



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO  
Universidade Técnica de Lisboa

# **ESTUDO DO DESEMPENHO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA**

**O caso das Misturas Betuminosas Temperadas**

**Maria Cristina Canas Serra Lourenço Alves**

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia Civil**

**Júri**

Presidente: Professor Doutor José Álvaro Pereira Antunes Ferreira

Orientador: Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves

Co-Orientador: Professor Doutor Luís Guilherme de Picado Santos

Vogal: Professora Doutora Patrícia Alexandra Afonso Dinis Ferreira

Vogal: Professor Doutor Paulo Fonseca Teixeira

**Julho 2012**







## AGRADECIMENTOS

A realização da presente dissertação foi possível graças à colaboração, dedicação e acompanhamento de diversos intervenientes, aos quais gostaria de expressar os maiores e sinceros agradecimentos.

Ao Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves, meu orientador científico, pela sua orientação, leitura, correção e pelo estímulo demonstrado ao longo deste trabalho.

Ao Professor Doutor Luís de Picado Santos, meu co-orientador científico, pela disponibilidade, apoio e acompanhamento constantes ao longo do desenvolvimento do presente trabalho, pelos conhecimentos e orientações transmitidos bem como pelo interesse que me despertou nesta área.

Ao Engenheiro Fernando Martinho, por toda a disponibilidade, ajuda e apoio e por todos os esclarecimentos fornecidos.

À empresa Tecnovia S.A., sem a qual o estudo laboratorial não teria sido possível, em especial ao tio Luís Guilherme e ao João Guilherme da Costa, por todos os meios técnicos postos à disposição, pela sua confiança e por permitirem que este estudo se realizasse. Agradeço também ao Engenheiro Ângelo Baptista pelo seu acompanhamento, à Engenheira Maria João Torres, ao Paulo Bairrada e ao Telmo pela sua boa vontade e amizade, pela colaboração e apoio e por todos os ensinamentos e conhecimentos transmitidos.

A toda a minha família, pelo seu apoio, carinho e preocupação, em especial aos meus pais, pela educação e pelos valores que sempre me transmitiram, pelo acompanhamento e motivação constantes ao longo de toda a minha formação académica, por me terem proporcionado as melhores oportunidades e pelo seu desejo de que eu continue a crescer em todas as dimensões da minha vida.

Aos meus amigos, pela sua amizade, companheirismo e por todos os momentos de diversão, convívio e alegria, em especial à Teresa, que me acompanhou e esteve sempre comigo durante estes seis anos de curso.

Finalmente, agradeço ao João por estar sempre ao meu lado em todos os momentos, pela sua paciência e compreensão, por todo o apoio, incentivo e interesse demonstrados e pelo seu afeto e carinho especial.

## Agradecimentos

# ESTUDO DO DESEMPENHO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS NA PAVIMENTAÇÃO RODOVIÁRIA

## RESUMO

A crescente preocupação com a redução do consumo de energia e com a diminuição da pegada de carbono tem conduzido ao desenvolvimento de novas tecnologias menos prejudiciais a nível ambiental e social e mais vantajosas a nível económico. Neste contexto surgem as Misturas Betuminosas Temperadas (MBT) que, devido à diminuição da temperatura na fase de produção e compactação, em comparação com as Misturas Betuminosas Convencionais (MBC) atenuam o seu impacto na poluição ambiental, no consumo energético e na exposição dos trabalhadores aos gases emitidos.

Atualmente, para que este tipo de misturas sejam aceites é necessário comprovar que o seu desempenho é semelhante ao obtido com misturas do mesmo tipo fabricadas a quente. Desta forma, a presente dissertação tem como objetivo efetuar uma análise comparativa do desempenho, em laboratório, de uma mistura betuminosa produzida a temperaturas convencionais e da mistura equivalente produzida com três tecnologias de produção de MBT diferentes, nomeadamente através da incorporação de aditivos, que permitem fabricar e compactar a mistura a temperaturas inferiores, ou seja, entre 100 e 120 °C.

Foram estudadas quatro misturas betuminosas do tipo AC 20 Base 35/50 (MB), com base na execução de ensaios de laboratório. Começou-se por realizar um estudo Marshall de forma a determinar a percentagem ótima de betume da mistura, e, posteriormente, sobre a percentagem de betume determinada, executaram-se os ensaios de sensibilidade à água (ITSR) e de deformação permanente.

Os resultados obtidos com este trabalho permitem concluir que o desempenho e o comportamento das MBT é análogo ao das MBC, uma vez que, apesar da reduzida resistência à ação da água, as MBT apresentam valores de estabilidade Marshall elevados bem como uma boa resistência à deformação permanente.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Pavimentos Rodoviários

Misturas Betuminosas Convencionais

Misturas Betuminosas Temperadas

Aditivos

Desempenho

# STUDY OF THE PERFORMANCE OF ALTERNATIVE MATERIALS IN ROAD PAVING

## ABSTRACT

The growing concern regarding the reduction of energy consumption as well as the decrease of the carbon footprint has led to the development of new technologies that are environmentally and socially less harmful and more advantageous in economical terms. The Warm Mix Asphalt (WMA) emerges in this context, due to the decrease of the temperature during the production and compaction phase, compared to Hot Mix Asphalt (HMA); it mitigates its impact on the environmental pollution, energy consumption and worker's exposure to the emitted gases.

Currently for these mixtures to be accepted it is necessary to prove that its performance is similar to that obtained from mixtures of the same type but manufactured at higher temperatures, Hot Mix Asphalt (HMA). Thus, this dissertation's aim is to make a comparative analysis of the performance, in the laboratory, of one hot mixture produced at conventional temperatures (between 140 and 150 °C), and a warm mixture of the same type produced with three different WMA production technologies, such as the introduction of additives that allow manufacturing and compacting the mixture at lower temperatures, between 100 and 120°C.

Four mixtures of the type AC 20 Base 35/50 (MB) based on the performance of some laboratory tests. The first was a Marshall study in order to determine the optimal bitumen percentage, and subsequently with the optimal bitumen percentage defined it was possible to perform tests to evaluate the water sensitivity and permanent deformation.

The results obtained with this work show that the performance and behavior of the warm mixtures is similar to that of the hot mixtures. Despite the low moisture resistance, the warm mixture presents high Marshall stability values and a good permanent deformation resistance.

**KEYWORDS**

Road Pavements

Hot Mix Asphalt

Warm Mix Asphalt

Additives

Performance

## ÍNDICE

1.	Introdução .....	1
1.1.	Enquadramento e Motivação .....	1
1.2.	Objetivos .....	2
1.3.	Metodologia.....	2
1.4.	Estrutura .....	3
2.	Generalidades sobre Misturas Betuminosas Temperadas .....	5
2.1.	Enquadramento .....	5
2.2.	Benefícios da utilização de Misturas Betuminosas Temperadas .....	9
2.2.1.	Composições usuais para Misturas Betuminosas Temperadas .....	10
2.2.2.	Estudos de caracterização anterior de Misturas Betuminosas Temperadas.....	16
3.	Descrição dos Trabalhos Experimentais .....	33
3.1.	Enquadramento .....	33
3.2.	Caracterização dos componentes das misturas.....	34
3.3.	Formulação da mistura .....	35
3.4.	Estudo de composição Marshall .....	37
3.4.1.	Preparação dos provetes para ensaio .....	37
3.4.2.	Baridade Aparente.....	39
3.4.3.	Baridade Máxima Teórica .....	41
3.4.4.	Estabilidade e Deformação Marshall .....	43
3.4.5.	Determinação da percentagem ótima de betume .....	47
3.5.	Ensaio de sensibilidade à água (ITSR) .....	47
3.6.	Ensaio de deformação permanente.....	52
3.6.1.	Preparação dos provetes .....	52
3.6.2.	Realização do ensaio .....	54
4.	Discussão de Resultados.....	59
4.1.	Análise crítica do estudo de composição Marshall .....	59
4.1.1.	Resultados da Baridade Aparente .....	59
4.1.2.	Resultados da Baridade Máxima Teórica .....	60
4.1.3.	Resultados da Estabilidade e Deformação Marshall .....	61
4.1.4.	Percentagem ótima de betume .....	62
4.1.5.	Validação de resultados.....	65
4.2.	Análise crítica do ensaio de sensibilidade à água (ITSR) .....	66
4.3.	Análise crítica do ensaio de deformação permanente .....	68
4.4.	Análise comparativa da baridade aparente .....	69
4.5.	Análise económica da produção de Misturas Betuminosas Temperadas .....	71

## Índice

5. Conclusões e Trabalhos Futuros.....	73
5.1. Conclusões gerais.....	73
5.2. Trabalhos futuros.....	74
Referências Bibliográficas.....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (INIR, 2011) .....	6
Figura 2.2 – Classificação de misturas betuminosas em função da temperatura de produção em central e do consumo de fuel (Ferreira, 2009) .....	8
Figura 2.3 – Melhoria do ângulo de contacto devido à incorporação de aditivo químico (adaptado de Redondo et al., 2010) .....	11
Figura 2.4 – Aditivo Sasobit .....	14
Figura 2.5 – Aditivo Sasobit (Hurley & Prowell, 2005).....	14
Figura 2.6 – Aditivo Rediset.....	15
Figura 2.7 – Fibras Viatop .....	16
Figura 2.8 – Resultados da compactabilidade da MB com incorporação de Sasobit a diferentes temperaturas e com diferentes provetes (Ferreira, 2009).....	18
Figura 2.9 – Resultados da compactabilidade a diferentes temperaturas e com o mesmo provete (Ferreira, 2009).....	18
Figura 2.10 - Média da profundidade de rodeira máxima da mistura convencional (Jones et al., 2010) ..	24
Figura 2.11 - Média da profundidade de rodeira máxima da mistura temperada (Jones et al., 2010).....	24
Figura 2.12 - Profundidade de rodeira máxima da mistura convencional (Jones et al., 2010) .....	24
Figura 2.13 - Profundidade de rodeira máxima da mistura temperada (Jones et al., 2010).....	24
Figura 2.14 - Representação das energias de compactação a temperaturas diferentes (Redondo et al., 2010).....	26
Figura 2.15 – Resultados da resistência conservadas a diferentes temperaturas (Redondo et al., 2010).	27
Figura 2.16 – Curva granulométrica S-20 da norma espanhola (Ministerio de Fomento, 2004 citado em Reyes-Ortiz et al., 2009) .....	28
Figura 2.17 – Viscosidade Rotacional em função da temperatura para betume modificado com ceras (Reyes-Ortiz et al., 2009) .....	29
Figura 2.18 - Viscosidade Rotacional em função da temperatura para betume modificado com tensioactivos (Reyes-Ortiz et al., 2009).....	29
Figura 2.19 – Densidade de misturas temperadas em função da temperatura de compactação (Reyes-Ortiz et al., 2009).....	30
Figura 2.20 – Resistência à tracção indirecta de misturas temperadas em função da temperatura de compactação (Reyes-Ortiz et al., 2009).....	31
Figura 3.1 – Fluxograma explicativo do estudo laboratorial (adaptado de Picado Santos, 2010) .....	33
Figura 3.2 – Enquadramento da curva granulométrica de estudo no fuso da norma EN 131108-1:2008.	36
Figura 3.4 – Fabrico da mistura em recipiente de alumínio sobre placa eléctrica.....	37
Figura 3.3 - Estufa.....	37
Figura 3.5 – Compactador de impacto .....	38
Figura 3.6 – Desmoldagem do provete .....	39

## Índice de Figuras

Figura 3.7 - Amostras da mistura betuminosa para as várias percentagens de betume, para o ensaio da baridade máxima teórica (de 3,5% a 5,5%, da esquerda para a direita, respetivamente) .....	41
Figura 3.8 – Picnómetro de vácuo com agitador .....	41
Figura 3.9 – Banho termoestático .....	44
Figura 3.10 – Exemplo de curva força-deformação registada no equipamento de aquisição de dados (Digimax) .....	44
Figura 3.11 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão Marshall .....	44
Figura 3.12 – Compressão do provete Marshall.....	44
Figura 3.13 – Esquema de montagem usado no ensaio de compressão Marshall (Branco et al., 1998) ...	45
Figura 3.14 - Provete após o ensaio de compressão Marshall .....	46
Figura 3.15 – Provetes preparados para o ensaio de sensibilidade à água .....	48
Figura 3.16 – Picnómetro de vácuo .....	48
Figura 3.17 – Câmara de temperatura controlada .....	49
Figura 3.18 – Máquina de ensaios de compressão com estabilómetro para ITSr .....	50
Figura 3.19 – Esquema do ensaio para a determinação da resistência conservada em tração indireta (adaptado de CEN, 2003).....	50
Figura 3.20 – Provetes fabricados com a mistura M1, após rotura no ensaio ITSr .....	52
Figura 3.21 - Provetes fabricados com a mistura M2, após rotura no ensaio ITSr .....	52
Figura 3.22 - Provetes fabricados com a mistura M3, após rotura no ensaio ITSr .....	52
Figura 3.23 - Provetes fabricados com a mistura M0, após rotura no ensaio ITSr .....	52
Figura 3.24 – Preparação da mistura para o fabrico da laje do ensaio de pista .....	53
Figura 3.25 – Molde da laje para o ensaio de pista .....	53
Figura 3.26 – Compactador “ Roller Compacter” .....	54
Figura 3.27 – Laje para o ensaio de pista após compactação .....	54
Figura 3.28 – Equipamento do ensaio de pista .....	55
Figura 3.29 – Laje após ensaio de pista .....	55
Figura 3.30 – Vigas cortadas das placas após ensaio .....	56
Figura 3.31 – Vigas imersas em água.....	56
Figura 3.32 - Pesagem da viga submersa em água .....	56
Figura 4.1 - Comparação da baridade aparente das misturas analisadas .....	59
Figura 4.2 - Comparação da baridade máxima teórica das misturas analisadas.....	60
Figura 4.3 - Comparação da porosidade das misturas analisadas .....	60
Figura 4.4 - Comparação do volume de vazios no agregado (VMA) das misturas analisadas .....	61
Figura 4.5 - Comparação da estabilidade de Marshall das misturas analisadas .....	61
Figura 4.6 - Comparação da deformação das misturas analisadas .....	62
Figura 4.7 – Variação da baridade aparente das misturas analisadas.....	63
Figura 4.8 - Variação da porosidade das misturas analisadas .....	63
Figura 4.9 - Variação do VMA das misturas analisadas .....	64

Figura 4.10 - Variação da estabilidade das misturas analisadas.....	64
Figura 4.11 - Variação da deformação das misturas analisadas.....	64
Figura 4.12 – Comparação da baridade aparente dos provetes fabricados com as misturas analisadas para o ensaio ITSR .....	67
Figura 4.13 – Comparação do ITSR das misturas analisadas .....	67
Figura 4.14 - Comparação da profundidade de rodeira das misturas analisadas .....	68
Figura 4.15 – Profundidade de rodeira de uma placa fabricada com a MBT M1 para 4,5% de betume....	69
Figura 4.16 – Comparação da baridade aparente das placas fabricadas com as misturas analisadas para o ensaio de pista.....	69
Figura 4.17 – Baridade Aparente das misturas analisadas para 4,0% de betume.....	70
Figura 4.18 - Baridade Aparente das misturas analisadas para 4,5% de betume .....	70
Figura 4.19 - Baridade Aparente das misturas analisadas para 5,0% de betume .....	71



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Tecnologias de produção de MBT (Ferreira, 2009) .....	13
Quadro 2.2 – Percentagem de cada fração de agregados utilizados na mistura betuminosa (Ferreira, 2009).....	17
Quadro 2.3 – Resultados dos ensaios complementares para formulação da mistura (Ferreira, 2009) .....	17
Quadro 2.4 – Resistência à compactação obtida a diferentes temperaturas (Ferreira, 2009) .....	19
Quadro 2.5 – Resultados dos ensaios laboratoriais comparando a MBQ e a MBT com Sasobit (Ferreira, 2009).....	19
Quadro 2.6 – Características das carotes retiradas em obra (Ferreira, 2009) .....	20
Quadro 2.7 – Características das misturas aplicadas no trecho experimental (Ferreira, 2009).....	21
Quadro 2.8 – Valores de resistência à deformação permanente de lajes retiradas do pavimento (Ferreira, 2009).....	21
Quadro 2.9 – Valores da resistência à deformação permanente de lajes moldadas em laboratório com betume recolhido em obra (Ferreira, 2009).....	21
Quadro 2.10 – Composição granulométrica da mistura AC 16 Surf 50/70 (Pérez & Pérez, 2009).....	22
Quadro 2.11 – Comparação das características de uma mistura convencional e de uma mistura temperada (Pérez & Pérez, 2009) .....	23
Quadro 2.12 – Comparação das características de uma mistura convencional e de uma mistura temperada com o aditivo Rediset (Jones et al., 2010) .....	24
Quadro 2.13 – Resultados das energias de compactação a temperaturas diferentes (Redondo et al., 2010).....	26
Quadro 3.1 – Denominação das misturas betuminosas analisadas .....	34
Quadro 3.2 - Resultados dos ensaios realizados aos agregados (Tecnovia S.A., 2011).....	34
Quadro 3.3 – Percentagem de agregados a incorporar na mistura (Tecnovia S.A., 2011).....	35
Quadro 3.4 – Curva granulométrica de estudo (Fuso da norma EN 13108-1:2008) .....	36
Quadro 3.5 – Resultados experimentais da baridade aparente dos provetes .....	40
Quadro 3.6– Resultados experimentais da baridade máxima teórica .....	43
Quadro 3.7 – Resultados experimentais da porosidade .....	43
Quadro 3.8 – Resultados experimentais do volume de vazios no agregado (VMA) .....	43
Quadro 3.9 – Resultados experimentais da estabilidade Marshall .....	45
Quadro 3.10 – Resultados experimentais da deformação Marshall .....	46
Quadro 3.11 – Resultados do ensaio Marshall .....	47
Quadro 3.12 – Resultados experimentais da resistência conservada em tração indireta .....	51
Quadro 3.13 – Resultados da Baridade Aparente, da Baridade Geométrica e do Ensaio de Pista das placas fabricadas com as misturas betuminosas analisadas .....	57
Quadro 4.1 – Limites das propriedades das misturas betuminosas, para a camada de base, definidos no CETO (EP, 2009).....	65

## Índice de Quadros

Quadro 4.2 – Validação de resultados obtidos no estudo Marshall para as misturas betuminosas analisadas .....	66
Quadro 4.3 – Resultados experimentais da baridade aparente dos provetes fabricados para o ensaio ITSr .....	66
Quadro 4.4 – Baridade aparente dos provetes fabricados para os ensaios executados.....	70
Quadro 4.5 – Análise dos custos totais das misturas betuminosas.....	72

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

- AC - Asphalt Concrete (Betão Betuminoso)
- B - conteúdo de ligante betuminoso do provete
- CETO - Caderno de Encargos Tipo Obra
- CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono
- E - Módulo de deformabilidade
- EN - European Norm (Norma europeia)
- EP - Estradas de Portugal, S.A.
- IST - Instituto Superior Técnico
- ITS<sub>d</sub> - média dos valores de ITS dos 3 provetes “secos”
- ITSR - Indirect Tensile Strength Ratio (resistência conservada em tração indireta)
- ITS<sub>w</sub> - média dos valores de ITS dos 3 provetes “molhados”
- L - maior dimensão interior do molde das lajes para o ensaio de pista
- M - massa da mistura betuminosa para as lajes do ensaio de pista
- M0 - Mistura betuminosa AC 20 Base 35/50 convencional
- M1 - Mistura betuminosa AC 20 Base 35/50 com Sasobit
- M2 - Mistura betuminosa AC 20 Base 35/50 com Rediset
- M3 - Mistura betuminosa AC 20 Base 35/50 com Rediset e Viatop
- MB - Mistura Betuminosa
- MBC - Mistura Betuminosa Convencional
- MBQ - Mistura Betuminosa Quente
- MBT - Misturas Betuminosas Temperadas
- NP - Norma Portuguesa
- P - pico de carga
- PRD<sub>AIR</sub> - Proportional Ruth Depth in Air (média proporcional da profundidade de rodeira)
- RD<sub>AIR</sub> - Ruth Depth in Air (profundidade de rodeira)
- V<sub>m</sub> - conteúdo de vazios do provete
- VMA - conteúdo de vazios no agregado
- V<sub>p</sub> - volume do picnómetro, preenchido até à referência
- Vv - Volume de vazios

## Lista de Símbolos e Siglas

$WTS_{AIR}$  - taxa de deformação

d - diâmetro

$d_{10000}$  - profundidade de rodeira para 10000 ciclos

$d_{5000}$  - profundidade de rodeira para 5000 ciclos

e - altura final do molde das lajes para o ensaio de pista

h - altura

l - menor dimensão interior do molde das lajes para o ensaio de pista

$m'_1$  - massa do picnómetro mais acessórios

$m_1$  - massa do provete seco

$m'_2$  - massa do picnómetro mais acessórios e amostra

$m_2$  - massa do provete em água

$m'_3$  - massa do picnómetro mais acessórios, amostra e água

$m_3$  - massa do provete saturado com a superfície seca

v - conteúdo de vazios da mistura betuminosa para as lajes do ensaio de pista

$\rho_B$  - densidade do ligante betuminoso

$\rho_{bssd}$  - baridade de um provete saturado com superfície seca

$\rho_m$  - máxima densidade da mistura betuminosa para as lajes do ensaio de pista

$\rho_{mv}$  - densidade máxima da mistura betuminosa

$\rho_w$  - massa volúmica da água

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento e Motivação

Ao longo dos últimos anos, após a adoção do Protocolo de Quioto, tem-se vindo a intensificar a preocupação com as questões ambientais também nos vários sectores da construção, uma vez que é necessário reduzir na generalidade as emissões de gases com efeito de estufa para a atmosfera. No ramo das infraestruturas rodoviárias esta questão também tem estado muito presente, sendo que nos últimos anos têm sido desenvolvidas tecnologias que visam contribuir para se atingir os objetivos definidos a nível ambiental.

Neste contexto, uma das tecnologias que surgiu e que tem sido alvo de diversos estudos é a produção de misturas betuminosas temperadas (MBT). Este processo consiste no fabrico, aplicação e compactação das misturas betuminosas a uma temperatura entre os 100 e os 120 °C, ou seja, uma temperatura inferior à praticada nas misturas produzidas a quente.

Esta é uma técnica que traz bastantes benefícios a vários níveis. A redução da temperatura no fabrico da mistura exige um menor consumo de energia, o que se traduz em reduções consideráveis nos gases emitidos para a atmosfera. A redução do combustível gasto no aquecimento dos agregados nos queimadores, é também apontada como um benefício a nível económico (Ferreira, 2009). Outro aspeto a favor da produção das MBT e de grande relevância, é a diminuição da exposição aos fumos e compostos hidrocarbonatados por parte dos trabalhadores das centrais betuminosas e das equipas de pavimentação. Foram realizados ensaios para a medição da exposição aos fumos e compostos hidrocarbonatados, apresentados pelo *Bitumen Forum*, cujos resultados indicam uma redução de 30 a 50% relativamente às misturas convencionais. Este facto proporciona melhores condições de conforto e segurança para os trabalhadores (D'Angelo et al., 2008). Finalmente, é de referir que a produção de MBT possibilita o seu transporte a longas distâncias bem como um alargamento da época de pavimentação e aplicação a temperaturas inferiores às usuais.

Para a produção das MBT, geralmente, recorre-se à utilização de aditivos. O aditivo é incorporado na mistura na fase de fabrico, provocando uma diminuição da viscosidade do ligante, permitindo, desta forma, a produção, aplicação e compactação da mistura betuminosa a temperaturas inferiores às praticadas nas misturas betuminosas a quente (Redondo et al., 2010). As MBT apresentam um desempenho semelhante, ou por vezes melhor, que as misturas betuminosas convencionais. O bom desempenho deste tipo de misturas betuminosas resulta de diversos fatores. O facto de a mistura apresentar uma boa trabalhabilidade possibilita alcançar uma maior densidade, o que, a longo prazo, reduz o endurecimento do betume e evita a infiltração de água. As temperaturas de produção reduzidas diminuem também o envelhecimento do betume na fase de produção, o que melhora as características de resistência térmica e de fadiga do pavimento (EAPA, 2010).

A escolha do tema da presente dissertação foi motivada pelo crescente interesse que tem surgido, nos últimos tempos, em torno do desenvolvimento de metodologias alternativas na pavimentação rodoviária, que sejam a favor da sustentabilidade ambiental, social e económica. Desta forma, o trabalho aqui desenvolvido pretende ser um contributo que potencie a utilização de MBT no mercado.

O estudo apresentado nesta dissertação está alinhado com a tese de doutoramento de Fernando Martinho, que está a ser desenvolvida no IST. Beneficia, assim, duma orientação para a constituição prévia das misturas e contribuirá para o conhecimento do comportamento das MBT com maior profundidade naquela tese de doutoramento.

## 1.2. Objetivos

Esta dissertação tem como objetivos principais:

- Formular pela NP EN 13108-1 (IPQ, 2008) três misturas betuminosas temperadas (MBT) do tipo AC 20 Base 35/50, com incorporação de dois aditivos distintos e de fibras, com base num estudo Marshall, em ensaios de sensibilidade à água (ITSR) e em ensaios de pista.
- Efetuar uma análise comparativa entre os resultados obtidos para as três MBT e o comportamento normal de uma mistura betuminosa convencional (MBC) do mesmo tipo.

## 1.3. Metodologia

O trabalho aqui presente foi desenvolvido em quatro fases:

1. Numa primeira fase foi recolhida informação sobre o “estado da arte”, em que se procurou aprofundar o conceito de MBT; os efeitos que advêm da utilização deste tipo de misturas e as suas tecnologias de produção. Procurou-se ainda estudar as normas dos ensaios que foram utilizadas na realização deste trabalho bem como recolher e analisar dados existentes sobre ensaios já realizados, semelhantes aos que se realizaram nesta dissertação, ou seja, caracterização de misturas betuminosas com base em estudos Marshall, sensibilidade à água e resistência à deformação permanente.
2. Na segunda fase realizou-se um estudo Marshall para três MBT, a primeira com incorporação do aditivo Sasobit, a segunda com incorporação do aditivo Rediset e a terceira com incorporação do aditivo Rediset e de fibras Viatop, no laboratório da empresa Tecnovia S.A. em Ourique. Realizaram-se os ensaios da baridade aparente, baridade máxima teórica e de compressão de Marshall em provetes fabricados com estas três misturas.
3. Na terceira fase, para as três misturas referidas anteriormente e para a MBC, realizaram-se ensaios de sensibilidade à água (ITSR) em provetes Marshall; e de deformação permanente em lajetas, no laboratório da empresa Tecnovia S.A. em Rio Maior.
4. Numa última fase efetuou-se uma análise comparativa das propriedades e do desempenho das MBT ensaiadas nesta dissertação e a mistura tradicional, atualmente em utilização pela empresa Tecnovia S.A, cujas propriedades e relatório de ensaio foram cedidos pela mesma.

## 1.4. Estrutura

A presente dissertação desenvolve-se ao longo de cinco capítulos que compilam a informação recolhida e os resultados obtidos das diferentes etapas que foram necessárias para a conclusão deste trabalho.

No Capítulo 1 (Introdução) faz-se o enquadramento do tema em estudo, realçando, de forma genérica, a importância das MBT. Apresentam-se os objetivos do trabalho, a metodologia que permite atingi-los e finalmente efetua-se uma breve descrição do conteúdo da tese.

No Capítulo 2 (Generalidades sobre Misturas Betuminosas Temperadas) faz-se uma abordagem ao uso de misturas betuminosas em infraestruturas de transportes e uma breve caracterização das mesmas. Efetua-se uma explicação do conceito de MBT, refere-se as vantagens e os benefícios da sua utilização e descrevem-se as composições usuais que têm sido utilizadas na sua produção. Por último, apresentam-se dados e resultados de diversos ensaios realizados, anteriormente, para este tipo de misturas betuminosas.

No Capítulo 3 (Descrição dos Trabalhos Experimentais) faz-se uma caracterização das misturas betuminosas utilizadas e descrevem-se os passos de todos os ensaios laboratoriais realizados para a execução deste trabalho, nomeadamente o ensaio Marshall, o ensaio de sensibilidade à água (resistência conservada em tração indireta – ITSR) e o ensaio de pista (resistência à deformação permanente). Finalmente, apresentam-se os resultados obtidos para cada mistura betuminosa temperada bem como os dados da mistura tradicional.

No Capítulo 4 (Discussão de Resultados) referem-se as inferências que se podem obter por comparação entre as três MBT analisadas no presente trabalho e a misturas betuminosa tradicional da empresa Tecnovia S.A.. Efetua-se ainda uma breve análise económica da produção das referidas misturas betuminosas.

No Capítulo 5 (Conclusões e Trabalhos Futuros) efetua-se uma síntese do trabalho, apresentam-se as principais conclusões deste estudo e referem-se algumas perspetivas futuras que poderão servir de base para a continuação da investigação no âmbito da temática aqui estudada.



## 2. Generalidades sobre Misturas Betuminosas Temperadas

### 2.1. Enquadramento

Um pavimento rodoviário é uma estrutura de suporte de tráfego, construída após a fase de terraplenagem, que tem como função suportar e degradar as cargas do tráfego e transmiti-las ao solo de fundação. Para além desta função estrutural, o pavimento deve garantir segurança e conforto à circulação dos veículos que deve ser conseguida com a máxima qualidade e o mínimo custo possíveis.

Normalmente os pavimentos constituem-se numa estrutura multicamadas de espessuras constantes e materiais diferentes. Na parte superior colocam-se, habitualmente, os materiais capazes de garantir melhor as qualidades superficiais pretendidas, resistir às ações agressivas do tráfego e do ambiente, e proteger as camadas subjacentes. Inferiormente vão-se dispendo camadas de materiais de qualidade e custo progressivamente decrescentes, de acordo com a sucessiva redução das solicitações com a profundidade. Em suma, os pavimentos são estruturas laminares, estratificadas, com apoio contínuo sobre a fundação (Branco et al., 1998).

Os pavimentos agrupam-se em duas categorias, pavimentos rígidos e flexíveis, consoante a deformabilidade das suas camadas.

Os pavimentos rígidos são pavimentos pouco deformáveis em que a função estrutural é assegurada por uma laje de betão de cimento. A laje de betão apresenta uma elevada resistência à flexão garantindo uma rápida distribuição das cargas exteriores. Assim, a uma profundidade relativamente pequena, as tensões verticais transmitidas ao solo de fundação assumem valores compatíveis com a resistência deste.

Nos pavimentos flexíveis, as camadas são formadas por materiais mais deformáveis, tais como materiais betuminosos, e por camadas granulares. As camadas, sendo mais deformáveis, degradam as cargas mais lentamente, exigindo, por isso, espessuras maiores para as reduzir até valores adequados ao nível da fundação. Neste tipo de pavimentos, quando sujeitos a sobrecargas elevadas, recorre-se à utilização de bases betuminosas, que mantêm o carácter de grande deformabilidade. No entanto, também pode recorrer-se ao uso de bases tratadas com ligantes hidráulicos, nomeadamente o cimento. Neste caso, uma vez que a rigidez da camada é relativamente elevada para um pavimento flexível, passa a denominar-se de pavimento semi-rígido.

Os pavimentos apresentam, essencialmente, três tipos de camadas: a camada de desgaste, ou seja, a camada mais superficial, que tem um papel funcional e um papel estrutural e que é, em geral constituída por misturas betuminosas; a camada de base que assegura, essencialmente, um papel estrutural, distribuindo e reduzindo as tensões sobre a sub-base e o solo de fundação e é, geralmente, constituída por misturas betuminosas, ou por materiais granulares britados; e, finalmente, a camada de

sub-base que tem como função assegurar o apoio da base, permitir a sua adequada compactação e ainda defender o solo de fundação da ação do tráfego de obra. Para além disso, desempenha uma ação drenante e anti-contaminante no sentido de evitar a penetração dos finos do solo de fundação na camada de base granular. Esta última camada é, habitualmente, formada por materiais do tipo indicado para bases granulares (Branco et al., 1998).

As camadas subjacentes ao pavimento são o solo de fundação e o leito do pavimento. O solo de fundação tem como função suportar o pavimento enquanto o papel do leito do pavimento é evitar a deformação do solo, garantir a homogeneidade das características mecânicas da fundação, servir de plataforma construtiva e possibilitar a compactação das camadas sobrejacentes em condições adequadas (INIR, 2011).

Na Figura 2.1 pode observar-se um diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário.

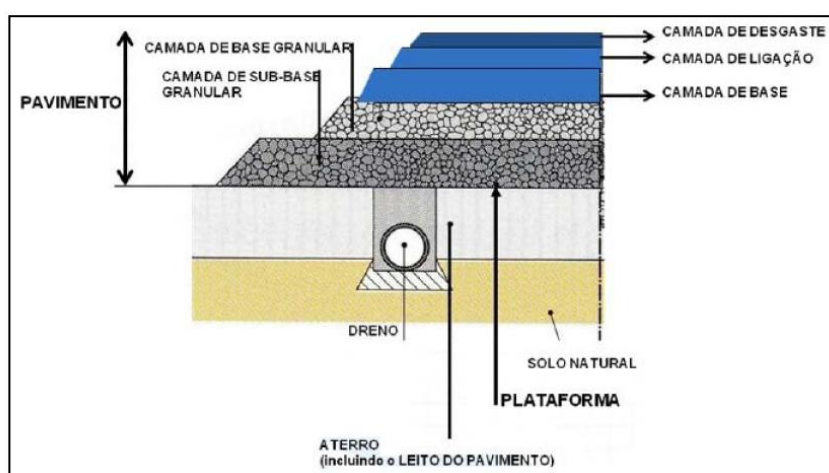


Figura 2.1 – Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (INIR, 2011)

Tal como já foi referido, nos pavimentos flexíveis, as camadas superiores, nomeadamente a camada de desgaste e eventualmente também a camada de base, são formadas por misturas betuminosas. Neste capítulo, pretende-se descrever as diferentes misturas betuminosas que são utilizadas neste tipo de pavimentos, dando especial atenção à caracterização de MBT bem como às suas tecnologias de produção.

As misturas betuminosas são, geralmente, constituídas por um conjunto de materiais granulares, que se denominam por agregados, e por um ligante hidrocarbonado, o betume asfáltico. Estes componentes são doseados de forma ponderal ou volumétrica e misturados em central. A mistura é, posteriormente, transportada, espalhada e compactada constituindo uma camada de pavimento.

O betume asfáltico é um material termoplástico cuja viscosidade diminui com o aumento da temperatura. Normalmente, à temperatura ambiente apresenta-se no estado semi-sólido, sendo

necessário fluidificá-lo temporariamente para ser utilizado no fabrico da mistura betuminosa e permitir a trabalhabilidade da mesma.

Os agregados são materiais granulares obtidos por extração direta ou por britagem de rochas de diferentes naturezas. A utilização de agregados nas misturas betuminosas tem como objetivo a formação de um esqueleto pétreo que resista à ação do tráfego.

Uma das principais exigências das misturas betuminosas é que estas apresentem boas características mecânicas, consoante o tipo de camada a construir. Para além disso devem garantir a aptidão para o desempenho de funções relacionadas com a segurança e conforto dos utentes da via bem como determinados critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução. Essencialmente, são exigidas às misturas betuminosas características como estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade.

A estabilidade pretendida consiste em obter uma mistura com a capacidade adequada para resistir às deformações produzidas pelas cargas a que fica sujeita em serviço. Se o material não for estável dá-se a formação de rodeiras.

A durabilidade de uma mistura betuminosa pretende caracterizar a sua resistência à desintegração causada pelas solicitações climáticas e pelo tráfego.

A flexibilidade de uma mistura betuminosa está relacionada com a sua capacidade de para se adaptar gradualmente aos movimentos do seu suporte.

A fadiga nos pavimentos rodoviários é um fenómeno provocado pela passagem repetida de veículos que induzem nos materiais ligados extensões de tração constituídas por duas componentes: uma reversível ou elástica e outra irreversível ou plástica, sendo que a acumulação sucessiva de extensões irreversíveis origina a abertura de fendas.

Apesar de ser necessário fabricar um material com as características desejadas é também fundamental que esse material possa ser colocado e compactado com facilidade, ou seja, que este apresente uma boa trabalhabilidade. Normalmente, o respeito pelas regras de operação dos equipamentos e a correta formulação da mistura permitem resolver as questões relativas à trabalhabilidade dos materiais. (Branco et al., 1998).

As misturas betuminosas podem ser classificadas de diversas formas, sendo que uma delas é feita de acordo com a gama de temperatura de produção e o consumo de fuel. Na Figura 2.2 encontra-se a classificação utilizada para as misturas betuminosas em função da temperatura de produção em central e do consumo de fuel.

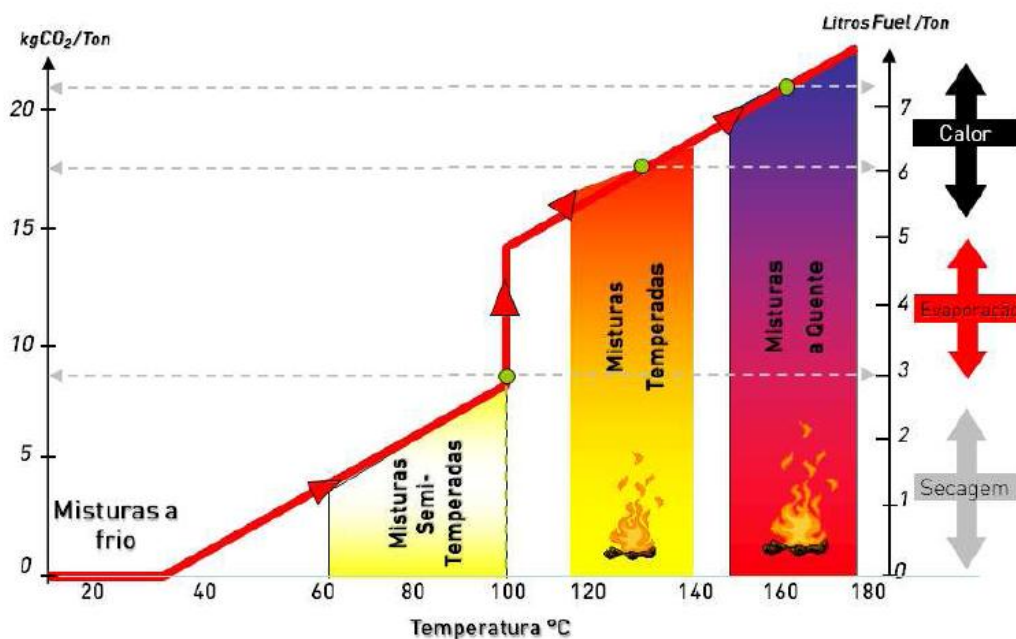


Figura 2.2 – Classificação de misturas betuminosas em função da temperatura de produção em central e do consumo de fuel (Ferreira, 2009)

Nas misturas a frio a mistura betuminosa é fabricada à temperatura ambiente e como ligante utiliza-se a emulsão betuminosa ou espuma de betume (Vaitkus et al., 2009). A emulsão betuminosa é constituída por dois líquidos imiscíveis: betume e água. O betume é disperso no meio contínuo formado pela água sob a forma de pequenos glóbulos. O emulsionante distribui-se à volta dos glóbulos de betume e estabelece aí uma camada de cargas elétricas que repelem as dos outros glóbulos, permitindo que a suspensão se mantenha estável e mantendo assim o sistema em equilíbrio (Branco et al., 1998).

As misturas betuminosas semi-temperadas são produzidas a uma temperatura inferior à temperatura de evaporação da água, ou seja 100°C (Vaitkus et al., 2009). Neste tipo de mistura os agregados são aquecidos a uma temperatura entre os 70 e os 100°C, aproximadamente (Ferreira, 2009) e pode-se utilizar como ligante o betume ou a emulsão betuminosa (Alconada, 2011).

As MBT são fabricadas a uma temperatura entre 120 e os 140°C, aproximadamente (Vaitkus et al., 2009). A produção de misturas betuminosas dentro desta gama de temperaturas é possível com incorporação de aditivos. Os aditivos são agentes com diversas origens que permitem a redução da temperatura de fabrico e de compactação da mistura.

As misturas a quente, denominadas também como misturas tradicionais ou convencionais, são produzidas a temperaturas entre os 150 e os 180 °C, dependendo do tipo de ligante utilizado (Vaitkus et al., 2009). Na produção deste tipo de misturas o consumo de fuel é bastante mais elevado, comparativamente com as restantes misturas, e conseqüentemente gera-se uma maior emissão de gases para a atmosfera.

## 2.2. Benefícios da utilização de Misturas Betuminosas Temperadas

A produção de MBT começou a ser alvo de preocupação por volta de 1997 no *German Bitumen Forum*. Nessa altura já havia sido adotado e assinado pelos países da União Europeia o Protocolo de Quioto que exigia uma redução dos níveis de CO<sub>2</sub> e dos gases com efeito de estufa. A partir deste momento tanto a Europa como os Estados Unidos começaram a investir no desenvolvimento de misturas betuminosas produzidas a temperaturas inferiores (Newcomb, 2007).

As MBT são produzidas, colocadas em obra e compactadas a temperaturas inferiores às misturas produzidas a quente, o que proporciona benefícios ao nível da sustentabilidade a curto, médio e longo prazo.

Tal como já foi referido, a redução da temperatura de fabrico e de compactação da mistura é possível graças à incorporação de aditivos na mesma, que provocam uma diminuição da viscosidade do ligante garantindo boas condições de trabalhabilidade, tal como na mistura a quente.

O recurso a MBT apresenta diversos benefícios dependendo da tecnologia de produção utilizada. No entanto, de acordo com várias pesquisas, os benefícios podem ser agrupados em:

- Benefícios ambientais
- Benefícios técnicos
- Benefícios sociais
- Benefícios económicos

### **Benefícios ambientais**

A nível ambiental verificou-se uma redução na emissão de gases, suportada por dados de alguns países Europeus, tais como França, Noruega e Holanda, que surge devido à redução da temperatura de produção e compactação das misturas.

Existem também relatórios que indicam que a utilização de MBT gera uma poupança de 20 a 35% de fuel (D'Angelo et al., 2008). Os níveis de poupança de fuel dependem de vários fatores, tais como as reduções de temperatura efetivamente praticadas para produzir as MBT, o teor em água dos agregados e as condições de funcionamento da central. Medições efetuadas permitem concluir que aumentos de 1% no teor em água dos agregados aumentam o consumo de fuel em 10% (Prowell & Hurley, 2008).

### **Benefícios técnicos**

O facto de ser possível executar um pavimento a temperaturas mais baixas traz inúmeras vantagens tornando a tecnologia de produção de misturas betuminosas bastante atrativa. É possível pavimentar a temperaturas mais reduzidas assegurando igualmente a densidade pretendida, bem como realizar o transporte da mistura a distâncias superiores às habituais e ainda assim garantir trabalhabilidade para a aplicação e compactação com menor esforço.

Para além disso, a tecnologia de produção de MBT pode ser benéfica para as misturas com uma elevada percentagem de incorporação de material reciclado na medida em que a redução da viscosidade do ligante facilita o processo de compactação e ainda dado que se verifica uma redução do envelhecimento do ligante. Esta redução surge devido às baixas temperaturas de produção, e compensa o envelhecimento do ligante do material reciclado (D'Angelo et al., 2008).

### **Benefícios sociais**

Foram apresentados estudos que demonstram que existe uma forte correlação entre a temperatura de produção das misturas e os fumos emitidos aquando da sua aplicação. Ao reduzir as temperaturas reduzem-se as emissões de fumos e gases proporcionando-se melhores condições de trabalho e segurança aos trabalhadores, assim como uma melhor qualidade ambiental para a sociedade (D'Angelo et al., 2008).

Dados relativos aos países europeus mostram que as MBT reduzem significativamente a exposição dos trabalhadores da pavimentação de estradas aos fumos em cerca de 30 a 50% em relação às misturas betuminosas a quente (D'Angelo et al., 2008).

Dados oriundos da França, Alemanha e Itália, onde foram efetuadas comparações diretas dos fumos e dos aerossóis, provam que os resultados obtidos para as exposições associadas à pavimentação com misturas betuminosas a quente cumprem os valores estipulados pela regulamentação em vigor. Contudo, a avaliação realizada para as MBT indica uma redução de cerca de 30 a 50% para os fumos, aerossóis e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (Rühl & Lindemeier, 2006).

O facto de se proporcionar maior conforto e melhores condições de trabalho aos trabalhadores promove um aumento de produtividade na aplicação das MBT (D'Angelo et al., 2008).

### **Benefícios económicos**

A nível económico verifica-se uma redução nos custos energéticos resultante da redução do consumo de fuel.

O aumento da produtividade dos operários face às melhores condições de trabalho, o aumento da temporada de aplicação das misturas e a capacidade de armazenamento em silos durante um maior período de tempo também podem ser apontados como benefícios económicos (Soto et al., 2009).

A central de produção das MBT está sujeita a uma degradação menor devido às temperaturas mais reduzidas (Zaumanis, 2010).

#### **2.2.1. Composições usuais para Misturas Betuminosas Temperadas**

Tal como já foi referido, a característica principal das MBT é a capacidade de se reduzir a temperatura na fase de produção e compactação das mesmas. Esta redução de temperatura é possível graças à

incorporação de aditivos que provocam uma diminuição da viscosidade do ligante garantindo igualmente uma boa trabalhabilidade da mistura.

Atualmente têm vindo a ser desenvolvidas e utilizadas diversas composições para a produção de MBT, que se encontram distribuídas em quatro grandes grupos:

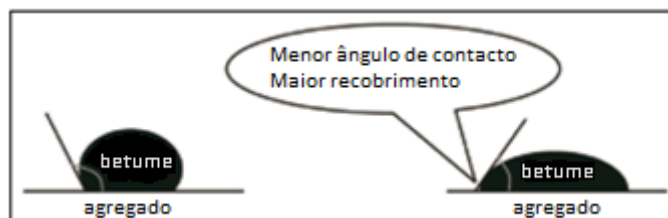
- Aditivos orgânicos

Este tipo de aditivos pode ser utilizados para diminuir a viscosidade do ligante a temperaturas acima do ponto de amolecimento das ceras, ou seja, cerca de 90°C (D'Angelo et al., 2008). Este grupo de aditivos modifica a reologia do betume, de forma a que, a altas temperaturas (> 100°C), a viscosidade do ligante diminui, permitindo uma redução da temperatura de fabrico da mistura (Redondo et al., 2010).

Os aditivos orgânicos mais utilizados são o Sasobit e o Asphaltan B.

- Aditivos químicos

No caso de produção de MBT com recurso a aditivos químicos, o que se pretende com a incorporação do aditivo é um melhor recobrimento do agregado pelo ligante, mesmo a baixas temperaturas (Hurley & Prowell, 2006). Estes aditivos provocam uma redução da tensão superficial agregado/betume e diminuem o ângulo de contacto entre o betume e o agregado ajudando assim a um bom recobrimento do agregado, tal como se pode observar na Figura 2.3.



**Figura 2.3 – Melhoria do ângulo de contacto devido à incorporação de aditivo químico (adaptado de Redondo et al., 2010)**

Para além disso, este grupo de aditivos podem atuar como “lubrificantes” melhorando a trabalhabilidade da mistura (González et al., 2009 citado em Redondo et al., 2010).

De entre os diversos aditivos químicos, destacam-se o Evotherm, o Rediset, o Revix e o Cecabase RT.

- Espuma com minerais sintéticos ou naturais

A tecnologia de produção de MBT recorrendo a minerais sintéticos ou naturais baseia-se na utilização de zeólitos. Estes pertencem ao grupo dos minerais, aluminossilicatos hidratados e alcalimetals. Na

produção das MBT, os minerais criam um efeito controlado de espuma quando estão em contacto com o ligante, originando neste um ligeiro incremento do volume e uma redução da viscosidade.

A aplicação de técnicas de produção de MBT com recurso a zeólitos permite ainda uma melhoria do tempo de trabalhabilidade das misturas de cerca de 6 a 7 horas ou até a temperatura descer aos 100°C (Prowell & Hurley, 2008).

Relativamente às espumas com minerais sintéticos, são de referir os zeólitos Aspha-min e Advera.

- Espuma com injeção de água

A espuma de betume consiste em bolhas de filme de betume preenchidas com vapor de água que surgem quando, na presença de betume quente, existe uma pequena quantidade de água (cerca de 2% sobre a massa do betume), que se expande e passa de líquido a vapor. Assim, no estado espumoso, a viscosidade do ligante é reduzida, garantindo o recobrimento dos agregados a temperaturas de mistura mais reduzidas (Croteau & Tessier, 2008).

A espuma de betume por injeção de água resulta, tal como o nome indica, da injeção de água sob a forma de spray no betume quente, ou da adição de uma fração de agregados finos húmidos (Ferreira, 2009).

No que respeita às espumas com injeção de água recorre-se normalmente a processos tais como WMA Foam, Double Barrel, Low Energy Asphalt (LEA), LEAB e Ultrafoam GX.

No Quadro 2.1 encontram-se de forma resumida algumas informações das tecnologias de produção das MBT, nomeadamente os principais produtos utilizados em cada uma delas.

No presente trabalho os aditivos utilizados foram o Sasobit e o Rediset. Para além disso foram também utilizadas fibras de celulose denominadas Viatop. Desta forma, efetuou-se uma análise mais aprofundada apenas destes componentes.

### **Sasobit**

O Sasobit é um produto da Sasol Wax (antigamente Schumann Sasol) da África do Sul. É um *Fischer-Tropsch* (F-T) ou cera sintética produzida através do processo de aquecimento do carvão ou gás natural com vapor de água, na presença de um catalisador (Chowdhury & Button, 2008).

Este aditivo apresenta um ponto de amolecimento entre os 85 e os 115 °C e é completamente solúvel no betume para temperaturas superiores aos 115 °C (Sasol Wax, 2007). Outra característica bastante importante deste aditivo é o facto de proporcionar uma diminuição da viscosidade do ligante modificado, tanto na fase de fabrico da mistura, como na fase de aplicação da mesma. A redução da viscosidade da mistura confere-lhe trabalhabilidade e permite reduzir a sua temperatura de fabrico, diminuindo, conseqüentemente, a emissão de fumos, bem como o consumo de energia (Sasol Wax).

Quadro 2.1 – Tecnologias de produção de MBT (Ferreira, 2009)

Tecnologia MBT	Empresa proprietária da patente	Gama de temperatura de fabrico (°C)
<b>ADITIVOS ORGÂNICOS</b>		
Sasobit® (Ficher-Tropsch wax)	Sasol Wax GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170°C
Asphaltan B® (Cera de Montana, estéril de baixo peso molecular)	Romonta GmbH, Alemanha	
Licomont BS 100®	Clariant, Suíça	
<b>ADITIVOS QUÍMICOS</b>		
Rediset®	Akzo Nobel, Holanda	Reduções de cerca de 15°C da temperatura referência das MBQ
Cecabase RT®	CECA, França	120-140°C
Interlow T®	Interchimica, Itália	120-140°C
Evotherm®	MeadWestvaco, EUA	85-115°C
Revic® ou Evotherm 3G®	MeadWestvaco Mathy-Ergon, EUA	130-140°C
<b>ESPUMA DE BETUME COM MINERAIS SINTÉTICOS OU NATURAIS</b>		
Aspha-Min® (Zeólito sintético)	MHI Group e Eurovia Services GmbH, Alemanha	Depende da gama de penetração do ligante, mas habitualmente entre os 130 e os 170°C
Advera® (Zeólito sintético)	PQ Corporation, EUA	
Zeólito Natural	Vários	
<b>ESPUMA DE BETUME POR INJEÇÃO DE ÁGUA</b>		
WAM Foam®	Shell, UK e Kolo-Veidekke, Noruega	110-120°C
Terex WMA System	Terex, EUA	130°C
Double-Barrel® Green	Astec Industries, EUA	121-135°C
LEA- Low Energy Asphalt (EBT® e EBE®)	LEA-CO (Joint-Adventure Eiffage/Fairco para divulgar a LEA). Nos EUA os direitos de utilização são da McConnaughay	<100°C
LT Asphalt® (LEA)	Nynas, Suécia	
LEAB®	Royal BAM Group, Holanda	110-115°C
Ultrafoam GX®	Gencor Industries, EUA	

Para além de possibilitar uma redução da temperatura de fabrico da mistura, a adição do aditivo Sasobit permite também uma redução da temperatura de compactação até cerca de 88 °C (Hurley & Prowell, 2005).

Como se pode observar na Figura 2.4 e na Figura 2.5, o aditivo Sasobit apresenta-se sob a forma de pequenas esferas sólidas de cor branca.

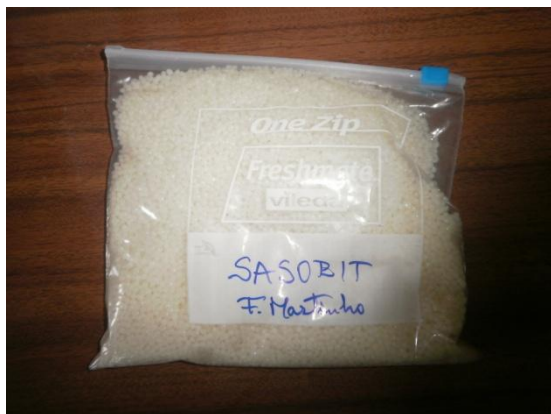


Figura 2.4 – Aditivo Sasobit



Figura 2.5 – Aditivo Sasobit (Hurley & Prowell, 2005)

### Rediset

O Rediset é um aditivo químico baseado na *WMA Technology* da Akzo Nobel (Chowdhury & Button, 2008). É constituído por uma combinação de surfactantes químicos e orgânicos, que modificam a reologia do ligante. Não contém água, sendo que os surfactantes incrementam o envolvimento da superfície dos agregados com o ligante através de uma “adesão ativa”, e os restantes componentes do aditivo reduzem a viscosidade do ligante (Prowell & Hurley, 2008).

A adição de Rediset permite uma redução de cerca de 15°C na temperatura de fabrico e de compactação da mistura. A quantidade de aditivo normalmente incorporada na mistura é cerca de 1,5 a 2,0% do peso do ligante (Chowdhury & Button, 2008).

Foram realizados ensaios de laboratório que indicam que o uso deste aditivo em misturas produzidas e compactadas a temperaturas mais baixas não influencia o desempenho do betão betuminoso, quando comparado com amostras de controlo produzidas e compactadas a quente. Em ensaios como o da fadiga e de pista, a mistura temperada apresentou um desempenho semelhante à mistura tradicional a quente (Jones et al., 2010).

O aditivo Rediset apresenta-se sob a forma de partículas sólidas de dimensões bastante reduzidas de cor castanha, tal como é visível na Figura 2.6.



Figura 2.6 – Aditivo Rediset

### Viatop

O Viatop é um produto que consiste em fibras de celulose revestidas com betume através de um processo de produção especial. O betume funciona como uma ajuda no processo de granulação, na medida em que controla as forças de granulação que atuam nas fibras durante este processo. O betume assume também uma função de espaçador entre as fibras de forma a garantir a dispersão destas durante a fase de mistura do asfalto (J.Rettenmaier & Söhne (a)).

A adição de Viatop permite a estabilização da mistura. O pavimento apresenta uma elevada resistência à deformação e um longo período de vida (J.Rettenmaier & Söhne (b)). A adição de fibras de celulose não provoca qualquer reação química no betume, apenas reforça as propriedades físicas do produto final. As fibras tendem a adensar o betume de forma a que este envolva bem os agregados garantindo uma boa adesividade agregado-ligante antes da compactação (Schneider, s.d.).

As fibras Viatop apresentam várias vantagens quando comparadas com as fibras puras. As primeiras dispersam-se rápida e totalmente, apresentando assim um menor tempo de pré-mistura e um aumento de produção. Ao contrário das fibras puras, o Viatop não é sensível à humidade, não ficando inutilizado em caso de se molhar (Schneider, s.d.).

O principal campo de aplicação de Viatop é o *Stone Mastic Asphalt* (SMA). Esta é uma mistura com formulação de carácter especial (J.Rettenmaier & Söhne (c)). O *Stone Mastic Asphalt* é constituído por uma mistura mineral, com partículas grosseiras, que tem como ligante o betume e que contém também aditivos para estabilização. Esta mistura apresenta propriedades tais como uma boa resistência à deformação permanente e ao desgaste, menor fissuração provocada pelas baixas temperaturas, boa macro rugosidade e um bom comportamento a longo prazo (Drüschner & Schäfer, 2000).

Como é de notar na Figura 2.7, as fibras Viatop apresentam-se sob a forma de pequenos fragmentos sólidos de cor castanha, um pouco maiores que os fragmentos do aditivo Rediset. Antes de as fibras

serem adicionadas à mistura é aconselhável o seu esmagamento para que não haja diferenciação dos fragmentos e ocorra um bom envolvimento na mistura.



Figura 2.7 – Fibras Viatop

### 2.2.2. Estudos de caracterização anterior de Misturas Betuminosas Temperadas

Nesta subsecção vão ser analisados cinco estudos e ensaios experimentais, relativos a MBT, realizados por diversos autores, que possibilitam uma melhor caracterização e comparação com o estudo realizado nesta dissertação.

#### Estudo 1

O primeiro estudo apresentado - "Avaliação do Desempenho de MBT" - foi realizado no âmbito de uma dissertação de mestrado (Ferreira, 2009).

Neste estudo foi comparada uma mistura convencional do tipo AC 14 Surf 50/70 com agregados sieníticos e calcários, com duas MBT com a mesma composição, mas utilizando diferentes tipos de aditivos comerciais, uma com o aditivo Sasobit e a outra com o aditivo Cecabase. No entanto, apenas a mistura com adição de Sasobit será alvo de uma análise mais detalhada, dado que este é um dos aditivos utilizados nas misturas estudadas na presente dissertação.

Neste estudo, a percentagem de aditivo e as temperaturas de produção e de compactação foram as únicas variáveis em análise. Os restantes parâmetros de composição (tipo de agregados, curva granulométrica, tipo e percentagem de ligante) mantiveram-se constantes nas três misturas estudadas.

A formulação da mistura AC 14 Surf 50/70 foi feita com base no fuso granulométrico especificado no anexo nacional da norma NP EN 13108-1 (IPQ, 2008). As percentagens de cada agregado utilizado na mistura, que possibilitaram obter uma curva granulométrica que cumprisse o referido fuso, foram as indicadas no Quadro 2.2.

Pela aplicação do método Marshall foi concluído que a percentagem ótima de ligante era de 5%, valor para o qual todas as especificações do caderno de encargos são cumpridas.

**Quadro 2.2 – Percentagem de cada fração de agregados utilizados na mistura betuminosa (Ferreira, 2009)**

Fração de agregados	Agregado 8/14 (sienítico)	Agregado 4/10 (sienítico)	Areia Lavada 0/4 (calcário)	Pó 0/5 (calcário)	Filer (eurocálcio)
<b>Percentagem de agregados utilizada na MB</b>	37%	21%	12%	28%	2%

Foi executado um estudo adicional que consistiu na realização de ensaios de sensibilidade à água (ITSR), resistência à deformação permanente ( $WTS_{AIR}$ ) e resistência conservada, sobre misturas betuminosas preparadas com três percentagens de ligante diferentes, 4,5, 5,0 e 5,5%. Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 2.3.

**Quadro 2.3 – Resultados dos ensaios complementares para formulação da mistura (Ferreira, 2009)**

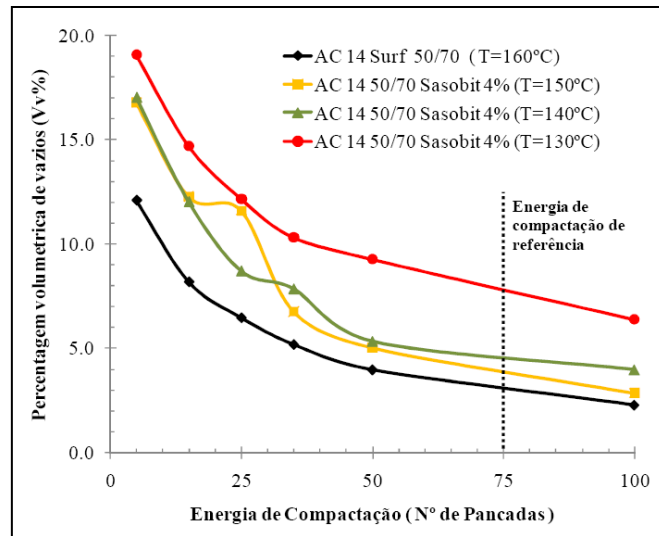
Propriedade avaliada	Percentagem de ligante		
	4,5	5,0	5,5
Ensaio de pista - $WTS_{AIR}$ ( $mm/10^3$ )	0,06	0,08	0,09
Sensibilidade à água - ITSR (%)	39,9	47,0	41,9
Resistência conservada (%)	69,0	74,0	73,0
Volume de vazios (%)	4,4	3,5	2,7

Analisando os resultados comprovou-se que, de facto, a percentagem ótima de ligante é de 5%, uma vez que, para este valor, os valores de  $WTS_{AIR}$  e ITSR são razoáveis.

Foi efetuada, anteriormente, uma caracterização do betume convencional modificado com o aditivo, através de ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade dinâmica, que conduziram à conclusão de que a quantidade ótima de Sasobit a incorporar na mistura seria de 4%.

Realizou-se um ensaio de compactabilidade com compactador de impacto para se poder validar as temperaturas de fabrico, com base em parâmetros volumétricos obtidos para misturas produzidas a diferentes temperaturas, de modo a definir e otimizar as temperaturas de produção da mistura betuminosa temperada. Na Figura 2.8 podem ser observados os resultados da compactabilidade a diferentes temperaturas e com diferentes provetes.

Pela análise dos resultados obtidos foi verificado que era possível reduzir a temperatura de fabrico para os 140°C, dado que, para esta temperatura, o volume de vazios da mistura na linha de energia de compactação de referência (75 pancadas em cada extremo do provete) ainda se encontra dentro dos limites estabelecidos para a mistura convencional.

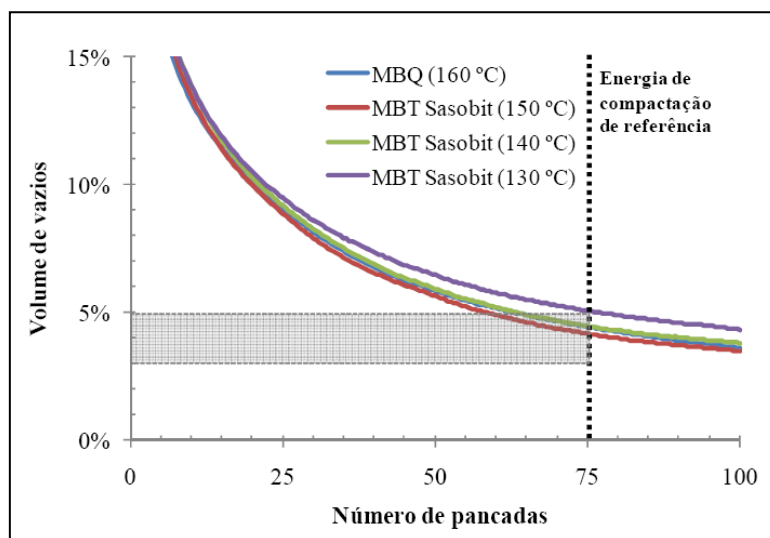


**Figura 2.8 – Resultados da compactabilidade da MB com incorporação de Sasobit a diferentes temperaturas e com diferentes provetes (Ferreira, 2009)**

Posteriormente, foi realizado um outro ensaio de compactabilidade, mas com o mesmo provete para diferentes energias de compactação com o intuito de avaliar a compactabilidade das misturas.

Na Figura 2.9 podem observar-se as temperaturas de fabrico que foram utilizadas neste novo método de ensaio, assim como os resultados volumétricos obtidos para as misturas betuminosas convencionais a quente e temperadas, com Sasobit, quando se utiliza o mesmo provete para as diferentes energias de compactação.

A resistência à compactação foi calculada com base na norma EN 12697-10 (CEN, 2001), e os resultados obtidos estão apresentados no Quadro 2.4.



**Figura 2.9 – Resultados da compactabilidade a diferentes temperaturas e com o mesmo provete (Ferreira, 2009)**

**Quadro 2.4 – Resistência à compactação obtida a diferentes temperaturas (Ferreira, 2009)**

Mistura	MBQ		MBT Sasobit	
Temperatura de produção (°C)	160	150	140	130
Volume de vazios às 75x2 pancadas (%)	4,4	4,2	4,5	5,1
Resistência à compactação T (21 Nm)	33,9	31,2	31,8	33,5
Espessura mínima $t_{\infty}$ (mm)	64,2	63,6	64,3	64,4
Espessura mínima $t_0$ (mm)	81,6	82,4	83,2	82,3

Os resultados obtidos confirmam as reduções de temperatura que já tinham sido definidas anteriormente, ou seja, a MBT com Sasobit pode ser fabricada, sem problemas volumétricos, à temperatura de 140°C. Verificou-se que a resistência à compactação das misturas só aumenta significativamente para temperaturas inferiores à referida. Constatou-se também que a resistência à compactação da MBQ é superior à obtida para a MBT, mesmo fabricada a menores temperaturas, o que pode significar que os aditivos alteram a forma como a estrutura interna da mistura resiste aos esforços de compactação.

Após a definição das temperaturas de produção das MBT e da quantidade de aditivo a utilizar na sua composição foram avaliadas, através de um estudo laboratorial, algumas propriedades como por exemplo a sensibilidade à água, a resistência conservada e a resistência à deformação permanente.

No Quadro 2.5 podem ser observados os valores das características que resultaram do estudo laboratorial.

**Quadro 2.5 – Resultados dos ensaios laboratoriais comparando a MBQ e a MBT com Sasobit (Ferreira, 2009)**

Propriedade avaliada	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit
Porcentagem de betume (%)	EN 12697-1	5,0	5,0
Baridade máxima teórica (kg/m <sup>3</sup> )	EN 12697-5	2420	2409
Volume de vazios (%)	EN 12697-8	3,0	3,5
Sensibilidade à água - ITR (%)	EN 12697-12	47	42
Resistência conservada (%)	MIL-STD-620A	74	70
Ensaio de pista - WTS <sub>AIR</sub> (mm/10 <sup>3</sup> )	EN 12697-22	0,08	0,10
Ensaio de pista - PRD <sub>AIR</sub> (mm/10 <sup>3</sup> )	EN 12697-22	2,7	2,1

Analisando o quadro anterior constatou-se que as características volumétricas da mistura betuminosa temperada são análogas às da mistura betuminosa a quente, o que permitiu concluir que a metodologia usada, bem como as temperaturas e quantidades de aditivo selecionadas, foram adequadas. Verificou-se uma ligeira redução da baridade máxima teórica, devido à incorporação do aditivo, e um ligeiro

aumento do volume de vazios da MBT. Relativamente aos restantes parâmetros avaliados obtiveram-se pequenas diferenças entres os resultados da MBQ e da MBT, o que significa que ambas as misturas têm um desempenho semelhante.

Ainda neste trabalho foi realizado um trecho experimental com as mesmas misturas estudadas em laboratório. A estrutura do pavimento do trecho experimental era constituída por uma base em agregado britado de granulometria extensa com 0.20 m de espessura, sobre a qual foi colocada uma mistura betuminosa de base (AC 20 base 50/70), com 0,07 m de espessura, e finalmente uma camada de desgaste com cada uma das duas misturas betuminosas em estudo, numa espessura de 0,05 m.

Foram retiradas do trecho experimental 12 carotes cujas características se apresentam no Quadro 2.6. Os valores indicados são os valores médios das 12 carotes.

**Quadro 2.6 – Características das carotes retiradas em obra (Ferreira, 2009)**

Propriedade avaliada	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit
Espessura (cm)	EN 12697-1	5,1	5,0
Volume de vazios (%)	EN 12697-8	5,0	4,4
Grau de compactação - Em relação à baridade aparente (%)	EN 12697-6	97,4	97,1

Concluiu-se que as misturas em estudo apresentaram, em obra, características volumétricas e de grau de compactação semelhantes, nas temperaturas de compactação utilizadas. Desta forma, confirmou-se que a redução de temperatura nas MBT não reduziu a sua compactabilidade em obra, tal como já tinha sido verificado em laboratório.

O processo de compactação da mistura betuminosa a quente deu-se numa gama de temperaturas entre 145 e 160°C, sendo que a mistura betuminosa temperada com Sasobit foi compactada a temperaturas entre os 120 e os 135°C.

Para validar em obra os resultados obtidos em laboratório, para além das características volumétricas foram avaliadas propriedades relacionadas com o desempenho final no trecho experimental, tal como se pode observar no Quadro 2.7.

Relativamente às características indicadas no Quadro 2.7 constatou-se que são análogas para a MBQ e para a MBT, o que permitiu concluir que a metodologia (temperaturas e quantidades de aditivos) utilizada também garantiu uma compactabilidade adequada *in situ*. É de referir que o volume de vazios da MBT é consideravelmente menor, o que pode originar alguns problemas de estabilidade.

**Quadro 2.7 – Características das misturas aplicadas no trecho experimental (Ferreira, 2009)**

Propriedade avaliada	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit
Porcentagem de betume (%)	EN 12697-1	5,0	5,1
Baridade máxima teórica (kg/m <sup>3</sup> )	EN 12697-5	2418	2414
Volume de vazios (%)	EN 12697-8	2,7	2,0
Sensibilidade à água - ITSR (%)	EN 12697-12	85,8	85,2
Resistência conservada (%)	MIL-STD-620A	106,0	103,0

Foram retiradas lajes do trecho experimental para determinação da resistência à deformação permanente, com base em ensaios de pista. Os valores obtidos podem ser observados no Quadro 2.8.

**Quadro 2.8 – Valores de resistência à deformação permanente de lajes retiradas do pavimento (Ferreira, 2009)**

Propriedade avaliada	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit
Volume de vazios da laje (%)	EN 12697-8	2,4	2,1
Ensaio de pista - $WTS_{AIR}$ (mm/10 <sup>3</sup> )	EN 12697-22	0,25	0,69

Verificou-se que a resistência à deformação permanente da MBT era inferior à que se observou na MBQ. Comparando estes resultados com os obtidos em laboratório foi possível verificar que os valores de resistência à deformação permanente das misturas aplicadas no trecho foram, aproximadamente, metade dos obtidos em laboratório. Esta situação alertou para o eventual problema de contaminação com fuel.

Para confirmar esta teoria, e dado que tinham sido recolhidas, em obra, amostras dos ligantes em quantidade suficiente, ainda antes da produção das misturas para o trecho experimental, foram produzidas novamente em laboratório lajes para o ensaio de pista, com a mesma composição granulométrica do trecho experimental. Estas lajes tinham como objetivo verificar os valores de resistência à deformação permanente determinados nas lajes retiradas do trecho experimental. Os resultados que foram obtidos apresentam-se no Quadro 2.9.

**Quadro 2.9 – Valores da resistência à deformação permanente de lajes moldadas em laboratório com betume recolhido em obra (Ferreira, 2009)**

Propriedade avaliada	Norma de ensaio	MBQ 50/70	MBT 50/70 Sasobit
Volume de vazios da laje (%)	EN 12697-8	3,2	3,1
Ensaio de pista - $WTS_{AIR}$ (mm/10 <sup>3</sup> )	EN 12697-22	0,10	0,12

Os resultados obtidos confirmaram os valores da validação em laboratório, afastando a possibilidade de ter ocorrido algum problema na mistura do aditivo com o betume, e confirmando a contaminação com fuel das misturas produzidas no trecho experimental (Ferreira, 2009).

## Estudo 2

O segundo estudo foi apresentado num artigo com o título “Mezclas Bituminosas Fabricadas a Baja Temperatura. Experiencia Española” (Pérez & Pérez, 2009).

Neste estudo foram realizados ensaios experimentais com o objetivo de comparar uma mistura convencional e uma mistura temperada, ambas do tipo AC 16 Surf 50/70 como agregados siliciosos, com a mesma formulação e com a composição granulométrica apresentada no Quadro 2.10.

**Quadro 2.10 – Composição granulométrica da mistura AC 16 Surf 50/70 (Pérez & Pérez, 2009)**

<b>Peneiro</b>	20	12,5	8	4	2	0,5	0,250	0,125	0,063
<b>% passa</b>	100	84,9	68,4	50,9	37,3	19,4	14,8	10,8	6,7

As misturas foram fabricadas em central contínua, foram carregadas em camiões, aplicadas em obra e posteriormente caracterizadas.

Relativamente à mistura temperada, a percentagem de betume adicionado foi de 5.1 e a temperatura de fabrico da mistura em central e medida no camião de transporte durante o seu carregamento foi de 95°C.

A temperatura da mistura à chegada à obra era de 84°C e a sua aplicação ocorreu sem qualquer problema. É de referir que a mistura apresentava uma boa trabalhabilidade aquando da realização da junta longitudinal apesar de já ter passado um período de tempo considerável. A temperatura de compactação foi de 82°C e garantiu ao pavimento a coesão necessária.

No estudo referido o processo de fabrico da mistura temperada foi não aquecer totalmente os agregados. O aproveitamento da humidade dos agregados, para além de poupar energia, modifica a reologia do betume permitindo o fabrico e aplicação das misturas a temperaturas inferiores a 100°C, sendo que a única modificação necessária é a adaptação aos tempos de compactação.

Neste artigo é referido que, em laboratório, para caracterizar a mistura temperada não foi realizado o ensaio de Marshall pois não seria possível aplicar uma correta compactação por impacto devido à baixa temperatura de fabrico e à presença de gotas de água à superfície. O facto de se estar num espaço fechado, não permite a eliminação de humidade residual da mistura impossibilitando a compactação por impacto. Assim, foram fabricados provetes com as mesmas dimensões que os provetes de Marshall, mas recorrendo ao processo de compactação giratória. Posteriormente foram determinadas algumas características dos provetes tal como se pode observar no Quadro 2.11.

**Quadro 2.11 – Comparação das características de uma mistura convencional e de uma mistura temperada (Pérez & Pérez, 2009)**

Propriedade avaliada	Norma de ensaio	Mistura Convencional (Marshall - Compactação por impacto)	Mistura Temperada (Compactação giratória)
Estabilidade (kN)		14,8	12
Deformação (mm)	NLT - 159	2,8	3,2
Baridade aparente (kg/m <sup>3</sup> )		2392	2306
Sensibilidade à água - ITSr (%)	EN 12697 - 12	95	91
Ensaio de pista (mm)	EN 12697 - 22	0,075	0,08

Observando os resultados obtidos em laboratório constatou-se que os valores foram semelhantes para as duas misturas, ou seja, ambas apresentaram um bom desempenho e cumpriram os requisitos normativos correspondentes.

Com este estudo comprovou-se que é possível fabricar misturas a temperaturas inferiores às praticadas nas misturas convencionais, garantindo igualmente um bom comportamento e mantendo as mesmas características e a mesma formulação da mistura a quente (Pérez & Pérez, 2009).

### Estudo 3

O terceiro estudo foi apresentado num relatório denominado “Warm Mix Asphalt Study: Laboratory Test Results for AkzoNobel Rediset™ WMX” (Jones et al., 2010).

Neste estudo foram analisados ensaios laboratoriais que comparam o desempenho de uma mistura convencional e de uma mistura temperada com a incorporação do aditivo Rediset.

A mistura estudada era composta por agregados graníticos e por um betume PG 64-10, o que equivale a uma mistura do tipo AC 20 Base 60/70 (Illinois Department of Transportation, 2005), (Subagio & Kosasih, 2005), (Tia, 2006). A percentagem ótima de betume foi de 5.9 e a percentagem de Rediset adicionada à mistura temperada foi de 2% do peso do betume.

Apesar de no relatório terem sido apresentados diversos ensaios como o ensaio de corte, de fadiga, resistência à humidade (Tensile Strength Retained), ensaio de pista e ensaio de Cantabro, apenas serão analisados, no presente trabalho, o ensaio de pista (“Hamburg Wheel-Track Test”), dado que é o único que poderá ser utilizado como termo de comparação.

As misturas ensaiadas foram produzidas de acordo com as normas da AASHTO PP3-94 *Standard Practice for Preparing Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens By Means of the Rolling Wheel Compactor Test Method*. A mistura convencional foi produzida a uma temperatura de 155°C e compactada entre 145 e 155°C enquanto a mistura temperada foi produzida a 120°C e compactada entre 110 e 120°C.

Para o ensaio de pista foram fabricadas lajes de 320 x 260 x 120 mm e as suas características bem como os valores resultantes do ensaio de pista encontram-se no Quadro 2.12. Na Figura 2.10, na Figura 2.11, na Figura 2.12 e na Figura 2.13 pode observar-se a evolução das curvas médias e máximas da profundidade de rodeira, para a mistura convencional e para a mistura temperada.

**Quadro 2.12 – Comparação das características de uma mistura convencional e de uma mistura temperada com o aditivo Rediset (Jones et al., 2010)**

Propriedade avaliada	Norma de ensaio	Mistura Convencional	Mistura Temperada Rediset
Baridade aparente (kg/m <sup>3</sup> )	AASHTO T -166	2451	2456
Baridade máxima teórica (kg/m <sup>3</sup> )	ASTM D-2041	2576	2575
Volume de vazios (%)	-	4,9	4,6
Profundidade de rodeira - 10000 pass (mm)	AASHTO T - 324	7,2	8,2
Profundidade de rodeira - 20000 pass (mm)		16,8	16,5

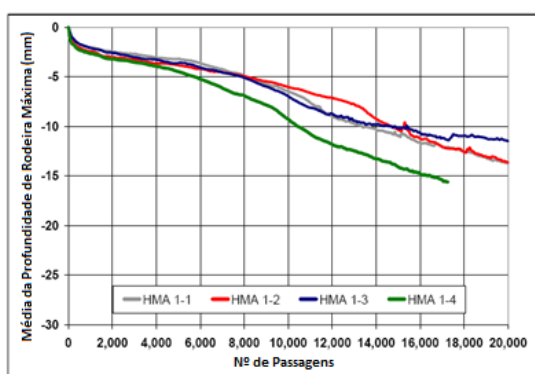


Figura 2.10 - Média da profundidade de rodeira máxima da mistura convencional (Jones et al., 2010)

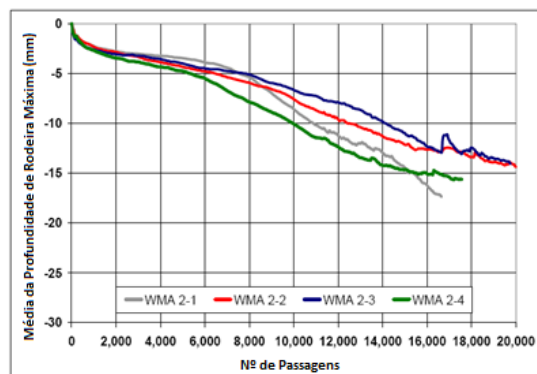


Figura 2.11 - Média da profundidade de rodeira máxima da mistura temperada (Jones et al., 2010)

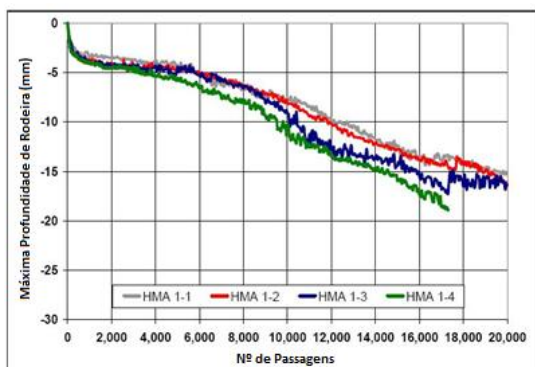


Figura 2.12 - Profundidade de rodeira máxima da mistura convencional (Jones et al., 2010)

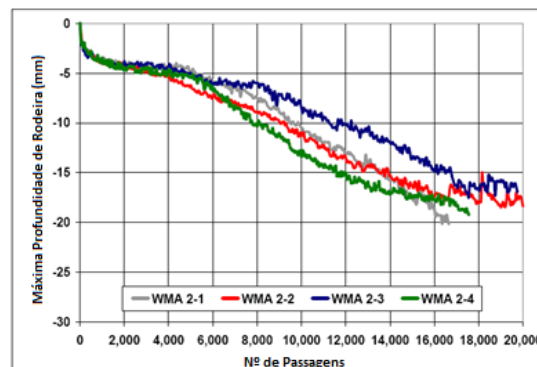


Figura 2.13 - Profundidade de rodeira máxima da mistura temperada (Jones et al., 2010)

Os resultados mostraram tendências semelhantes para ambas as misturas, principalmente a profundidade de rodeira às 20000 passagens que apresentou valores praticamente análogos. No geral, em todos os parâmetros avaliados neste ensaio, a mistura betuminosa temperada mostrou ter um desempenho bastante semelhante ao da MBC.

Neste estudo concluiu-se que o facto de se produzir e compactar a mistura temperada a temperaturas inferiores não gerou problemas, em laboratório. O volume de vazios de cada amostra foi bastante semelhante para as duas misturas, o que indicou que os provetes da mistura temperada foram fabricados e compactados de forma adequada.

Os operadores de laboratório referiram que não surgiram problemas na preparação dos provetes a temperaturas reduzidas e que desta forma as condições de trabalho são melhores e mais seguras.

Os ensaios de laboratório comprovaram que a utilização de Rediset para a produção e compactação da mistura a temperaturas inferiores não afetou, de forma significativa, o desempenho do betão betuminoso, quando comparado com provetes produzidos a temperaturas convencionais. De facto, os resultados obtidos indicaram um desempenho bastante semelhante para a mistura convencional e para a mistura temperada (Jones et al., 2010).

#### **Estudo 4**

O quarto estudo foi apresentado num artigo com o título “Estudio del ángulo de contacto de betunes aditivados y su efecto sobre distintas propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas” (Redondo et al., 2010).

Apesar de terem sido realizados diversos ensaios como por exemplo o de sensibilidade à água, módulo de rigidez e fadiga, apenas serão analisados, no presente trabalho, o ensaio de sensibilidade à água, dado que é o único que poderá ser utilizado como termo de comparação.

Neste estudo foram realizados alguns ensaios experimentais, com o intuito de comparar diversas misturas; uma mistura de referência do tipo AC 16 Surf 60/70 e quatro misturas do mesmo tipo mas com incorporação de aditivos, sendo que se encontrou referência à natureza dos agregados ensaiados. As misturas são compostas e encontram-se identificadas da seguinte forma:

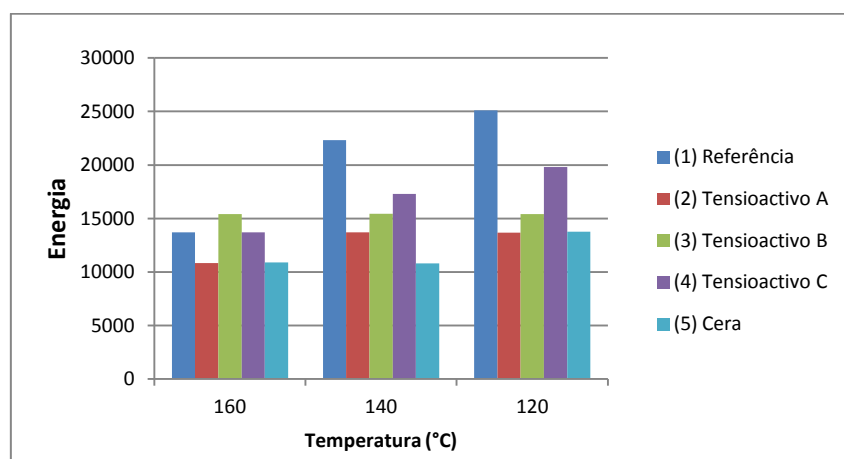
- (1) AC 16 Surf 60/70 (referência)
- (2) AC 16 Surf 60/70 + 0.4% Tensioactivo A
- (3) AC 16 Surf 60/70 + 0.4% Tensioactivo B
- (4) AC 16 Surf 60/70 + 0.4% Tensioactivo C
- (5) AC 16 Surf 60/70 + 3% Cera

Um dos parâmetros avaliados neste estudo experimental foi a energia de compactação. Assim, mediu-se a energia de compactação necessária para compactar a mistura betuminosa, que segundo os autores foi

expressa em unidades CEI (adimensional), até se alcançar 92% da densidade máxima. Quanto menor o índice, mais fácil se torna o processo de compactação. Os resultados obtidos podem ser observados no Quadro 2.13 e na Figura 2.14.

**Quadro 2.13 – Resultados das energias de compactação a temperaturas diferentes (Redondo et al., 2010)**

Mistura AC 16 Surf 60/70	CEI		
	Temperatura (°C)		
	160	140	120
(1) Referência	13690	22329	25088
(2) Tensioactivo A	10818	13705	13682
(3) Tensioactivo B	15421	15445	15406
(4) Tensioactivo C	13719	17301	19795
(5) Cera	10896	10815	13756



**Figura 2.14 - Representação das energias de compactação a temperaturas diferentes (Redondo et al., 2010)**

Como se pode observar, à temperatura de 160°C, o valor da energia de compactação da mistura de referência não diferiu muito do valor da energia de compactação das misturas temperadas. Contudo, à medida que se foi diminuindo a temperatura de fabrico e compactação, as diferenças entre a mistura de referência e as misturas temperadas foram aumentando. Verificou-se que a energia de compactação para as misturas temperadas foi bastante menor devido ao facto de os aditivos diminuírem o ângulo de contacto agregado/betume no caso dos tensioactivos; e no caso das ceras, porque estas produzem uma redução na viscosidade do betume.

Foi também realizado um ensaio de sensibilidade à água, em que se estudou a adesividade agregado-ligante com base na norma EN 12697-12 (CEN, 2008). Este ensaio analisa o efeito de saturação e de imersão acelerada na água e da resistência à tração indireta em provetes do tipo Marshall. Foram fabricados oito provetes com a mistura AC 16 Surf 60/70, com percentagem ótima de betume de 4,9%, para cada tipo de aditivo, para as três temperaturas de estudo. Os provetes foram separados em dois

grupos de forma homogénea segundo a sua densidade. Um dos grupos foi conservado numa sala à temperatura de 20°C e o outro foi submerso em água à temperatura de 40°C, durante três dias, depois de terem sido colocados em vácuo durante 30 minutos. Antes de se efetuar o ensaio, os provetes foram colocados numa câmara a 15°C durante duas horas. Posteriormente, realizou-se o ensaio de tração indireta aos dois grupos de provetes segundo a norma EN 12697-22 (CEN, 2003b), cujos resultados se podem observar na Figura 2.15.

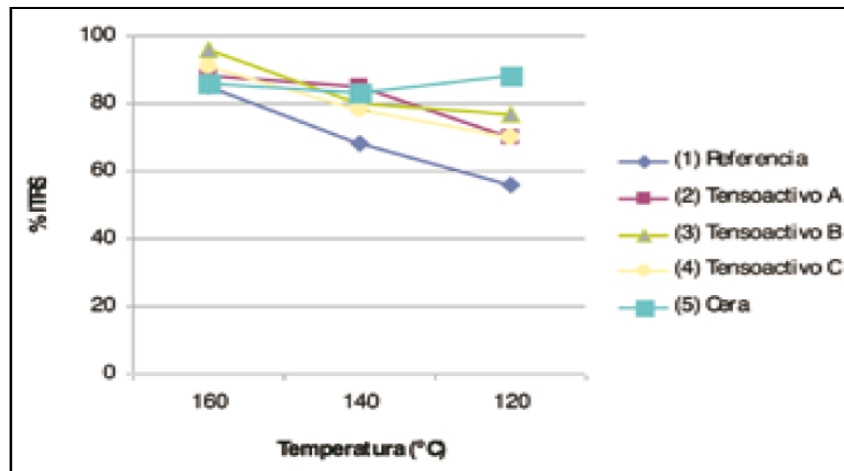


Figura 2.15 – Resultados da resistência conservadas a diferentes temperaturas (Redondo et al., 2010)

Pelos resultados obtidos constatou-se que, a 160°C, todas as misturas têm uma resistência conservada próxima dos 90%. À medida que se foi diminuindo a temperatura surgiu uma queda considerável na mistura de referência chegando a atingir uma resistência conservada de 55% aos 120°C. Nas misturas aditivadas verificou-se que a diminuição da temperatura provoca uma diminuição da resistência conservada bastante menos acentuada, a 120°C a resistência conservada ronda os 80%. Este efeito já era de esperar no caso dos tensioactivos uma vez que a redução da tensão interfacial (melhor recobrimento dos agregados pelo betume) evita que a água provoque a desagregação do betume do agregado.

Este estudo permitiu concluir que os aditivos do tipo tensioactivos reduzem o ângulo de contacto betume/agregado e aumentando, conseqüentemente, o recobrimento do agregado pelo betume. Esta redução do ângulo de contacto poderá estar relacionada com a necessidade de uma menor energia de compactação para as misturas temperadas. Verificou-se ainda que as misturas temperadas são menos susceptíveis à diminuição das temperaturas de fabrico e compactação no que respeita às suas propriedades mecânicas, como por exemplo a sensibilidade à água (Redondo et al., 2010).

### Estudo 5

O quinto estudo foi apresentado num artigo denominado “ El Proyecto Fénix en la UPC. Mezclas Semicalientes” (Reyes-Ortiz et al., 2009).

Este estudo teve como objetivo comparar o comportamento e as propriedades de uma mistura convencional e de uma mistura temperada fabricada com betumes modificados com ceras e tensioactivos. O estudo foi dividido em duas etapas: a primeira etapa consistiu na determinação da percentagem ótima de cera e de tensioactivo a adicionar ao betume B60/70 para o fabrico da mistura temperada; e a segunda etapa consistiu no estudo do comportamento da mistura convencional e da mistura temperada.

Na primeira etapa foram adicionadas percentagens de ceras e de tensioactivos, entre 0.1 e 4%, ao betume, e foi medida a viscosidade rotacional com o objetivo de definir a percentagem ótima de aditivo bem como a temperatura de fabrico e de compactação adequada.

A segunda etapa iniciou-se com a definição da curva granulométrica S-20 centrada no fuso da norma espanhola, tal como se pode observar na Figura 2.16.

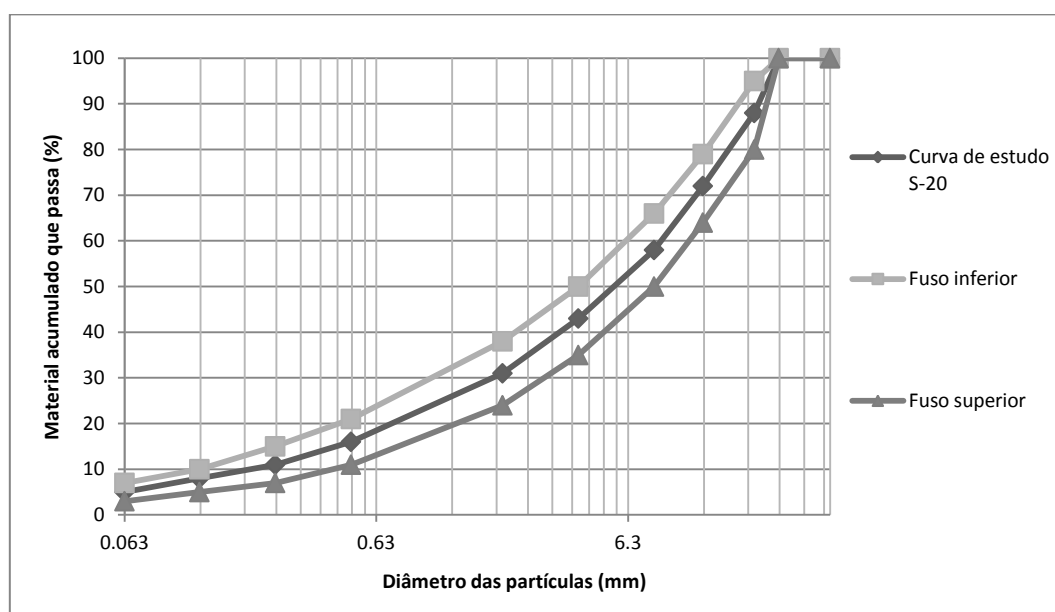
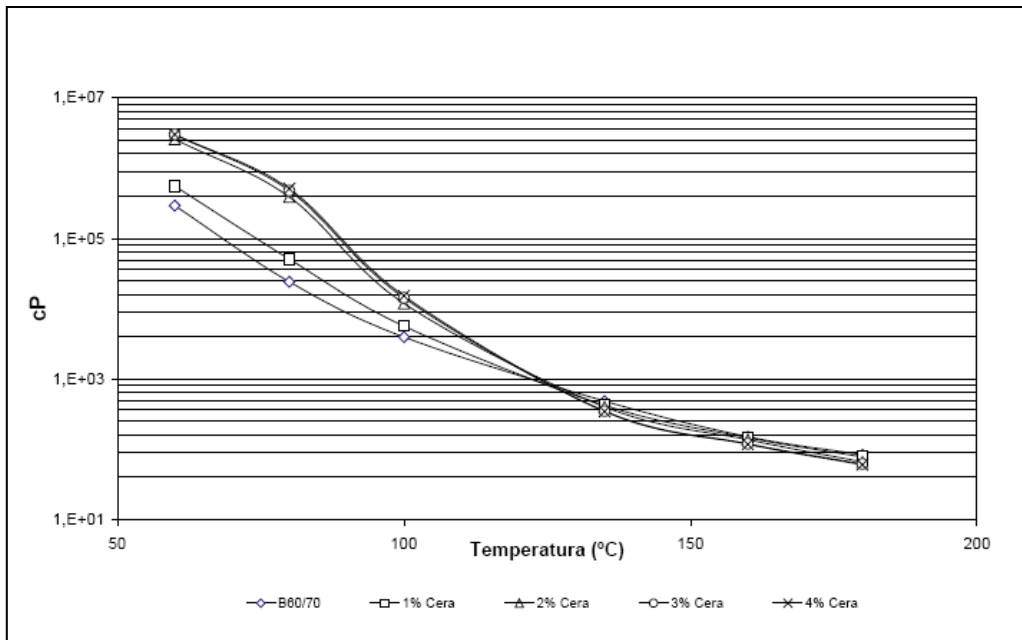


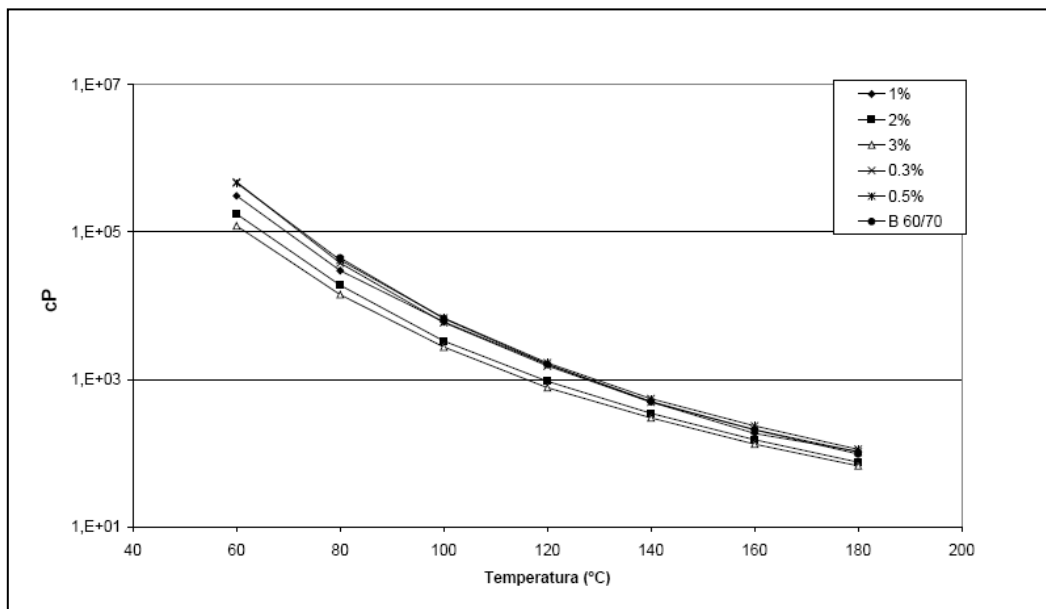
Figura 2.16 – Curva granulométrica S-20 da norma espanhola (Ministerio de Fomento, 2004 citado em Reyes-Ortiz et al., 2009)

Numa primeira fase do ensaio experimental foi determinada a viscosidade rotacional do betume modificado com diferentes percentagens de ceras e tensioactivos (1 a 4% para as ceras e 0,5 a 1 % para os tensioactivos). Verificou-se que a viscosidade do betume modificado com ceras diminui ligeiramente para temperaturas superiores a 130°C. Para temperaturas inferiores a 130°C, a viscosidade dos betumes aditivados aumenta significativamente, exceto para o betume com 1% de aditivo, cujo comportamento é muito semelhante ao do betume convencional. Com base nos resultados apresentados na Figura 2.17 definiu-se que a percentagem ótima de ceras seria de 3%.



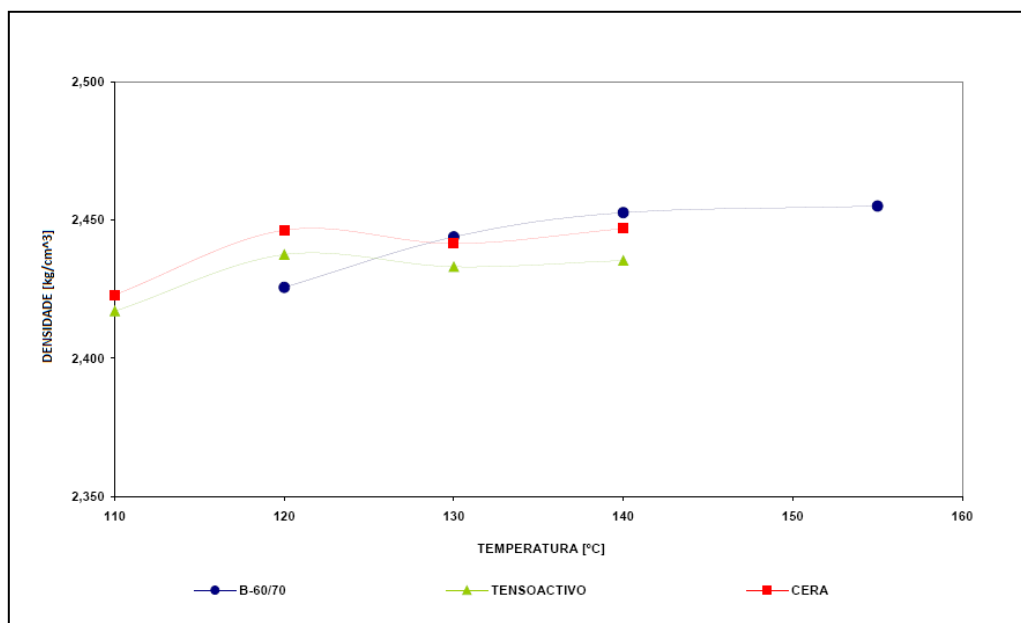
**Figura 2.17 – Viscosidade Rotacional em função da temperatura para betume modificado com ceras (Reyes-Ortiz et al., 2009)**

Relativamente aos tensoactivos verificou-se que estes atuavam como plastificantes diminuindo a viscosidade do ligante, para todas as temperaturas e em percentagens de aditivo superiores a 0,5%, como se pode observar na Figura 2.18. Assim, para não comprometer as características mecânicas do betume, a percentagem ótima de tensoactivo definida para o estudo foi de 0,3%.



**Figura 2.18 - Viscosidade Rotacional em função da temperatura para betume modificado com tensoactivos (Reyes-Ortiz et al., 2009)**

Os resultados obtidos na segunda etapa experimental mostraram a influência da temperatura de compactação e do tipo de aditivo utilizado na densidade da mistura estudada. Com base nos resultados da Figura 2.19 constatou-se que a baridade da mistura diminui à medida que a temperatura de compactação diminui, independentemente do tipo de betume utilizado. Verificou-se que existiu um intervalo de temperaturas (120 a 140°C) onde a variação da densidade foi muito pequena e que abaixo desse intervalo a densidade diminuiu consideravelmente.



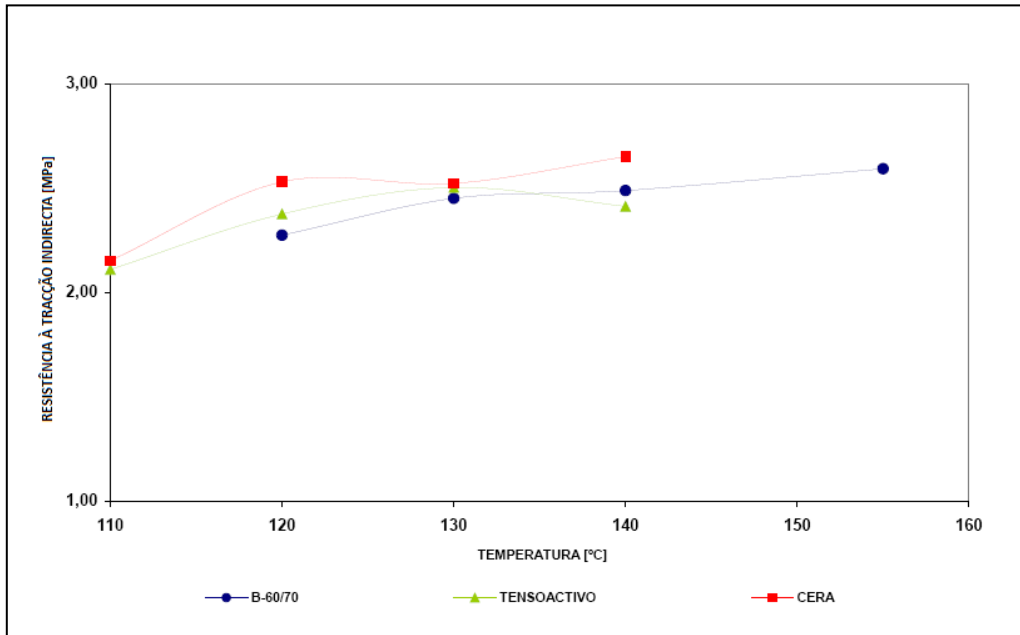
**Figura 2.19 – Densidade de misturas temperadas em função da temperatura de compactação (Reyes-Ortiz et al., 2009)**

Neste estudo foi também avaliada a resistência à tração indireta da mistura para diversas temperaturas de compactação. Os resultados apresentados na Figura 2.20 mostraram que, para temperaturas compreendidas entre 120 e 140°C, a mistura fabricada com betume modificado com ceras apresentou uma resistência superior à das restantes misturas (B 60/60 e com tensioactivos). No caso da mistura fabricada com betume modificado com tensioactivos, a sua resistência foi um pouco inferior à da mistura convencional. Para uma temperatura de compactação de 110°C, a resistência das misturas que contêm aditivos foi significativamente inferior à da mistura convencional (betume 60/70 e compactada a 155°C).

As conclusões apuradas indicaram que ao adicionar 3% de ceras ao betume B60/70 surgiu um aumento na resistência à tração indireta das misturas temperadas, especialmente no intervalo de temperaturas entre os 120 e os 140°C. No entanto, verificou-se que se a compactação da mistura for efetuada abaixo dos 110°C, a resistência à tração indireta diminui substancialmente.

Por último, constatou-se mais uma vez com este estudo que fabricar e compactar misturas temperadas entre os 120 e os 140°C gerou a possibilidade de poupar energia nos processos de fabrico, aplicação e

compactação do pavimento, diminuiu a emissão de gases com efeito de estufa e proporcionou melhores condições de trabalho aos trabalhadores (Reyes-Ortiz et al., 2009).



**Figura 2.20 – Resistência à tracção indirecta de misturas temperadas em função da temperatura de compactação (Reyes-Ortiz et al., 2009)**

Para além dos ensaios analisados neste trabalho foram realizados outros como o módulo de rigidez e fadiga, que não foram referidos pois não servem de termo de comparação com o trabalho realizado na presente dissertação.



### 3. Descrição dos Trabalhos Experimentais

#### 3.1. Enquadramento

Na presente dissertação desenvolveu-se um estudo laboratorial com o objetivo de avaliar o desempenho de quatro misturas betuminosas. Neste capítulo descrevem-se os ensaios laboratoriais executados e apresentam-se os resultados obtidos. A Figura 3.1 mostra o fluxograma explicativo do trabalho experimental que se realizou e dos resultados que dele foram obtidos.

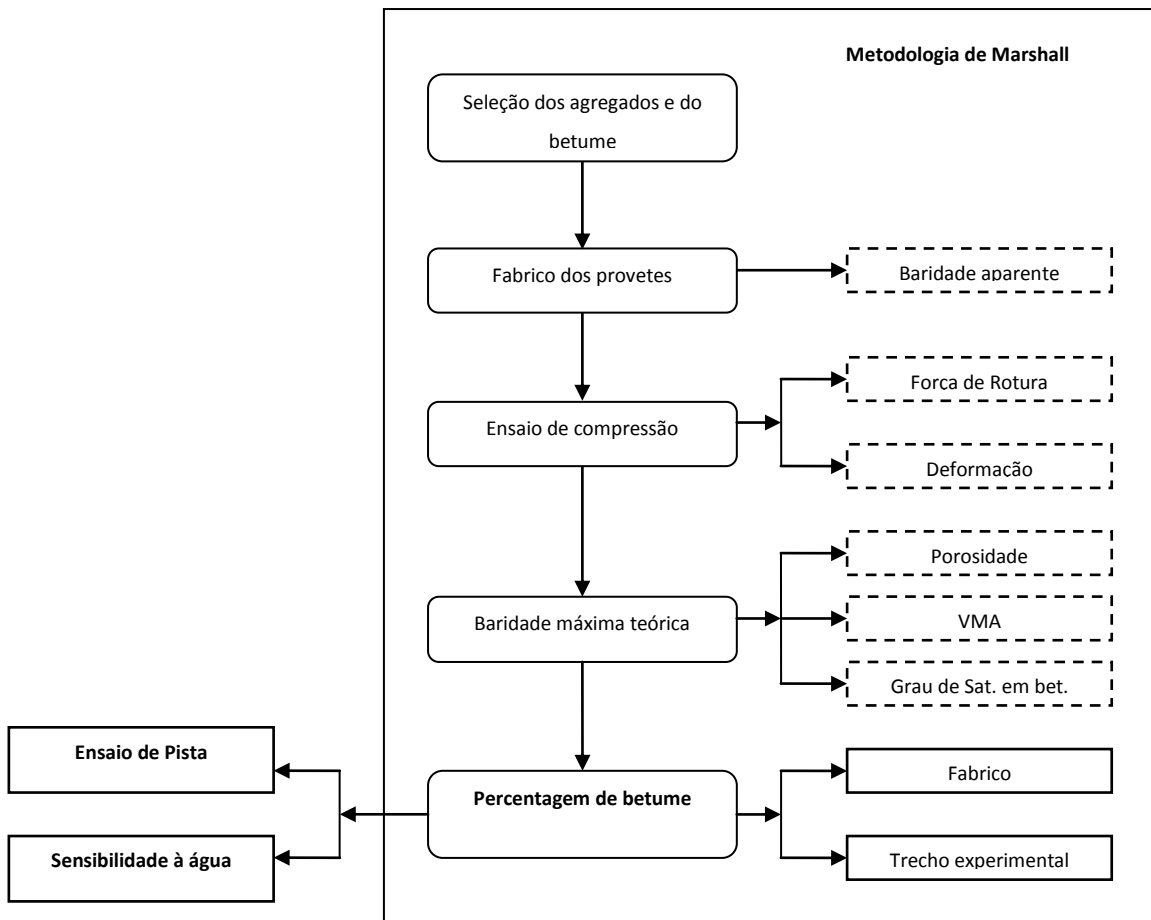


Figura 3.1 – Fluxograma explicativo do estudo laboratorial (adaptado de Picado Santos, 2010)

A mistura estudada é do tipo AC 20 base 35/50, constituída por agregados calcários da pedreira Quinta da Sra. da Luz em Rio Maior, propriedade da Tecnovia S.A.. Trata-se de uma mistura produzida e comercializada pela empresa e, como tal, foi possível ter como base alguns estudos já realizados por esta empresa. Contudo, foram introduzidas algumas variantes nesta mistura que serão referidas mais à frente. Foram estudadas três misturas; uma com incorporação do aditivo Sasobit, outra com incorporação do aditivo Rediset e uma última com incorporação do aditivo Rediset e de fibras Viatop, cujas propriedades foram comparadas com a MBC. A partir daqui as misturas betuminosas analisadas serão denominadas de acordo com o indicado no Quadro 3.1.

**Quadro 3.1 – Denominação das misturas betuminosas analisadas**

Denominação	Mistura	Tipo	Aditivo
M0	Convencional	AC 20 Base 35/50	-
M1	Temperada	AC 20 Base 35/50	Sasobit
M2	Temperada	AC 20 Base 35/50	Rediset
M3	Temperada	AC 20 Base 35/50	Rediset e Viatop

Os aditivos Sasobit e Rediset foram escolhidos para ser alvo de estudo no presente trabalho porque ainda não existem muitos estudos que avaliem o comportamento de misturas betuminosas com estes produtos. Os motivos pelos quais se analisou uma mistura com o aditivo Rediset e com as fibras Viatop foram para se poder comparar o desempenho desta mistura com o desempenho da mistura unicamente com Rediset, para se verificar se existe uma melhoria na trabalhabilidade da mistura e para efetuar uma comparação económica.

### 3.2. Caracterização dos componentes das misturas

As misturas são compostas por três ou quatro componentes: agregados, betume, aditivos e fibras.

Relativamente aos agregados, as misturas betuminosas analisadas na presente dissertação contêm três frações de agregados: Brita 10/20 mm; Brita 4/10 mm e Areão 0/4 mm.

De acordo com a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000), a Tecnovia determinou as granulometrias dos agregados anteriormente apresentados e realizou o ensaio da massa volúmica e da absorção de água (NP EN 1097-6 (IPQ, 2003a)), do índice de achatamento (NP EN 933-3 (IPQ, 2002a)), do coeficiente de desgaste pela máquina de Los Angeles (NP EN 1097-2 (IPQ, 2002c)) e do azul metileno (NP EN 933-9 (IPQ, 2002b)), cujos resultados se resumem no Quadro 3.2.

**Quadro 3.2 - Resultados dos ensaios realizados aos agregados (Tecnovia S.A., 2011)**

Fração	10/20 mm	4/10 mm	0/4 mm	10/14 mm	
Índice de achatamento (%)	12	13	-	-	
Azul de metileno da fração 0/0.125mm (g/kg)	-	-	0,2	-	
Los Angeles	-	-	-	27	
MicroDeval	-	-	-	17	
Massa volúmica das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_a$	2,70	2,72	2,68	-
	$\rho_{rd}$	2,63	2,64	2,60	-
	$\rho_{ssd}$	2,66	2,67	2,63	-
Absorção de água (%)	1,0	1,0	1,2	-	

$\rho_a$  é a massa volúmica do material impermeável das partículas;  $\rho_{rd}$  é a massa volúmica do material impermeável das partículas secas em estufa e  $\rho_{ssd}$  é a massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca.

No que respeita ao ligante betuminoso, utilizou-se no estudo do Betão Betuminoso um betume de pavimentação 35/50, fornecido pela CEPISA. As características deste betume estão conforme com as exigências da norma EN 12591 (CEN, 2009).

Tal como já foi referido, em cada mistura betuminosa temperada foi incorporado um aditivo ou um aditivo juntamente com fibras. Os aditivos utilizados foram o Sasobit da Sasol Wax, o Rediset da Akzo Nobel e as fibras Viatop da J.Rettenmaier & Söhne.

### 3.3. Formulação da mistura

Este estudo teve por base o fuso granulométrico apresentado no Quadro 3.4, referente à mistura “AC 20 Base (MB) – Macadame Betuminoso”, definida na norma EN 13108-1 (IPQ, 2008).

Com base nas granulometrias das frações de agregados constituintes da mistura, foram determinadas as proporções dos materiais granulares a adotar, de modo a obter uma mistura de agregados que se ajustasse, tão bem quanto possível, ao fuso granulométrico que consta na norma EN 13108-1 (IPQ, 2008). A curva granulométrica que melhor se ajusta, apresentando uma forma regular, é aquela que resulta da combinação de percentagem de agregados, apresentada no Quadro 3.3.

**Quadro 3.3 – Percentagem de agregados a incorporar na mistura (Tecnovia S.A., 2011)**

Agregados	Percentagem
Brita 10/20 mm	32
Brita 4/10 mm	20
Areão 0/4 mm	48

Relativamente aos aditivos, adotou-se o seguinte procedimento: na mistura M1, adicionou-se uma percentagem de Sasobit de cerca de 4% do peso do betume; na mistura M2 adicionou-se cerca de 2% do peso do betume de Rediset; e na mistura M3 adicionou-se cerca de 1,5% do peso do betume de Rediset e cerca de 5% do peso do betume de fibras Viatop. A determinação da percentagem de aditivo e de fibras a adicionar às misturas baseou-se nos valores médios propostos pelos fornecedores destes produtos.

No Quadro 3.4 e na Figura 3.2 mostra-se o enquadramento da curva granulométrica de estudo no fuso granulométrico da mistura de acordo com o especificado na norma EN 13108-1 (IPQ, 2008).

Quadro 3.4 – Curva granulométrica de estudo (Fuso da norma EN 13108-1:2008)

Abertura das malhas dos peneiros ISO (mm)	Curva granulométrica de estudo (% passados)	Fuso granulométrico "EN 13108-1" (% passados)
31,5	100	100
20	97	90 – 100
16	86	
14	80	
12,5	74	57 – 86
10	67	
8	60	
6,3	55	
4	46	34 – 49
2	31	26 – 41
1	19	
0,5	14	12 – 26
0,25	8	
0,125	6	4 – 14
0,063	4,50	2 – 7

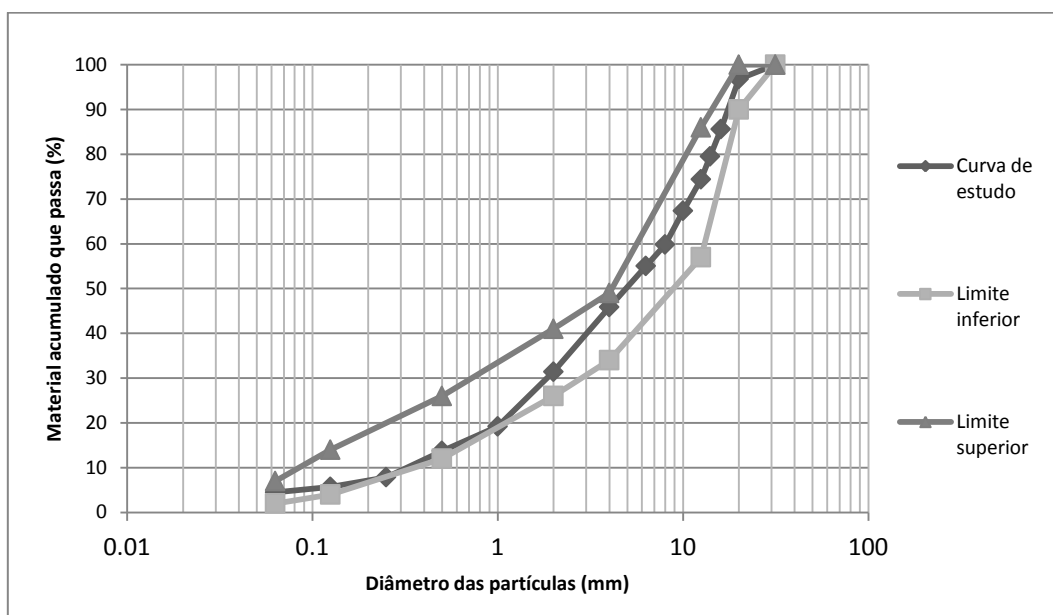


Figura 3.2 – Enquadramento da curva granulométrica de estudo no fuso da norma EN 131108-1:2008

### 3.4. Estudo de composição Marshall

#### 3.4.1. Preparação dos provetes para ensaio

No estudo Marshall utilizaram-se provetes preparados de acordo com o procedimento preconizado na norma NP EN 12697-30 (IPQ, 2004b).

Na execução dos provetes, começou-se por aquecer os agregados na estufa que se apresenta na Figura 3.3, até uma temperatura de 120°C. De seguida adicionou-se o aditivo, à temperatura ambiente, e o ligante a uma temperatura de 160°C e misturou-se manualmente durante o tempo necessário até que o agregado estivesse completamente envolvido pelo ligante. A mistura foi realizada num recipiente de alumínio sobre placa elétrica, de forma a garantir que a mistura na produção se mantivesse à temperatura constante de 120°C, tal como se pode observar na Figura 3.4.



Figura 3.3 - Estufa



Figura 3.4 – Fabrico da mistura em recipiente de alumínio sobre placa elétrica

O provete cilíndrico foi compactado, à temperatura de 100°C, em molde de base circular com um diâmetro de 100 mm e uma altura nominal de 63,5 mm, pela aplicação de 75 pancadas em cada face da amostra, em condições normalizadas. As pancadas são resultantes da queda do pilão do compactador de impacto que se pode observar na Figura 3.5.



**Figura 3.5 – Compactador de impacto**

Usando esta metodologia, compactaram-se, a partir das misturas fabricadas, os provetes 1 a 4 (com 3,5% de betume), 5 a 8 (com 4,0% de betume), 9 a 12 (com 4,5% de betume), 12 a 16 (com 5,0% de betume) e 16 a 20 (com 5,5% de betume).

Depois de compactados, deixaram-se os provetes nos moldes durante 24 horas. Passado este tempo de cura, retiraram-se os provetes dos moldes, com recurso ao equipamento apresentado na Figura 3.6, e mediu-se a altura (h) e o diâmetro (d) de cada um, para verificar a conformidade com a norma NP EN 12697-30 (IPQ, 2004b).

No entanto, antes de se compactarem os grupos de quatro provetes correspondentes a cada percentagem de betume, foi necessário, também para cada percentagem de betume, fabricar a mistura com as quantidades de material necessárias para preparar dois provetes adicionais. Assim, preparou-se um provete de teste que teve como função determinar a quantidade de material necessária que garantisse que a altura do provete, depois de compactado, cumpria a norma NP EN 12697-30 (IPQ, 2004b). O material restante utilizou-se posteriormente na determinação da Baridade Máxima Teórica.



**Figura 3.6 – Desmoldagem do provete**

Este procedimento realizou-se para as três misturas em estudo: a mistura M1, a mistura M2 e a mistura M3.

É de referir que, previamente à introdução das fibras Viatop na mistura, foi necessário esmagá-las com o auxílio de um almofariz, dado que a dimensão dos seus grânulos era excessiva, o que poderia dificultar o seu envolvimento pelo betume.

Apesar de não terem sido fabricados provetes com a mistura M0 para o estudo Marshall pois estes dados foram fornecidos pela Tecnovia, é de referir que a temperatura de produção desta mistura é de 150°C e que a temperatura de compactação é de 140°C.

#### **3.4.2. Baridade Aparente**

Após a preparação dos provetes, determinou-se a baridade aparente de cada um com base no método B da norma NP EN 12697-6 (IPQ, 2003b).

Começou por determinar-se a massa do provete seco ( $m_1$ ). De seguida determinou-se a massa volúmica da água à temperatura de ensaio, imergiu-se o provete em água, durante cerca de 30 minutos, até este se encontrar saturado, e mediu-se a temperatura da água. Determinou-se, posteriormente, a massa do provete saturado quando imerso ( $m_2$ ), removeu-se o provete da água, secou-se as gotas da superfície com uma toalha húmida e finalmente determinou-se, através de pesagem ao ar, a massa do provete saturado com a superfície seca imediatamente após secagem ( $m_3$ ).

Este procedimento foi executado para os 20 provetes de cada mistura, ou seja, para um total de 60 provetes.

O cálculo da baridade do provete foi efetuado a partir da fórmula seguinte:

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (3.1)$$

onde:

$\rho_{bssd}$  é a baridade de um provete saturado com superfície seca, em  $\text{kg/m}^3$ ;

$m_1$  é a massa do provete seco, em g;

$m_2$  é a massa do provete em água, em g;

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

$\rho_w$  é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio, em  $\text{kg/m}^3$ , com aproximação a 0.1  $\text{kg/m}^3$ .

Dado que a densidade da água varia consoante a temperatura a que esta se encontra foi necessário aplicar um fator de correção que consta da norma EN 12697-6 (IPQ, 2003b).

Os resultados obtidos no ensaio da baridade aparente apresentam-se no Quadro 3.5.

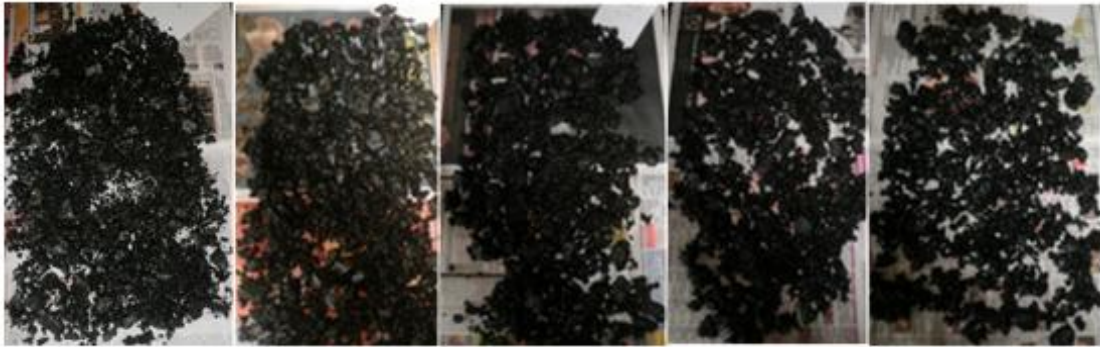
**Quadro 3.5 – Resultados experimentais da baridade aparente dos provetes**

% Betume	Nº do proвете	Baridade Aparente ( $\text{kg/m}^3$ )							
		M0		M1		M2		M3	
3,5%	1	2337	2345	2286	2289	2313	2289	2294	2275
	2	2343		2305		2299		2268	
	3	2354		2282		2271		2269	
	4	2346		2285		2275		2270	
4,0%	5	2365	2367	2244	2260	2310	2296	2283	2276
	6	2374		2264		2287		2272	
	7	2366		2296		2306		2280	
	8	2364		2237		2280		2270	
4,5%	9	2391	2394	2312	2310	2346	2299	2278	2284
	10	2404		2326		2307		2296	
	11	2389		2293		2271		2283	
	12	2391		2311		2271		2281	
5,0%	13	2388	2382	2302	2312	2350	2327	2321	2323
	14	2378		2353		2314		2331	
	15	2381		2315		2316		2314	
	16	2381		2278		2329		2326	
5,5%	17	2350	2353	2335	2327	2353	2316	2310	2324
	18	2352		2330		2249		2324	
	19	2358		2324		2338		2325	
	20	2351		2320		2322		2339	

### 3.4.3. Baridade Máxima Teórica

Utilizando uma amostra de cada mistura betuminosa, determinou-se a baridade máxima teórica da mistura de acordo com o procedimento A (volumétrico) da norma EN 12697-5 (CEN, 2002a).

Começou-se por pesar o conjunto do picnómetro de vácuo ( $m'_1$ ). De seguida, pesou-se o picnómetro de vácuo juntamente com a amostra ( $m'_2$ ). Na Figura 3.7 podem-se observar as amostras da mistura para cada percentagem de betume (de 3,5% a 5,5%).



**Figura 3.7 - Amostras da mistura betuminosa para as várias percentagens de betume, para o ensaio da baridade máxima teórica (de 3,5% a 5,5%, da esquerda para a direita, respetivamente)**

Posteriormente, registou-se o volume do picnómetro ( $V_p$ ), que se mostra na Figura 3.8. Encheu-se o picnómetro com água, até um máximo de 30 mm abaixo da junta superior e extraiu-se o ar residual através da aplicação de uma pressão de 4kPa durante 15 minutos. Este procedimento foi assistido por vibração do picnómetro através de um agitador. Finalmente, encheu-se com água o restante volume do picnómetro e pesou-se a sua massa ( $m'_3$ ). Mediu-se também a temperatura da água para se determinar a sua densidade, aplicando o fator de correção correspondente.



**Figura 3.8 – Picnómetro de vácuo com agitador**

A baridade máxima da mistura betuminosa ( $\rho_{mv}$ ) calculou-se com base na seguinte expressão:

$$\rho_{mv} = \frac{m'_2 - m'_1}{1000 \times \left( V_p - \frac{(m'_3 - m'_2)}{\rho_w} \right)} \quad (3.2)$$

onde:

$\rho_{mv}$  é a baridade máxima da mistura betuminosa, em  $\text{kg/m}^3$ ;

$m'_1$  é a massa do picnómetro mais acessórios, em g;

$m'_2$  é a massa do picnómetro mais acessórios e amostra, em g;

$m'_3$  é a massa do picnómetro mais acessórios, amostra e água, em g;

$V_p$  é o volume do picnómetro, preenchido até à referência ( $\text{m}^3$ );

$\rho_w$  é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio, em  $\text{kg/m}^3$ , com aproximação a 0.1  $\text{kg/m}^3$ .

A determinação dos vazios dos provetes efetuou-se com base na norma EN 12697-8 (CEN, 2003a).

A porosidade calculou-se com base na seguinte expressão:

$$V_m = \frac{\rho_{mv} - \rho_{bssd}}{\rho_{mv}} \times 100\% (v/v) \quad (3.3)$$

onde:

$V_m$  é o conteúdo de vazios do provete, em %;

$\rho_{mv}$  é a baridade máxima da mistura betuminosa, em  $\text{kg/m}^3$ ;

$\rho_{bssd}$  é a baridade de um provete saturado com superfície seca, em  $\text{kg/m}^3$ .

O VMA (conteúdo de vazios na mistura de agregado) calculou-se com base na seguinte expressão:

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_{bssd}}{\rho_B} \% (v/v) \quad (3.4)$$

onde:

$V_m$  é o conteúdo de vazios do provete, em %;

B é o conteúdo de ligante betuminoso do provete, em %;

$\rho_B$  é a baridade do ligante betuminoso, em  $\text{kg/m}^3$ .

Os resultados obtidos no ensaio da baridade máxima teórica, da porosidade e do volume de vazios no agregado encontram-se no Quadro 3.6, no Quadro 3.7 e no Quadro 3.8, respetivamente.

**Quadro 3.6– Resultados experimentais da baridade máxima teórica**

% Betume	Baridade Máxima Teórica (kg/m <sup>3</sup> )			
	M0	M1	M2	M3
3,5	2544	2459	2477	2468
4,0	2517	2436	2419	2453
4,5	2495	2443	2416	2414
5,0	2462	2380	2395	2365
5,5	2444	2383	2366	2341

**Quadro 3.7 – Resultados experimentais da porosidade**

% Betume	Porosidade (%)			
	M0	M1	M2	M3
3,5	7,8	6,9	7,6	7,8
4,0	6,0	7,2	5,1	7,2
4,5	4,1	5,4	4,9	5,4
5,0	3,2	2,9	2,8	1,8
5,5	3,7	2,3	2,1	0,7

**Quadro 3.8 – Resultados experimentais do volume de vazios no agregado (VMA)**

% Betume	VMA (%)			
	M0	M1	M2	M3
3,5	16,8	14,7	15,4	15,6
4,0	16,2	16,0	14,0	16,0
4,5	15,6	15,5	14,9	15,4
5,0	15,8	14,1	14,1	13,1
5,5	17,3	14,8	14,5	13,1

#### 3.4.4. Estabilidade e Deformação Marshall

O ensaio de compressão Marshall que permitiu determinar a estabilidade e a deformação foi realizado com base na norma NP EN 12697-34 (IPQ, 2004b). O ensaio foi executado num período entre 4 a 32 horas após a desmoldagem dos provetes, e foi efetuado sobre séries de 4 provetes preparados e compactados segundo a norma NP EN 12697-30 (IPQ, 2004a), aos quais foi, previamente, determinada a baridade aparente de acordo com a norma NP EN 12697-6 (IPQ, 2003b).

Começou-se por aquecer o provete à temperatura de 60°C, no banho termoestático, entre 40 e 60 minutos, como se pode observar na Figura 3.9. Limpou-se a cabeça do estabilómetro e das guias laterais e lubrificou-se as guias para que a cabeça superior deslize livremente. O estabilómetro foi pré-aquecido à temperatura de 60°C durante 30 minutos, no banho termoestático.

Retirou-se o provete do banho termoestático e colocou-se sobre a cabeça inferior do estabilómetro. Colocou-se a cabeça superior do estabilómetro sobre o provete e centrou-se o conjunto na máquina para ensaios de compressão. Confirmou-se as ligações da máquina para ensaios de compressão ao equipamento de aquisição de dados, que se encontra na Figura 3.10, para leitura de dados.

Aplicou-se uma carga ao provete à velocidade de 50mm/min, até que fosse atingida a rotura do provete. Finalmente, registaram-se os valores de estabilidade e deformação, de acordo com as leituras indicadas no equipamento de aquisição de dados.



**Figura 3.9 – Banho termoestático**



**Figura 3.10 – Exemplo de curva força-deformação registada no equipamento de aquisição de dados (Digimax)**

Na Figura 3.11 mostra-se o equipamento efetivamente utilizado no ensaio e na Figura 3.12 pode-se observar a compressão de um provete.



**Figura 3.11 – Equipamento utilizado no ensaio de compressão Marshall**



**Figura 3.12 – Compressão do provete Marshall**

Na Figura 3.13 representa-se o esquema de montagem usado no ensaio de compressão Marshall.

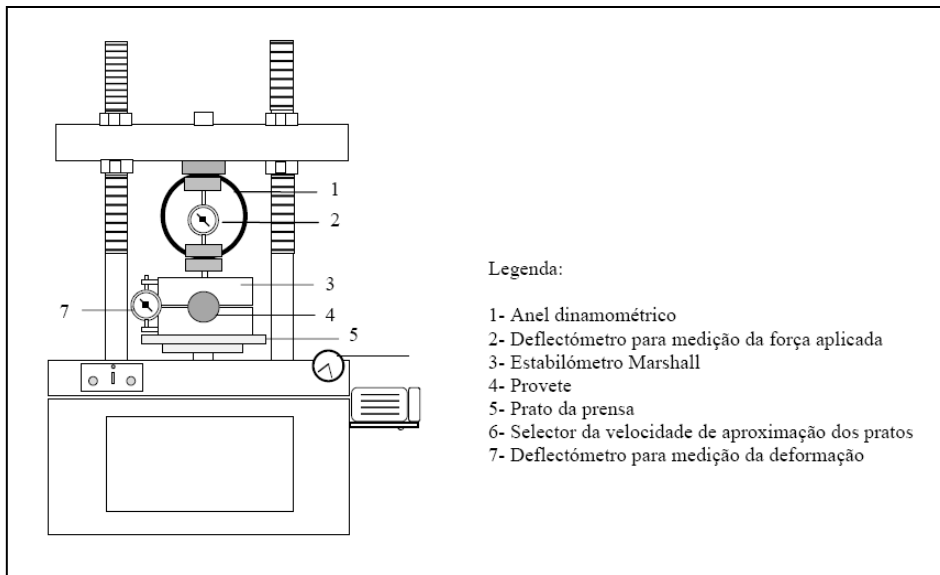


Figura 3.13 – Esquema de montagem usado no ensaio de compressão Marshall (Branco et al., 1998)

Os resultados obtidos para a estabilidade Marshall encontram-se no Quadro 3.9 e para a deformação Marshall encontram-se no Quadro 3.10.

Quadro 3.9 – Resultados experimentais da estabilidade Marshall

% Betume	Nº do provete	Estabilidade (kN)							
		M0		M1		M2		M3	
3,5	1	10,1	9,7	10,6	11,4	12,1	10,4	9,5	10,0
	2	9,3		11,7		11,3		10,2	
	3	9,6		12,6		9,2		11,2	
	4	9,8		10,6		9,1		9,3	
4,0	5	12,2	11,6	9,3	9,9	8,9	10,4	8,1	8,7
	6	11,3		9,7		10,6		7,4	
	7	11,6		12,2		11,3		9,5	
	8	11,1		8,5		10,7		10,0	
4,5	9	11,3	12,2	10,3	11,2	13,4	10,8	9,3	11,0
	10	12,6		10,9		10,4		11,9	
	11	12,9		11,8		9,9		11,6	
	12	12,1		11,7		9,7		11,1	
5,0	13	11,0	11,1	11,4	11,0	11,2	10,4	9,1	10,1
	14	11,7		12,2		9,5		10,9	
	15	10,7		11,4		9,3		9,8	
	16	11,1		9,2		11,5		10,7	
5,5	17	8,7	9,1	12,5	11,3	12,4	10,3	9,8	10,6
	18	9,2		11,0		8,3		10,6	
	19	8,9		11,6		10,1		11,1	
	20	9,4		10,3		10,2		10,8	

Quadro 3.10 – Resultados experimentais da deformação Marshall

% Betume	Nº do provete	Deformação (mm)							
		M0		M1		M2		M3	
3,5	1	2,63	2,68	3,90	5,00	4,43	5,77	4,88	4,85
	2	2,71		5,59		5,98		5,10	
	3	2,73		5,50		7,22		3,97	
	4	2,66		5,03		5,43		5,45	
4,0	5	3,11	3,35	6,32	6,03	9,43	7,40	6,13	5,79
	6	3,55		6,49		4,43		4,85	
	7	3,33		5,90		11,37		6,24	
	8	3,41		5,42		4,38		5,94	
4,5	9	3,62	3,65	4,03	4,24	5,00	4,61	3,56	5,06
	10	3,71		3,47		4,74		4,58	
	11	3,62		5,18		4,08		5,78	
	12	3,65		4,26		4,62		6,32	
5,0	13	4,21	4,29	5,93	4,68	3,99	4,04	5,04	6,26
	14	4,36		3,85		4,28		6,77	
	15	4,41		4,96		3,48		5,93	
	16	4,19		3,99		4,42		7,30	
5,5	17	5,36	5,29	4,13	4,35	7,27	5,12	6,39	5,76
	18	5,21		4,39		5,27		5,53	
	19	5,16		3,81		3,91		5,56	
	20	5,42		5,09		4,02		5,57	

Na Figura 3.14 pode-se observar o aspeto de um provete após o ensaio de compressão Marshall.



Figura 3.14 - Provete após o ensaio de compressão Marshall

### 3.4.5. Determinação da percentagem ótima de betume

A percentagem ótima de betume de uma mistura betuminosa é determinada calculando a média das percentagens correspondentes à máxima estabilidade, à máxima baridade aparente e ao valor médio dos limites da porosidade.

Como se pode observar através do Quadro 3.11, constatou-se que os valores de algumas das grandezas obtidas no ensaio Marshall, para as três MBT, não seguem a tendência normal, dificultando a indicação da percentagem ótima de betume com base nos valores obtidos nos ensaios realizados a estas misturas. Desta forma, optou-se por prosseguir os estudos adotando, para as três MBT, a percentagem ótima de betume definida para a MBC, ou seja, 4,5%, dado que as MBT apresentam valores de estabilidade consistentes.

Quadro 3.11 – Resultados do ensaio Marshall

	% de Betume	Baridade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Baridade Máxima Teórica (kg/m <sup>3</sup> )	Estabilidade (kN)	Deformação (mm)	Porosidade (%)	VMA (%)
M1	3,5	2289	2459	11,3	5,01	6,9	14,7
	4,0	2260	2436	10,0	6,03	7,2	16,0
	4,5	2310	2443	11,1	4,30	5,4	15,5
	5,0	2312	2380	10,6	4,68	2,9	14,1
	5,5	2327	2383	11,1	4,36	2,3	14,8
M2	3,5	2289	2477	10,6	5,77	7,6	15,4
	4,0	2296	2419	10,3	7,40	5,1	14,0
	4,5	2299	2416	10,8	4,61	4,9	14,9
	5,0	2327	2395	10,1	4,04	2,8	14,1
	5,5	2316	2365	10,1	5,12	2,1	14,5
M3	3,5	2275	2468	10,3	4,85	7,8	15,6
	4,0	2276	2453	9,1	5,79	7,2	16,0
	4,5	2284	2414	11,3	5,06	5,4	15,4
	5,0	2323	2365	9,9	6,26	1,8	13,1
	5,5	2324	2341	10,4	5,76	0,7	13,1
M0	3,5	2345	2544	9,7	2,68	7,8	16,8
	4,0	2367	2517	11,5	3,35	6,0	15,1
	4,5	2394	2495	12,2	3,65	4,2	14,4
	5,0	2382	2462	11,1	4,29	3,2	14,7
	5,5	2353	2444	9,0	5,29	3,7	16,2

### 3.5. Ensaio de sensibilidade à água (ITSR)

O ensaio de sensibilidade à água foi efetuado com base na norma EN 12697-12 (CEN, 2008).

Começou-se por preparar 6 provetes cilíndricos que foram compactados por impacto, conforme a norma NP EN 12697-30 (IPQ, 2004a), com 75 pancadas de cada lado, com diâmetro de 100 mm e altura de 63,5 mm, como se observa na Figura 3.15.

Os provetes fabricados com a mistura M0 foram fabricados a 150°C e compactados a 140°C e os provetes fabricados com as misturas M1, M2 e M3 foram fabricados a 120°C e compactados a 100°C.

Determinaram-se as dimensões e a baridade aparente de cada provete de acordo com as normas EN 12697-29 (CEN, 2002b) e NP EN 12697-6 (IPQ, 2003b), respetivamente.



Figura 3.15 – Provetes preparados para o ensaio de sensibilidade à água

Os 6 provetes foram divididos em dois grupos de 3 tendo, aproximadamente, as mesmas dimensões e baridade, sendo que a diferença de alturas médias e de baridades médias entre os dois grupos de provetes não excedeu, respetivamente, 5 mm e 15 Kg/m<sup>3</sup>, tal como determina a norma. Os grupos denominaram-se como “molhados” e “secos”, sendo sujeitos a procedimentos de ensaio diferentes.

Aguardou-se um período de 24 horas, desde a compactação, e colocaram-se os provetes “molhados” no picnómetro de vácuo preenchido com água a 20°C, até um nível de 20 mm acima da face superior dos provetes, tal como se pode observar na Figura 3.16. Aplicou-se vácuo de modo a obter uma pressão absoluta de 6,7 kPa (50 mmHg), dentro de um período de 10 minutos. As condições de pressão referidas foram mantidas durante 30 minutos, deixando depois a pressão atmosférica entrar lentamente no picnómetro. Os provetes permaneceram submersos em água durante mais 30 minutos, à pressão atmosférica.



Figura 3.16 – Picnómetro de vácuo

Determinaram-se as dimensões de cada provete “molhado” após o vácuo, de acordo com a norma EN 12697-29 (CEN, 2002b), de forma a calcular o volume de cada um, sendo que os provetes que aumentaram mais de 2% em volume foram rejeitados. Finalmente, colocaram-se os provetes “molhados” no banho termoestático, a 40°C, por um período de 72 horas.

Os provetes “secos” ficaram armazenados numa superfície plana, à temperatura ambiente, na gama dos 20°C.

No final deste procedimento ensaiaram-se todos os provetes, de acordo com a norma EN 12697-23 (CEN, 2003c), para se determinar o índice de tração indireta (ITSR), que é a razão entre a resistência à tração indireta média do grupo de provetes “molhados” e do grupo de provetes “secos”.

Previamente ao ensaio, os provetes “molhados” e “secos” foram condicionados à temperatura de ensaio, cerca de 15°C, na câmara de temperatura controlada, apresentada na Figura 3.17, durante 2 horas, sendo que os provetes “molhados” encontravam-se colocados dentro de um banho e os provetes “secos” fora do banho.



**Figura 3.17 – Câmara de temperatura controlada**

Retiraram-se os provetes da câmara de temperatura controlada e colocaram-se na máquina de ensaios de compressão, com a cabeça adequada para ensaios de tensão indireta, como se pode observar na Figura 3.18. Iniciou-se a compressão do provete, aplicando uma carga diamétrica continuamente, à velocidade de deformação constante de 50 mm/min, após um período de transição de até 20% do tempo de carga, até que o pico de carga  $P_i$  fosse atingido e registado, através da leitura no equipamento de aquisição de dados. A compressão continuou até ocorrer a rotura física do provete, e de acordo com a norma EN 12697-23 (CEN, 2003c), registaram-se o tipo de rotura, e o estado dos agregados à

superfície (se se encontravam principalmente fraturados ou intactos). A partir do valor de  $P_i$  e das dimensões dos provetes calculou-se o valor da resistência à tração indireta (ITS).



Figura 3.18 – Máquina de ensaios de compressão com estabilômetro para ITS

Na Figura 3.19 pode-se observar o esquema do ensaio para a determinação da resistência conservada em tração indireta.

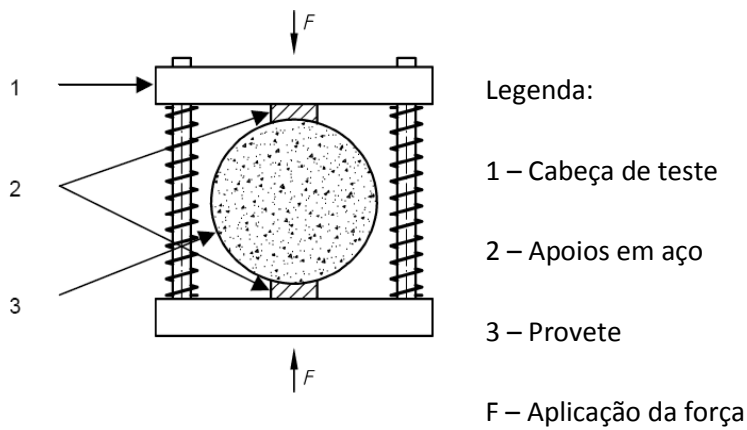


Figura 3.19 – Esquema do ensaio para a determinação da resistência conservada em tração indireta (adaptado de CEN, 2003)

A resistência conservada em tração indireta (ITSR) calculou-se com base na seguinte expressão:

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (3.5)$$

$$ITS = \frac{2.P}{\pi.d.h} \quad (3.6)$$

onde:

P é o pico de carga, em kN;

d é o diâmetro do provete, em mm;

h é a altura do provete, em mm;

ITSR é o valor da resistência conservada em tração indireta, em %;

ITS<sub>w</sub> é a média dos valores de ITS dos 3 provetes “molhados”, em GPa;

ITS<sub>d</sub> é a média dos valores de ITS dos 3 provetes “secos”, em GPa.

Os resultados obtidos para a resistência conservada em tração indireta encontram-se no Quadro 3.12.

**Quadro 3.12 – Resultados experimentais da resistência conservada em tração indireta**

ITSR (%)				
% Betume	M1	M2	M3	M0
4,0%	46,7	41,7	44,1	72,4
4,5%	42,4	49,0	47,6	73,8
5,0%	55,6	36,4	41,5	82,9

Após a rotura dos provetes, em todas as misturas analisadas, verificou-se que os agregados no grupo dos provetes “secos” se encontravam mais fraturados do que no grupo dos provetes “molhados”, o que significa que o condicionamento do grupo dos provetes “molhados” fez com que a ligação agregado-betume não fosse tão eficaz, o que resulta numa menor fracturação dos agregados nos provetes “molhados”.

Este fenómeno pode ser observado nas figuras seguintes, onde se encontram os provetes fabricados para o ensaio ITSR, após rotura, para a percentagem ótima de betume. Na fila superior encontra-se o grupo dos provetes “secos” e na fila inferior o grupo dos provetes “molhados”. A Figura 3.20, a Figura 3.21, a Figura 3.22 e a Figura 3.23 são referentes às misturas M1, M2, M3 e M0, respetivamente.

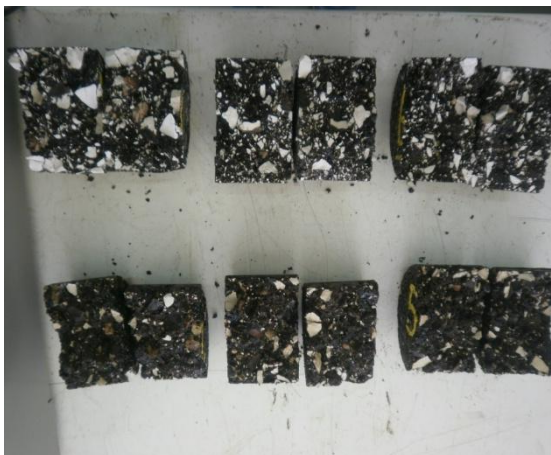


Figura 3.20 – Provetes fabricados com a mistura M1, após ruptura no ensaio ITSr



Figura 3.21 - Provetes fabricados com a mistura M2, após ruptura no ensaio ITSr

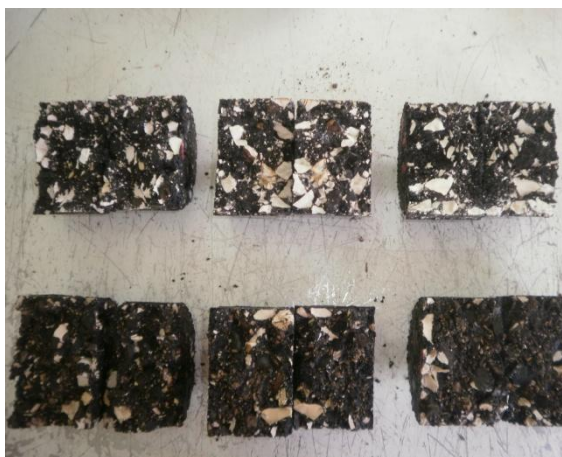


Figura 3.22 - Provetes fabricados com a mistura M3, após ruptura no ensaio ITSr

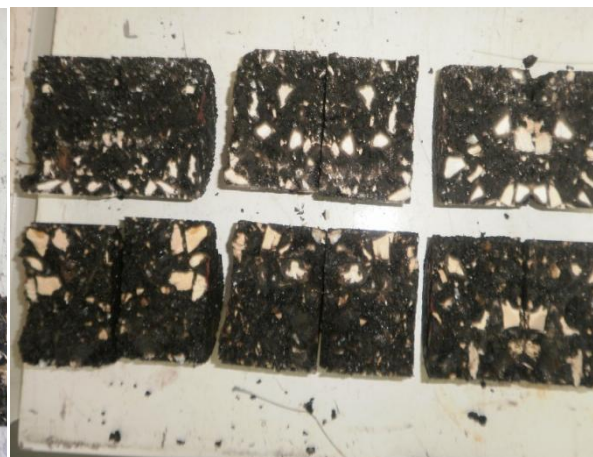


Figura 3.23 - Provetes fabricados com a mistura M0, após ruptura no ensaio ITSr

### 3.6. Ensaio de deformação permanente

O ensaio de resistência à deformação permanente, normalmente designado por ensaio de pista, permite avaliar a suscetibilidade à deformação da mistura betuminosa. Consiste na medição da profundidade de rodeira formada após passagens repetidas de uma roda normalizada sobre um provete, em condições de temperatura mais elevadas.

#### 3.6.1. Preparação dos provetes

Os provetes para o ensaio de pista foram preparados conforme o estipulado na norma EN 12697-33 (CEN, 2003d).

Começou-se por preparar a mistura betuminosa e introduzi-la no molde, devidamente montado, como se pode observa na Figura 3.24 e na Figura 3.25. Os provetes fabricados com a mistura M0 foram fabricados a 150°C e compactados a 140°C e os provetes fabricados com as misturas M1, M2 e M3

foram fabricados a 120°C e compactados a 100°C. A massa M a utilizar no ensaio (em kg) foi calculada com base na seguinte expressão:

$$M = 10^{-6} \cdot L \cdot l \cdot e \cdot \rho_m \cdot \frac{100 - v}{100} \quad (3.7)$$

onde:

L é a maior dimensão interior do molde, em mm;

l é a menor dimensão interior do molde, em mm;

e é a altura final do molde, em mm;

$\rho_m$  é a máxima densidade da mistura betuminosa, em kg/mm<sup>3</sup>;

v é o conteúdo de vazios da mistura, em %.



**Figura 3.24 – Preparação da mistura para o fabrico da laje do ensaio de pista**



**Figura 3.25 – Molde da laje para o ensaio de pista**

Colocou-se o molde no compactador “roller compacter” e a mistura foi compactada pela passagem repetida do compactador. Após a compactação retirou-se o molde e deixou-se arrefecer até à temperatura ambiente e desmoldou-se o provete por desmontagem das paredes laterais do molde, fixas por parafusos. Na Figura 3.26 pode-se observar o compactador e na Figura 3.27 o aspeto da laje após compactação.

Para cada percentagem de betume de todas as misturas betuminosas analisadas, foram fabricadas duas placas para serem ensaiadas à deformação permanente, sendo que após o ensaio efetuou-se uma média dos resultados obtidos com as duas placas.

### 3.6.2. Realização do ensaio

O ensaio realizou-se com base na norma EN 12697-22 (CEN, 2003b) sobre séries de dois provetes retangulares (lajetas) de dimensões 300 x 400 x 60 mm e compactados com pelo menos 48 horas. Os provetes foram armazenados na horizontal a uma temperatura inferior a 25°C.



Figura 3.26 – Compactador “ Roller Compacter”



Figura 3.27 – Laje para o ensaio de pista após compactação

Determinou-se a baridade geométrica de cada provete bem como a sua espessura real. Condicionou-se o provete a testar à temperatura de ensaio, cerca de 60°C, por um período de 4 horas, e pré aqueceu-se a máquina de ensaio à temperatura de ensaio. Foi realizado um furo no provete para introdução do termómetro do equipamento que foi, posteriormente, fixo na máquina de ensaios de pista. Na Figura 3.28 pode observar-se a máquina de ensaio.

O ensaio foi executado segundo o procedimento B da norma EN 12697-22 (CEN, 2003b), ou seja, com recurso a um equipamento pequeno e acondicionamento de ar. Foram aplicados 10 000 ciclos de carga, sendo que o ensaio foi dado como concluído após este número de ciclos ou quando atingiu uma profundidade de rodeira de 20 mm. Realizaram-se 40 leituras, uma a cada 250 ciclos, com 5 ciclos iniciais não contabilizáveis.

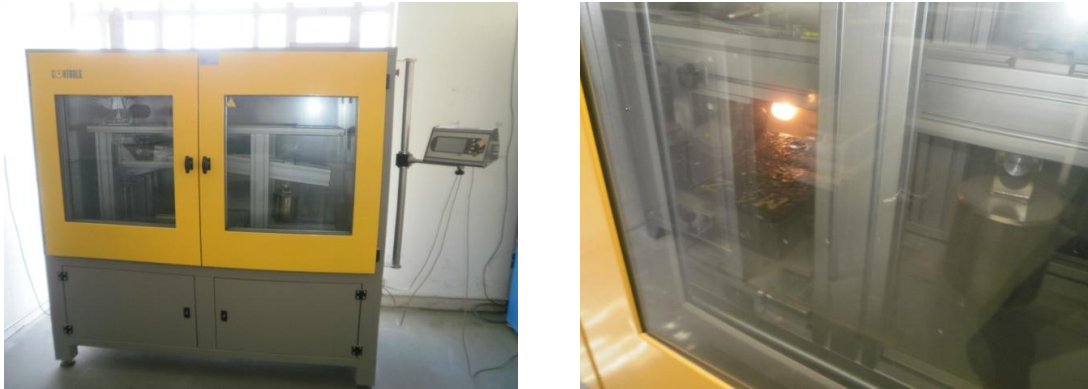


Figura 3.28 – Equipamento do ensaio de pista

Registaram-se os valores lidos no equipamento de aquisição de dados para a taxa de deformação – “Wheel Tracking Slope in Air” ( $WTS_{AIR}$ ) – e para a profundidade de rodeira nos dois provetes ensaiados – “Rut Depth in Air” ( $RD_{AIR}$ ). A variação da deformação permanente em ar é expressa pela seguinte equação:

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (3.8)$$

onde:

$d_{10000}$  e  $d_{5000}$  são a profundidade de rodeira para 10000 e 5000 ciclos, respetivamente, em mm;

$WTS_{AIR}$  é a taxa de deformação, em  $\text{mm}/10^3$  ciclos

Na Figura 3.29 pode-se observar o aspecto da laje após o ensaio de pista.



Figura 3.29 – Laje após ensaio de pista

Para determinar a baridade aparente das misturas betuminosas utilizadas no fabrico das placas para o ensaio de pista recorreu-se ao método B (provete saturado com a superfície seca) referido na norma NP EN 12697-6 (IPQ, 2003b). Após as placas terem sido ensaiadas, foram cortadas, em cada placa, entre duas as quatro vigas com uma largura de 50 mm e comprimento variável, tendo sempre em atenção que as vigas não contivessem a zona da placa deformada. Determinou-se, posteriormente, a baridade aparente de cada viga seguindo o procedimento B da norma NP EN 12697-6 (IPQ, 2003b), já descrito anteriormente. Na Figura 3.30, Figura 3.31 e na Figura 3.32 apresentam-se algumas imagens da forma como foi executado o ensaio para determinar a baridade aparentes das placas.



Figura 3.30 – Vigas cortadas das placas após ensaio



Figura 3.31 – Vigas imersas em água



Figura 3.32 - Pesagem da viga submersa em água

É de referir que, ao contrário do que se verificou no estudo Marshall, os resultados apresentados relativos à MBC para os ensaios de sensibilidade (ITSR) à água e de deformação permanente, não foram retirados do Relatório de Ensaio Tipo Inicial, fornecidos pela Tecnovia, uma vez que não tinham sido realizados pela empresa. Desta forma, os valores apresentados são resultado de ensaios executados exclusivamente para a presente dissertação.

Os resultados obtidos através do ensaio de pista bem como do ensaio da baridade aparente e da baridade geométrica das placas fabricadas com as misturas betuminosas analisadas encontram-se no Quadro 3.13, onde:

- $RD_{AIR}$  é a profundidade de rodeira, em mm.
- $PRD_{AIR}$  é média proporcional da profundidade de rodeira, em %.
- $WTS_{AIR}$  é a taxa de deformação, em  $mm/10^3$  ciclos

**Quadro 3.13 – Resultados da Baridade Aparente, da Baridade Geométrica e do Ensaio de Pista das placas fabricadas com as misturas betuminosas analisadas**

	M0			M1			M2			M3		
% Betume	4,0	4,5	5,0	4,0	4,5	5,0	4,0	4,5	5,0	4,0	4,5	5,0
Baridade Aparente ( $kg/m^3$ )	2296	2334	2343	2265	2284	2339	2309	2335	2325	2289	2270	2294
Baridade Geométrica ( $kg/m^3$ )	2186	2195	2245	2123	2139	2229	2192	2217	2228	2191	2339	2217
$RD_{AIR}$ (0,01mm)	7,69	7,8	10,27	1,98	2,17	2,37	4,03	3,44	3,82	3,94	6,14	5,93
$PRD_{AIR}$ (0,01%)	12,23	12,44	16,73	3,1	3,35	3,83	6,4	5,57	6,21	6,31	10,56	9,73
$WTS_{AIR}$ ( $mm/10^3$ ciclos)	0,265	0,334	0,489	0,038	0,056	0,054	0,092	0,101	0,094	0,106	0,226	0,186



## 4. Discussão de Resultados

### 4.1. Análise crítica do estudo de composição Marshall

Tal como já foi referido anteriormente, efetuou-se um estudo Marshall para determinar as principais grandezas que caracterizam as misturas betuminosas, ou seja, a baridade aparente, a porosidade, o volume de vazios no agregado compactado (VMA), a estabilidade e a deformação.

#### 4.1.1. Resultados da Baridade Aparente

Na Figura 4.1 apresenta-se um gráfico comparativo dos resultados obtidos para a baridade aparente, determinados com base na norma NP EN 12697-6 (IPQ, 2003b), das quatro misturas betuminosas analisadas.

A Figura 4.1 mostra que a baridade aparente da MBC (M0) é superior à baridade aparente das MBT (M1, M2 e M3), facto que se pode justificar com a diminuição da temperatura, tanto de fabrico como de compactação. Como já foi referido, os provetes para o estudo Marshall foram fabricados manualmente, o que dificultou a manutenção de uma temperatura constante, tanto na fase de fabrico como na fase de compactação. Após o fabrico dos provetes a 120°C, estes aguardavam à temperatura ambiente até atingirem os 100°C para poderem ser compactados. Assim, dadas as condições laboratoriais, é provável que a compactação tenha sido efetuada a uma temperatura ligeiramente inferior a 100°C, o que justifica uma diminuição da densidade aparente das misturas temperadas. É de notar que uma variação de apenas 1°C na fase de compactação tem influência nos resultados obtidos.



Figura 4.1 - Comparação da baridade aparente das misturas analisadas

#### 4.1.2. Resultados da Baridade Máxima Teórica

Na Figura 4.2 apresenta-se um gráfico comparativo dos resultados obtidos para a baridade máxima teórica, determinados com base na norma NP EN 12697-5 (CEN, 2002a), das quatro misturas betuminosas analisadas.

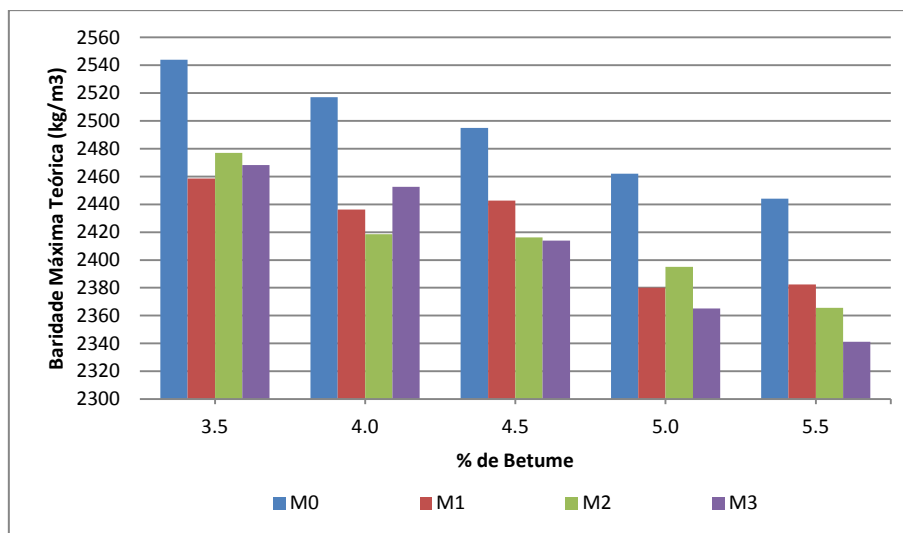


Figura 4.2 - Comparação da baridade máxima teórica das misturas analisadas

Analisando a baridade máxima teórica com base na Figura 4.2, pode igualmente constatar-se que a baridade da mistura betuminosa a quente é superior à baridade das misturas temperadas, possivelmente pelos motivos já enunciados na análise da baridade aparente. O ensaio da baridade máxima teórica permitiu determinar posteriormente a porosidade e o VMA, cuja análise comparativa se encontra na Figura 4.3 e na Figura 4.4, respetivamente.

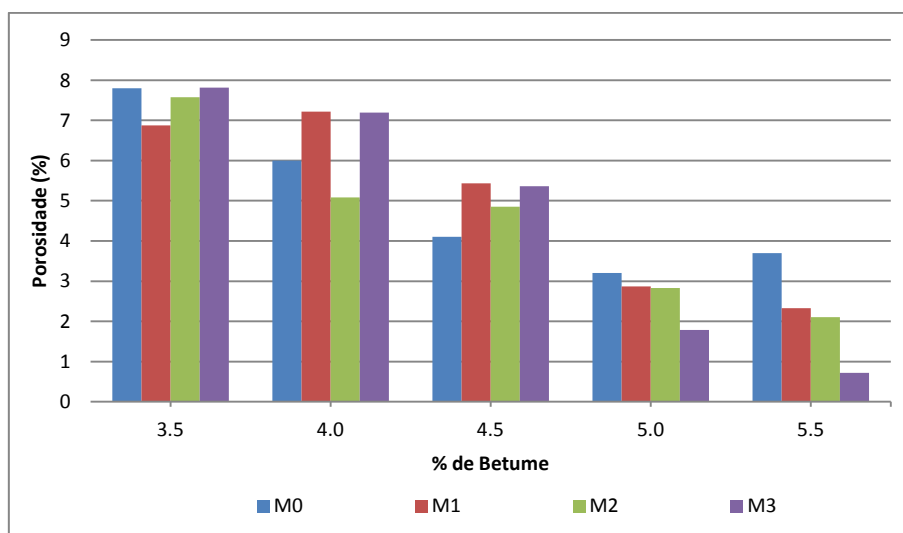


Figura 4.3 - Comparação da porosidade das misturas analisadas

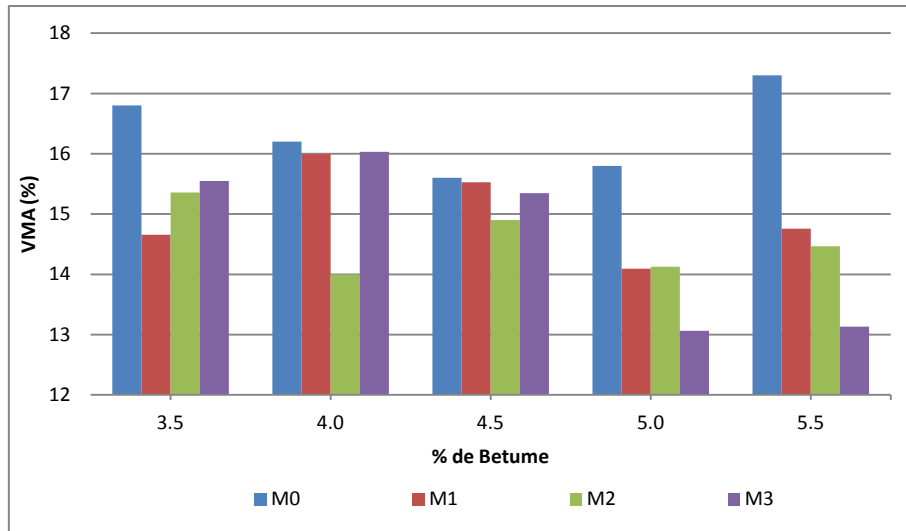


Figura 4.4 - Comparação do volume de vazios no agregado (VMA) das misturas analisadas

Pode verificar-se que para a percentagem de betume de 3,5 a porosidade das MBT é semelhante à da MBC, para 4,0% e 4,5% de betume a porosidade das MBT é superior à da MBC e para 5,0% e 5,5% a porosidade das MBT é inferior à da MBC.

Em relação ao volume de vazios no agregado, pode constatar-se que a mistura betuminosa a quente apresenta valores superiores aos das misturas temperadas, para as percentagens de betume de 3,5, 5,0 e 5,5. Nas duas restantes percentagens de betume, os valores são semelhantes, exceto na mistura M2.

#### 4.1.3. Resultados da Estabilidade e Deformação Marshall

Na Figura 4.5 e na Figura 4.6 apresenta-se, respetivamente, o gráfico comparativo dos resultados obtidos para a estabilidade e para a deformação das quatro misturas betuminosas analisadas.

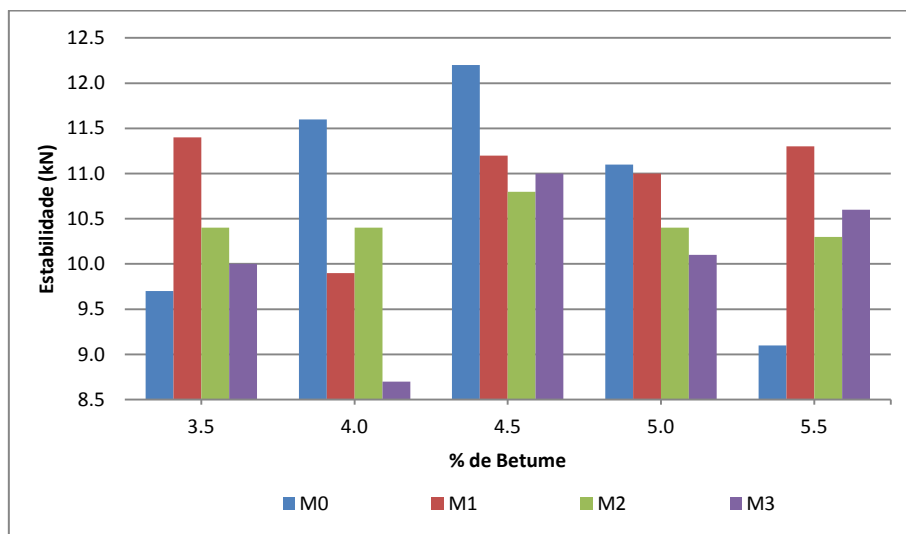


Figura 4.5 - Comparação da estabilidade de Marshall das misturas analisadas

Como se pode observar na Figura 4.5, os valores obtidos para a estabilidade das misturas temperadas não seguiram a tendência esperada. Normalmente, o comportamento é semelhante ao da mistura betuminosa a quente: para as menores percentagens de betume a estabilidade é mais reduzida, aumentando progressivamente até se atingir o valor de pico, para passar a diminuir com o aumento da quantidade de betume presente na mistura. Nas misturas temperadas isto não se verificou: na generalidade, constatou-se que os valores de estabilidade se mantiveram sensivelmente constantes, atingindo na maior parte das situações os 10kN. Apenas se verificou uma exceção na mistura M3, para a percentagem de betume de 4,0, com valor inferior.

No que respeita à deformação, como se pode observar na Figura 4.6, os valores obtidos para as misturas temperadas foram superiores aos da mistura betuminosa a quente e, do mesmo modo que a estabilidade, não seguiram a tendência esperada, ou seja, não aumentaram com o incremento da percentagem de betume, como acontece com a MBC. Este facto já seria de esperar uma vez que os valores da baridade para as misturas temperadas foram reduzidos.

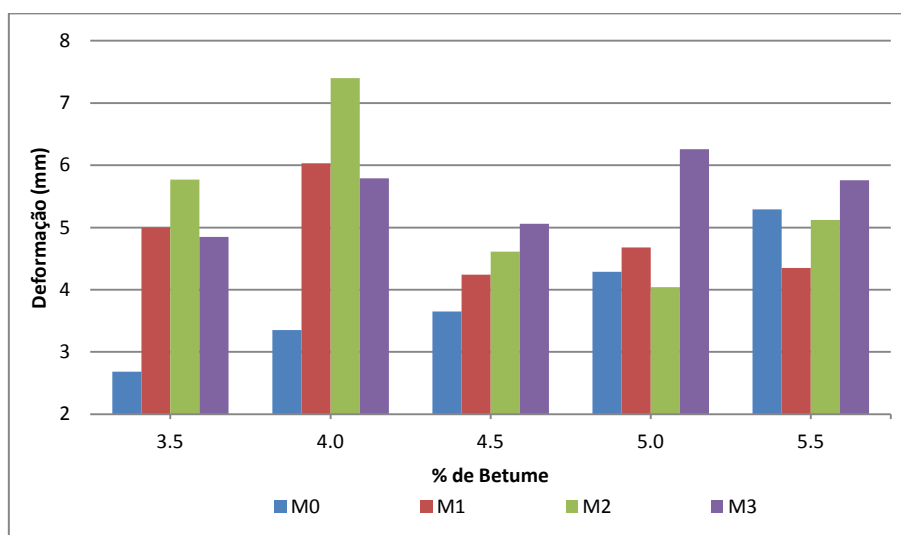


Figura 4.6 - Comparação da deformação das misturas analisadas

É de referir que os valores de deformação apresentados não são corrigidos. A norma NP EN 12697-34 (IPQ, 2004b) refere que se devem avaliar os valores da deformação corrigida. No entanto, não foi possível obter estes valores porque o "output" usado não o permitia. Desta forma, é provável que os valores que se estão a usar sejam superiores ao que efetivamente seriam se estivessem corrigidos.

#### 4.1.4. Percentagem ótima de betume

Tal como já foi referido no capítulo anterior, os valores obtidos no estudo Marshall para as MBT não seguem a tendência normal, dificultando a indicação da percentagem ótima de betume. Assim, dado que o valor da MBC era de 4,5% e para esta percentagem de betume as misturas temperadas apresentam consistentemente a maior estabilidade (ou muito próximo disso) e cumprem bem os limites para a porosidade (3-6%) e do VMA mínimo (> 14%), o que representa uma consistência aceitável, prosseguiram-se os estudos também com 4,5%.

A variabilidade que as misturas temperadas apresentaram pode dever-se à variabilidade das condições de fabrico e compactação dos provetes Marshall que não se conseguiu controlar sempre de forma eficiente devido a uma certa maneira artesanal usada na produção, a qual que já foi antes referida.

Nas figuras seguintes encontra-se a variação das características das misturas betuminosas analisadas com as percentagens de betume com que foram fabricados os provetes Marshall (baridade aparente, porosidade, VMA, estabilidade e deformação).

A Figura 4.7, a Figura 4.8, a Figura 4.9, a Figura 4.10 e a Figura 4.11 referem-se à baridade aparente, à porosidade, ao VMA, à estabilidade e à deformação, respetivamente.

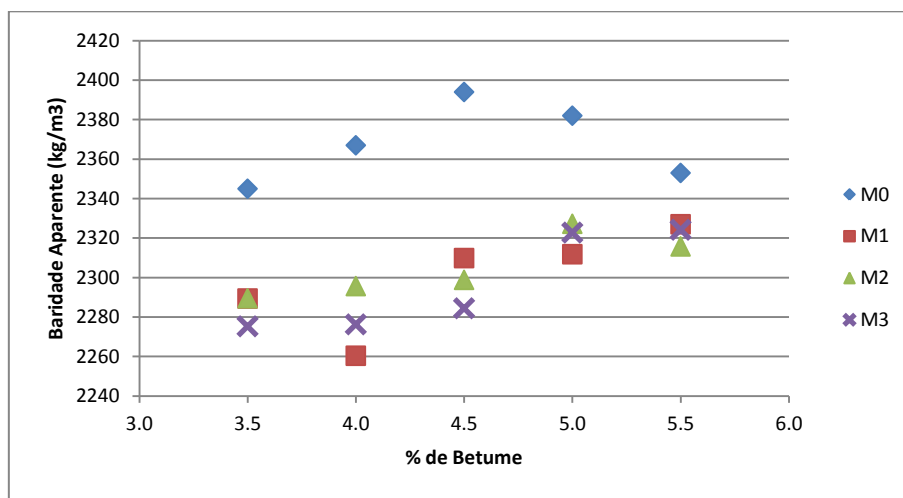


Figura 4.7 – Variação da baridade aparente das misturas analisadas

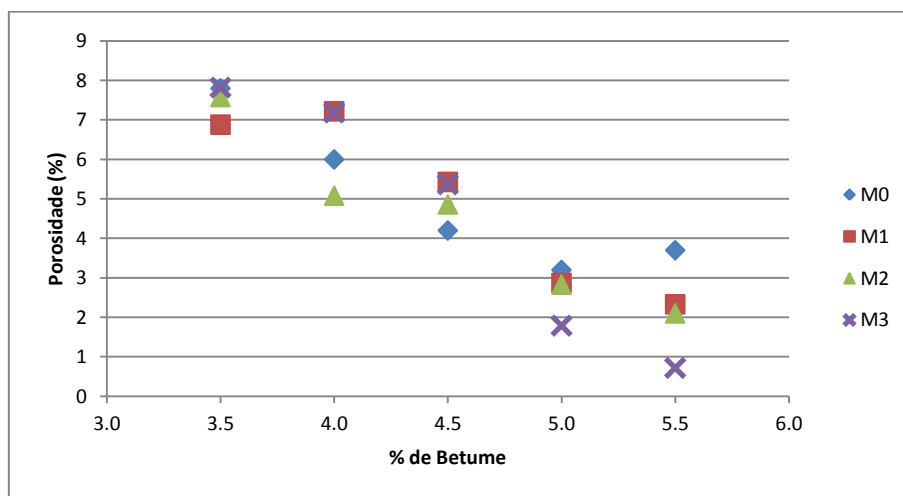


Figura 4.8 - Variação da porosidade das misturas analisadas

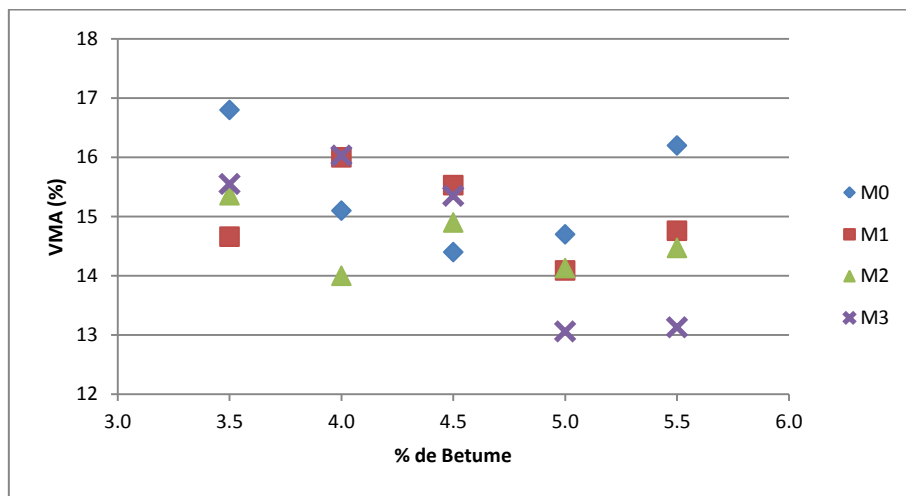


Figura 4.9 - Variação do VMA das misturas analisadas

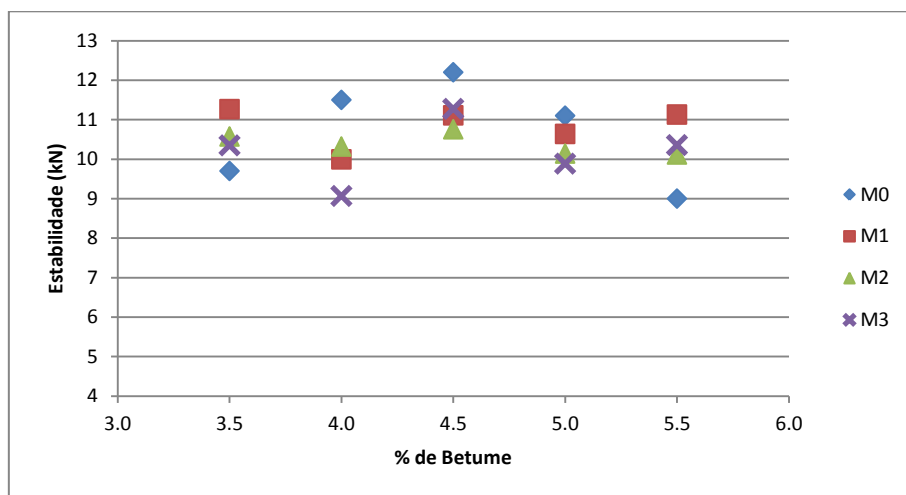


Figura 4.10 - Variação da estabilidade das misturas analisadas

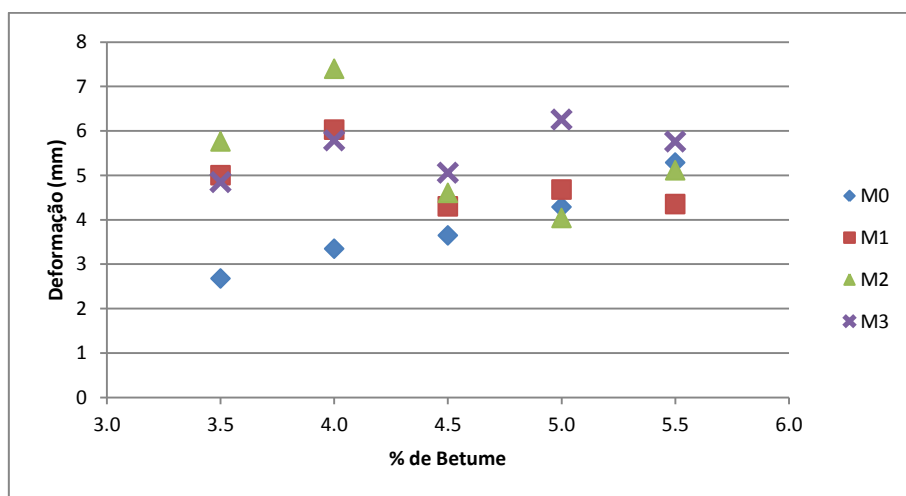


Figura 4.11 - Variação da deformação das misturas analisadas

#### 4.1.5. Validação de resultados

Para que as misturas betuminosas possam ser aplicadas em pavimentos é necessário que tanto as misturas betuminosas como os seus componentes cumpram determinados requisitos. Estes requisitos são normalmente especificados no Caderno de Encargos, como é o caso das obras tuteladas pela EP. Assim, vai-se proceder à verificação dos requisitos das propriedades das misturas betuminosas analisadas para a camada de base.

No Quadro 4.1 encontram-se os limites das propriedades das misturas betuminosas definidos no Caderno de Encargos Tipo Obra da EP (CETO) (EP, 2009) para a camada de base. No Quadro 4.2 encontram-se os valores das características das misturas betuminosas analisadas, obtidos no estudo Marshall, sendo que se encontram realçados a negrito os valores que não cumprem os limites impostos pelo CETO.

**Quadro 4.1 – Limites das propriedades das misturas betuminosas, para a camada de base, definidos no CETO (EP, 2009)**

ENSAIOS			NORMAS	VALORES LIMITE CE - EP
Porosidade		$V_m$	EN 12697-8	3 -6 %
Vazios na mistura de agregados		$VMA_{min}$	EN 12697-8	> 14 %
Marshall	Estabilidade	$S_{min/max}$	EN 12697-34 e EN 12697-30	7 - 15 kN
	Deformação	$F_{min/max}$		2 - 4 mm
	Quociente	$Q_{min}$		> 2 kN/mm

Como não foi possível determinar a percentagem ótima de betume a partir das MBT, efetuou-se uma análise dos resultados obtidos para todas as percentagens de betume e não só para a percentagem ótima que se obteve a partir da MBC.

Analisando o Quadro 4.2, verifica-se que as propriedades que melhor cumprem os limites impostos pelo CETO são o VMA e a estabilidade, tanto para as MBT como para a MBC. As propriedades que se encontram fora dos limites estabelecidos, em todas as misturas analisadas, são a porosidade, que para as menores percentagens de betume é mais elevada e para as maiores percentagens de betume é mais reduzida; bem como a deformação que, como já foi observado, é muito elevada. No entanto, pode verificar-se que, para a percentagem ótima de betume definida, apenas a deformação das MBT excede o limite definido, e num valor não muito elevado, o que permite concluir que a nível das propriedades volumétricas e mecânicas avaliadas no estudo Marshall, o desempenho das MBT é análogo ao da MBC fabricada a quente. Para além disso, é importante referir que se tivesse sido determinada a deformação corrigida seria natural que os valores estivessem dentro dos limites definidos pelo CETO.

Quadro 4.2 – Validação de resultados obtidos no estudo Marshall para as misturas betuminosas analisadas

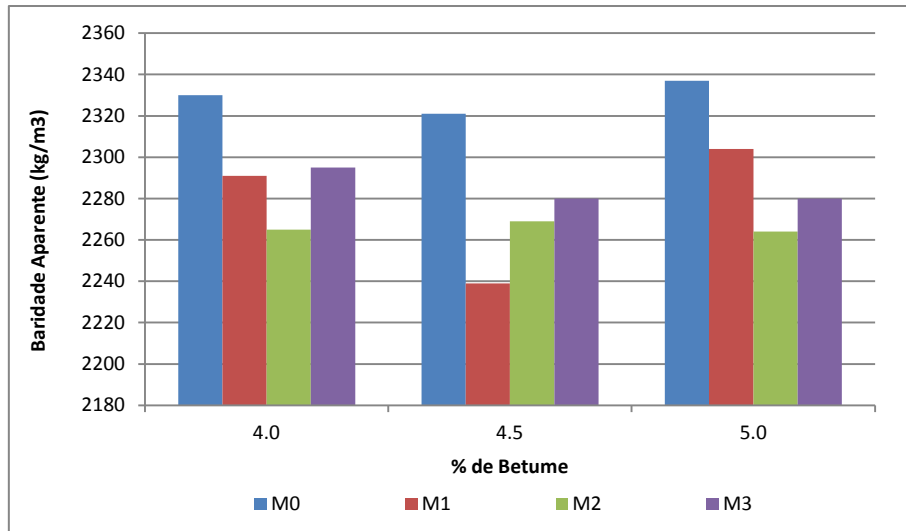
	% de Betume	Porosidade (%)	VMA (%)	Estabilidade (kN)	Deformação (mm)	Quociente (kN/mm)
M1	3,5	<b>6,9</b>	14,7	11,3	<b>5,01</b>	2,25
	4,0	<b>7,2</b>	16,0	10,0	<b>6,03</b>	<b>1,66</b>
	4,5	5,4	15,5	11,1	<b>4,30</b>	2,58
	5,0	<b>2,9</b>	14,1	10,6	<b>4,68</b>	2,27
	5,5	<b>2,3</b>	14,8	11,1	<b>4,36</b>	2,56
M2	3,5	<b>7,6</b>	15,4	10,6	<b>5,77</b>	<b>1,83</b>
	4,0	5,1	14,0	10,3	<b>7,40</b>	<b>1,39</b>
	4,5	4,9	14,9	10,8	<b>4,61</b>	2,33
	5,0	<b>2,8</b>	14,1	10,1	<b>4,04</b>	2,51
	5,5	<b>2,1</b>	14,5	10,1	<b>5,12</b>	<b>1,98</b>
M3	3,5	<b>7,8</b>	15,6	10,3	<b>4,85</b>	2,13
	4,0	<b>7,2</b>	16,0	9,1	<b>5,79</b>	<b>1,57</b>
	4,5	5,4	15,4	11,3	<b>5,06</b>	2,23
	5,0	<b>1,8</b>	<b>13,1</b>	9,9	<b>6,26</b>	<b>1,58</b>
	5,5	<b>0,7</b>	<b>13,1</b>	10,4	<b>5,76</b>	<b>1,80</b>
M0	3,5	<b>7,8</b>	16,8	9,7	2,68	3,62
	4,0	6,0	15,1	11,5	3,35	3,43
	4,5	4,2	14,4	12,2	3,65	3,34
	5,0	3,2	14,7	11,1	<b>4,29</b>	2,59
	5,5	3,7	16,2	9,0	<b>5,29</b>	<b>1,70</b>

#### 4.2. Análise crítica do ensaio de sensibilidade à água (ITSR)

Antes de se proceder ao ensaio ITSR sobre os provetes fabricados, avaliou-se a baridade dos mesmos. Observando o Quadro 4.3 e a Figura 4.12 pode-se constatar que os valores obtidos para a baridade aparente das quatro misturas betuminosas analisada não apresentam uma grande variação e que, tal como se verificou nos provetes fabricados para o estudo Marshall, a baridade das MBT é inferior à baridade da MBC, uma vez mais, devido à diminuição da temperatura na fase de fabrico e compactação dos provetes.

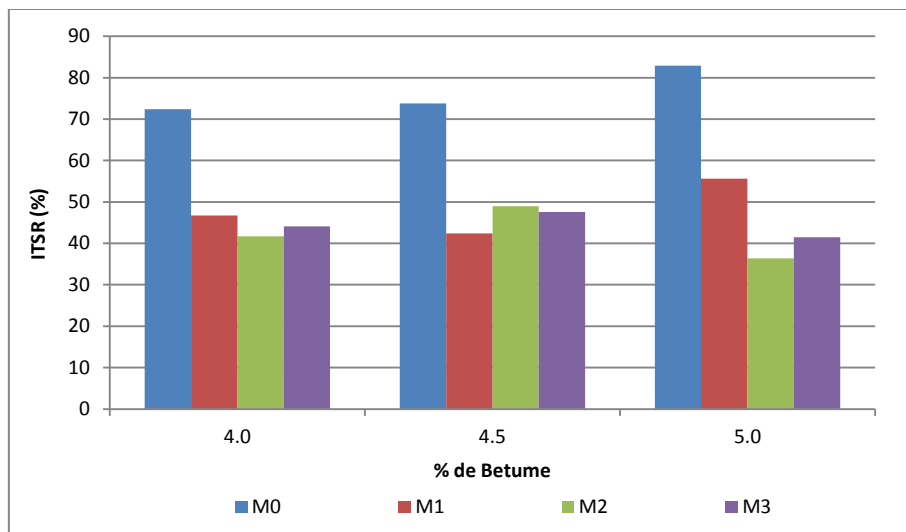
Quadro 4.3 – Resultados experimentais da baridade aparente dos provetes fabricados para o ensaio ITSR

Baridade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )				
% Betume	M1	M2	M3	M0
4,0	2291	2265	2295	2330
4,5	2239	2269	2280	2321
5,0	2304	2264	2280	2337



**Figura 4.12 – Comparação da baridade aparente dos provetes fabricados com as misturas analisadas para o ensaio ITSR**

Na Figura 4.13 apresenta-se um gráfico comparativo dos resultados obtidos para a resistência conservada em tração indireta, determinados com base na norma NP EN 12697-30 (IPQ, 2004a), das quatro misturas betuminosas analisadas.



**Figura 4.13 – Comparação do ITSR das misturas analisadas**

Pode-se constatar que o ITSR das misturas temperadas é relativamente inferior ao da MBC, o que significa que nas misturas temperadas houve uma diminuição na resistência à ação da água. Isto deve-se, provavelmente, às pequenas dimensões dos provetes fabricados e às baixas temperaturas de fabrico e compactação, portanto a menor densidade do que no caso da convencional e outra configuração dos vazios, para além de eventualmente algum insucesso na ligação agregado-betume.

### 4.3. Análise crítica do ensaio de deformação permanente

Na Figura 4.14 apresenta-se um gráfico comparativo dos resultados obtidos para a profundidade de rodeira, determinados com base na norma EN 12697-22 (CEN, 2003b), das quatro misturas betuminosas analisadas.

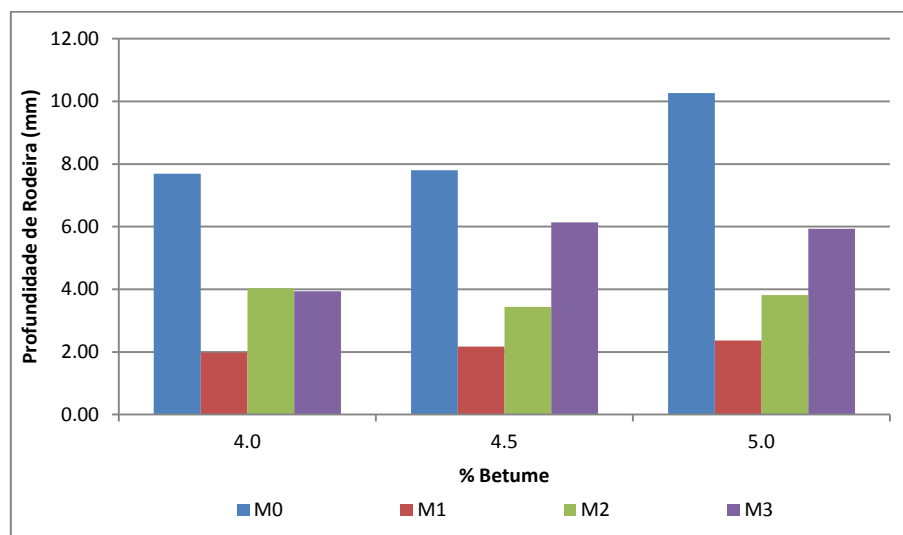


Figura 4.14 - Comparação da profundidade de rodeira das misturas analisadas

O ensaio de pista, um dos mais representativos do desempenho mecânico de misturas betuminosas, revelou que as MBT apresentam uma maior resistência à deformação permanente. Verifica-se que, principalmente na mistura M1, o aditivo permitiu um melhor encaixe do esqueleto do agregado na mistura, o que conduziu a uma profundidade de rodeira menor. As restantes MBT apresentaram igualmente uma boa resistência à deformação permanente, quando comparadas com a MBC fabricada a quente. Desta forma, pode-se concluir que, a nível de resistência à deformação permanente, o desempenho das MBT apresenta uma melhoria em relação à MBC.

Na Figura 4.15 pode observar-se um gráfico com o andamento da profundidade de rodeira para os 10000 ciclos de carga, por exemplo, para o caso de uma placa fabricada com a mistura betuminosa temperada M1 para uma percentagem de betume de 4,5.

Na Figura 4.16 apresenta-se um gráfico comparativo da baridade aparente das placas fabricadas com as misturas analisadas para o ensaio de pista. Neste caso verifica-se que a baridade das misturas temperadas se aproxima mais da baridade da MBC exceto na mistura M1 para 4,0 e 4,5 % de betume; e na mistura M3 para 4,5 e 5,0 % de betume, o que sustenta o bom desempenho das MBT a nível de resistência à deformação permanente.

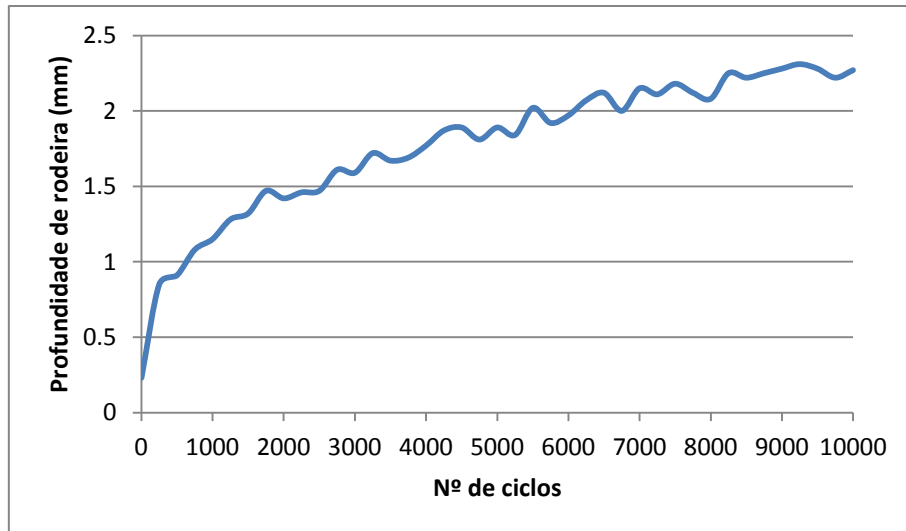


Figura 4.15 – Profundidade de rodeira de uma placa fabricada com a MBT M1 para 4,5% de betume

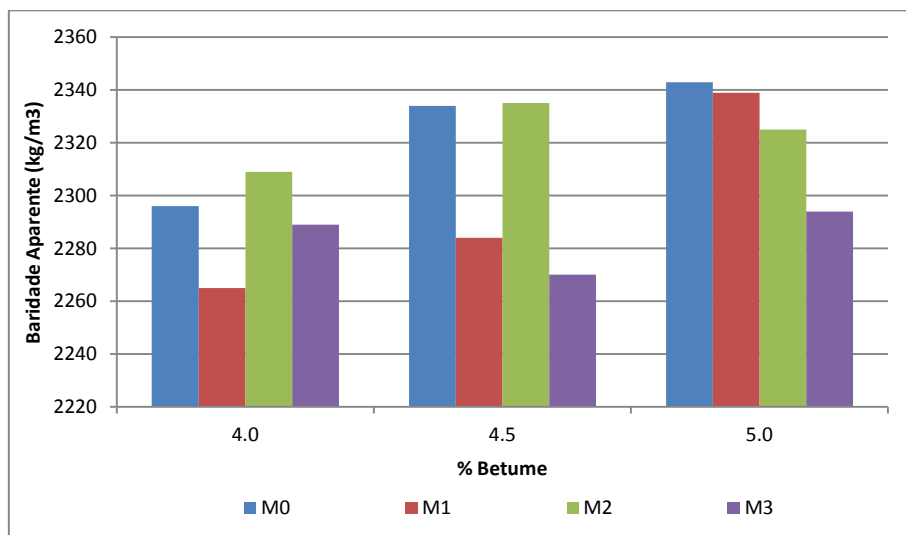


Figura 4.16 – Comparação da baridade aparente das placas fabricadas com as misturas analisadas para o ensaio de pista

#### 4.4. Análise comparativa da baridade aparente

No Quadro 4.4 apresenta-se a média dos resultados obtidos no ensaio da baridade aparente de cada provete, das quatro misturas betuminosas analisadas, determinadas com base na norma NP EN 12697-6 (IPQ, 2003b), para as percentagens de betume de 4,0, 4,5 e 5,0.

Analisando o Quadro 4.4, a Figura 4.17, a Figura 4.18 e a Figura 4.19 verifica-se que, para a mesma mistura e relativamente a igual percentagem de betume, os provetes fabricados para os três ensaios executados no presente trabalho apresentaram baridades semelhantes, o que demonstra a coerência dos resultados que foram sendo obtidos ao longo deste estudo, em todas as misturas analisadas.

Quadro 4.4 – Baridade aparente dos provetes fabricados para os ensaios executados

	Baridade Aparente (kg/m <sup>3</sup> )				
	% Betume	M1	M2	M3	M4
Marshall	4,0	2260	2296	2276	2367
	4,5	2310	2299	2284	2394
	5,0	2312	2327	2323	2382
ITSR	4,0	2291	2265	2295	2330
	4,5	2239	2269	2280	2321
	5,0	2304	2264	2280	2337
Ensaio de Pista	4,0	2265	2309	2289	2296
	4,5	2284	2335	2270	2334
	5,0	2339	2325	2294	2343

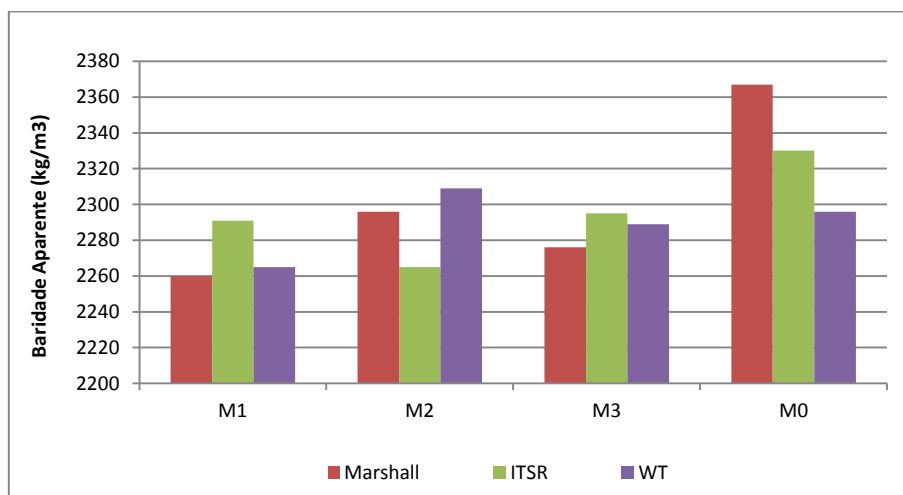


Figura 4.17 – Baridade Aparente das misturas analisadas para 4,0% de betume

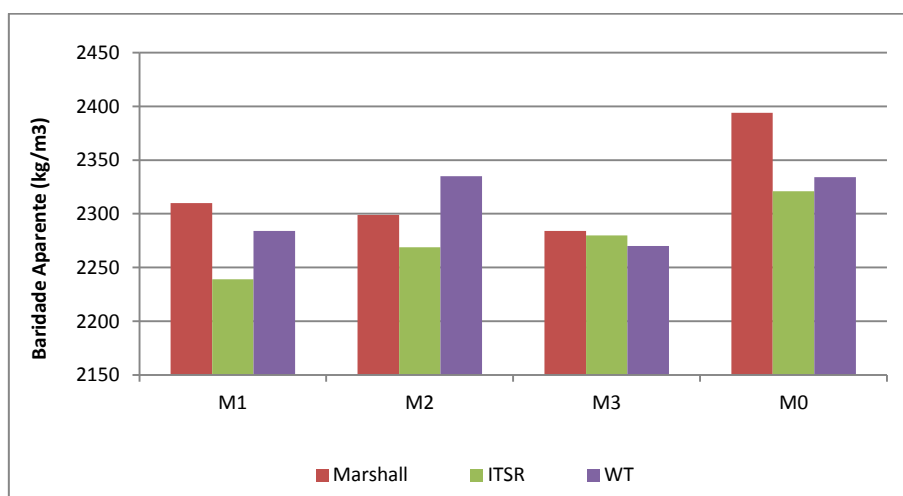


Figura 4.18 - Baridade Aparente das misturas analisadas para 4,5% de betume

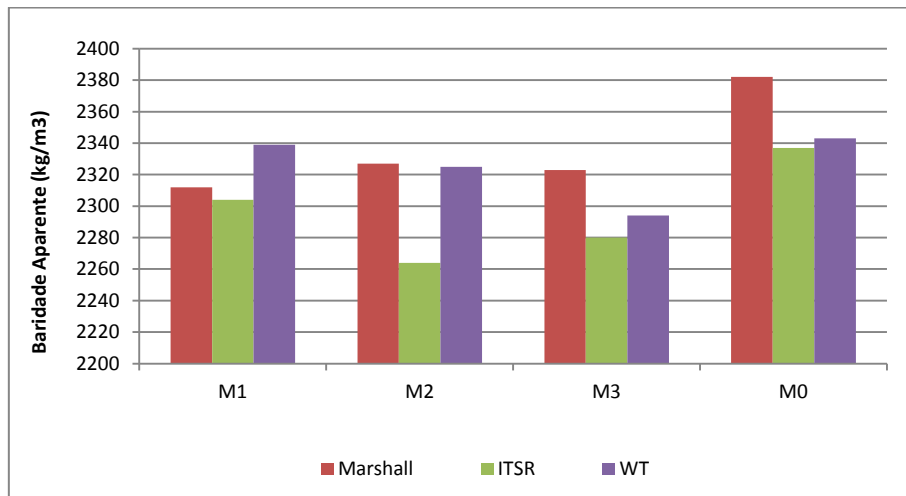


Figura 4.19 - Baridade Aparente das misturas analisadas para 5,0% de betume

#### 4.5. Análise económica da produção de Misturas Betuminosas Temperadas

Nesta subsecção apresenta-se uma estimativa simples dos custos associados à produção das misturas betuminosas analisadas, de modo a verificar se as MBT são, efetivamente, um produto competitivo quando comparadas com as misturas betuminosas convencionais.

É expectável que, a nível de custos, possam ocorrer tanto reduções como aumentos. No que respeita a reduções, o fator que mais contribui para este facto é a diminuição da temperatura de produção da mistura uma vez que é necessário menos combustível para aquecer tanto o agregado como o betume. As temperaturas de produção mais reduzidas provocam ainda um desgaste menor na central de produção, o que se traduz, igualmente, numa vantagem económica. No entanto, as MBT apresentam novos custos que podem advir do custo dos aditivos, da modificação da central de produção, que pode ser necessária, e ainda do custo de licenças para aplicação de novas tecnologias.

Assim, dependendo da interação de todos estes fatores, espera-se que os custos finais de produção de MBT sejam semelhantes aos das misturas betuminosas convencionais (EAPA, 2010).

No Quadro 4.5 indicam-se as quantidades e os custos da maioria dos componentes necessários para a produção das MBT e da MBC para a percentagem ótima de betume; entre eles, o ligante, os aditivos, os agregados e o combustível. Os custos unitários destes componentes foram fornecidos pela empresa Tecnovia e pela empresa representante dos aditivos e das fibras em Portugal.

**Quadro 4.5 – Análise dos custos totais das misturas betuminosas**

		<b>Unidade</b>	<b>M0</b>	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>	
<b>Ligante na MB</b>		%	4,5	4,5	4,5	4,5	
<b>Betume na MB</b>		kg/ton MB	45	45	45	45	
<b>Custo do Betume 35/50</b>		€/ton betume	556	556	556	556	
<b>Custo do Betume 35/50</b>		€/ton MB	25	25	25	25	
<b>Aditivo na MB</b>		kg/ton MB	-	1,79	0,9	0,67	2.3
<b>Aditivo na MB</b>		%/ligante	-	4	2	1,5	5
<b>Custo do aditivo</b>		€/ton aditivo	-	2000	3000	3000	1200
<b>Custo do aditivo</b>		€/ton MB	-	3,58	2,7	2,01	2.7
<b>Agregado na MB</b>	<b>Brita 2</b>	kg/ton MB	306	305	305	305	
	<b>Brita 1</b>	kg/ton MB	191	191	191	190	
	<b>Areão</b>	kg/ton MB	458	458	458	457	
<b>Custo do agregado</b>	<b>Brita 2</b>	€/ton agregado	2,74	2,74	2,74	2,74	
	<b>Brita 1</b>	€/ton agregado	2,74	2,74	2,74	2,74	
	<b>Areão</b>	€/ton agregado	5,24	5,24	5,24	5,24	
<b>Custo do agregado</b>	<b>Brita 2</b>	€/ton MB	0,84	0,84	0,84	0,84	
	<b>Brita 1</b>	€/ton MB	0,52	0,52	0,52	0,52	
	<b>Areão</b>	€/ton MB	2,40	2,40	2,40	2,40	
<b>Consumo de fuel</b>		kg/ton MB	7	3,5	3,5	3,5	
<b>Custo do fuel</b>		€/ton	602,94	602,94	602,94	602,94	
<b>Custo do fuel</b>		€/ton MB	4,22	2,11	2,11	2,11	
<b>Custos totais de produção</b>		€/ton MB	33	34	34	36	

Os resultados apresentados mostram que o custo total de produção da MBC a quente é análogo ao custo das MBT, uma vez que o custo adicional do aditivo é compensado pela redução no consumo de combustível. As misturas M1 e M2 apresentam uma diferença nos custos, relativamente à MBC M0, de apenas 3%, enquanto que a mistura M3 apresenta uma diferença ligeiramente superior, de cerca de 9%. Esta conclusão de que os custos de produção seriam bastante similares já era expectável pois está de acordo com a bibliografia consultada. No entanto, é de referir que, tal como já foi indicado anteriormente, apesar dos custos económicos das MBT não se revelarem numa vantagem considerável em relação às misturas betuminosas fabricadas a quente, as primeiras apresentam benefícios bastante relevantes como a redução das emissões de gases poluentes para a atmosfera e a melhoria das condições de segurança e conforto dos trabalhadores na fase de pavimentação.

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1. Conclusões gerais

No presente trabalho desenvolveu-se um estudo laboratorial para avaliar o desempenho de misturas betuminosas temperadas (MBT). Em particular, foram estudadas misturas betuminosas do mesmo tipo – AC 20 Base 35/50 com agregado calcário – com incorporação dos aditivos Sasobit e Rediset e das fibras Viatop: uma mistura com incorporação de Sasobit, outra com incorporação de Rediset e uma última com incorporação de Rediset e Viatop. A incorporação destes aditivos permitiu diminuir a temperatura de fabrico e compactação das misturas até um valor compreendido entre os 100 e os 120°C.

Tendo em conta os principais objetivos desta dissertação, efetuou-se a formulação das misturas pela NP EN 13108-1 (IPQ, 2008), com base no estudo Marshall, ensaios de sensibilidade à água (ITSR) e ensaios de pista. Os resultados laboratoriais obtidos permitiram realizar uma análise comparativa das MBT com a MBC e confirmar que o seu desempenho se mostrou adequado.

O estudo foi realizado nos laboratórios da empresa Tecnovia localizados nas pedreiras de Ourique e de Rio Maior. Começou por realizar-se o estudo Marshall de forma a determinar a percentagem ótima de betume. Procedeu-se ainda à determinação da resistência conservada em tração indireta (ITSR), através do ensaio de sensibilidade à água, bem como à determinação da resistência à deformação permanente, através do ensaio de pista. Estes dois últimos ensaios foram realizados para todas as misturas betuminosas, enquanto o estudo Marshall foi apenas efetuado para as MBT, dado que para a MBC a empresa Tecnovia já tinha realizado este estudo. Todos os ensaios foram executados de acordo com o estipulado nas diversas partes aplicáveis da norma EN 12697.

Do estudo Marshall, verificou-se que, para a percentagem ótima de betume adotada, 4,5%, as MBT cumprem os limites definidos no caderno de encargos tipo obra (CETO) da E.P., tal como também a MBC, indicando, à partida, que ambos os tipos de misturas têm desempenho análogo. No entanto, é de referir que se optou por adotar uma percentagem ótima de betume igual à da MBC uma vez que os valores obtidos no estudo Marshall das MBT não permitiram chegar a conclusões muito claras.

Os resultados obtidos no ensaio de sensibilidade à água demonstraram que as MBT perderam alguma capacidade de resistência à ação da água. Isto deve-se, provavelmente, às pequenas dimensões dos provetes fabricados e às baixas temperaturas de fabrico e compactação, para além de eventualmente algum insucesso na ligação agregado-betume.

Por último, o ensaio de pista comprovou o bom desempenho das MBT ao nível de resistência à deformação permanente, uma vez que os resultados obtidos foram relativamente melhores nas MBT do

que na MBC, mais concretamente, observou-se que os valores de profundidade de rodeira nas MBT são inferiores aos da MBC.

A nível económico concluiu-se que os custos de produção das MBT são semelhantes aos da MBC, dado que o aumento do custo que advém da utilização de aditivos nas MBT é compensado com a redução no consumo de combustível que ocorre devido à diminuição das temperaturas de fabrico e compactação.

Assim, conclui-se que os objetivos da presente dissertação foram atingidos ao comprovar-se laboratorialmente que as MBT apresentam um desempenho idêntico ao da MBC, o que corrobora que as MBT podem ser uma solução técnica eficaz com o acréscimo de outras vantagens importantes a nível ambiental, social e económico.

## 5.2. Trabalhos futuros

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre as MBT analisadas neste trabalho e de dar continuidade ao estudo do tema aqui desenvolvido, indicam-se seguidamente algumas linhas de orientação que se consideram mais importantes para trabalhos de investigação futuros:

- Avaliação do comportamento à deformabilidade e à fadiga das MBT estudadas neste trabalho através, por exemplo, de ensaio por flexão em quatro pontos.
- Avaliação e comparação do desempenho de outro tipo de misturas betuminosas convencionais e de MBT, nomeadamente com a incorporação de material fresado.
- Realização de trechos experimentais, onde sejam aplicadas as MBT deste estudo, de forma a validar a técnica de execução e de modo a acompanhar o seu comportamento num período mais extenso do seu ciclo de vida.

## Referências Bibliográficas

- Alconada, I. B. (2011). *Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas Mornas*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Lisboa.
- Branco, F. E., Picado Santos, L. & Dias Capitão, S. (1998). *Vias de Comunicação, Volume 2*. LUTVC. Coimbra.
- CEN (2001). *EN 12697-10 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 10: Compactability*. Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2002a). *EN 12697-5 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density*. Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2002b). *EN 12697-29 Bituminous mixtures. Test method for hot mix asphalt. Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen*. Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2003a). *EN 12697-8 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*. Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2003b). *EN 12697-22 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 22: Wheel tracking*. Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2003c). *EN 12697-23 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*. Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2003d). *EN 12697-33 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 33: Specimen prepared by roller compactor*. Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2008). *EN 12697-12 Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*. Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2009). *EN 12591 Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens*. Comité Européen de Normalisation.
- Chowdhury, A. & Button, J. W. (2008). *A review of warm mix asphalt*. The Texas A&M University System.
- Croteau, P. J. & Tessier, B. (2008). *WMA Paving Technology: A road Builder's Perspective*. Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
- D'Angelo, J., 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*. Alexandria: Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.

Drüschner, L. & Schäfer, V. (2000). *Stone Mastic Asphalt*. Alemanha: German Asphalt Association.

EAPA (2010). *The Use of Warm Mix Asphalt - Position Paper*. European Asphalt Pavment Association.

EP (2009). *Caderno de Encargos Tipo Obra. 14.03 - Pavimentação. Características dos Materiais*. Estradas de Portugal, S.A.

Ferreira, C. I. (2009). *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho.

González, J. A., Grampé, L. & Barreto, G. (2009). *Mezclas Asfálticas Templadas com Aditivos Químicos*. Jornada Nacional, ASEFMA.

Hurley, G. C. & Prowell, B. D. (2005). *Evaluation of Sasobit® for use in Warm Mix Asphalt*. National Center for Asphalt Technology.

Hurley, G. C. & Prowell, B. D. (2006). *Evaluation of Potential Processes for use in Warm Mix*. National Center for Asphalt Technology.

Illinois Department of Transportation (2005). *Pavment Technology Advisory - Performance Graded Binder Materials for Hot Mix Asphalt - PTA-D4*. Bureau of Materials and Physical Research.

INIR (2011). *Directivas para a Concepção de Pavimentos. Critérios de Dimensionamento*. Lisboa: Instituto de Infra-Estruturas Rodoviárias IP.

IPQ (2000). *NP EN 933-1 Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 1: Análise granulométrica. Método de peneiração*. Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2002a). *NP EN 933-3 Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 3: Determinação da forma das partículas. Índice de achatamento*. Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2002b). *NP EN 933-9 Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 9: Determinação do teor de finos. Ensaio do azul de metileno*. Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2002c). *NP EN 1097-2 Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 2: Métodos para a determinação da resistência à fragmentação*. Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2003a). *NP EN 1097-6 Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*. Instituto Português da Qualidade.

IPQ (2003b). *NP EN 12697-6 Misturas betuminosas. Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente. Parte 6: Determinação da baridade de provetes betuminosos*. Instituto Português da Qualidade.

- IPQ (2004a). *NP EN 12697-30 Misturas betuminosas. Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente. Parte 30: Preparação de provetes por compactador de impacto*. Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2004b). *NP EN 12697-34 Misturas betuminosas. Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente. Parte 34: Ensaio Marshall*. Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2008). *NP EN 13108-1 Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso*. Instituto Português da Qualidade.
- J.Rettenmaier & Söhne (a) (s.d.). Obtido em 14 de 12 de 2011, de [www.jrspharma.de](http://www.jrspharma.de):  
<http://www.jrspharma.de/wEnglisch/anwend/strassenbau/produkte.shtml>
- J.Rettenmaier & Söhne (b) (s.d.). Obtido em 14 de 12 de 2011, de [www.sma-viatop.com](http://www.sma-viatop.com):  
[http://www.sma-viatop.com/cgi-bin/wPermission.cgi?file=/SMAviatop\\_engl/viatop/start.shtml?navid=76](http://www.sma-viatop.com/cgi-bin/wPermission.cgi?file=/SMAviatop_engl/viatop/start.shtml?navid=76)
- J.Rettenmaier & Söhne (c) (s.d.). Obtido em 14 de 12 de 2011, de [www.polypan.gr](http://www.polypan.gr):  
<http://www.polypan.gr/products.cfm?catID=44>
- Jones, D., Tsai, B. W. & Signore, J. (2010). *Warm-mix Asphalt Study: Laboratory Test Results for Akzo Nobel Rediset TM WMX*. University of California Pavement Research Center.
- Ministerio de Fomento (2004). *Secciones de firme: Instrucción de carreteras norma 6.1 IC*. Ministerio de Fomento.
- Newcomb, D. (2007). *An Introduction to Warm-mix Asphalt*. National Asphalt Pavement Association.
- Pérez, L. M. & Pérez, M. E. (2009). *Mezclas Bituminosas Fabricadas a Baja Temperatura. Experiencia Española*. XV Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto, CILA. Lisboa.
- Picado Santos, L. (2010). *Vias de comunicação. Misturas Betuminosas. Formulação de misturas betuminosas*. Obtido em 30 de Maio de 2012, de  
[https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/736819/1/VC\\_Misturas\\_Betuminosas\\_Formulacao\\_Aula16.pdf](https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/736819/1/VC_Misturas_Betuminosas_Formulacao_Aula16.pdf)
- Prowell, B. D. & Hurley, G. C. (2008). *National Asphalt Pavement Association Warm Mix Asphalt: Contractors' Experiences*. Quality Improvement Series 125.
- Redondo, S. G., Amor, J. I., Felipo, J., Costa, A., Cortés, C., Páez, A., Valor, F. & Potti, J. (2010). *Study of Additives to Reduce the Viscosity of the Binder at High Temperatures*. International Road Federation. 16th World Meeting. Lisboa.
- Redondo, S. G., León, J. G. & Alonso, E. S. (2010). *Estudio del ángulo de contacto de betunes aditivados y su efecto sobre distintas propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas*. V Jornada Nacional, ASEFMA.

Reyes-Ortiz, O., Pérez-Jimenez, F., Recacens, R. M., Parras, J. A. & Redondo, S. G. (2009). *El Proyecto Fénix en la UPC. Mezclas Semicalientes*. XV Congreso Ibero- Latino Americano do Asfalto, CILA. Lisboa.

Rühl, R. & Lindemeier, B. (2006). *Progress Report 2006: The German Bitumen Forum. Edition 2*. Alemanha: Heinrich Lauck GmbH.

Sasol Wax. (s.d.). Obtido em 23 de Novembro de 2011, de [www.sasolwax.us.com](http://www.sasolwax.us.com):  
<http://www.sasolwax.us.com/pdf/SasobitHandling-BlendingGuidelineUSA.pdf>

Sasol Wax. (12 de Dezembro de 2007). Obtido em 23 de Novembro de 2011, de  
[http://www.warmmixasphalt.com/submissions/53\\_20080101\\_John\\_Shaw\\_-\\_Sasobit.pdf](http://www.warmmixasphalt.com/submissions/53_20080101_John_Shaw_-_Sasobit.pdf)

Schneider, B. (s.d.). *Stone Mastic Asphalt: Pavement Technology for the New Millennium*. Germany: J. Rettenmaier & Söhne.

Soto, J. A., Barreno, I. P. & Siller, A. G. (2009). *Sostenibilidad en Pavimentos de Carreteras. Mezclas a Bajas Temperaturas*. XV Congreso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto, CILA. Lisboa.

Subagio, B. S. & Kosasih, D. (2005). *Development of Stiffness Modulus and Plastic Deformation Characteristics of Porous Asphalt Mixture Using Tappack SuperTM*. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, pp. 803 - 812.

Tecnovia S.A. (2011). *Relatório de Ensaio Tipo Inicial*.

Tia, M. (2006). *Bituminous Materials*. University of Florida.

Vaitkus, A., Vorobjovas, V. & Ziliute, L. (2009). *The Research on the Use of Warm Mix Asphalt for Asphalt Pavement Structures*. Vilnius: Vilnius Gediminas Technical University.

Zaumanis, M. (2010). *Warm Mix Asphalt Investigation*. Dinamarca: Technical University of Denmark.