico da mistura no misturador automático.



Figura 14 - Fabrico da mistura.

3. Colocação da mistura em moldes cilíndricos de aproximadamente 100 mm de diâmetro.



Figura 15 - Colocação da mistura em moldes.

4. Compactação dos moldes com recurso a um compactador de impacto.



Figura 16 - Compactador de impacto.

5. Após arrefecimento da mistura procedeu-se à sua desmoldagem.



Figura 17 - Desmoldagem da mistura.

Após a compactação, desmoldaram-se e identificaram-se os provetes tendo sido feito a sua pesagem a seco e imersos, conforme exemplificado na Figura 18.



Figura 18 - Preparação e pesagem dos provetes Marshall.

Em seguida, calculou-se a baridade da mistura, ρ_{bdry} , segundo o Procedimento A (densidade aparente – seco) da Norma EN 12697-6, através da Equação 10.

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_w \quad \text{Equação 10}$$

Em que,

ρ_{bdry} – densidade aparente a seco (g/cm^3);

m_1 – massa do provete seco (g);

m_2 – massa do provete imerso em água (g);

ρ_w – densidade da água à temperatura do ensaio (g/cm^3).

Os resultados encontram-se calculados no Quadro 17 e no Quadro 18 para a mistura AC14 Surf (BB) e MBT-3RED, respetivamente.

Quadro 17 - Cálculo da baridade dos provetes *Marshall* da mistura AC14 Surf (BB).

Betume (%)	Ref.	Densidade da água, ρ_w	Massa seca, m_1	Massa imersa, m_2	Baridade, ρ_{bdry}	Média
		(g/cm ³)	(g)		(g/cm ³)	
4,5	1	0,998	1202,2	687,3	2,330	2,331
	2		1201,8	687,3	2,331	
	3		1202,3	687,7	2,332	
5	1		1203,3	692,3	2,353	2,349
	2		1202,6	689,8	2,341	
	3		1202,5	692,4	2,353	
5,5	1		1203,6	695,0	2,362	2,360
	2		1203,6	695,5	2,364	
	3		1198,4	690,2	2,354	
6	1		1200,0	696,1	2,377	2,373
	2		1200,4	694,8	2,370	
	3		1201,7	695,9	2,371	
6,5	1		1200,2	691,7	2,356	2,362
	2		1201,9	694,9	2,366	
	3		1201,5	694,3	2,364	

Quadro 18 - Cálculo da baridade dos provetes *Marshall* da mistura MBT-3RED.

Betume (%)	Ref.	Densidade da água, ρ_w	Massa seca, m_1	Massa imersa, m_2	Baridade, ρ_{bdry}	Média
		(g/cm ³)	(g)		(g/cm ³)	
4,5	1	0,998	1197,7	684,2	2,328	2,326
	2		1200,1	688,2	2,340	
	3		1197,4	680,2	2,311	
5	1		1201,4	688,7	2,339	2,335
	2		1201,2	689,4	2,343	
	3		1201,7	685,4	2,323	
5,5	1		1200,8	689,2	2,343	2,343
	2		1200,4	688,5	2,341	
	3		1199,6	689,5	2,347	
6	1		1197,9	689,5	2,352	2,359
	2		1197,1	692,3	2,367	
	3		1198,5	691,4	2,359	
6,5	1		1198,8	691,8	2,360	2,358
	2		1199,5	691,9	2,359	
	3		1199,1	691,1	2,356	

Ainda na fase de medição das características geométricas dos provetes, com auxílio de um paquímetro, mediu-se as suas dimensões para ambas as misturas conforme é possível observar pelo Quadro 19 e Quadro 20.

Quadro 19 - Características geométricas dos provetes da mistura AC14 Surf (BB).

Betume (%)	Ref.	Diâmetro	Altura média				Diferença
			Provete		Grupo		
		(mm)	(mm)				
4,5	1	102	65,89	66,15	65,62	65,89	1,20
	2		66,99	66,73	67,00	66,91	
	3		65,52	65,33	66,26	65,70	
5	1		63,70	64,31	64,05	64,02	0,94
	2		64,42	64,80	64,86	64,69	
	3		64,58	65,08	65,23	64,96	
5,5	1		63,81	63,93	63,60	63,78	0,32
	2		63,59	64,88	63,82	64,10	
	3		63,70	63,85	64,18	63,91	
6	1		62,75	62,87	62,73	62,78	0,65
	2		63,37	63,28	63,38	63,34	
	3		63,40	63,24	63,67	63,44	
6,5	1	62,73	62,50	62,21	62,48	0,33	
	2	62,60	62,30	62,31	62,40		
	3	62,97	62,38	62,84	62,73		

Quadro 20 - Características geométricas dos provetes da mistura MBT-3RED.

Betume (%)	Ref.	Diâmetro	Altura média				Diferença
			Provete		Grupo		
		(mm)	(mm)				
4,5	1	102	66,52	66,69	67,22	66,81	0,66
	2		66,84	67,05	67,42	67,10	
	3		67,66	67,63	67,11	67,47	
5	1		66,01	66,23	66,51	66,25	0,23
	2		65,95	66,13	66,33	66,14	
	3		66,65	66,03	66,42	66,37	
5,5	1		65,44	66,18	66,04	65,89	0,50
	2		65,17	65,68	66,05	65,63	
	3		65,22	65,14	65,81	65,39	
6	1		64,20	64,66	64,63	64,50	0,73
	2		63,58	63,75	63,96	63,76	
	3		64,33	64,07	64,14	64,18	
6,5	1	63,25	63,00	62,93	63,06	0,32	
	2	63,19	63,89	63,77	63,62		
	3	63,45	63,74	62,96	63,38		

3.3.3. Ensaio de compressão Marshall

Os provetes foram ensaiados à compressão na prensa de *Marshall*, tendo sido previamente submetidos a um banho-maria mantido a uma temperatura de (60 ± 1) °C conforme o estabelecido na Norma EN 12697-34.

O ensaio de compressão *Marshall*, representado na Figura 19, é um ensaio destrutivo de compressão que implica a colocação do provete no centro do estabilómetro *Marshall* com a capacidade de aplicar carga ao provete de ensaio a uma velocidade constante de deformação de (50 ± 2) mm/min. É necessário manter a aplicação desta carga até ser obtida a leitura máxima no dispositivo de medição de cargas, sendo a condição de paragem a rotura do provete de forma a obter os valores de força de rotura e deformação.

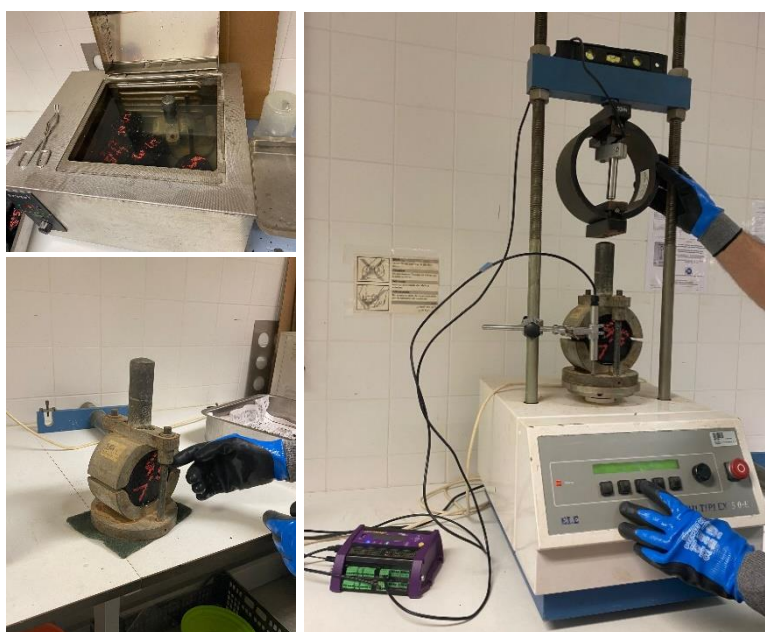


Figura 19 - Ensaio de compressão *Marshall*.

De referir que os resultados obtidos, valores de estabilidade (força de rotura) e deformação, apresentam-se registados no subcapítulo 3.3.4 a propósito da determinação da percentagem ótima de betume.

3.3.4. Caraterização volumétrica e percentagem ótima de betume

De maneira a determinar as características volumétricas pretendidas, calculou-se também, para além da baridade, a baridade máxima teórica, a porosidade, o VMA (volume de vazios da mistura de agregados) e o VFB (o volume de vazios preenchidos com betume). Determinou-se a baridade máxima teórica, ρ_{mv} , utilizando o procedimento A da Norma EN 12697-5 (*Bituminous mixtures – Test Methods for hot mix asphalt – Determination of the maximum density*). Este procedimento implica a desagregação completa da amostra e a sua colocação no picnómetro de vácuo, imerso em água.



Figura 20 - Determinação da baridade máxima teórica com o picnómetro de vácuo.

A aplicação de uma pressão negativa no interior do recipiente, através de uma bomba de ar em funcionamento durante 24h, juntamente com a aplicação de vibrações ao picnómetro, é possível remover o ar presente na água e na amostra de modo a realizar as pesagens necessárias para o cálculo, por intermédio da Equação 11.

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times V_p - (m_3 - m_2)/\rho_w} \quad \text{Equação 11}$$

Em que,

- ρ_{mv} – baridade máxima teórica da mistura betuminosa (kg/m^3);
- m_1 – massa do picnómetro sem a tampa (g);
- m_2 – massa do picnómetro sem a tampa e com a amostra (g);
- m_3 – massa do picnómetro sem a tampa, com a amostra e a água (g);
- V_p – volume do picnómetro, com água até à marca de referência (m^3);
- ρ_w – densidade da água à temperatura do ensaio (kg/m^3);

Pesou-se também o picnómetro sem tampa com água até à marca de referência, m_4 , de maneira a ser possível calcular o volume do recipiente. Esta medição foi feita para as diferentes amostras utilizando nos cálculos o valor da sua média.

No Quadro 21 e no Quadro 242 encontram-se calculados, para as diferentes percentagens de betume, os valores da máxima baridade teórica para cada uma das misturas.

Quadro 21 - Determinação da máxima baridade teórica da mistura AC14 Surf (BB).

Betume (%)	m ₁	m ₄		m ₂	m ₃	Temp. da água (°C)	ρ _w (kg/m ³)	V _P (m ³)	ρ _{mv}	
		(g)							(kg/m ³)	(g/cm ³)
4,5	777,0	5874	5864,6	1967	6573	21	998,1	0,005	2466,2	2,466
5		5870		1973	6576				2463,3	2,463
5,5		5867		1973	6574				2453,2	2,453
6		5853		1973	6573				2448,2	2,448
6,5		5859		1962	6566				2445,7	2,446

Quadro 22 - Determinação da máxima baridade teórica da mistura MBT-3RED.

Betume (%)	m ₁	m ₄		m ₂	m ₃	Temp. da água (°C)	ρ _w (kg/m ³)	V _P (m ³)	ρ _{mv}	
		(g)							(kg/m ³)	(g/cm ³)
4,5	777,0	5894	5889,6	1964	6597	21	998,1	0,005	2470,3	2,470
5		5891		1973	6598				2448,2	2,448
5,5		5890		1973	6597				2443,2	2,443
6		5890		1971	6596				2444,1	2,444
6,5		5883		1972	6594				2431,2	2,431

A baridade máxima teórica, juntamente com a baridade, permite calcular a porosidade e outras propriedades volumétricas da mistura. É assim possível, de acordo com as Equações 12, 13 e 14, calcular os valores para a porosidade (V_m), VMA e para o VFB.

$$V_m = \frac{p_m - p_b}{p_m} \times 100 \quad \text{Equação 12}$$

Em que,

V_m – porosidade da mistura (%);

ρ_m – baridade máxima teórica da mistura (kg/m³);

ρ_b – baridade do provete (kg/m³);

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} \quad \text{Equação 13}$$

$$VFB = \frac{(B \times \rho_B) / \rho_B}{VMA} \times 100 \quad \text{Equação 14}$$

Em que,

VMA – percentagem de vazios na mistura de agregados (%);

B – percentagem de betume do provete (em 100% da mistura) (g);

ρ_B – densidade do betume (kg/m^3);

ρ_b – baridade do provete (kg/m^3);

V_m – porosidade da mistura (%);

VFB – percentagem de vazios na mistura de agregados com betume (%).

No Quadro 23 e no Quadro 24 encontram-se calculados, para cada um dos grupos de provetes com diferentes percentagens de betume, os valores médios das propriedades *Marshall* para cada uma das misturas.

Quadro 23 - Resumo dos valores calculados para a formulação *Marshall* da mistura AC14 Surf (BB).

Betume (%)	*Baridade	Baridade Máxima Teórica	Porosidade	VMA	VFB	Estabilidade	Deformação	Quociente Marshall
	(g/cm ³)		(%)			(kN)	(mm)	(kN/mm)
4,5	2,331	2,466	5,5	15,7	65,0	14,8	3,4	4,4
5	2,349	2,463	4,6	16,0	71,0	17,2	3,9	4,4
5,5	2,360	2,453	3,8	16,4	76,8	16,1	4,0	4,0
6	2,373	2,448	3,1	16,9	81,8	14,3	4,8	3,0
6,5	2,362	2,446	3,4	18,3	81,3	12,9	5,3	2,4

*valor médio da baridade dos três provetes de cada conjunto calculado no Quadro 17.

Quadro 24 - Resumo dos valores calculados para a formulação *Marshall* da mistura MBT-3RED.

Betume (%)	*Baridade	Baridade Máxima Teórica	Porosidade	VMA	VFB	Estabilidade	Deformação	Quociente Marshall
	(g/cm ³)		(%)			(kN)	(mm)	(kN/mm)
4,5	2,326	2,470	5,8	16,0	63,5	12,2	4,0	3,0
5	2,335	2,448	4,6	16,0	71,0	13,2	4,3	3,0
5,5	2,343	2,443	4,1	16,6	75,4	13,0	4,7	2,7
6	2,359	2,444	3,5	17,2	79,8	10,9	5,1	2,2
6,5	2,358	2,431	3,0	17,9	83,2	12,1	6,4	1,9

*valor médio da baridade dos três provetes de cada conjunto calculado no Quadro 18.

Os valores de estabilidade (força de rotura) e deformação, resultantes do ensaio de compressão de *Marshall*, podem ser consultados no Quadro 25 e no Quadro 26 para a mistura AC14 Surf (BB) e MBT-3RED, respetivamente:

Quadro 25 - Resultados do ensaio de compressão de *Marshall* da mistura AC14 Surf (BB).

Betume (%)	Ref.	Estabilidade corrigida	Média	Deformação	Média
	(-)				
4,5	1	15,88	14,8	3,7	3,4
	2	13,52		3,1	
	3	15,05		3,4	
5	1	17,38	17,2	3,8	3,9
	2	16,34		3,8	
	3	17,98		4,1	
5,5	1	15,94	16,1	4,8	4,0
	2	16,29		4,2	
	3	16,00		3,1	
6	1	15,07	14,3	5,0	4,8
	2	14,28		4,8	
	3	13,55		4,5	
6,5	1	12,53	12,9	5,0	5,3
	2	11,82		5,6	
	3	14,43		5,3	

Quadro 26 - Resultados do ensaio de compressão de *Marshall* da mistura MBT-3RED.

Betume (%)	Ref.	Estabilidade corrigida	Média	Deformação	Média
	(-)				
4,5	1	12,65	12,2	4,1	4,0
	2	11,84		3,9	
	3	12,07		4,0	
5	1	11,60	13,2	4,2	4,3
	2	15,44		4,7	
	3	12,55		4,1	
5,5	1	12,03	13,0	4,9	4,7
	2	13,21		4,8	
	3	13,65		4,5	
6	1	10,67	10,9	5,0	5,1
	2	11,18		4,7	
	3	10,87		5,5	
6,5	1	11,21	12,1	5,5	6,4
	2	11,62		6,0	
	3	13,57		7,8	

A melhor forma de analisar a variação das várias grandezas da mistura AC14 Surf (BB), em função da percentagem de betume, e de determinar a sua percentagem ótima é a representação gráfica das características consideradas no método de *Marshall*, tal como ilustra a Figura 21.

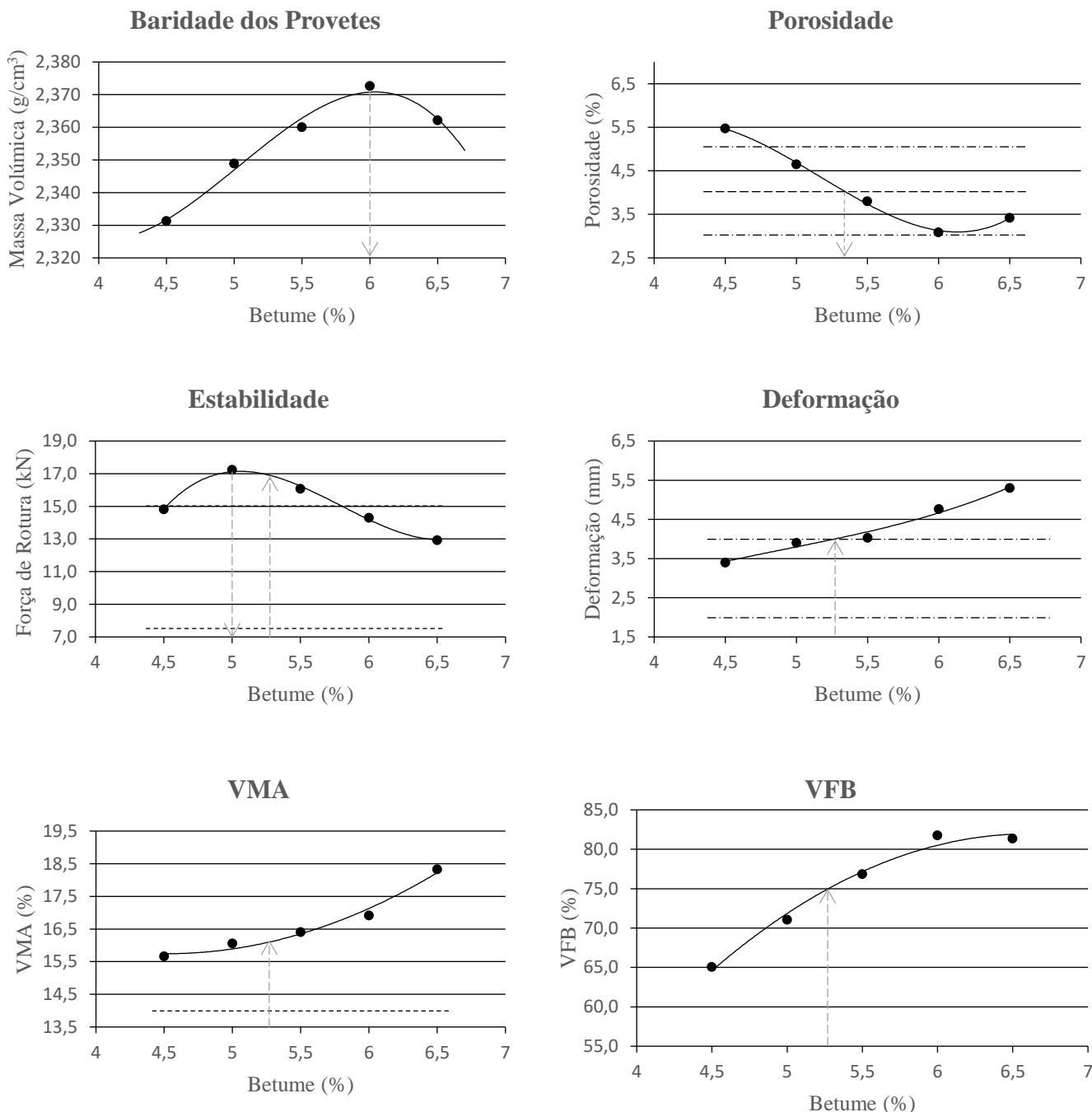


Figura 21 - Representação gráfica das caraterísticas da mistura betuminosa AC14 Surf (BB) em função da percentagem de betume dos provetes.

A percentagem ótima de betume é calculada conforme a Equação 15 correspondendo à média que garante a máxima estabilidade, a máxima baridade e o valor médio dos limites impostos para a porosidade.

$$P_b = \frac{P_b(S_{m\acute{a}x}) + P_b(\rho_{mv}) + P_b(\text{Média dos limites de porosidade})}{3} \quad \text{Equação 15}$$

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que a percentagem ótima de betume é de 5,3% para a mistura AC14 Surf (BB). Este valor é válido se o volume de vazios do esqueleto de agregado e a deformação correspondentes a esse ponto estiverem dentro dos limites estabelecidos pelo CEEP (Quadro 15). Através dos gráficos da Figura 21 que representam o VMA e a deformação dos provetes, respetivamente, constata-se que o VMA correspondente à percentagem de 5,3% é de 16,1%, superior ao limite de 14% e que a deformação nesse mesmo ponto é de 4,0 mm, valores que se encontram dentro dos limites estipulados.

Quadro 27 - Resumo das características da mistura AC14 Surf (BB) para a percentagem ótima de betume.

Mistura	Betume	Estabilidade	Deformação	Porosidade	VMA	VFB
	(%)	(kN)	(mm)	(%)		
AC14 Surf (BB)	5,3	16,9	4,0	4,1	16,1	75,0

Os dados referentes ao cálculo das características volumétricas, para a mistura MBT-3RED, podem ser consultados no Quadro 18, no subcapítulo 3.3.2, e no Quadro 24.

Na Figura 22 está presente a representação gráfica das características consideradas no método de *Marshall*, para a mistura temperada.

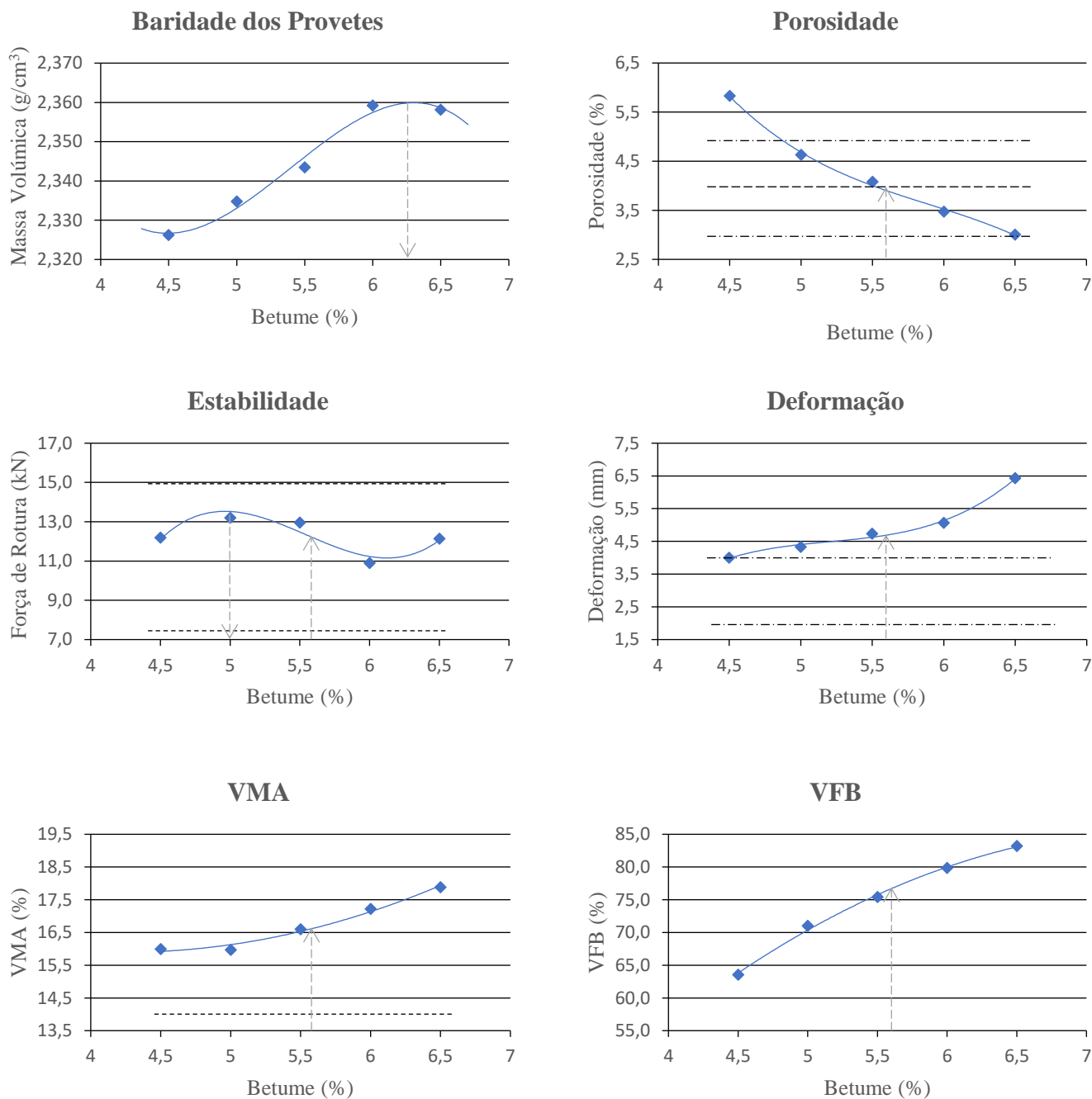


Figura 22 - Representação gráfica das caraterísticas da mistura temperada MBT-3RED em função da percentagem de betume dos provetes.

De acordo com os resultados obtidos e a Equação 15, conclui-se que a percentagem ótima de betume para a mistura temperada é de 5,6%. Através dos gráficos da Figura 22 que representam o VMA e a deformação dos provetes, respetivamente, constata-se que o VMA correspondente à percentagem de 5,6% é de 16,6%, superior ao limite de 14% e que a deformação nesse mesmo ponto é de 4,6 mm, valor ligeiramente superior ao limite estipulado no CEEP (Quadro 15).

Está representado no Quadro 28 o resumo das características da mistura temperada MBT-3RED para a percentagem ótima de betume.

Quadro 28 - Resumo das características da mistura MBT-3RED para a percentagem ótima de betume.

Mistura	Betume	Estabilidade	Deformação	Porosidade	VMA	VFB
	(%)	(kN)	(mm)	(%)		
MBT-3RED	5,6	12,0	4,6	5,5	16,6	77,0

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Considerações iniciais

Neste subcapítulo, após a realização dos ensaios de caracterização para ambas as misturas, analisam-se os resultados apresentados ao longo do Capítulo 3. Procura-se, desta maneira, compreender como se relacionam as propriedades calculadas e identificar padrões gerais.

Compararam-se neste estudo uma mistura betuminosa, do tipo AC14 Surf (BB), produzida de forma convencional a 170 °C e compactada a 160 °C, com a mistura aditivada MBT-3RED, produzida a 140 °C e compactada a 130 °C. Esta redução das temperaturas de fabrico e compactação foi conseguida através da introdução de 3% de Rediset™ ao betume 35/50. O objetivo do estudo consiste em demonstrar que este tipo de mistura, ainda que produzida a temperaturas bastante inferiores às habituais, mantém as características de desempenho semelhantes às da mistura padrão.

De forma a facilitar a apresentação e discussão dos resultados, estes apresentam-se compilados no Quadro 29. Como a percentagem ótima de betume foi de 5,3% e 5,6% para a mistura do tipo AC14 Surf (BB) e MBT-3RED, respetivamente, adotou-se um valor médio para a percentagem ótima de betume de 5,5%.

Quadro 29 - Síntese dos resultados obtidos para a mistura do tipo AC14 Surf (BB) e MBT-3RED.

Comparação das características de desempenho das misturas			
Tipo de Mistura		MBQ	MBT
Mistura	(-)	AC 14 Surf (BB)	MBT-3RED
Betume		35/50	35/50 com 3% de Rediset™
Temperatura de fabrico e compactação	(°C)	170/160	140/130
Percentagem ótima de betume	(%)	5,5	
Máxima baridade teórica	(g/cm ³)	2,453	2,443
Estabilidade, S	(kN)	16,1	13,0
Deformação, f	(mm)	4,0	4,7
Porosidade, V _m		3,8	4,1
VMA	(%)	16,4	16,6
VFB		76,8	75,4
Quociente <i>Marshall</i>	(kN/mm)	4,0	2,7

4.2. Características Marshall

Irá proceder-se a uma análise mais detalhada dos resultados das características volumétricas da mistura e do ensaio de compressão de *Marshall*. Na Figura 23 está presente a representação gráfica das características consideradas no método de *Marshall*, para ambas as misturas.

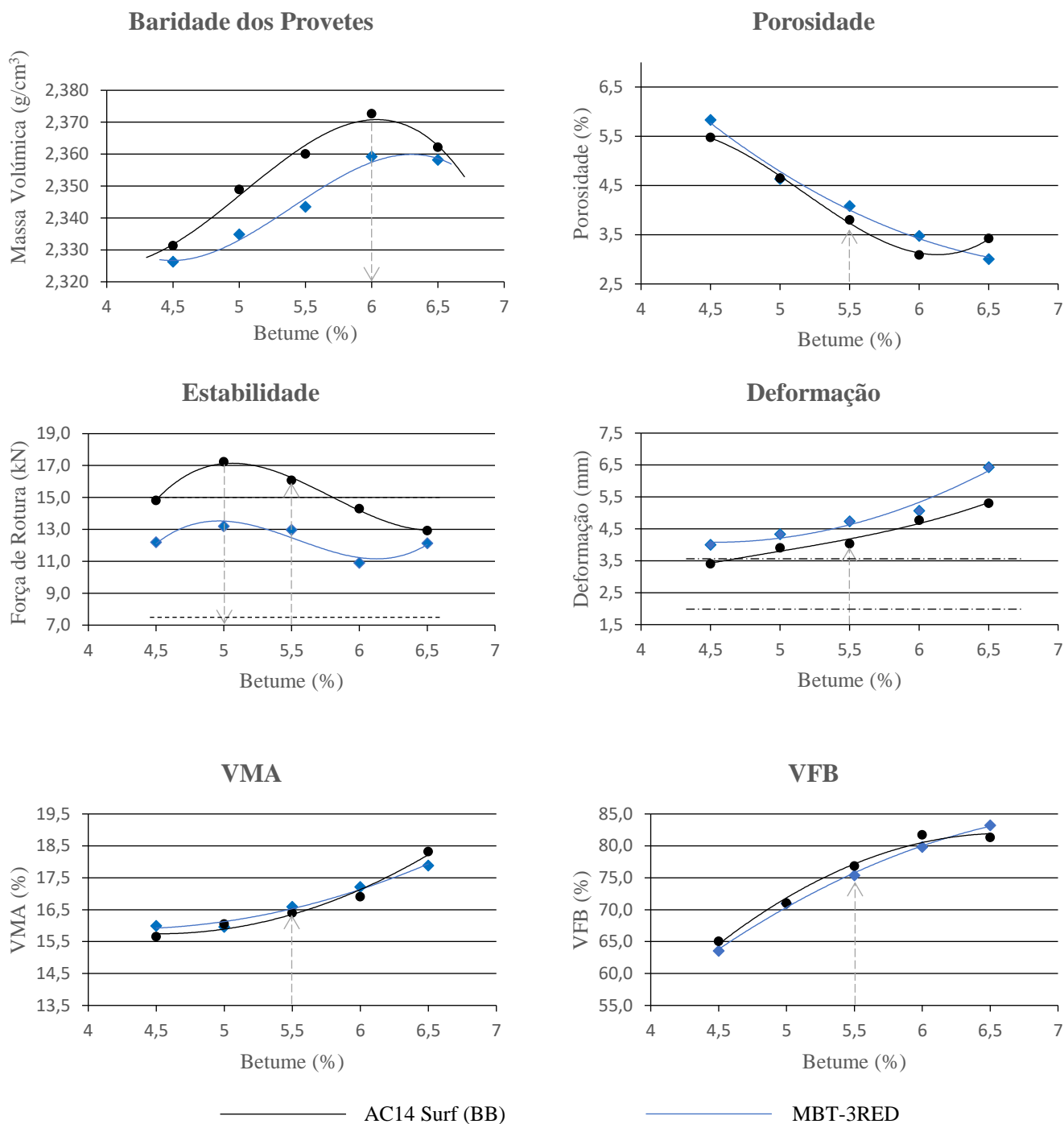


Figura 23 - Representação gráfica das caraterísticas de ambas as misturas em função da percentagem de betume dos provetes.

Da observação dos valores do gráfico, relativos à estabilidade e à deformação de ambas as misturas (Figura 23), conclui-se que a maior estabilidade e a menor deformação ocorrem para uma percentagem de betume de 5%. Este valor é coerente com o estudo da formulação pois confirma o facto da menor deformação ser atingida na máxima estabilidade. Para a deformação verifica-se a ocorrência de valores mais elevados para a mistura temperada MBT-3RED, variando entre 4 e 6,4 mm, enquanto na mistura convencional AC14 Surf (BB), os valores variam entre 3,4 e 5,3 mm. Confirma-se assim, no geral, valores excessivos para a deformação em ambas as misturas, excedendo os limites estipulados pelo CEEP de 2 a 4 mm para misturas do tipo AC14 Surf (BB).

Tal como esperado, a baridade dos provetes foi bastante semelhante para ambas as misturas, porém é essencialmente a estabilidade, a deformação e a baridade as características mais condicionantes e que variam mais. A porosidade também apresenta valores bastante idênticos, ou seja, as misturas adquirem praticamente o mesmo grau de compactação. Comparando os gráficos da Figura 23, relativamente à percentagem de VMA e VFB, é possível confirmar que estes valores são relativamente próximos para ambas as misturas.

É também importante referir que o quociente *Marshall*, que se traduz pelo quociente entre a estabilidade (força) e a deformação, mostrou ser superior para a mistura padrão (Quadro 29). Para a percentagem ótima de betume a mistura AC14 Surf (BB) obteve um quociente de *Marshall* de 4 kN/mm, enquanto a mistura temperada MBT-3RED foi de 2,7 kN/mm, não excedendo o limite mínimo estipulado pelo CEEP de 3 kN/mm

4.3. Considerações Finais

No geral a mistura temperada apresenta bom comportamento face à redução significativa da temperatura de fabrico e compactação da mistura mais convencional.

Já vimos na subcapítulo 4.2, que as misturas em termos de vazios e grau de compactação atingem valores semelhantes. O que se observa é uma ligeira subida da deformação na mistura temperada porque a mistura torna-se mais trabalhável e há uma perda significativa de resistência (estabilidade). O facto também da mistura temperada MBT-3RED ter menor baridade que a mistura AC14 Surf (BB), ainda que a diferença seja mínima, pode-se justificar devido ao facto do betume 35/50 tornar-se ligeiramente mais leve com a adição do aditivo. De maneira a corroborar esta ideia, seria interessante ter realizado o ensaio de medição da massa volúmica do betume, de acordo com a Norma EN 15326 (*Bitumen and bituminous binders – Capillary-stoppered pycnometer*) (CEN, 2007e). Este ensaio estipula a utilização de um picnómetro para essa finalidade, no entanto, por ser uma técnica difícil e demorada, exigindo etapas de limpeza que envolvem temperaturas elevadas e o uso de solventes orgânicos, não foi possível realizá-lo.

O problema inicial da fixação das percentagens granulométricas, o excesso de partículas finas presentes na mistura tornando-a menos dura, fez com que fosse necessária uma maior adição de betume, penalizando nos parâmetros de estabilidade. Isto acontece para ambas as misturas pois têm a mesma constituição de agregados que, sendo uma mistura mais fina, será sempre mais “branda” apresentando menos estrutura mineral que uma mistura mais equilibrada/balançada.

5. CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões gerais

Pode-se concluir, da interpretação e discussão dos resultados, que a mistura não está otimizada em termos de granulometria pois quando tem melhor desempenho na baridade, a máxima estabilidade já foi atingida. A máxima estabilidade é atingida com 5% de betume e a baridade dos provetes com aproximadamente 6%, ou seja, quando se consegue uma boa compactação e a mistura fica bem adensada, já a estabilidade foi atingida. Esta granulometria está dispendiosa, com excesso de partículas finas, não se conseguindo tirar o máximo proveito da mesma.

Este tipo de misturas são fáceis de trabalhar e a elevada percentagem de finos permite uma menor segregação dos agregados, sendo uma mistura mais trabalhável e fácil de espalhar. Por esta razão manteve-se este tipo de granulometria desde o início da execução dos trabalhos, permitindo dar valores mais assertivos comparativamente a uma mistura mais rígida, que no ponto de vista de execução, é mais difícil de realizar. Uma mistura mais rígida, com uma granulometria mais equilibrada, exige um elevado rigor e controlo dos parâmetros laboratoriais tais como a temperatura. Este tipo de mistura seria, por exemplo, mais sensível a ligeiras alterações de temperatura, variável essa que por vezes é difícil de controlar influenciando significativamente os resultados.

Em rigor, a MBT é melhor que a MBQ em termos de relação força/deformação, porém, no ponto de vista de resistência final (estabilidade), a mistura temperada é pior que a mistura padrão. Em ambas as misturas, para uma baixa percentagem de betume, a deformação já está acima do limite estipulado pelo CEEP. Por outras palavras, o betume ainda está em falta já a deformação é elevada fazendo da MBQ uma mistura mais frágil, que rompe com uma força elevada, mas uma deformação relativamente baixa. Quando uma mistura tem mais ligante o seu comportamento normal é deformar-se mantendo a resistência, por essa razão, é possível que a MBQ seja uma mistura mais frágil que a MBT, rompendo por atrito sem plastificar.

5.2. Trabalhos futuros

Este tipo de estudo deixa sempre em aberto novas possibilidades. Como forma de reduzir as temperaturas de fabrico e compactação, a avaliação dos aditivos pode ser realizada utilizando diferentes materiais (agregados e ligantes) no mesmo tipo de misturas, ou em diferentes tipos de misturas. Um ponto interessante seria assim explorar a fragilidade da mistura e fabricar provetes com uma granulometria mais grossa, realizar os mesmos ensaios, e comparar possíveis alterações no resultado.

Complementarmente ao estudo laboratorial realizado neste trabalho, e de forma a comprovar o melhor comportamento da mistura temperada relativamente à mistura betuminosa de referência, seria importante realizar ensaios fundamentais (ex. ensaio de flexão em 4 pontos) e ensaios de simulação (ex. ensaio *wheel tracking*). Como no método de *Marshall*, método usado neste trabalho, só se consegue estimar razoavelmente o comportamento das misturas em função da sua composição e dos parâmetros de ensaio, é necessário realizar ensaios fundamentais que permitem determinar as propriedades intrínsecas das misturas (ex. módulo de rigidez) e avaliar o seu comportamento em serviço, assim como realizar ensaios de simulação que permitem simular o comportamento da mistura betuminosa durante o período de vida do pavimento.

A resistência à fadiga, assim como o módulo de rigidez, são assim requisitos fundamentais de desempenho que caracterizam o comportamento da mistura em serviço. Seria assim interessante determinar estes parâmetros através do ensaio de flexão em 4 pontos, sendo um ensaio importante à análise linear elástica dos materiais betuminosos, permitindo quantificar a resposta mecânica que um pavimento rodoviário pudesse vir a ter, sob determinadas solicitações, ao longo do seu período de vida útil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, M. E., Zamhari, K. A., Buhari, R., Bakar, S. K. A., Kamaruddin, N. H. M., Nayan, N., Hainin, M. R., Hassan, N. A., Hassan, S. A., & Yusoff, N. I. M. (2014). Warm mix asphalt technology: A review. *Jurnal Teknologi*, *71*(3), 39–52.
- Almeida-Costa, A., & Benta, A. (2016). Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 2308–2317.
- Arabani, M., & Hamedi, G. H. (2011). Using the Surface Free Energy Method to Evaluate the Effects of Polymeric Aggregate Treatment on Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, *23*(6). Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000228](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000228).
- Banerjee, A., De Fortier Smit, A., & Prozzi, J. A. (2012). The effect of long-term aging on the rheology of warm mix asphalt binders. *Fuel*, *97*, 603–611.
- Benta, A., Duarte, C., Almeida-Costa, A., Cordeiro, T., & Pereira, R. (2015). Design and performance of a warm high-modulus asphalt concrete. *Journal of Cleaner Production*, *95*, 55–65.
- Button, J. W., Estakhri, C. K., & Wimsatt, A. J. (2007). *A Synthesis of Warm-Mix Asphalt*. Texas Transportation Institute. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/39636>.
- Calandra, P., Caputo, P., De Santo, M. P., Todaro, L., Turco Liveri, V., & Oliviero Rossi, C. (2019). Effect of additives on the structural organization of asphaltene aggregates in bitumen. *Construction and Building Materials*, *199*, 288–297.
- Capitão, S. D., Picado-Santos, L. G., & Martinho, F. (2012). Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, *36*, 1016–1024.
- Capitão, S. D., Picado-Santos, L., & Pais, J. (2004). Deformabilidade, comportamento à fadiga e resistência à deformação permanente de misturas betuminosas de alto módulo para camadas de base. *In III Congresso Rodoviário Português*, Lisboa.
- Caputo, P., Abe, A. A., Loise, V., Porto, M., Calandra, P., Angelico, R., & Rossi, C. O. (2020). The Role of Additives in Warm Mix Asphalt Technology: An Insight into Their Mechanisms of Improving an Emerging Technology. *Nanomaterials*, *10*. Disponível em: www.mdpi.com/journal/nanomaterials.
- Caputo, P., Porto, M., Loise, V., Teltayev, B., & Rossi, C. O. (2019). Analysis of mechanical performance of bitumen modified with waste plastic and rubber (SBR) additives by rheology and PGSE NMR experiments. *Eurasian Chemico-Technological Journal*, *21*(3), 235–239.

- Carvalho, B. M. de A. (2016). *Misturas betuminosas temperadas, do tipo SMA, com incorporação de material betuminoso reciclado: Contribuição para Avaliação de desempenho mecânico*. [Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.26/18856>.
- CEN. (2001). Determination of flash and fire points - Cleveland open cup method. EN ISO 2592, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- CEN. (2002). Bituminous Mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density - EN 12697-5, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- CEN. (2003a). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens - EN 12697-8, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- CEN. (2003b). Bituminous Mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens - EN 12697-12, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- CEN. (2003c). Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking - EN 12697-22, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- CEN. (2004). Bituminous Mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness - EN 12697-26, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- CEN. (2007a). Bitumen and Bituminous Binders - Determination of kinematic viscosity - EN 12595, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- CEN. (2007b). Bitumen and Bituminous Binders - Determination of needle penetration - EN 1426, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- CEN. (2007c). Bitumen and Bituminous Binders - Determination of the resistance to hardening under the influence of heat and air - Part 1: RTFOT method - EN 12607-1, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- CEN. (2007d). Bitumen and Bituminous Binders - Determination of the softening point - Ring and Ball method - EN 1427, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- CEN. (2007e). Bitumen and Bituminous binders - Measurement of density and specific gravity - Capillary-stoppered pycnometer method. EN 15326:2007, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- CEN. (2015). Bitumen and bituminous binders - Determination of the Fraass breaking point. EN 12593, Bruxelas: *European Committee for Standardization*.
- D'Angelo, Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., & Yeaton, B. (2008). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. Disponível em: www.international.fhwa.dot.gov.

- Devivere, M. V., Barthel, W., & Marchand, J. P. (2004). *Warm Asphalt Mixes by Adding Aspha-Min a Synthetic Zeolite*. Disponível em: <http://www.aspha-min.com/Downloads.html>.
- EAPA. (2014). *The use of Warm Mix Asphalt*. Disponível em: www.eapa.org.
- EAPA. (2015). *The use of Warm Mix Asphalt*. Disponível em: www.eapa.org.
- EP. (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra - Pavimentação, Lisboa, Portugal: Estradas de Portugal*.
- Estakhri, C., Button, J., & Alvarez, A. E. (2010). *Field and Laboratory Investigation of Warm Mix Asphalt in Texas*. Disponível em: <http://www.ntis.gov>.
- FHWA. (2019). *Warm Mix Asphalt Technologies and Research*. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>.
- Ghabchi, R., Singh, D., Zaman, M., & Tian, Q. (2013). Application of Asphalt-aggregates Interfacial Energies to Evaluate Moisture-induced Damage of Warm Mix Asphalt. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 104, 29–38.
- Goh, S. W., You, Z., & Vam-Dam, T. J. (2007). *Laboratory evaluation and pavement design for warm mix asphalt*. Disponível em: http://www.intrans.iastate.edu/publications/_documents/midcon-presentations/2007/YouLaboratory.pdf.
- Guo, N., You, Z., Zhao, Y., Tan, Y., & Diab, A. (2014). Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 64, 141–149.
- Habal, A., & Singh, D. (2017). *Moisture damage resistance of GTR-modified asphalt binders containing WMA additives using the surface free energy approach*. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29CF.1943-5509.0000995>.
- Hesami, S., Roshani, H., Hamedi, G. H., & Azarhoosh, A. (2013). Evaluate the mechanism of the effect of hydrated lime on moisture damage of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 47, 935–941.
- Hill, B., Behnia, B., Buttlar, W. G., & Reis, H. (2013). Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement through Mechanical Performance Tests and an Acoustic Emission Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(12), 1887–1897.
- Hurley, G. C., & Prowell, B. D. (2005). *Evaluation of Sasobit® for use in Warm Mix Asphalt*.
- Hurley, G. C., & Prowell, B. D. (2006). *Evaluation of Evotherm® for use in Warm Mix Asphalt*.
- IPQ. (2011). *Betumes e ligantes betuminosos. Especificações para betumes de pavimentação. NP EN 12591, Lisboa: Instituto Português da Qualidade*.

- IPQ. (2016a). Betumes e ligantes betuminosos; Determinação da resistência ao envelhecimento sob a influência do calor e do ar. Parte 1: Método RTFOT. NP EN 12607-1, Lisboa: *Instituto Português da Qualidade*.
- IPQ. (2016b). Betumes e ligantes betuminosos. Determinação da solubilidade. NP EN 12592, Lisboa: *Instituto Português da Qualidade*.
- Kheradmand, B., Muniandy, R., Teik Hua, L., Bt Yunus, R., & Solouki, A. (2014). An overview of the emerging warm mix asphalt technology. *International Journal of Pavement Engineering*, 15(1), 79–94. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=gpav20>
- Koenders, B. G., Stoker, D. A., Robertus, C., Larsen, O., & Johansen, J. (2002). WAM-Foam, Asphalt Production at Lower Operating Temperatures. *Proceedings, 9th Conference of International Society for Asphalt Pavements*.
- Kristjansdottir, O. (2006). *Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving*.
- Little, D. N., Epps, J. A., & Sebaaly, P. E. (2006). *The Benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt*.
- Lu, D. X., & Saleh, M. (2016). Laboratory evaluation of warm mix asphalt incorporating high RAP proportion by using evotherm and sylvaroad additives. *Construction and Building Materials*, 114, 580–587.
- Mallick, R. B., Kandhal, P. S., & Bradbury, R. L. (2008). Using warm-mix asphalt technology to incorporate high percentage of reclaimed asphalt pavement material in asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 2051, 71–79.
- Martinho, F. (2014). *Misturas Temperadas com Subprodutos industriais - Caracterização e Validação Tecnológica*. [Master's thesis, Instituto Superior Técnico]. Repositório Institucional da Universidade de Lisboa.
- Mohd Hasan, M. R., You, Z., & Yang, X. (2017). A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques. *Construction and Building Materials*, 152, 115–133.
- Muthen, K. M. (1998). *Foamed Asphalt Mixes - Mix Design Procedure*. Disponível em: <http://asphalt.csir.co.za/foamasph/foamasph.pdf>.
- NCHRP. (2007). *Using Surface Energy Measurements to Select Materials for Asphalt Pavements*. Transportation Research Board. Disponível em: <https://www.nap.edu/catalog/23182>.
- NCHRP. (2011). *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*. Transportation Research Board. Disponível em: <https://doi.org/10.17226/14488>.
- Pais, J. C., & Palha, C. A. F. (2010). *Resistência à Fadiga em Misturas Betuminosas para Pavimentos Rodoviários*. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/16382>.

- Pais, J. C., Pereira, P. A. A., & Azevedo, M. C. M. (2000). Ensaios Mecânicos para Caracterização de Misturas Betuminosas. *1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000*, 639–649.
- Picado-Santos, L., Branco, F., & Ferreira, P. (2008). *Pavimentos Rodoviários* (Edições Almedina, Ed.; 3ª). Gráfica de Coimbra, Lda.
- Read, J., Whiteoak, D., & Hunter, R. N. (2003). *The Shell Bitumen Handbook 5a ed.*, Thomas Telford Publishing.
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76–84. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>.
- Saberi, K. F., Fakhri, M., & Azami, A. (2017). Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1125–1132.
- Sasol. (2018). *Sasobit - The versatile additive for asphalt mixes*. Disponível em: <https://products.sasol.com/pic/products/home/grades/ZA/5sasobit/index.html>
- Shen, S., & Carpenter, S. H. (2007). *An Energy Approach for Airport Pavement Low Damage Fatigue Behavior*.
- Silva, L. F. A. da. (2016). *Camadas de Desgaste Betuminosas com Adição de Borracha por via Seca - Avaliação da Resistência à Reflexão de Fendilhamento*. Dissertação de doutoramento, Universidade de Aveiro. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10773/21925>.
- Silva, H. M. R. D. (2006). *Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique - Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*. Dissertação de doutoramento, Universidade do Minho. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/5981>.
- Srikanth, G., Kumar, R., & Vasudeva, R. (2019). *A Review on Warm Mix Asphalt*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/330997303>.
- Vaitkus, A., Vorobjovas, V., Žalimienė, L., & Žiliūt, L. (2009). *The Research on the use of Warm Mix Asphalt for Asphalt Pavement Structures*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/237582194>.
- Van De Ven, M. F. C., Jenkins, K. J., Voskuilen, J. L. M., Voskuilen, J. L. M., & Van Den Beemt, R. (2007). Development of (half-) warm foamed bitumen mixes: state of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 8, 163–175. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=gpav20>
- Woszuk, A., Zofka, A., Bandura, L., & Franus, W. (2017). Effect of zeolite properties on asphalt foaming. *Construction and Building Materials*, 139, 247–255.
- Zaumanis, M. (2010). Research on Properties of Warm Mix Asphalt. In *Scientific Journal of Riga Technical University Construction Science* (Vol. 11).

- Zhang, J. Z., Wu, S. P., Van De Ven, M., & Chen, F. (2012). Dynamic viscosity analysis of base bitumen with the addition of rediset. *Advanced Materials Research*, 1621–1625. Disponível em: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.476-478.1621>.
- Zhang, S., Zhou, W., & Jin, G. (2016). Warm Mix Asphalt (WMA) technologies: Benefits and drawbacks—a literature review. *Functional Pavement Design - Proceedings of the 4th Chinese-European Workshop on Functional Pavement Design, CEW 2016*, 1203–1212.
- Zhao, S., Huang, B., Shu, X., & Woods, M. (2013). Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 44, 92–100. Disponível em: https://www.academia.edu/79830376/Comparative_evaluation_of_warm_mix_asphalt_containing_high_percentages_of_reclaimed_asphalt_pavement.