



Mestrado em Engenharia Civil

**Betão Betuminoso Temperado com Betume Aditivado
em Refinaria com Incorporação de Misturas
Betuminosas Recicladas**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Civil - Especialização em Construção Urbana

Autor

Julien Fernandes Bessa

Orientador

Prof. Doutor Silvino Dias Capitão

Professor Coordenador do DEC-ISEC

Coimbra, dezembro de 2016

AGRADECIMENTOS

Uma dissertação de Mestrado envolve muito trabalho individual, devido à sua finalidade académica. Porém as pessoas/entidades que se envolveram neste projeto merecem ser destacadas. Por esse motivo, expresso aqui os meus mais sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador, Professor Doutor Silvino Dias Capitão, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC), por todo o apoio e orientação e por estar sempre disponível e pronto a ajudar. Obrigado por todos os conhecimentos que me transmitiu e por ter sempre uma palavra de ânimo e incentivo, mesmo quando surgiam obstáculos. Sem dúvida que é o responsável para que hoje eu goste ainda mais desta área que são os pavimentos rodoviários.

Ao Engenheiro Técnico Carlos Renato, Técnico do Laboratório de Pavimentos do DEC-ISEC, pela ajuda imprescindível prestada na realização de grande parte dos trabalhos experimentais, pela dedicação e encorajamento. Manifesto também o meu agradecimento aos colaboradores do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), pelo auxílio e disponibilidade mostrado na realização de alguns trabalhos experimentais indispensáveis para a realização desta dissertação. Expresso também o meu agradecimento ao Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST), pela colaboração prestada na realização dos trabalhos laboratoriais.

À Andrea, por estar sempre ao meu lado ao longo desta árdua caminhada, mesmo nos dias mais difíceis. Por ter sempre uma palavra de encorajamento e também por saber criticar quando era necessário, fazendo-me sempre acreditar que conseguiria chegar ao fim desta etapa. Obrigado por todo o amor, carinho e compreensão.

Expresso o meu agradecimento à empresa Contec, S.A., em especial à Engenheira Filipa Gomes, por ter disponibilizado os materiais necessários para a realização dos trabalhos experimentais.

Agradeço ao ISEC e a todos os professores com que me cruzei ao longo destes anos, que são responsáveis por todo o meu conhecimento e formação em Engenharia Civil.

Por fim, obrigado a todos os meus amigos por toda a força que me transmitiram, pela ajuda e incentivo, mesmo nos momentos em que estive mais ausente.

Julien Fernandes Bessa

Coimbra, dezembro de 2016

RESUMO

Ao longo dos anos tem-se verificado uma crescente consciencialização ambiental. Esta preocupação tem-se tornado cada vez mais presente, quer individual, quer ao nível das indústrias. As centrais de fabrico evoluíram para esta nova realidade, adotando novos procedimentos de fabrico, que reduzem os consumos energéticos e as emissões de gases que provocam efeito de estufa, e que adotam processos que reutilizam vários tipos de materiais.

No âmbito da produção de misturas betuminosas, a redução da temperatura de produção aliada à reciclagem de materiais de pavimentação resulta numa tecnologia mais sustentável e auspiciosa. No entanto, apesar da implementação das misturas betuminosas temperadas nas centrais surgir como uma solução promissora, existe ainda algum ceticismo por parte dos produtores quanto à qualidade e ao desempenho a longo prazo daquelas misturas. É, assim, prioritário contribuir para desmontar este estigma e demonstrar que o desempenho mecânico destas misturas é semelhante ao das misturas tradicionais para, futuramente, tornar a utilização desta tecnologia menos controversa.

Além disso, a adição de Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR), ou seja, recicladas, em substituição de materiais virgens na produção de novas misturas, constitui uma oportunidade para economizar recursos e evitar o impacto associado à sua extração e transporte, constituindo uma prática sustentável e economicamente vantajosa.

Neste contexto, o presente trabalho pretende constituir um contributo para o desenvolvimento de misturas betuminosas temperadas com MBR, utilizando como ligante betume aditivado em refinaria. Esta é uma técnica inovadora, ainda pouco utilizada, em que o betume fornecido já é aditivado, dispensando o uso de outros aditivos para ser possível baixar a temperatura de manipulação.

Ao longo deste trabalho é feita uma breve apresentação das principais tecnologias e técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas, assim como um resumo das suas vantagens e desvantagens. Posteriormente, são descritas as principais técnicas de reciclagem, e são referidos os aspetos mais importantes relacionados com a incorporação de MBR em novas misturas betuminosas.

Foram realizados ensaios laboratoriais para avaliar as propriedades volumétricas e o comportamento mecânico de misturas temperadas com betume aditivado em refinaria com incorporação de MBR. Por fim, foi feita uma análise comparativa dos resultados obtidos com outros trabalhos realizados, com misturas convencionais e outras comparáveis, realizando uma análise crítica dos resultados, com o objetivo de demonstrar a aplicabilidade da mistura temperada estudada em pavimentos rodoviários.

Através do trabalho realizado foi possível concluir que as misturas temperadas com betume aditivado em refinaria com incorporação de MBR constituem uma solução com inúmeras vantagens ambientais, económicas, sem com isto por em causa o desempenho mecânico dos pavimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Misturas Betuminosas Temperadas; Betume Aditivado em Refinaria; Propriedades de Misturas Betuminosas; Preocupação Ambiental; Reciclagem de misturas betuminosas.

ABSTRACT

Over the years there has been a growing environmental awareness. This concern has become increasingly present, both individual and industry-wide. The manufacturing plants have evolved for this new reality by adopting new manufacturing procedures that reduce energy consumption and greenhouse gas emissions, and adopt processes that reuse several types of materials.

As part of the production of bituminous mixtures, the reduction of production temperature coupled with the recycling of pavements' materials results in a more sustainable and auspicious technology. However, although the implementation of warm-asphalt mixtures in plants seem a promising solution, there is still some scepticism of producers about the quality and the long-term performance of these mixtures. It is, thus, a priority contributing to dismantle this stigma and demonstrate that mechanical performance of these blends is similar to that of traditional mixes, in order to make the use of this technology less controversial.

In addition, adding Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), i.e., recycled, in substitution of virgin materials in the production of new mixtures, is an opportunity to economize resources and avoid the impact associated with their extraction and transportation, constituting a sustainable and economically viable option.

In this context, the present project intends to contribute to the development of recycled warm bituminous mixtures with RAP, by using as binder a "terminal blend" bitumen. This is an innovative technique, still little used, in which the supplied bitumen is already additivated, dispensing the use of other additives to allow lowering handling temperature.

Throughout this work, a brief presentation of the main technologies and techniques to produce warm bituminous mixtures is made, as well as a summary of their advantages and disadvantages. Subsequently, the main recycling techniques are described, and the most important aspects related to the incorporation of RAP in new bituminous mixtures are mentioned.

Laboratory tests were carried out to evaluate the volumetric properties and the mechanical behaviour of warm bituminous mixtures with terminal blend bitumen with incorporation of RAP. Finally, a comparative analysis of the obtained results with other works performed with conventional and other comparable mixtures was carried out, by performing a critical analysis of the results, with the objective of demonstrating the applicability of the warm-mix asphalt studied in road pavements.

Through the work carried out, it was possible to conclude that the warm-asphalt mixtures with refined bitumen in refinery with MBR incorporation constitute a solution with numerous advantages, such as environmental and economical, without undermining the mechanical performance of the pavements.

KEYWORDS: Warm-mix asphalt; Terminal blend Bitumen; Properties of Bituminous Mixtures; Environmental Concern; Recycling of bituminous mixtures.

ÍNDICE**ÍNDICE DE FIGURAS xi****ÍNDICE DE QUADROS xv****SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS xvii****1. Introdução e Organização do Trabalho 1**1.1. Enquadramento 11.2. Objetivos e Metodologia do Trabalho..... 21.3. Estrutura da Dissertação..... 3**2. Misturas Betuminosas Temperadas 5**2.1. Generalidades 52.2. Características das Misturas Betuminosas Temperadas (MBT) 52.3. Mecanismos Envolvidos na Redução da Temperatura 72.3.1. Aditivos Orgânicos 72.3.2. Aditivos químicos..... 72.3.3. Espuma de betume..... 82.4. Benefícios das Misturas Betuminosas Temperadas 112.4.1. Ambientais..... 122.4.2. Benefícios económicos 132.4.3. Benefícios técnicos 132.4.4. Benefícios para os trabalhadores e populações residentes 132.5. Desvantagens das Misturas Betuminosas Temperadas 142.6. Misturas Betuminosas Recicladas..... 152.6.1. Reciclagem a quente em central 162.6.2. Reciclagem semi-temperada em central 202.6.3. Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Misturas
Betuminosas Recuperadas..... 212.7. Considerações Finais..... 22

3. Estudo Laboratorial de uma MBT com Betume Aditivado em Refinaria e MBR 23

3.1. Considerações Iniciais	23
3.2. Caracterização dos Materiais Utilizados.....	23
3.2.1. Análise granulométrica do material reciclado.....	23
3.2.2. Análise granulométrica dos agregados naturais e propriedades do ligante.....	27
3.2.3. Composição granulométrica das misturas betuminosas.....	30
3.3. Fabrico da Mistura e Moldagem de Provetes	31
3.3.1. Provetes cilíndricos para ensaio de Marshall	34
3.3.2. Provetes cilíndricos para ensaio a deformação permanente.....	34
3.3.3. Provetes prismáticos.....	35
3.4. Caracterização da mistura betuminosa.....	36
3.4.1. Determinação da baridade (EN 12697-6).....	36
3.4.2. Determinação da baridade máxima teórica (EN 12697-5).....	37
3.4.3. Formulação da mistura pelo método de Marshall	40
3.4.4. Percentagem ótima de betume.....	42
3.4.5. Sensibilidade á agua	43
3.4.6. Ensaio de compressão uniaxial cíclico.....	46
3.4.7. Ensaio de determinação do módulo de rigidez.....	53
3.4.8. Previsão do comportamento à fadiga	61
3.5. Considerações finais	64

4. Comparação das Características das Misturas em Estudo com as Obtidas em Estudos Similares 65

4.1. Considerações Iniciais.....	65
4.2. Propriedades Volumétricas	65
4.3. Ensaio de Compressão de Marshall	71
4.4. Sensibilidade à Água.....	73
4.5. Resistência à Deformação Permanente em Ensaio de Compressão Uniaxial	75
4.6. Módulo de Rigidez com Base em Ensaio de Flexão em 4 Pontos	77
4.7. Considerações finais	79

5. Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros 81

5.1. Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais	81
5.2. Prosseguimento de Trabalhos Futuros	85

5.3. Considerações Finais..... 85

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... a

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de produção (Ferreira, 2009).....	6
Figura 2.2 Melhoria do ângulo de contacto devido a incorporação de aditivo químico (Martinho, 2014).....	8
Figura 2.3 Equipamento para a junção simultânea do aditivo e do betume.....	8
Figura 2.4 Temperatura de fabrico em função da tecnologia de produção das misturas betuminosas temperadas (Ferreira, 2009)	9
Figura 2.5 Ilustração esquemática de produção de espuma de betume por injeção de água (Adaptado de Jenkins, 2000).....	10
Figura 2.6 Zeólito sintético Aspha-min [®] (www.aspha-min.com).....	11
Figura 2.7 Zeólito sintético Advera [®] (www.adverawma.com).....	11
Figura 2.8 Esquematização dos benefícios associados à utilização de MBT.....	11
Figura 2.9 MBQ aplicadas a 160°C e MBT aplicadas a 120°C (http://www.marini.fayat.com)...	12
Figura 2.10 Determinação da percentagem ótima de betume nas MBQ com MBR (Antunes et al, 2009; Martinho et al, 2013).....	18
Figura 2.11 Esquema de central betuminosa contínua adaptada ao fabrico de MBRQ (Baptista, 2006).....	19
Figura 2.12 Esquema das entradas do material fresado no tambor de uma central contínua (adaptado, EAPA,1998)	19
Figura 2.13 Esquema do processo de reciclagem semi-temperada em central (adaptado de Wirtgen, 2003 citado por Baptista, 2006)	20
Figura 3.1 Mistura betuminosa recuperada proveniente da camada superficial do pavimento da base aérea nº5 de Monte Real.....	24
Figura 3.2 Equipamento utilizado para determinação da percentagem de betume envelhecido e aspeto geral do material ensaiado.....	24
Figura 3.3 Processo de peneiração (Antunes, 2014)	25
Figura 3.4 Curva granulométrica do material recuperado e limites do fuso	26
Figura 3.5 Curva granulométrica do material fresado após incineração e limites do fuso	27
Figura 3.6 Agregados naturais utilizados na mistura	27
Figura 3.7 Curvas granulométricas dos agregados naturais em estudo.....	29
Figura 3.8 Granulometria da mistura em estudo em comparação com os limites definidos na EN 13108-1.....	30
Figura 3.9 Frações de MBR (esquerda) e de agregados naturais (direita)	31
Figura 3.10 Pesagem do betume	33
Figura 3.11 Mistura betuminosa pronta a ser colocada no molde.....	33
Figura 3.12 Equipamento de compactação	34
Figura 3.13 Marcação para corte do provete.....	34
Figura 3.14 Vibro-compactação	35
Figura 3.15 Provetes retificados.....	35

Figura 3.16 Processo de compactação das lajetas.....	35
Figura 3.17 Processo de corte das lajetas em vigas	36
Figura 3.18 Determinação da baridade dos provetes (Fernandes, G. 2012).....	36
Figura 3.19 Determinação da baridade máxima teórica pelo picnómetro de vácuo	39
Figura 3.20 Prensa de Marshall.....	40
Figura 3.21 Propriedades Marshall da mistura em estudo	42
Figura 3.22 Provetes imersos a 40°C e prensa utilizada no ensaio	44
Figura 3.23 Aplicação da tração indireta e aspeto dos provetes após o ensaio.....	44
Figura 3.24 Equipamento e provete durante ensaio	46
Figura 3.25 Representação esquemática da evolução da deformação num ensaio de compressão uniaxial cíclico (Gardete, 2006).....	48
Figura 3.26 Curvas de deformação para cada provete no ensaio de compressão uniaxial cíclico para provetes com 5% de betume	49
Figura 3.27 Curvas de deformação para cada provete no ensaio de compressão uniaxial cíclico para provetes com 4,5% de betume	49
Figura 3.28 Curva de deformação média obtida no ensaio de compressão uniaxial cíclico para provetes com 5% de betume	50
Figura 3.29 Curva de deformação média obtida no ensaio de compressão uniaxial cíclico para provetes com 4,5% de betume	50
Figura 3.30 Unidade de flexão (Cooper, 2011)	54
Figura 3.31 Câmara climática (Crucho, 2011).....	55
Figura 3.32 Unidade de controlo.....	55
Figura 3.33 Reservatório de ar comprimido (Crucho, 2011).....	55
Figura 3.34 Unidade de aquisição de dados e computador e software (Crucho, 2011).....	56
Figura 3.35 Esquema do ensaio de flexão em quatro pontos (norma EN 12697-26).....	56
Figura 3.36 Evolução típica da tensão, da extensão e do modulo de rigidez em ensaios 4PB longos, conduzidos com extensão controlada e tensão controlada (Baptista, 2006).....	58
Figura 3.37 Representação gráfica do módulo de rigidez para as misturas betuminosas com 5% e 4,5% de betume, em função da frequência de carregamento.....	59
Figura 3.38 Representação gráfica do ângulo de fase para as misturas betuminosas em função da frequência de carregamento	60
Figura 3.39 Relação entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase para misturas betuminosas...	60
Figura 3.40 Representação das leis da Shell para F=7,5.....	62
Figura 3.41 Representação das leis da Shell para F=1.....	63
Figura 4.1 Comparação da variação da baridade das MBT em estudo com outras seis misturas.	68
Figura 4.2 Comparação da variação da baridade máxima teórica das MBT em estudo com outras cinco misturas	69
Figura 4.3 Comparação da variação da porosidade das MBT em estudo com outras seis misturas	70
Figura 4.4 Comparação da variação de VMA das MBT em estudo com outras seis misturas	71

Figura 4.5 Comparação da variação do valor de estabilidade Marshall das MBT em estudo com outras seis misturas.....	72
Figura 4.6 Comparação da variação do valor de deformação Marshall das MBT em estudo com outras seis misturas.....	73
Figura 4.7 Comparação da sensibilidade à água das MBT em estudo com outras cinco misturas.....	75
Figura 4.8 Comparação da resistência à deformação permanente das MBT em estudo com as avaliadas por Sousa (2015)	76
Figura 4.9 Comparação dos resultados do parâmetro f_c das MBT em estudo com as avaliadas por Sousa (2015).....	76
Figura 4.10 Comparação dos valores do módulo de rigidez das MBT em estudo com outras quatro misturas	77
Figura 4.11 Comparação dos valores do módulo de rigidez das MBT em estudo com outras quatro misturas	79

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 Dados relativos à redução de emissões com Misturas Betuminosas Temperadas, em percentagem [adaptado de FHWA (2008)]	12
Quadro 2.2 Principais técnicas de Reciclagem (adaptado de Baptista, 2006).....	15
Quadro 2.3 Dados estatísticos da reciclagem na europa (adaptado de EAPA, 2011).....	17
Quadro 3.1 Percentagem de betume de três amostras da MBR.....	24
Quadro 3.2 Análise granulométrica do material recuperado, após incineração	25
Quadro 3.3 Análise granulométrica do agregado recuperado, após incineração.....	26
Quadro 3.4 Características físicas dos agregados de granulometria 0/4 mm	28
Quadro 3.5 Características físicas dos agregados de granulometria 4/12 mm	28
Quadro 3.6 Características físicas dos agregados de granulometria 4/12 mm	28
Quadro 3.7 Características físicas dos agregados de granulometria 8/20 mm	28
Quadro 3.8 Características físicas dos agregados de granulometria 8/20 mm	29
Quadro 3.9 Características do betume 35/50 (Sousa, 2015).....	29
Quadro 3.10 Mistura de agregados para a formulação da mistura betuminosa.....	31
Quadro 3.11 Baridade dos provetes cilíndricos utilizados no método de Marshall	37
Quadro 3.12 Massa volúmica das diferentes frações de agregado	38
Quadro 3.13 Baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático.....	38
Quadro 3.14 Baridade máxima teórica da mistura	40
Quadro 3.15 Resultados obtidos nos ensaios de compressão de Marshall.....	41
Quadro 3.16 Propriedades de Marshall da mistura em estudo	41
Quadro 3.17 Resumo do cálculo da percentagem ótima de betume pelo método de Marshall..	43
Quadro 3.18 Baridades dos provetes submetidos ao ensaio de sensibilidade à água.....	45
Quadro 3.19 Resultados dos ensaios de sensibilidade à água para provetes com 5% de betume	45
Quadro 3.20 Resultados dos ensaios de sensibilidade à água para provetes com 4,5% de betume	46
Quadro 3.21 Caraterização dos provetes ensaiados.....	47
Quadro 3.22 Resultados laboratoriais da porosidade	52
Quadro 3.23 Resultados laboratoriais de ϵ_{3600}	52
Quadro 3.24 Resultados laboratoriais de f_c	52
Quadro 3.25 Características das vigas	53
Quadro 3.26 Características das vigas (Pb e Porosidade)	54
Quadro 3.27 Valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase para provetes com 5% de betume	58
Quadro 3.28 Valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase para provetes com 4,5% de betume	59
Quadro 3.29 Extensão para um milhão de ciclos ($N=1 \times 10$) e leis de fadiga para $F=7,5$	63
Quadro 3.30 Extensão para um milhão de ciclos ($N=1 \times 10$) e leis de fadiga para $F=1$	63

Quadro 4.1 Quadro resumo das composições das MBT em comparação, produzidas com betume aditivado em refinaria.....	66
Quadro 4.2 Quadro resumo das composições das MBT em comparação, produzidas com betume 35/50 e aditivo adicionado no processo de produção da mistura	66
Quadro 4.3 Quadro resumo da composição da MBQ em comparação, produzida com betume 35/50.....	67
Quadro 4.4 Quadro comparativo da baridade	67
Quadro 4.5 Quadro comparativo da baridade máxima teórica.....	68
Quadro 4.6 Quadro comparativo da porosidade.....	69
Quadro 4.7 Quadro comparativo do VMA.....	70
Quadro 4.8 Quadro comparativo da estabilidade Marshall.....	71
Quadro 4.9 Quadro comparativo de deformação Marshall	72
Quadro 4.10 Quadro resumo das composições consideradas para comparação da sensibilidade à água	74
Quadro 4.11 Resultados obtidos através do ensaio de tração indireta	74
Quadro 4.12 Resultados obtidos através do ensaio de compressão uniaxial cíclica realizados a 60°C	75
Quadro 4.13 Resultados do módulo de rigidez obtidos a 20°C através do ensaio 4PB	78

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

4PB – *Four-Point-Bending test* (Ensaio de flexão em 4 pontos)

AC – *Asphalt Concrete*

CEEP – Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (atual Infraestruturas de Portugal)

EAPA – *European Asphalt Pavement Association* (Associação Europeia de Pavimentos Betuminosos)

Em – Módulo de rigidez da mistura betuminosa

EN – *European Norm* (Norma Europeia)

EUA – Estados Unidos da América

f_c – velocidade de deformação

GEE – Gases com efeito de estufa

H – Humidade do material fresado

h₀ – Altura inicial do provete

h_N – Altura do provete ao fim de N ciclos

ITS – Resistência à tração indireta (Indirect Tensile Strength)

ITS_d – Resistência à tração indireta de provetes secos

ITS_R – Índice de resistência conservada em tração indireta (Indirect Tensile Strength Ratio)

ITS_w – Resistência à tração indireta (Indirect Tensile Strength) de provetes imersos em água

LVDT – *Linear Variable Differential Transformer* (Transformador Diferencial Variável Linear)

m₁^{*} – Massa do picnómetro e da tampa

m₁ – Massa do provete seco

m₂^{*} - Massa do picnómetro, da tampa e da amostra

m₂ – Massa do provete em água

m₃ – Massa do picnómetro, da tampa, do provete e da água

MBQ – Mistura betuminosa fabricada a Quente

MBR – Mistura betuminosa recuperada

MBT – Mistura betuminosa temperada

N – N^o de ciclos

-
- ND** – Não Determinado
- NP** – Norma Portuguesa
- pa** – Percentagem de agregados novos na mistura
- PAH** – *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons* (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos)
- pb** – Percentagem de betume na mistura
- pF** – Taxa de reciclagem da mistura
- pi** – Percentagem de cada agregado na mistura
- R** – Relação entre a massa de material recuperado e a massa de agregado
- RAP** – *Recycled Asphalt Pavement*
- T** – Temperatura da água no ensaio
- Ta** – Temperatura de aquecimento dos agregados
- TF** – Temperatura inicial do material fresado
- Tm** – Temperatura final da mistura betuminosa
- Vb** – Percentagem volumétrica de betume no volume total
- VMA** – Volume de vazios na mistura de agregados
- Vp** – Volume do picnómetro, de acordo com o Anexo C da norma EN 12697-5
- ΔT_a – Correção da temperatura da mistura
- ε – Extensão de tração
- ε_N – Extensão axial permanente acumulada após N ciclos
- ρ_b** – Baridade
- ρ_b** – Massa volúmica do ligante
- ρ_{bdry}** – Baridade a seco
- ρ_i** – Massa volúmica de cada agregado
- ρ_{mc}** – baridade máxima teórica da mistura determinada por cálculo
- ρ_{mv}** – Baridade máxima teórica da mistura betuminosa, determinada pelo método volumétrico
- ρ_{rd}** – Massa volúmica das partículas de agregado secas em estufa
- ρ_{ssd}** – Massa volúmica das partículas de agregado saturadas com superfície seca
- ρ_w** – Massa volúmica da água à temperatura do ensaio
-

1. Introdução e Organização do Trabalho

1.1. Enquadramento

Ao longo do século XX, houve um forte desenvolvimento da indústria e dos meios de transporte. Por isso, os pavimentos betuminosos foram ganhando cada vez mais importância no mundo atual. O revestimento betuminoso impôs-se como pavimento de referência a nível mundial, devendo-se às suas características mecânicas, conforto e segurança que oferece aos utilizadores. A construção de estradas tornou-se uma ferramenta social, política e económica fundamental para a sociedade e o seu desenvolvimento.

Porém, a partir do século XXI, e com entrada em vigor do Protocolo de Quioto em 2005, surge um novo desafio cuja principal premissa é resolver o problema do aquecimento global, reduzindo a emissão de gases com efeito de estufa (GEE). É manifesto, que a indústria de construção de pavimentos rodoviários tem um grande impacto nestas questões ambientais, existindo a consciência de que há muitos aspetos a melhorar, sendo importante existirem mudanças pró-ativas nas técnicas de execução de pavimentos betuminosos.

Neste contexto têm sido estudadas diversas alterações no domínio dos pavimentos rodoviários, em busca de pavimentos cada vez mais sustentáveis. Essas alterações têm sido direcionadas essencialmente para os processos produtivos, de forma a otimizar a utilização de recursos naturais, reduzir o consumo de energia, e reduzir as emissões de GEE, sem com isto pôr em causa a saúde, bem como garantir um elevado nível de conforto e segurança dos utentes.

Hoje em dia as misturas betuminosas fabricadas a quente (MBQ) são as mais utilizadas em obras de construção e reabilitação de pavimentos rodoviários. Este método de produção requer um importante consumo energético, produzindo consequentemente efeitos negativos para o ambiente e para a saúde dos operários na aplicação em obra. É, portanto, evidente a importância da diminuição destes aspetos negativos, encontrando métodos que permitam a diminuição da temperatura de produção. Quanto mais elevada for a temperatura de produção da mistura, maior será o consumo de combustíveis fósseis e a emissão de gases poluentes.

É neste contexto que surgem as misturas betuminosas temperadas (MBT). Estas caracterizam-se principalmente pela diminuição do consumo de energia e das emissões em todo o processo de fabrico. Apesar das tecnologias de produção de misturas betuminosas temperadas ser ainda relativamente recente, existe já um conjunto de alternativas para a diminuição da temperatura de fabrico. Os seus inúmeros benefícios do ponto de vista ambiental e económico têm potenciado o seu crescente desenvolvimento.

Depois do processo de utilização de MBT se ter iniciado pela mistura de aditivos ao betume em obra, passou a ser oferecido ao mercado um betume aditivado em refinaria, o qual pode ser utilizado em central de produção. Isto é representativo da importância que esta tecnologia tem vindo a adquirir nos processos de construção de pavimentos betuminosos.

Atualmente, não é possível discutir-se o desenvolvimento sustentável sem abordar o tema da reciclagem. A reutilização de materiais provenientes de pavimentos betuminosos encontra-se em constante desenvolvimento. A reutilização dos materiais de pavimentos degradados ou, até

mesmo, o aproveitamento de resíduos provenientes de outras atividades industriais tem vindo a ganhar cada vez mais importância, promovendo um conjunto de vantagens tais como: a redução das emissões de GEE, a diminuição de consumo energético, a diminuição dos custos de produção e a preservação dos recursos naturais.

É neste contexto que surge o desenvolvimento desta dissertação, tendo como objeto estudar o fabrico e as propriedades de misturas betuminosas temperadas com um betume aditivado em refinaria, ao mesmo tempo que se incorpora MBR proveniente de pavimentos degradados.

1.2. Objetivos e Metodologia do Trabalho

O objetivo desta dissertação é contribuir para o estudo das características volumétricas e mecânicas de uma mistura betuminosa temperada, do tipo AC 20 bin/base, produzida com betume aditivado em refinaria e com incorporação de material betuminoso recuperado. Neste sentido, pretende-se avaliar e garantir o bom desempenho desta mistura betuminosa, demonstrando com base em ensaios em laboratório que esta técnica inovadora pode ser utilizada com vantagem e com um maior nível de certeza em relação às propriedades que é possível obter. Para isso são realizadas comparações dos desempenhos mecânicos com misturas fabricadas em condições semelhantes e misturas fabricadas de forma convencional.

O contributo que pretende dar-se assenta em princípios alinhados com as políticas de desenvolvimento sustentável prosseguidas nos países da União Europeia, designadamente a utilização, na indústria da construção de pavimentos, de misturas betuminosas ambientalmente mais adequadas, recorrendo a reciclagem e reutilização de subprodutos, a redução do consumo de energia e a diminuição de emissões.

Relativamente à metodologia do trabalho, a mesma foi realizada em três fases que se descrevem nos parágrafos seguintes.

- A primeira fase consistiu na elaboração de uma revisão da literatura sobre os aspetos associados à produção e aplicação das misturas betuminosas temperadas e sobre a incorporação de material reciclado em misturas betuminosas. A recolha de dados relativos à revisão bibliográfica foi realizada com o objetivo de obter enquadramento global dos conceitos mais importantes relacionados com a temática. Seguiu-se um aprofundamento dos conhecimentos relacionados com as diversas metodologias de fabrico de misturas betuminosas temperadas. Fez-se, ainda, uma análise mais detalhado das normas de ensaios a realizar ao longo do estudo laboratorial.
- Na segunda fase realizaram-se os trabalhos experimentais que tiveram como objetivo a caracterização dos materiais constituintes das misturas, a análise destas relativamente às suas propriedades volumétricas mais relevantes, e a avaliação de algumas propriedades mecânicas.
- Na última fase efetuou-se uma análise comparativa dos resultados laboratoriais obtidos, para as misturas betuminosas temperadas em estudo, com resultados publicados por outros autores, relativos a misturas betuminosas convencionais e a misturas temperadas.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos, cuja estrutura e conteúdos se descrevem seguidamente.

Neste primeiro capítulo introdutório faz-se um enquadramento do tema em estudo, sendo referidos aspetos gerais sobre o tema tratado. São definidos os principais objetivos da investigação e faz-se uma síntese da organização do trabalho.

No capítulo 2 desenvolve-se o tema das misturas betuminosas temperadas, descrevendo as tecnologias atualmente disponíveis para o fabrico deste tipo de misturas e referindo alguns aspetos ligados à produção e aplicação das mesmas. Apresenta-se também uma síntese das vantagens e desvantagens relativas à utilização de misturas betuminosas temperadas. Por fim, apresenta-se os aspetos considerados mais relevantes no que respeita à formulação de MBT com incorporação de mistura betuminosa recuperada (MBR).

No capítulo 3 apresentam-se os trabalhos experimentais que foram realizados em laboratório e os resultados obtidos, referentes ao estudo de caracterização de uma MBT, com MBR. Ao longo deste capítulo, são apresentadas as propriedades de cada um dos materiais constituintes da mistura, bem como os procedimentos realizados no fabrico desta e na sua compactação para a moldagem de provetes cilíndricos e vigas. São também apresentados os aspetos mais relevantes de cada ensaio, assim como os procedimentos adotados e o seu enquadramento normativo.

No capítulo 4 faz-se uma análise comparativa dos resultados obtidos nos trabalhos experimentais com os determinados por outros autores, sobre misturas convencionais e MBT comparáveis às estudadas nesta dissertação, realizando-se uma análise crítica aos resultados.

No capítulo 5 é realizada uma síntese do trabalho efetuado, resumindo as principais conclusões desta dissertação. Também se sugerem algumas linhas de investigação que podem ser pertinentes para a continuação do estudo deste tema em trabalhos futuros.

2. Misturas Betuminosas Temperadas

2.1. Generalidades

O desenvolvimento sustentável é um tema que vem merecendo uma atenção crescente na sociedade, tendo vindo a ganhar cada vez mais importância ao longo dos anos. A indústria da construção, na qual está inserido o setor rodoviário, não foge a estas preocupações, tendo vindo a desenvolver esforços no sentido de diminuir os impactos ambientais originados pelas tecnologias de produção de misturas betuminosas. Nesse sentido surgiu o interesse em desenvolver as misturas betuminosas temperadas (MBT). Este tipo de misturas começou a ser estudado a partir da década de 90 (Prowell e Hurley, 2008).

As misturas betuminosas temperadas permitem uma redução da temperatura de produção entre 30 a 50°C face às misturas betuminosas a quente (MBQ). Esta diminuição de temperatura leva a que exista uma redução de gases emitidos para a atmosfera, poluindo menos, gastando menos energia no aquecimento dos materiais, além de melhorar as condições de trabalho dos trabalhadores, uma vez que as elevadas temperaturas aumentam a quantidade de fumos indesejáveis que prejudicam a saúde.

Vários estudos publicados mostram reduções de 60 a 70% de óxidos de azoto, 50% de compostos orgânicos, 30 a 40% de CO₂ e de SO₂, 20 a 25% de poeiras e 10 a 30% de monóxido de carbono. Quanto maior a redução de temperatura maior será a redução de emissões de gases (D'Angelo et al., 2008). Segundo Hurley e Prowell, (Hurley e Prowell, 2006), cerca de 30 a 50% dos gastos totais de uma central são atribuídos ao combustível.

Existem diversos métodos que permitem manter a trabalhabilidade das misturas a temperaturas mais baixas. Para isso, é necessário juntar aditivos orgânicos ou químicos, ou utilizar um processo de fabrico que origine a formação de espuma de betume. O aumento da trabalhabilidade permite a incorporação de misturas betuminosas recuperadas. As MBT permitem maiores distâncias de transporte e maiores períodos de pavimentação, bem como a aplicação em zonas com temperaturas mais baixas e melhorias na compactação.

2.2. Características das Misturas Betuminosas Temperadas (MBT)

As misturas betuminosas podem ser classificadas em 4 famílias, em função da gama de temperaturas de fabrico utilizadas (Figura 2.1):

- Misturas betuminosas a frio;
- Misturas betuminosas semi-temperadas;
- Misturas betuminosas temperadas;
- Misturas betuminosas a quente;

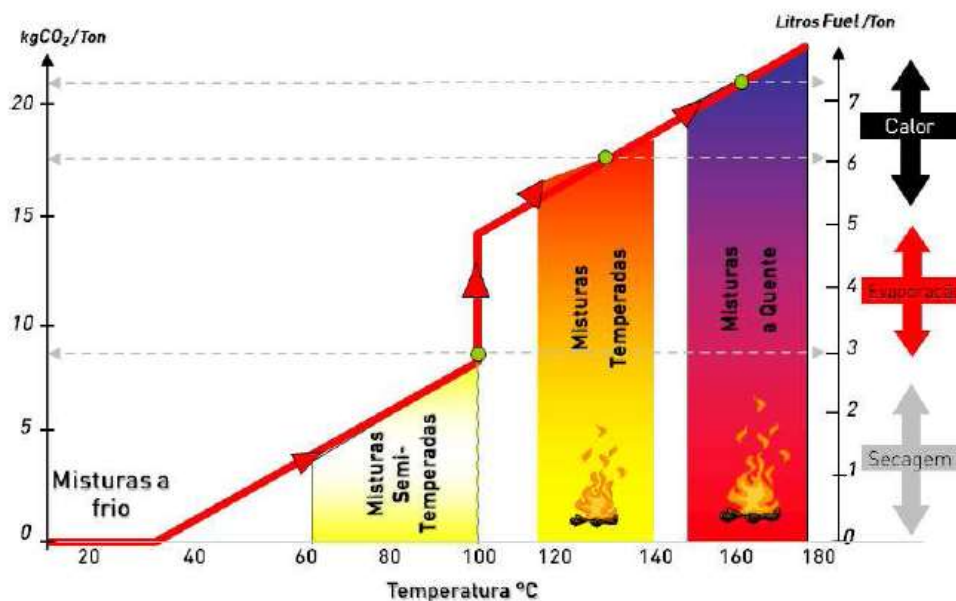


Figura 2.1 Classificação das tecnologias de produção de misturas betuminosas em função da temperatura de produção (Ferreira, 2009)

As misturas betuminosas a frio são produzidas sem aquecimento dos agregados e com emulsões de betume ou betume espuma. As misturas betuminosas semi-temperadas são produzidas com os mesmos tipos de ligantes, a temperaturas abaixo de 100°C, com agregados aquecidos a uma temperatura que varia entre 70 e 100°C. (Capitão et al, 2012)

As misturas betuminosas temperadas são compostas por agregados e betume, podendo possuir ou não aditivos. Estas misturas são produzidas a temperaturas entre 100 e 140°C, conseguindo-se, portanto, uma redução de 30°C relativamente a misturas betuminosas a quente. A metodologia de produção é muito semelhante à seguida no fabrico de MBQ. São utilizadas diversas técnicas com o objetivo de permitir, por um lado, o completo revestimento dos agregados pelo ligante a temperaturas mais baixas e, por outro lado, assegurar a adequada compactação subsequente (EAPA, 2010).

As misturas betuminosas temperadas podem ser produzidas de diversas formas, utilizando varias tecnologias, algumas das quais provocam modificações temporárias, ou permanentes de algumas propriedades do betume, como por exemplo a viscosidade.

2.3. Mecanismos Envolvidos na Redução da Temperatura

As misturas betuminosas temperadas podem ser produzidas utilizando varias tecnologias. É possível classificar as tecnologias mais usuais em três grupos diferentes (EAPA, 2010; Prowell et al, 2011; Martinho et al, 2013) consoante o princípio que utilizam para baixar a temperatura de fabrico e aplicação de MBT:

- Utilização de aditivos orgânicos;
- Utilização de aditivos químicos;
- Tecnologias de espuma de betume.

As técnicas que utilizam aditivos são de um modo geral as mais simples de aplicar, porque permitem utilizar as centrais de fabrico sem necessidade de alterações, o que constitui uma vantagem significativa (Martinho et al, 2013). A maioria dos aditivos são geralmente sólidos, e introduzidos na mistura à temperatura ambiente, uma vez que são fornecidos sob a forma de pastilhas ou *pellets*. Alguns estão disponíveis no estado líquido, tendo um período de validade para a sua aplicação mais curto (Prowell et al, 2011; Martinho et al, 2013; Antunes, 2014).

2.3.1. Aditivos Orgânicos

Os aditivos orgânicos são constituídos por ceras orgânicas que, ao serem acrescentadas às misturas betuminosas, baixam a viscosidade do ligante. Quando estas ceras estão submetidas a temperaturas acima do seu ponto de amolecimento alteram as propriedades do betume, resultando numa redução da sua viscosidade. Se a mistura betuminosa estiver suficientemente quente o efeito da redução da viscosidade será mantido ao longo de todo o processo de mistura e compactação.

Após o arrefecimento do betume, os aditivos cristalizam, aumentando a rigidez do ligante e a sua resistência à deformação (Martinho et al, 2013).

O aditivo orgânico a utilizar tem de ser escolhido de forma a que o seu ponto de amolecimento seja sempre superior à temperatura em serviço, reduzindo, assim, o risco de ocorrerem deformações permanentes e a possibilidade de ocorrerem fendilhamentos associados a baixas temperaturas (Prowell e Hurley, 2008; Sousa, 2015).

Estes tipos de aditivos proporcionam uma redução de temperatura entre 20 e 30 °C e tendem a aumentar a resistência das misturas à deformação permanente (EAPA, 2010).

2.3.2. Aditivos químicos

Os aditivos químicos podem ser formados por um conjunto de produtos, tais como os tensoativos (*surfactants*), agentes de emulsificação, promotores de revestimento dos agregados (Figura 2.2.) e melhoria da adesividade proporcionada ao ligante (Capitão et al, 2012).

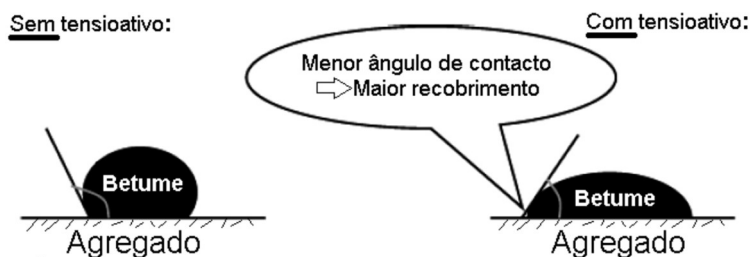


Figura 2.2 Melhoria do ângulo de contacto devido a incorporação de aditivo químico (Martinho, 2014)

Os aditivos químicos atuam ao nível da interface do betume com os agregados, permitindo melhorar o recobrimento dos agregados pelo betume com temperaturas mais baixas (Alves, 2012; Martinho, 2014).

Este tipo de aditivos é normalmente adicionado ao ligante durante o processo de mistura, sob a forma granular, líquida ou através de técnicas que possibilitam a sua adição através de emulsões betuminosas (Antunes, 2014).

Os aditivos químicos podem reduzir as temperaturas de mistura e compactação em cerca de 30°C (Martinho, 2013).

Em geral, a percentagem de aditivo químico utilizado em relação à massa de betume varia entre 1,5 e 2,5%, não alterando significativamente as propriedades de consistência do betume da mistura à qual é adicionado (Prowell e Hurley, 2008).

Quando se usam aditivos químicos nas centrais de produção de misturas betuminosas, a introdução do material pode ser feita diretamente no tanque do betume ou na mistura imediatamente após a colocação do ligante, como se pode observar na Figura 2.3. No entanto, quando se coloca na mistura é necessário modificar o sistema de introdução do ligante, para que este possa ser introduzido ao mesmo tempo que o aditivo.



Figura 2.3 Equipamento para a junção simultânea do aditivo e do betume (Prowell e Hurley, 2008)

2.3.3. Espuma de betume

Existem atualmente varias tecnologias para a obtenção de espuma de betume. Esta é geralmente obtida pela adição de uma pequena quantidade de água pulverizada, a frio, no betume pré-aquecido. A pulverização pode ser efetuada de forma direta ou através da utilização de zeólitos naturais ou sintéticos com um teor em água considerável.

Quando se junta água ao betume sob determinadas condições faz com que o betume expanda, aumentando, assim, o seu volume inicial, provocando uma redução da viscosidade, o que permite misturar o ligante com os agregados à temperatura ambiente. Quando a mistura arrefece o volume de betume diminui, o que faz com que o betume regresse novamente às suas características iniciais. Este fenómeno promove assim uma melhor distribuição do ligante na mistura betuminosa (Martinho, 2014; Zaumanis, 2010).

As técnicas de produção de espuma de betume podem classificar-se em duas categorias:

- Espuma de betume por injeção direta de água;
- Espuma de betume com adição de minerais sintéticos ou naturais.

A literatura refere diferentes gamas de temperaturas de fabrico aplicáveis, em função da técnica utilizada, tal como se ilustra na Figura 2.4:

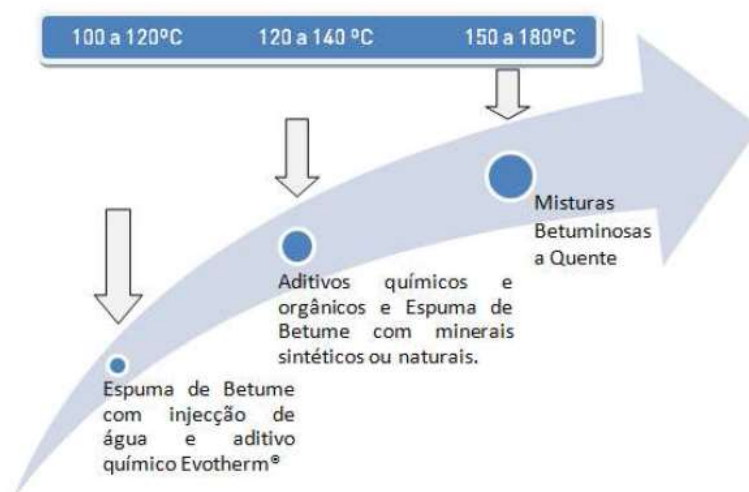


Figura 2.4 Temperatura de fabrico em função da tecnologia de produção das misturas betuminosas temperadas (Ferreira, 2009)

Espuma de betume por injeção de água

Uma das técnicas de produção de espuma de betume consiste em injeções de pequenas quantidades de água atomizada (cerca de 2% da massa do betume) em betume quente numa câmara de expansão. No momento em que a água entra em contacto com o betume, esta vaporiza-se rapidamente, levando o betume a formar uma “espuma”. Durante o processo existe um aumento temporário do seu volume, cerca de 20 a 30 vezes superior ao inicial, e uma redução significativa da viscosidade do betume, permitindo o recobrimento dos agregados a menores temperaturas (Croteau e Tessier, 2008). Na Figura 2.5 abaixo é ilustrado este processo de produção.

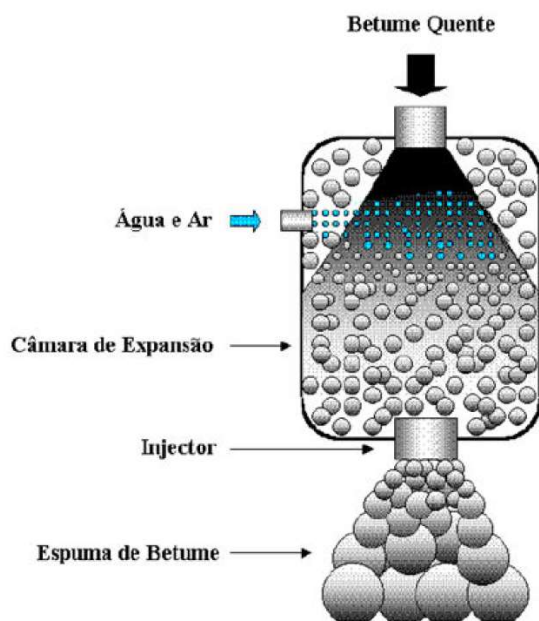


Figura 2.5 Ilustração esquemática de produção de espuma de betume por injeção de água
(Adaptado de Jenkins, 2000)

Espuma de betume com adição de minerais sintéticos ou naturais

Estas tecnologias de produção de MBT utilizam minerais (sintéticos ou naturais) como fonte de formação de espuma no betume. O pó mineral contém cerca de 20 % de água na sua estrutura, sendo adicionado durante o processo de mistura do betume com o agregado. Quando a temperatura ultrapassa 100°C ocorre a expulsão das moléculas de água na forma de vapor, o qual em contacto com o ligante gera betume-espuma (EAPA, 2010). O Aspha-min[®] (Figura 2.6) e o Advera[®] (Figura 2.7) são dois exemplos de zeólitos sintéticos que podem utilizar-se nesta tecnologia.

Os minerais vulgarmente utilizados como fonte de formação de espuma no betume são constituídos por cadeias de silicatos, com grandes espaços vazios na sua estrutura, que permitem a presença de grandes catiões como o sódio e o cálcio, e as moléculas de água. Os zeólitos são utilizados nas misturas betuminosas temperadas por possuírem propriedades importantes, as quais estão relacionadas com a sua capacidade de absorção de diferentes quantidades de água e o modo como a libertam, sem provocar alterações na sua estrutura cristalina (Martinho et al, 2013; FHWA, 2010).

Tecnologias como esta, nas quais são adicionadas pequenas quantidades de água, libertam menores quantidades de vapor de água que no caso das tecnologias baseadas em injeção de água. Por conseguinte, a expansão do betume baseada na adição de pó mineral é menor que a obtida na tecnologia de injeção de água (Capitão et al, 2012).



Figura 2.6 Zeólito sintético Aspha-min®
(www.aspha-min.com)



Figura 2.7 Zeólito sintético Advera®
(www.adverawma.com)

2.4. Benefícios das Misturas Betuminosas Temperadas

As misturas betuminosas temperadas possuem um conjunto de vantagens geralmente reconhecidas pela comunidade científica (Figura 2.8). Estas vantagens assentam na redução das temperaturas de produção e colocação das misturas betuminosas. Estes benefícios são visíveis a curto, médio e longo prazo, podendo ser agrupados em benefícios ambientais, económicos, e técnicos, acarretando também benefícios para os trabalhadores, utilizadores e população residente (Martinho et al, 2013).



Figura 2.8 Esquemática dos benefícios associados à utilização de MBT

2.4.1. Ambientais

As misturas betuminosas temperadas têm como principal vantagem ambiental a redução de consumos de recursos energéticos. Uma vez que este tipo de mistura é produzido a temperaturas mais baixas, são esperadas numerosas vantagens em termos ambientais (Martinho et al, 2014).

A diminuição da temperatura de fabrico das MBT faz com que a emissão de gases para atmosfera reduza de forma significativa, comparativamente com as misturas tradicionais (Quadro 2.1). A temperaturas mais baixas, a emissão de vapores e fumos durante a produção e compactação em obra é menor (Figura 2.9).

Quadro 2.1 Dados relativos à redução de emissões com Misturas Betuminosas Temperadas, em percentagem [adaptado de FHWA (2008)]

Emissões	Noruega	Itália	Holanda	França	Canadá
CO ₂	31,5	30-40	15-30	23,0	45,8
SO ₂	Nd	35	Nd	18	41,2
COV _s	Nd	50	Nd	19	Nd
CO	28,5	10-30	Nd	Nd	63,1
NO _x	61,5-62,5	60-70	Nd	18*	58
Pó	54	25-55	Nd	Nd	Nd

*como NO₂

Nd – não determinado

As MBT permitem a incorporação de maiores quantidades de material betuminoso recuperado de pavimentos, o que possibilita uma maior conservação dos recursos naturais e um aproveitamento do ligante pré-existente. Numa publicação do programa WRAP (*Waste and Research Action Program*), do Reino Unido, foi assinalado que a inclusão de apenas 14% de agregados reciclados nas misturas betuminosas reduz as emissões de carbono em 4%, sendo conseguida uma redução global do impacto no meio ambiente de 9% (Nynas, 2009).



Figura 2.9 MBQ aplicadas a 160°C e MBT aplicadas a 120°C
(<http://www.marini.fayat.com>)

2.4.2. Benefícios económicos

Os benefícios económicos das MBT correspondem ao balanço entre os ganhos e os gastos necessários para produzir este tipo de misturas. A redução de temperatura conseguida permite reduzir o consumo de energia na produção em 35% ou mais, dependendo da diminuição da temperatura de produção alcançada. Essa diminuição estende-se aos custos associados numa proporção idêntica (Prowell e Hurley, 2008). Naturalmente, esta redução depende do tipo de combustível utilizado nas centrais de fabrico e do respetivo custo unitário em cada momento (Martinho, 2014).

Como foi referido no ponto anterior, as MBT permitem a incorporação de maiores percentagens de material betuminoso recuperado, sendo assim possível diminuir os custos associados à extração de agregados naturais e à eliminação/redução de depósitos dos resíduos, conseguindo, assim, reduzir o custo global e favorecer a conservação dos recursos naturais, bem como reduzir o impacto ambiental, relativamente às misturas betuminosas convencionais.

2.4.3. Benefícios técnicos

A utilização de MBT possui um conjunto de aspetos técnicos que favorecem a sua utilização na fase de pavimentação, uma vez que esta técnica permite o aumento da trabalhabilidade e da compactabilidade. Por causa disso, as MBT alargam os períodos, diários e ao longo do ano, nos quais é possível a sua aplicação, podendo aumentar-se a duração das viagens entre as centrais de produção e os locais de aplicação de forma significativa, mesmo em ambientes mais frios. Isto deve-se ao facto de a temperatura da mistura ser mais próxima da ambiente, possibilitando assim o aumento dos tempos de transporte, permite também a abertura ao tráfego num período mais curto (D'Angelo et al, 2008; EAPA, 2010).

Além disso, como já foi mencionado anteriormente, as MBT permitem a incorporação de maiores quantidades de misturas betuminosas recuperadas, devido à redução da viscosidade do ligante endurecido. Menores temperaturas induzem menor envelhecimento do ligante, o que pode contribuir para aumentar a vida útil dos pavimentos e diminuir a necessidade de extração de pó no processo de aquecimento, uma vez que os agregados são aquecidos a temperaturas inferiores.

2.4.4. Benefícios para os trabalhadores e populações residentes

A utilização de MBT é benéfica para os trabalhadores, uma vez que ao reduzir as temperaturas de produção e aplicação das misturas betuminosas, reduzem-se as emissões de substâncias nocivas a que os trabalhadores estão sujeitos. Este facto é confirmado nos ensaios aos componentes voláteis do betume/fumos e aos *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*, PAH (Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos), que indicam uma diminuição significativa em relação às misturas tradicionais. Os resultados apontam para uma redução de cerca de 30 a 50% nas referidas emissões (Capitão et al., 2012). Ao serem proporcionadas melhores condições de trabalho, conforto e segurança aos trabalhadores no fabrico e aplicação de MBT, promove-se também um aumento da produtividade.

Pode, portanto, concluir-se que a utilização de MBT proporciona uma melhoria ambiental para as populações residentes, quer nas proximidades das obras quer nas zonas das centrais de

produção. Outro benefício deste tipo de misturas betuminosas é permitir afastar as zonas produção para zonas mais afastadas das cidades, uma vez que as MBT permitem aumentar as distâncias e os tempos de percursos até o local de aplicação.

2.5. Desvantagens das Misturas Betuminosas Temperadas

Apesar de ter enumeras vantagens, esta tecnologia também possui algumas desvantagens. As tecnologias de produção de MBT são relativamente recentes, embora o número de locais de teste e projetos nos quais têm sido utilizadas em todo o mundo ser já bastante significativo. No entanto, a incorporação de material recuperado em MBT ainda necessita de ser estudada, de modo a que possa ter-se maior certeza no que se refere ao seu comportamento esperado.

Ao fazer uma análise dos custos comparativos relativamente às misturas convencionais, verifica-se uma redução de consumo de energia nas MBT, com a conseqüente redução dos custos. Contudo, deve referir-se que algumas tecnologias, designadamente as baseadas em betume espuma, exigem investimento inicial na adaptação da central de produção. As técnicas baseadas em aditivos acarretam a necessidade de se adquirirem esses produtos para baixar a temperatura de produção. Portanto, é necessário efetuar uma análise ponderada, de modo a garantir que as poupanças obtidas superam os custos adicionais, poupanças essas que serão tanto maiores quanto maiores forem as reduções nas temperaturas de produção (Zaumanis, 2010; Button et al, 2007).

A produção de misturas betuminosas temperadas permite a redução das emissões de gases com efeito de estufa. Contudo, apesar desse benefício ambiental, deve ser tido em conta que a produção dos aditivos gera por seu lado emissões de carbono, contrabalançando o benefício anterior (Zaumanis, 2010).

Segundo alguns autores (Zoumanis, 2010; Hurley e Prowell, 2006), a elevada sensibilidade à água das misturas betuminosas temperadas pode ser justificada pelas baixas temperaturas de produção e compactação que resultam numa secagem incompleta dos agregados. Estas circunstâncias, juntamente com o menor envelhecimento do ligante, devido ao uso de uma temperatura de produção das misturas mais reduzida, originando problemas de desagregação do pavimento e assentamentos prematuros pela presença de água. Mesmo utilizando aditivos tensioativos para melhorar a adesividade ligante-agregado, a humidade causada pela água pode acarretar problemas. A adição de material betuminoso recuperado à mistura pode melhorar o desempenho relativamente à sensibilidade à água e à deformação permanente (formação de rodeiras) (Hill, 2011).

Além disso, a boa trabalhabilidade de algumas MBT pode redundar numa porosidade reduzida, quando comparada com uma MBQ convencional equivalente. Este facto, que estará associado a um menor endurecimento do betume, devido à sua menor oxidação durante todo o processo de produção, pode aumentar o potencial para a deformação permanente de algumas MBT, embora contribua para a sua maior durabilidade (Martinho, 2014).

2.6. Misturas Betuminosas Recicladas

Na década de 70 do século XX viveu-se uma das maiores crises petrolíferas, o que levou a um maior estímulo à reciclagem dos pavimentos betuminosos. Devido ao preço, o uso do petróleo e, conseqüentemente, do betume, teve de ser otimizado, uma vez que aqueles influenciam diretamente os custos de fabrico, transporte e aplicação das misturas. Na Europa as misturas betuminosas lideram a lista de materiais reciclados, superando a sucata de ferro, representando mais do que a soma de todos os restantes materiais reciclados (vidro, plástico, jornais e revistas). Nos EUA, também as misturas betuminosas representam uma percentagem elevada de material reciclado, cerca de 80% (Baptista, 2006).

A reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis tem vindo a ganhar cada vez mais importância no setor rodoviário, devendo ser um tema de debate, a ser promovido e divulgado. Trata-se de uma técnica que consiste em fabricar novas misturas betuminosas, utilizando materiais fresados provenientes de pavimentos antigos a reabilitar, mediante a adição de novos materiais de correção, agregados e betume (Branco et al, 2011; Antunes, 2014).

As misturas betuminosas recicladas (MBR), independentemente da técnica de reciclagem usada, podem ser aplicadas na obra de onde provêm ou noutra, quer na reabilitação, quer aplicadas em obras novas de pavimentos rodoviários.

A utilização de misturas betuminosas recicladas oferece um conjunto de vantagens, a nível económico e ambiental, particularmente associadas à redução do consumo de agregados novos e ligante e à redução das distâncias de transporte, reduzindo os impactos ambientais (Martinho, 2014).

A reciclagem de misturas betuminosas pode ser realizada recorrendo a diferentes técnicas: a frio ou a quente, *in situ* ou em central, e com diferentes ligantes (betume asfáltico, emulsão betuminosa ou cimento). As principais técnicas de reciclagem de misturas betuminosas resumem-se no Quadro 2.2 (Baptista, 2006).

Quadro 2.2 Principais técnicas de Reciclagem (adaptado de Baptista, 2006)

Tipo de Reciclagem	Localização do processo de Reciclagem	
	<i>In Situ</i>	Em Central
Reciclagem a Frio com Cimento	sim	não
Reciclagem a Frio com Emulsão Betuminosa	sim	sim
Reciclagem a Frio com Betume - Espuma	sim	sim
Reciclagem Semi-Quente com emulsão Betuminosa	não	sim
Reciclagem a Quente	sim	sim
Reciclagem misturas temperadas	não	sim

Na reciclagem *in situ*, em simultâneo com a fresagem dos materiais (mistura betuminosa e/ou materiais das camadas granulares) é acrescentado o ligante novo, e procede-se à colocação da

mistura reciclada. Nestas técnicas, geralmente, todo o material fresado é integrado na nova mistura.

Nas técnicas de reciclagem em central, o material fresado é transportado para a central, sendo incorporado no processo de produção de misturas betuminosas, podendo o material recuperado ser aplicado no local de origem ou noutras obras (Baptista, 2006).

Analisando em conjunto os dois grupos de técnicas, pode concluir-se que as misturas betuminosas produzidas *in situ* apresentam características de desempenho tendencialmente inferiores às das misturas produzidas em central, uma vez que estas são fabricadas com um maior nível de controlo das composições e, por isso, o produto final tem geralmente menos variabilidade e maior fiabilidade. Porém, as misturas betuminosas produzidas em central exigem o transporte do material fresado, o que pode ser um inconveniente, uma vez que tal acarreta um aumento nos custos, principalmente se a central se encontrar muito afastada do local da obra de recolha do material (Fonseca *et al*, 2006).

2.6.1. Reciclagem a quente em central

Nesta secção descreve-se, de forma mais detalhada, o processo de reciclagem a quente em central, por ser a técnica mais utilizada em Portugal. Porém, analisando os dados recentes fornecidos pela EAPA (EAPA, 2011) acerca da utilização desta técnica a nível europeu, é possível constatar que ainda existe uma grande discrepância de valores entre os estados, visto que a Alemanha, a França ou a Itália, por exemplo, estão a obter um maior aproveitamento de misturas betuminosas recuperadas comparativamente a Portugal, como se pode observar no Quadro 2.3.

Quadro 2.3 Dados estatísticos da reciclagem na europa (adaptado de EAPA, 2011)

País	Material disponível (ton)	% de material disponível usado em reciclagem a:			% misturas betuminosas produzidas a quente e semiquente que contêm material disponível
		Quente	Semi-quente	Fria	
Áustria	550000	90	-	5	-
Bélgica	1500000	65	-	-	50
Republica Checa	1500000	14	0	15	10
Dinamarca	600000	80	-	20	53
Finlândia	1000000	-	-	-	65
França	7080000	45	-	-	30
Alemanha	14000000	84	-	16	65
Grécia	0	0	0	0	0,01
Inglaterra	4500000	-	-	-	-
Hungria	64882	100	0	0	30
Islândia	15000	-	-	25	2,5
Irlanda	100000	40	0	-	2
Itália	11000000	20	-	-	-
Luxemburgo	190000	95	0	-	80
Holanda	4000000	83	-	-	71
Noruega	726000	18	-	62	10
Polónia	110000	4	-	-	0,2
Portugal	2000	60	0	15	20
Roménia	13000	60	12	5	8
Eslovénia	10000	-	30	50	-
Espanha	1350000	73	-	17	-
Suécia	1100000	70	5	15	65
Suíça	1750000	51	18	10	23
Turquia	2809000	23	-	77	11

A produção de MBR a quente em central tem uma complexidade semelhante à produção de misturas betuminosas a quente convencionais. Segundo Antunes et al (2009), a formulação de misturas betuminosas recicladas a quente deve passar pelas fases expostas na Figura 2.10.

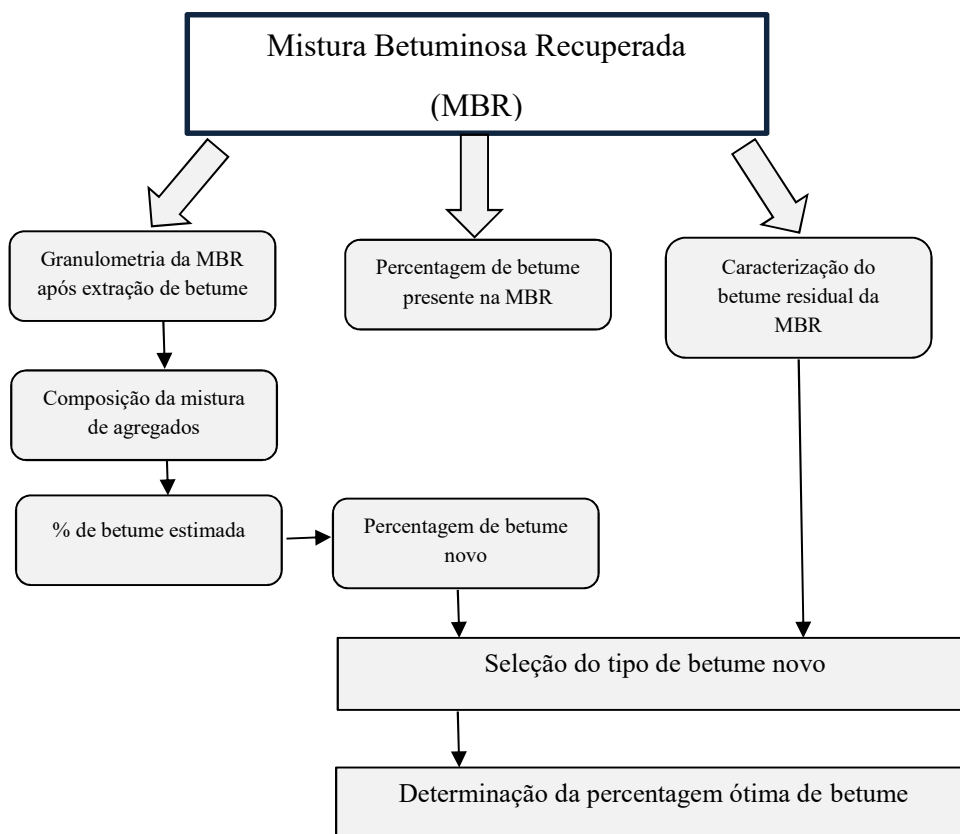


Figura 2.10 Determinação da percentagem ótima de betume nas MBQ com MBR (Antunes et al, 2009; Martinho et al, 2013).

A técnica de reciclagem a quente em central consiste em fabricar uma mistura betuminosa a quente, utilizando materiais betuminosos de pavimentos antigos, de modo a obter um novo pavimento com as características desejadas e que tenha um bom comportamento a longo prazo, com temperaturas de produção, acima dos 140 °C, dependendo do tipo de betume a utilizar (Branco et al, 2011).

➤ Central contínua de tambor-secador-misturador

Um fator importante que determina as percentagens permitidas de incorporação de material fresado nas MBQ é a forma como se procede ao aquecimento da mistura betuminosa recuperada. O aquecimento das misturas betuminosas recuperadas nas centrais de fabrico contínuas pode ser conseguido de três formas distintas: aquecimento por chama indireta, aquecimento através da chama no sentido do fluxo do MBR e aquecimento por contacto com os agregados sobreaquecidos (Dinis-Almeida, 2010). Atualmente as técnicas mais utilizadas são através do aquecimento em que a chama é direcionada no sentido do fluxo do MBR e por contacto com agregados sobreaquecidos (EAPA, 1998). É de salientar que no processo de

produção são adicionados materiais corretivos, agregados e betume, de forma a obter misturas com bons desempenhos, equiparáveis aos das misturas convencionais fabricadas a quente. Nesse sentido o betume “novo” a acrescentar a estas misturas deve ser mais mole que o habitual, modificado ou conter rejuvenescedores, de forma a que o material reciclado recupere algumas das suas propriedades, para que o desempenho da mistura reciclada seja idêntico ao de uma mistura convencional com materiais novos (Pais, 2013).

Na Figura 2.11 mostra-se a configuração genérica de uma central contínua adaptada ao fabrico de misturas recicladas a quente.

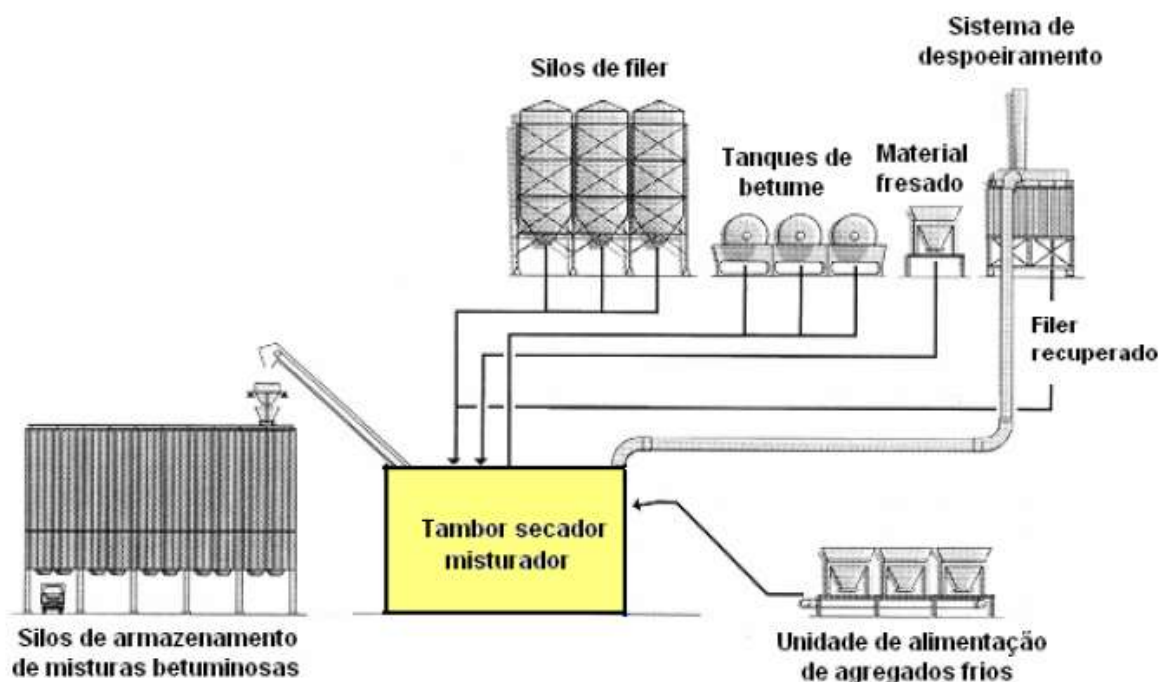


Figura 2.11 Esquema de central betuminosa contínua adaptada ao fabrico de MBRQ (Baptista, 2006)

O recurso a centrais contínuas proporciona o uso de métodos distintos para a produção de misturas betuminosas recicladas a quente, sendo as principais (Figura 2.12): central com tambor-secador-misturador (TSM) de fluxos paralelos, central com TSM com fluxos contracorrentes e central contínua de tambor duplo.

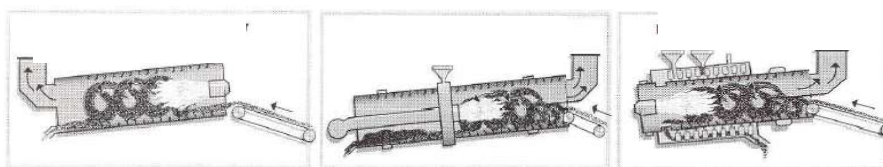


Figura 2.12 Esquema das entradas do material fresado no tambor de uma central contínua (adaptado, EAPA,1998)

➤ Central descontínua

As centrais descontínuas permitem a utilização de diferentes técnicas, que incluem os métodos RAP (*reclaimed asphalt pavement*) a frio, RAP a quente, *Recycleclean* (reciclagem limpa) e a central de torre.

No método de RAP a frio o material fresado não é aquecido. A mistura betuminosa recuperada é introduzida no elevador dos agregados quentes. O aquecimento desse material é conseguido por contacto com os agregados novos sobreaquecidos, de forma a que a mistura reciclada atinja uma temperatura final adequada. Neste processo conseguem-se taxas de reciclagem que oscilam entre 10 e 30%. O método RAP a quente prevê um pré-aquecimento do material a reciclar, normalmente, num tambor-secador de fluxo paralelo. Este método de reciclagem permite a incorporação de cerca de 70% de mistura betuminosa recuperada (Batista, 2004). Noutra variante, o método *recycleclean*, os agregados entram no tambor-secador pela extremidade enquanto que o material fresado é introduzido no meio do tambor secador através de um anel central. O aquecimento da mistura betuminosa recuperada é feito através de chama, assegurando que não sofre sobreaquecimento. Este método permite a incorporação de taxas de reciclagem até 35% (Gomes, 2005). A técnica de reciclagem através do processo da central com torre permite o armazenamento intermédio dos agregados aquecidos. Neste caso, os agregados (já aquecidos) são transportados para silos, localizados por cima da unidade de mistura, de acordo com a sua fração granulométrica, sendo posteriormente enviados para as básculas, em função da composição da mistura escolhida e, por fim, colocados no misturador.

2.6.2. Reciclagem semi-temperada em central

A reciclagem semi-temperada em central é uma técnica de reciclagem que utiliza como ligante uma emulsão betuminosa (Figura 2.13) que permite obter taxas de reciclagem até 100%.

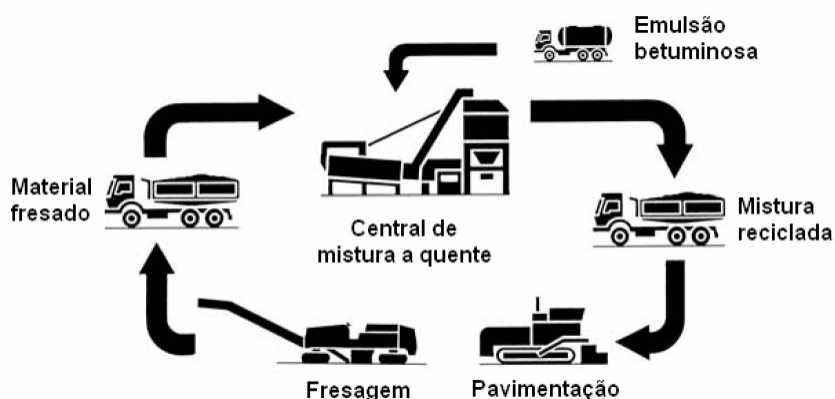


Figura 2.13 Esquema do processo de reciclagem semi-temperada em central (adaptado de Wirtgen, 2003 citado por Baptista, 2006)

Neste tipo de metodologia, à semelhança das metodologias convencionais, o material fresado é transportado do local de execução dos trabalhos até a central, sendo armazenado por lotes mediante as características do material. De seguida, a mistura betuminosa recuperada é

aquecida a cerca de 90°C no tambor de uma central a quente, contínua ou descontínua e a emulsão betuminosa é injetada à temperatura ambiente (através de um sistema automático). A mistura dos materiais é feita no misturador central (nas centrais descontínuas) ou no tambor-secador-misturador (nas centrais contínuas) (Pais, 2013).

Este tipo de reciclagem conjuga um conjunto de benefícios da reciclagem a quente e a frio, sendo as vantagens as seguintes: a mistura pode ser armazenada durante 24h sempre que o espalhamento e compactação sejam efetuados à temperatura superior ou igual a 60°C (Batista, 2006). Outra vantagem desta metodologia está relacionada com o aquecimento a que é submetido o material fresado, o que permite que a abertura ao tráfego seja imediata (devido a eliminação de grande parte da água durante o processo de fabrico), eliminando-se assim o período de cura necessário no caso de reciclagem a frio com emulsão (Batista, 2006). As temperaturas de produção e colocação são mais baixas que na reciclagem a quente devido a utilização de emulsões betuminosas, representando um conjunto de vantagem e termos económicos e ambientais.

2.6.3. Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Misturas Betuminosas Recuperadas.

A utilização de Misturas Betuminosas Recuperadas (MBR) de pavimentos existentes proporciona diversas vantagens económicas e ambientais, particularmente associadas à redução do consumo de agregados novos e ligantes, a um abaixamento da energia utilizada na produção e no aquecimento dos agregados, e a redução das distâncias de transporte, produzindo assim menores impactes ambientais. (Martinho, 2014).

A incorporação de MBR é uma prática facilitada quando se recorre a tecnologias de produção de Misturas Betuminosas Temperadas (MBT), dados estas garantirem um adequado envolvimento dos agregados a menores temperaturas, abrandando o aumento do envelhecimento do betume e conseqüentemente a sua rigidez (Fonseca et al, 2008).

Relativamente ao fabrico, transporte, espalhamento e a compactação de MBT com incorporação de MBR, podem ser seguidas as mesmas regras de usadas no caso de MBQ. Do ponto de vista mecânica, este tipo de misturas, apresentam resultados equiparados aos determinados para as MBQ (Martinho et al, 2013).

Analisando estudos recentes, conclui-se ainda que é possível produzir MBT incorporando apenas uma quantidade reduzida de agregados virgens, complementada com agregados reciclados, permitindo produzir MBT com custos energéticos de produção inferiores e com características equivalentes às misturas tradicionais fabricadas a quente, constituindo assim uma vantagem importante relativamente as MBQ na construção e reabilitação de pavimentos. (Martinho et al, 2013).

2.7. Considerações Finais

Analisando a literatura consultada, verifica-se que surgiu um grande interesse em desenvolver misturas betuminosas temperadas a partir da década de 90, altura em que houve um maior progresso das diversas tecnologias de produção deste tipo de misturas. Atualmente existem diversas tecnologias disponíveis para a produção de MBT, podendo ser agrupadas em três categorias: aplicação de aditivos orgânicos, utilização de aditivos químicos ou o uso de um processo de fabrico que origine a formação de espuma de betume.

As tecnologias empregadas nas misturas betuminosas temperadas, têm como principal objetivo a diminuição da temperatura de fabrico e de aplicação das misturas. Esta redução não deve pôr em causa o seu desempenho, tendo como objetivo obter propriedades equivalentes às das MBQ.

A redução da temperatura, de produção e aplicação das misturas betuminosas temperadas, proporciona um conjunto de benefícios, que vão desde a redução de gases emitidos para a atmosfera, à diminuição do consumo de energia (essa redução pode chegar aos 35%), a qual também é refletida nos custos de produção das centrais. Existe ainda uma melhoria das condições de trabalho dos trabalhadores.

As misturas betuminosas temperadas permitem ainda a incorporação de maiores quantidades de MBR, o que é vantajoso a nível ambiental e económico, havendo menores necessidades de extração de agregados naturais e de colocação de resíduos em vazadouro.

A formulação das MBT pode seguir os procedimentos normais das MBQ. Em termos de aplicação em obra são usadas tecnologias tradicionais para a o espalhamento e compactação da mistura. Este tipo de misturas consegue apresentar um nível de desempenho mecânico igual ou superior ao das misturas a quente.

3. Estudo Laboratorial de uma MBT com Betume Aditivado em Refinaria e MBR

3.1. Considerações Iniciais

No presente capítulo apresenta-se o estudo laboratorial realizado sobre uma mistura betuminosa temperada, com incorporação de material betuminoso reciclado, utilizando um “betume temperado” aditivado em refinaria, de modo a possibilitar a sua utilização a temperaturas moderadas, na gama das utilizadas no fabrico de misturas betuminosas temperadas.

Os principais trabalhos laboratoriais desenvolvidos no âmbito desta dissertação foram os seguintes:

- Caracterização dos diferentes materiais constituintes da mistura betuminosa reciclada temperada, procedendo-se à análise granulométrica dos mesmos e determinação da percentagem de betume residual da MBR;
- Estabelecimento das composições granulométricas de misturas do tipo AC 20 bin/base para as várias composições analisadas, fabrico das misturas e moldagem de provetes (cilindros e vigas);
- Caracterização das misturas betuminosas produzidas, nomeadamente, através de ensaios de avaliação das propriedades volumétricas e de avaliação da resistência mecânica; na primeira fase foram realizados ensaios para a determinação da baridade e da baridade máxima teórica; na segunda fase, efetuaram-se ensaios de caracterização mecânica: compressão de Marshall, sensibilidade à água, compressão uniaxial cíclica e determinação do módulo de rigidez.

3.2. Caracterização dos Materiais Utilizados

Neste subcapítulo apresenta-se a caracterização dos materiais constituintes novo introduzidos nas misturas betuminosas, bem como a caracterização do material recuperado.

3.2.1. Análise granulométrica do material reciclado

A mistura betuminosa reciclada utilizada no fabrico das misturas em estudo (Figura 3.1) foi recolhida por fresagem das camadas superficiais dos pavimentos da Base Aérea nº5 de Monte Real. É de salientar que o material reciclado possui agregado calcário.

Para a caracterização do material reciclado procedeu-se à determinação da sua granulometria, e da sua percentagem de betume.



Figura 3.1 Mistura betuminosa recuperada proveniente da camada superficial do pavimento da base aérea nº5 de Monte Real

A determinação da percentagem de betume presente na MBR é determinante para a formulação da mistura. Por isso, determinou-se a quantidade de betume residual do material recuperado através do método da inceneração (Figura 3.2), de acordo com a norma EN 12697-39, submetendo a MBR a um ciclo de inceneração numa mufla (Quadro 3.1).

O ensaio foi realizado para três amostras de MBR, de modo a avaliar a variabilidade da sua percentagem de betume. Obteve-se uma percentagem média de betume de 5,2%.

Quadro 3.1 Percentagem de betume de três amostras da MBR

	Perc. Betume (%)	Média (%)
MBR 1	5,53	
MBR 2	5,21	5,24
MBR 3	4,99	



Figura 3.2 Equipamento utilizado para determinação da percentagem de betume envelhecido e aspeto geral do material ensaiado

De seguida prepararam-se duas amostras de agregado para análise granulométrica, a qual se realizou de acordo com as indicações definidas pela norma NP EN 933-1 (para agregados) e EN 12697-2 (para agregados de misturas betuminosas), tendo sido utilizado como principal equipamento, um conjunto de peneiros e um agitador mecânico (Figura 3.3).



Figura 3.3 Processo de peneiração (Antunes, 2014)

O processo de peneiração consiste na separação de um material granular em várias frações, por meio de um conjunto de peneiros, dispostos em ordem decrescente de abertura de malha, fazendo passar o material através da coluna de peneiros. O ensaio foi efetuado com auxílio de um agitador mecânico durante um período de 30 minutos. Uma vez concluída a peneiração, pesou-se o material retido em cada peneiro. Nos quadros 3.2 e 3.3 e nas figuras 3.4 e 3.5 apresentam-se os resultados obtidos e os limites do fuso geralmente utilizados em Portugal.

Quadro 3.2 Análise granulométrica do material recuperado, após incineração

Aberturas dos peneiros (mm)	Percentagem de passados (%)				
	Amostra Base Aérea Monte real nº5			FUSO AC 20 base	
	Amostra 1	Amostra 2	Média das amostras	Limite inferior	Limite superior
31,5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
20	100,00	100,00	100,00	90,00	100,00
12,5	88,73	85,79	87,26	57,00	86,00
4	45,30	41,20	43,25	34,00	49,00
2	27,20	21,10	24,15	26,00	41,00
0,5	6,90	4,70	5,80	12,00	26,00
0,125	1,10	2,30	1,70	4,00	14,00
0,063	0,40	2,20	1,30	2,00	7,00

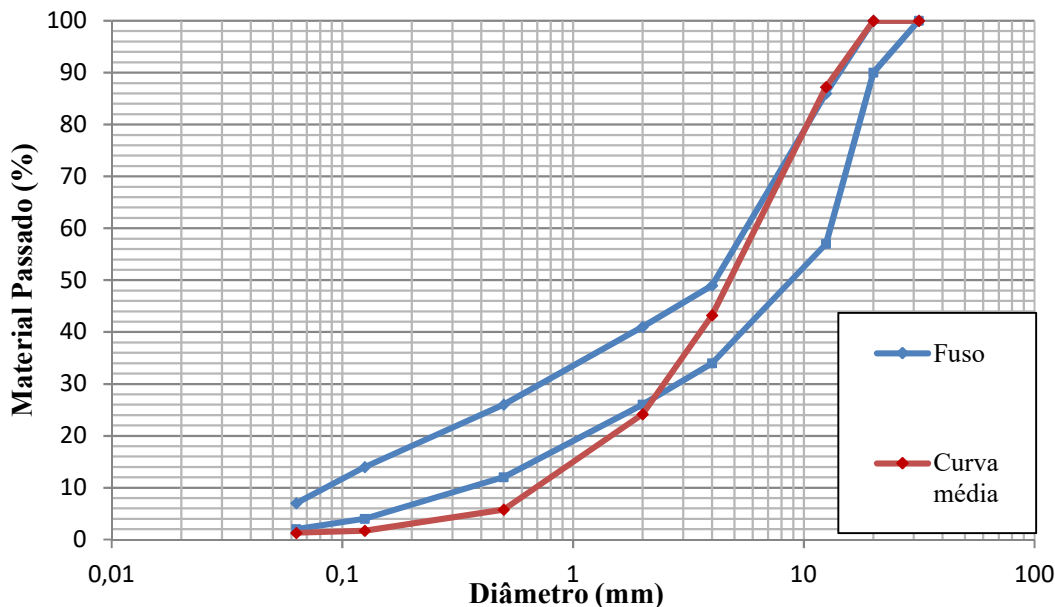
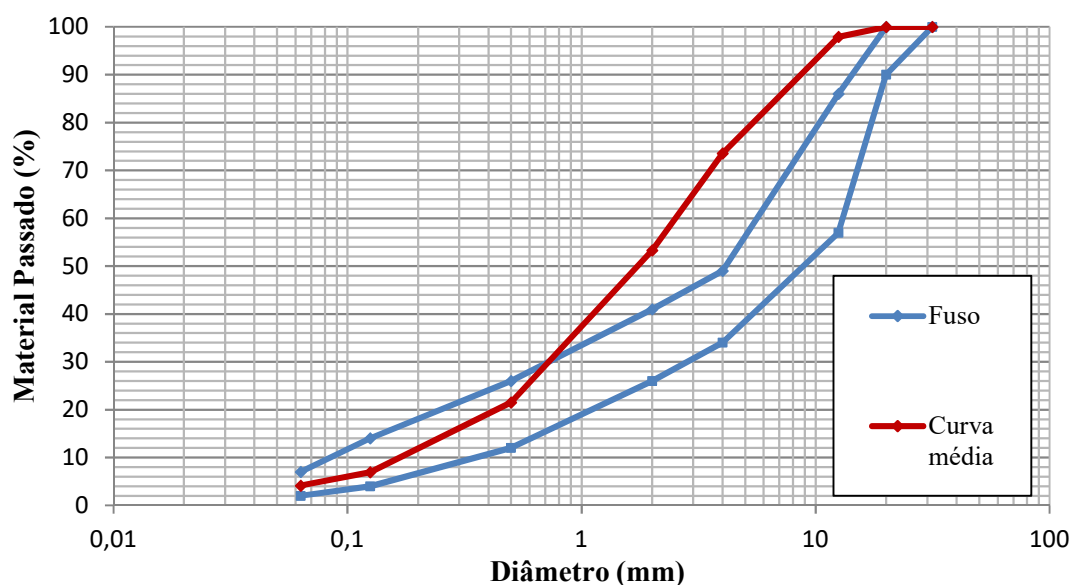


Figura 3.4 Curva granulométrica do material recuperado e limites do fuso

Quadro 3.3 Análise granulométrica do agregado recuperado, após incineração

Percentagem de passados (%)					
Aberturas dos peneiros (mm)	Amostra Base Aérea Monte real nº5			FUSO AC20Bin	
	Amostra 1	Amostra 2	Média das amostras	Limite inferior	Limite superior
31,5	100,00	100,00	100,00	100	100
20	100,00	100,00	100,00	90,0	100
12,5	98,29	97,61	97,95	57,0	86
4	74,70	72,38	73,54	34,0	49
2	55,50	51,09	53,30	26,0	41
0,5	23,47	19,50	21,48	12,0	26
0,125	7,44	6,44	6,94	4,0	14
0,063	4,33	3,97	4,15	2,0	7



Diâmetros (mm)	31,5	20	12,5	4	2	0,5	0,125	0,063
Limites do fuso (%)	100	100	86	49	41	26	14	7
	100	90,0	57,0	34,0	26,0	12,0	4,0	2,0

Figura 3.5 Curva granulométrica do material fresado após incineração e limites do fuso

3.2.2. Análise granulométrica dos agregados naturais e propriedades do ligante

Os agregados naturais novos adicionados às misturas betuminosas devem possuir características físicas, químicas, geométricas e mecânicas convenientes para um bom desempenho do pavimento. Neste caso de estudo, pretendia-se produzir um AC 20 base e dispunha-se de várias frações de agregados do tipo gnaiss: 8/20, 4/12, 0/4 e fíler calcário (figuras 3.6 e 3.7).

Foi possível obter informação acerca das características físicas do material utilizado através das fichas técnicas do produto, que se encontram resumidas nos (quadros 3.4 a 3.8) da onde é possível verificar os parâmetros físicos fundamentais, de acordo com a NP EN 13043.

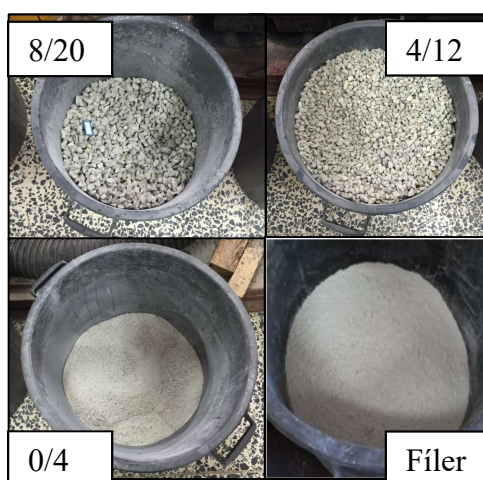


Figura 3.6 Agregados naturais utilizados na mistura

Quadro 3.4 Características físicas dos agregados de granulometria 0/4 mm

Características	Massa volúmica (Mg/m ³)			Granulometria	MB _f (g/kg)	Baridade ρ_b (Mg/m ³)	WA (%)
	ρ_a	Prd	ρ_{ssd}				
Material							
Pó 0/4	2,65	2,62	2,63	GA80	MB _f 10	1,61	0,4
NPEN 13043							
Requisitos/ Categoria	A declarar			A declarar	MB _f 10	A declarar	≤ 1

Quadro 3.5 Características físicas dos agregados de granulometria 4/12 mm

Características	Massa volúmica (Mg/m ³)			Granulometria	FI (%)	SI (%)	LA (%)	MDE (%)
	ρ_a	Prd	ρ_{ssd}					
Material								
Brita 4/12	2,62	2,59	2,61	GC 90-15	FI15	SI15	LA20	MDE10
NPEN 13043								

Quadro 3.6 Características físicas dos agregados de granulometria 4/12 mm

Características	Baridade ρ_b (Mg/m ³)	WA (%)	PSV (%)
Material			
Brita 4/12	1,38	0,6	PSV ₅₀
NPEN 13043			

Quadro 3.7 Características físicas dos agregados de granulometria 8/20 mm

Características	Massa volúmica (Mg/m ³)			Granulometria	FI (%)	SI (%)	LA (%)	MDE (%)
	ρ_a	Prd	ρ_{ssd}					
Material								
Brita 8/20	2,63	2,61	2,61	G90/10	FI15	SI15	LA20	MDE10
NPEN 13043								

Quadro 3.8 Características físicas dos agregados de granulometria 8/20 mm

Características	Massa volúmica (Mg/m ³)			Granulometria	FI (%)	SI (%)	LA (%)	MDE (%)
	ρ_a	Prd	ρ_{ssd}					
Material								
Brita 8/20	2,63	2,61	2,61	G90/10	FI15	SI15	LA20	MDE10
NPEN 13043								

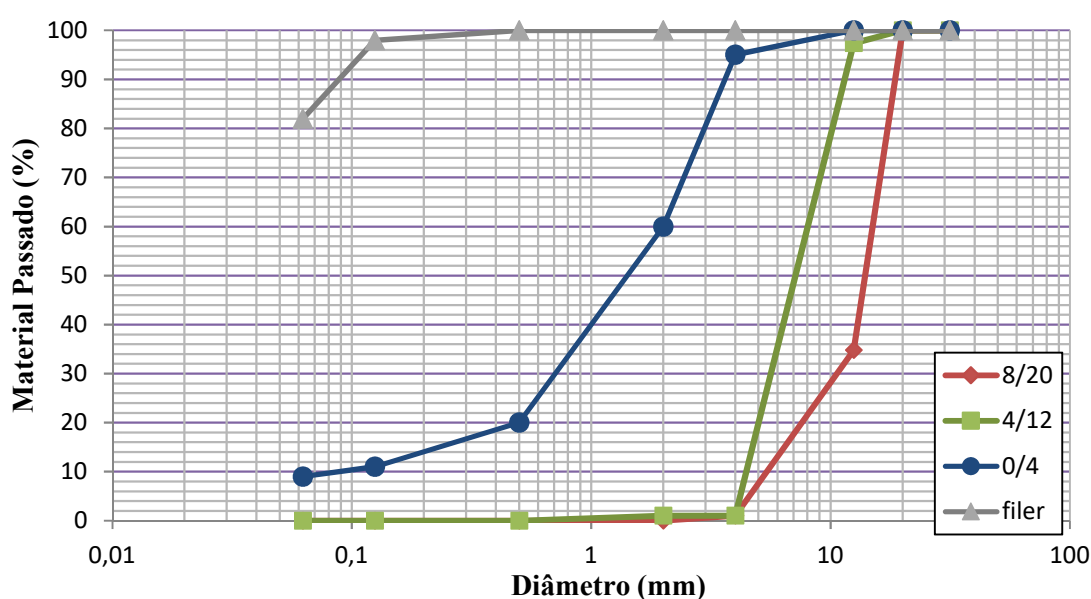


Figura 3.7 Curvas granulométricas dos agregados naturais em estudo

Para o fabrico da mistura foi utilizado um betume aditivado em refinaria, de classe 35/50, cujas propriedades e seus limites, de acordo com a norma EN 12591, se apresentam no Quadro 3.9. O betume foi caracterizado no âmbito de uma dissertação anterior (Sousa, 2015), tendo-se verificado experimentalmente o cumprimento dos requisitos relativos à temperatura de amolecimento e à penetração a 25°C.

Quadro 3.9 Características do betume 35/50 (Sousa, 2015)

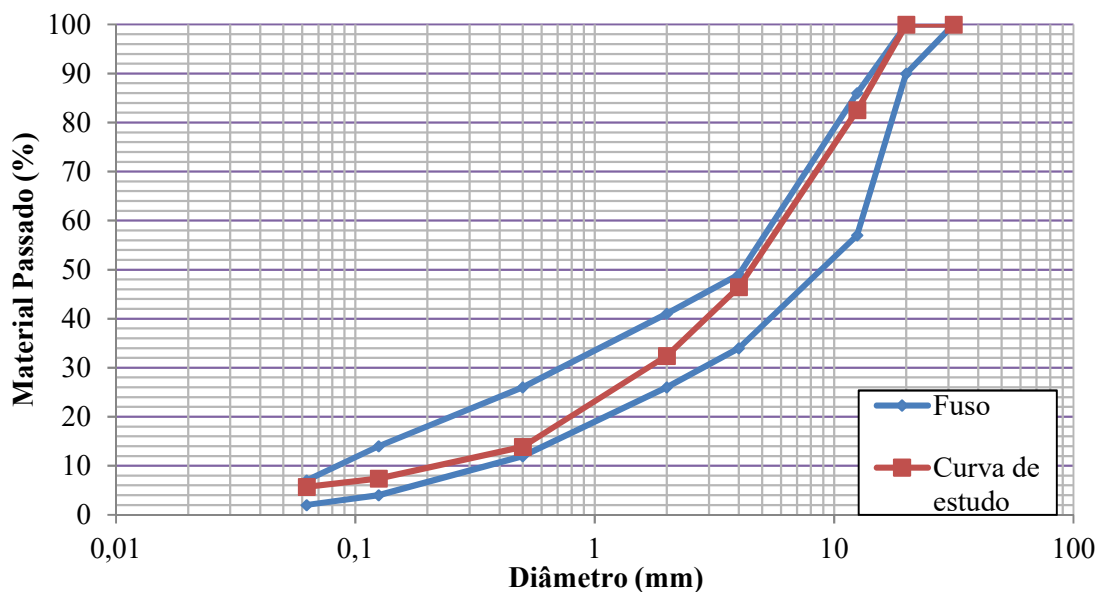
Características	Betume 35/50	Norma	Min.	Max.
Penetração (0,1 mm) [25°C; 100g ; 5s]	37	NP EN 12591	35	50
Temperatura de amolecimento (°C)	51	NP EN 12592	50	58

Densidade do betume	1,04	-	-	-
----------------------------	------	---	---	---

3.2.3. Composição granulométrica das misturas betuminosas

O estudo da composição granulométrica das misturas betuminosas foi efetuado para um AC 20 bin. Após a inceneração do material fresado e a determinação da sua granulometria (Figura 3.5), verificou-se que a curva obtida para as amostras de material fresado não cumpria os limites estabelecidos, por exemplo, no CEEP para aquele tipo de misturas. Verificou-se que não existem limites específicos para misturas temperadas, uma vez que estas substituem as funções das misturas a quente. Assim, utilizaram-se os requisitos indicados no CEEP para misturas betuminosas a quente, designadamente os referentes às misturas betuminosas a quente do tipo AC 20 bin.

Após verificar os resultados das análises granulométricas de cada um dos agregados constituintes da mistura, determinou-se a curva granulométrica da mistura em estudo (Figura 3.8) e as percentagens de cada fração. As proporções escolhidas para a mistura final foi de 30% de MBR e de 70% de material novo (Figura 3.9).



Diâmetros (mm)	31,5	20	12,5	4	2	0,5	0,125	0,063
Limites do fuso (%)	100	100	86	49	41	26	14	7
	100	90	57	34	26	12	4	2

Figura 3.8 Granulometria da mistura em estudo em comparação com os limites definidos na EN 13108-1

As percentagens de cada fração de agregados da mistura final estão apresentadas no quadro 3.10.

Quadro 3.10 Mistura de agregados para a formulação da mistura betuminosa

Peneiro ASTM	31,5	20	12,5	4	2	0,5	0,125	0,0625	V. Final
abertura das malhas (mm)									
Fração 8/20	100,0	100,0	34,8	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,0%
Fração 4/12	100,0	100,0	97,4	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0	20,0%
Fração 0/4	100,0	100,0	100,0	95,0	60,0	20,0	11,0	9,0	22,0%
fíler	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,0	82,0	3,0%
MBR	100,0	100,0	98,0	73,6	53,3	21,5	6,9	4,2	30,0%
NP 13108-1(MÁX.)	100,0	90,0	57,0	34,0	26,0	12,0	4,0	2,0	-
NP 13108-1 (min.)	100,0	100,0	86,0	49,0	41,0	26,0	14,0	7,0	-
Curva de estudo	100,0	100,0	82,5	46,4	32,4	13,9	7,4	5,7	-



Figura 3.9 Frações de MBR (esquerda) e de agregados naturais (direita)

3.3. Fabrico da Mistura e Moldagem de Provetes

Depois de realizado o estudo relativamente à granulometria dos agregados, em que se determinou a percentagem de cada um destes de modo a garantir o encaixe da curva da mistura dentro do fuso indicado no CEEP, avançou-se para o fabrico da mistura e moldagem dos provetes. Estes provetes foram posteriormente utilizados para a realização do método de Marshall e de alguns ensaios complementares de caracterização mecânica das misturas betuminosas.

Com o objetivo de formular a mistura betuminosa e determinar a sua percentagem ótima em betume, foram produzidos 5 grupos de provetes em laboratório, com diferentes percentagens de betume, incrementando a percentagem de betume em 0,5% de um conjunto para o seguinte, de modo a testar as seguintes percentagens de ligante: 3,5%, 4%, 4,5%, 5% e 5,5%. Para cada grupo foram realizados 5 provetes com 101 ± 3 mm de diâmetro, os quais foram submetidos aos ensaios efetuados no âmbito do método de Marshall.

Visto tratar-se de uma mistura betuminosa temperada, e tendo em conta que a MBR foi introduzida na mistura à temperatura ambiente, a determinação da temperatura de aquecimento dos agregados naturais tornou-se um fator essencial, de modo a produzir misturas com a temperatura de preparação pretendida, que no caso em estudo era de 120°C.

A temperatura de aquecimento dos agregados naturais foi determinada de acordo com as indicações de Baptista (2006), tendo em conta o equilíbrio térmico no fabrico de misturas betuminosas, exemplificou-se para uma percentagem de betume de 5%, sabendo que:

- a taxa de reciclagem da mistura (pF)=30%;
- a percentagem de filer na mistura = 3%;
- a humidade na MBR = 0%;
- a percentagem de betume novo na mistura = 2,64%;
- a percentagem de agregados novos na mistura (pa) = 67,36% .

A relação entre a massa de MBR e a massa de agregado novo é dada pela seguinte equação (1):

$$R = \frac{pF}{pa} = \frac{0,3}{0,6736} = 0,4454 \quad (1)$$

Admitindo que a temperatura da MBR é de 20°C e que as perdas de calor em laboratório correspondem a uma correção $\Delta T_a = 10\%$, para obter uma temperatura de 120 °C, a temperatura de aquecimento dos agregados será dada pela equação (2):

$$T_a = T_m \times (1 + R) - R \times T_F + 5 \times R \times h \times (637 - T_F) + \Delta T_a \quad (2)$$

Onde,

T_a – temperatura de aquecimento dos agregados (°C), calculada através da equação (3);

T_m – temperatura final da mistura betuminosa (°C);

ΔT_a – fator de correção de T_a devido as perdas de calor (°C);

R – relação entre a massa de MBR e a massa dos agregados novos;

T_F – temperatura inicial do material fresado (°C);

H – humidade da MBR.

$$T_a = 120 \times (1 + 0,4454) - 0,4454 \times 20 + 5 \times 0,4454 \times 0 \times (637 - 20) + 10 = 175^\circ\text{C} \quad (3)$$

Com base no resultado obtido, os agregados naturais foram aquecidos na estufa ventilada à temperatura de 180°C.

O betume “temperado” utilizado foi da classe 35/50 e foi mantido, na estufa ventilada, à temperatura de 140°C.

Para a produção da mistura (figuras 3.10 e 3.11), de acordo com a norma EN 12607-35, os agregados naturais foram previamente secos e aquecidos em estufa a 180 °C para cada uma das amassaduras.

Após a junção dos diferentes componentes, estes foram misturados de forma manual. Tendo em conta os valores habituais para o início da compactação de misturas temperadas, estabeleceu-se como objetivo uma temperatura de cerca de 120°C. A mistura foi, portanto, colocada dentro do molde com uma temperatura superior àquela (Antunes, 2014)



Figura 3.10 Pesagem do betume



Figura 3.11 Mistura betuminosa pronta a ser colocada no molde

3.3.1. Provetes cilíndricos para ensaio de Marshall

A compactação dos provetes foi realizada com um compactador de impacto (Figura 3.12), de acordo com a EN 12697-30+A1. Este método consiste em compactar de forma dinâmica provetes cilíndricos, com um diâmetro de $101\pm 0,3$ mm e uma altura de $63,5\pm 2,5$ mm, através da queda de uma massa de 4,5 kg de uma altura de 0,45 m, em que cada provete é submetido a 75 pancadas em cada face. Após o arrefecimento dos provetes à temperatura ambiente, estes são desmoldados com recurso a um equipamento de extrusão munido de um macaco hidráulico.



Figura 3.12 Equipamento de compactação

3.3.2. Provetes cilíndricos para ensaio a deformação permanente

Os provetes foram compactados em moldes cilíndricos com um diâmetro de 150 mm, utilizando um vibro-compactador com duas cargas de 16 kg cada uma (figura 3.14). A compactação foi realizada à temperatura de 120 °C durante 1 minuto em cada face do provete.

Após a compactação os provetes foram sujeitos a um processo de corte (Figuras 3.13 e 3.15) para garantir o paralelismo entre as faces. Para isso, estes foram realizados com uma altura superior à desejada em cerca de 20 mm, sendo posteriormente retificados numa máquina de corte, de modo a ficarem com as faces paralelas e com aproximadamente 60 mm de altura.

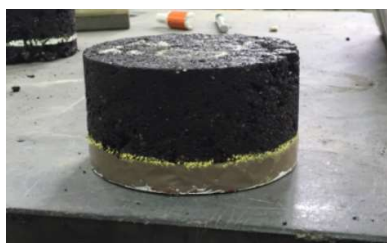


Figura 3.13 Marcação para corte do provete



Figura 3.14 Vibro-compactação



Figura 3.15 Provetes retificados

3.3.3. Provetes prismáticos

Para a obtenção de provetes prismáticos, vulgarmente designados por vigas, moldaram-se duas lajetas, com diferentes percentagens de betume, tendo-se utilizado uma misturadora elétrica para o processo de mistura e um cilindro de rolos vibradores no processo de compactação, como se ilustra na Figura 3.16.



Figura 3.16 Processo de compactação das lajetas

Após as lajetas terem sido compactadas, estas foram mantidas no molde durante 24h para arrefecerem até a temperatura ambiente. Depois procedeu-se à sua desmoldagem e foram cortadas em vigas de 415 mm de comprimento, 50 mm de largura e 50 mm de altura. Na Figura 3.17 é possível observar-se o processo de serragem das lajes em provetes prismáticos.



Figura 3.17 Processo de corte das lajetas em vigas

3.4. Caracterização da mistura betuminosa

3.4.1. Determinação da baridade (EN 12697-6)

Para o cálculo da baridade (ρ_b) utilizou-se o método da balança hidrostática, segundo a norma EN 12697-6+A1, seguindo o procedimento C (baridade SSD, provete saturado com a superfície seca), utilizado para amostras com superfície fechada (Figura 3.18), de referir ainda que as percentagens de betume indicadas já incluem a percentagem de betume residual existente na MBR.



Figura 3.18 Determinação da baridade dos provetes
(Fernandes, G. 2012)

O cálculo da baridade de cada provete foi efetuado recorrendo à equação (4):

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \quad (4)$$

Onde:

ρ_{bssd} é a baridade SSD, em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3);

m_1 é a massa do provete seco, em gramas (g);

m_2 é a massa do provete em água, em gramas (g);

m_3 é a massa do provete saturado com a superfície seca, em gramas (g);

ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura de ensaio, em quilogramas por metro cúbico (kg/m^3), com aproximação a 1 kg/m^3 .

Quadro 3.11 Baridade dos provetes cilíndricos utilizados no método de Marshall

Provete	Pb (%)	Massa do provete (g)			T	Constante	Baridade (kg/m^3)	
		Ar	Imerso	Sup.Seca	(°C)	K	Provete	Média
1.1	3,5	64,7	1180,4	680,4	20,2	1,00116	2338,44	2310,0
1.2		67,0	1183,5	686,3	20,4	1,00112	2320,55	
1.3		67,4	1188,5	684,3	20,2	1,00116	2300,62	
1.4		68,1	1183,8	681,1	20,4	1,00112	2280,37	
2.1	4,0	64,9	1182,9	681,9	19,8	1,00124	2332,48	2345,9
2.2		63,3	1162,5	675,5	19,8	1,00124	2359,35	
2.3		64,0	1177,7	682,9	19,8	1,00124	2353,36	
2.4		65,7	1190,9	689,7	19,8	1,00124	2338,55	
3.2	4,5	62,6	1177,9	683,7	20,2	1,00116	2375,93	2361,4
3.3		65,1	1177,9	679,0	20,4	1,00112	2332,01	
3.4		63,3	1186,7	690,3	20,4	1,00112	2376,30	
4.1		62,0	1163,7	676,9	19,2	1,00136	2381,93	
4.2	5,0	64,0	1187,8	686,6	19,2	1,00136	2352,64	2368,9
4.3		62,7	1154,6	670,2	19,2	1,00136	2370,59	
4.4		63,5	1178,2	683,2	19	1,0014	2370,40	
5.1	5,5	62,4	1187,9	690,0	18,8	1,00144	2379,94	2376,1
5.2		63,0	1174,7	680,4	18,6	1,00148	2366,88	
5.3		62,3	1161,5	672,8	18,8	1,00144	2370,81	
5.4		64,6	1191,0	690,7	18,8	1,00144	2374,71	

A análise dos resultados obtidos (Quadro 3.11) permite concluir que o incremento da percentagem de betume fez aumentar a baridade da mistura, não se tendo observado a evolução típica, com uma subida da baridade até um determinado valor da quantidade de betume na mistura, diminuindo para percentagens de ligante mais elevadas.

3.4.2. Determinação da baridade máxima teórica (EN 12697-5)

A baridade máxima teórica foi determinada segundo a norma EN 12697-5, seguindo os procedimentos A (volumétrico) e C (matemático).

Numa primeira fase utilizou-se o procedimento C que consiste num método matemático para a determinação da baridade máxima teórica das diferentes misturas betuminosas. Considerando a massa volúmica de cada constituinte da mistura é possível determinar a baridade máxima teórica através da seguinte equação (5):

$$\rho_{mc} = \frac{100}{\frac{pb}{\rho_b} + \sum_{i=1}^n \frac{pi}{\rho_i}} \quad (5)$$

Onde:

ρ_{mc} – baridade máxima teórica da mistura determinada por cálculo (kg/m^3);

ρ_b – massa volúmica do ligante (kg/m^3);

ρ_i – massa volúmica de cada fração de agregado (kg/m^3);

p_b – percentagem ponderal de betume na mistura (%);

p_i – percentagem de cada fração de agregado na mistura (%).

A massa volúmica determinada para o betume utilizado (35/50) foi de 1040 kg/m^3 .

As massas volúmicas de cada fração de agregado e da MBR encontram-se apresentada no Quadro 3.12.

Foi necessário determinar a massa volúmica da MBR, uma vez que essa não era conhecida. Separou-se uma amostra em duas frações, uma com dimensões superiores a 4 mm e outra com dimensões inferiores a 4mm, tendo-se seguido o procedimento indicado na norma EN1097-6, a qual propõe a determinação da massa volúmica pelo método do cesto de rede metálica para partículas superiores a 4 mm, e pelo método do picnómetro para partículas inferiores a 4mm.

Quadro 3.12 Massa volúmica das diferentes frações de agregado

Massa Volúmicas	
Fração d/D	ρ_{rd} (kg/cm^3)
Brita 8/20	2610
Brita 4/12	2590
Pó 0/4	2610
filer	2700
MBR	2615

O cálculo da baridade máxima teórica pelo procedimento matemático, conduziu aos valores que se apresentam no Quadro 3.13.

Quadro 3.13 Baridade máxima teórica determinada pelo procedimento matemático

Betume (%)	Baridade máxima teórica (kg/m^3)
3,5	2477,93
4,0	2460,03
4,5	2442,39
5,0	2424,99
5,5	2407,84

Segundo a norma EN 12697-5, utilizando agora o procedimento A (Figura 3.19) que corresponde ao método volumétrico no qual genericamente, se determina a baridade das

misturas quando os vazios entre as partículas da mistura desagregada estão preenchidos com água.

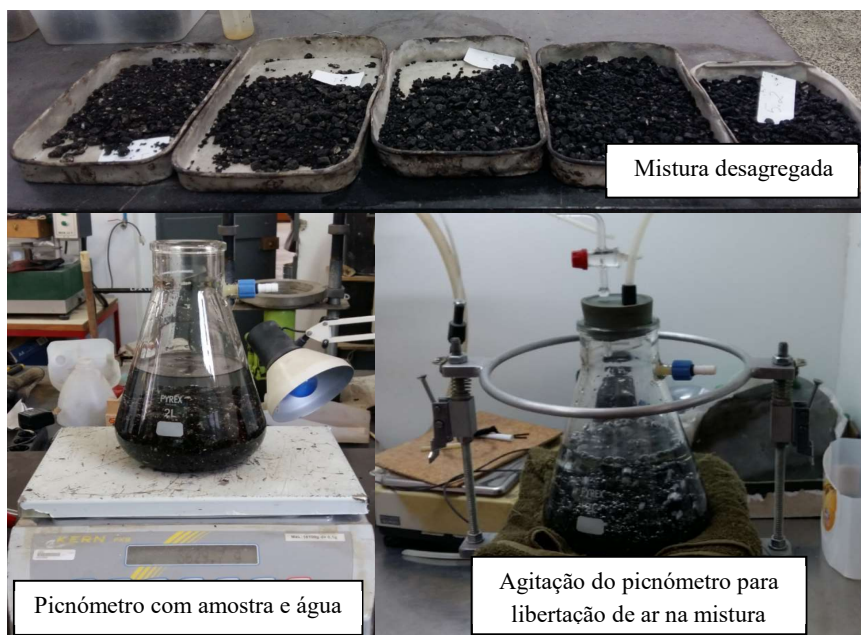


Figura 3.19 Determinação da baridade máxima teórica pelo picnómetro de vácuo

A baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa obtém-se através da equação (6):

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1^*}{1000 \times V_p - \frac{(m_3 - m_2^*)}{\rho_w}} \quad (6)$$

Onde:

ρ_{mv} – é a baridade máxima teórica da mistura betuminosa, determinada pelo método volumétrico (kg/m^3);

m_1^* – é a massa do picnómetro e da tampa (g);

m_2^* - é a massa do picnómetro, da tampa e da amostra (g);

m_3 – é a massa do picnómetro, da tampa, do provete e da água (g);

V_p – é o volume do picnómetro, determinado de acordo com o Anexo C da norma de ensaio (m^3);

ρ_w – é a densidade da água à temperatura do ensaio (kg/m^3).

No quadro 3.14 comparam-se os valores das baridades máximas teóricas das misturas ensaiadas obtidas experimentalmente e pelo procedimento matemático.

Quadro 3.14 Baridade máxima teórica da mistura

Betume (%)	Pelo método volumétrico (kg/m ³)	Pelo método matemático (kg/m ³)
3,5	2512,86	2477,93
4	2471,85	2460,03
4,5	2462,31	2442,39
5	2458,86	2424,99
5,5	2405,67	2407,84

3.4.3. Formulação da mistura pelo método de Marshall

Tal como é habitual em Portugal, para a formulação da mistura, utilizou-se o método de Marshall. Para a avaliação das características mecânicas de misturas betuminosas, através do ensaio de compressão de Marshall, foram seguidas as indicações definidas na norma EN 12697-34.

Os provetes cilíndricos da mistura em estudo (5 provetes por cada percentagem de betume) foram compactados de acordo com a norma EN 12697-30, tendo-se determinado a sua baridade segundo a norma EN 12697-5. Antes da realização dos ensaios de compressão na prensa Marshall (Figura 3.20), aqueceram-se os provetes a $(60\pm 1)^\circ\text{C}$ num banho de água durante 40 a 60 min. Os resultados dos ensaios de compressão, designadamente a estabilidade e a deformação obtida no momento da rotura apresentam-se no Quadro 3.15.

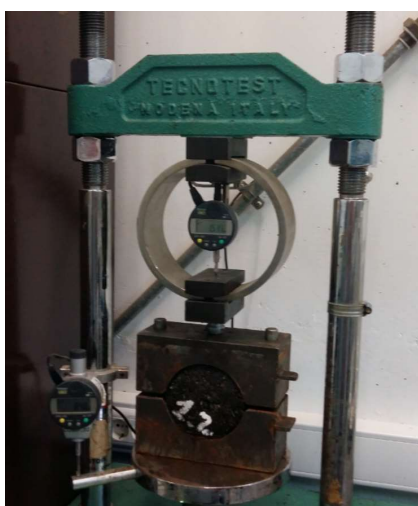


Figura 3.20 Prensa de Marshall

Quadro 3.15 Resultados obtidos nos ensaios de compressão de Marshall

Provete	Pb (%)	Estabilidade de Marshall (kN)		Deformação Marshall (mm)	
		Valor	Média	Valor	Média
1.1	3,5	17,5	17,6	4,5	5,7
1.2		18,4		5,2	
1.3		18,3		5,9	
1.4		16,3		7,0	
2.1	4,0	22,7	20,9	5,7	5,1
2.2		22,2		4,8	
2.3		19,3		4,6	
2.4		19,2		5,1	
3.2	4,5	19,0	20,3	4,7	6,0
3.3		18,1		6,8	
3.4		23,8		6,5	
4.1	5,0	17,6	17,8	5,0	5,9
4.2					
4.3		18,5		5,8	
4.4		17,2		6,9	
5.1	5,5	18,9	17,8	5,4	5,7
5.2		16,0		6,2	
5.3		19,3		5,9	
5.4		16,9		5,1	

No Quadro 3.16 sintetizam-se os resultados das propriedades mecânicas e volumétricas da mistura em estudo, necessárias para o estudo de formulação pelo método de Marshall. Na Figura 3.21 estão representados graficamente os resultados daquelas propriedades da mistura.

Quadro 3.16 Propriedades de Marshall da mistura em estudo

betume (%)	baridade (kg/m ³)	estabilidade (kN)	deformação (mm)	porosidade* (%)	VMA (%)
3,5	2309,99	17,6	5,7	8,07	15,92
4,0	2345,94	20,9	5,1	5,09	14,20
4,5	2361,41	20,3	6,0	4,10	14,41
5,0	2368,89	17,8	5,9	3,66	15,16
5,5	2373,09	17,8	5,7	1,35	14,03

* valores determinados com base na baridade máxima teórica (procedimento volumétrico)

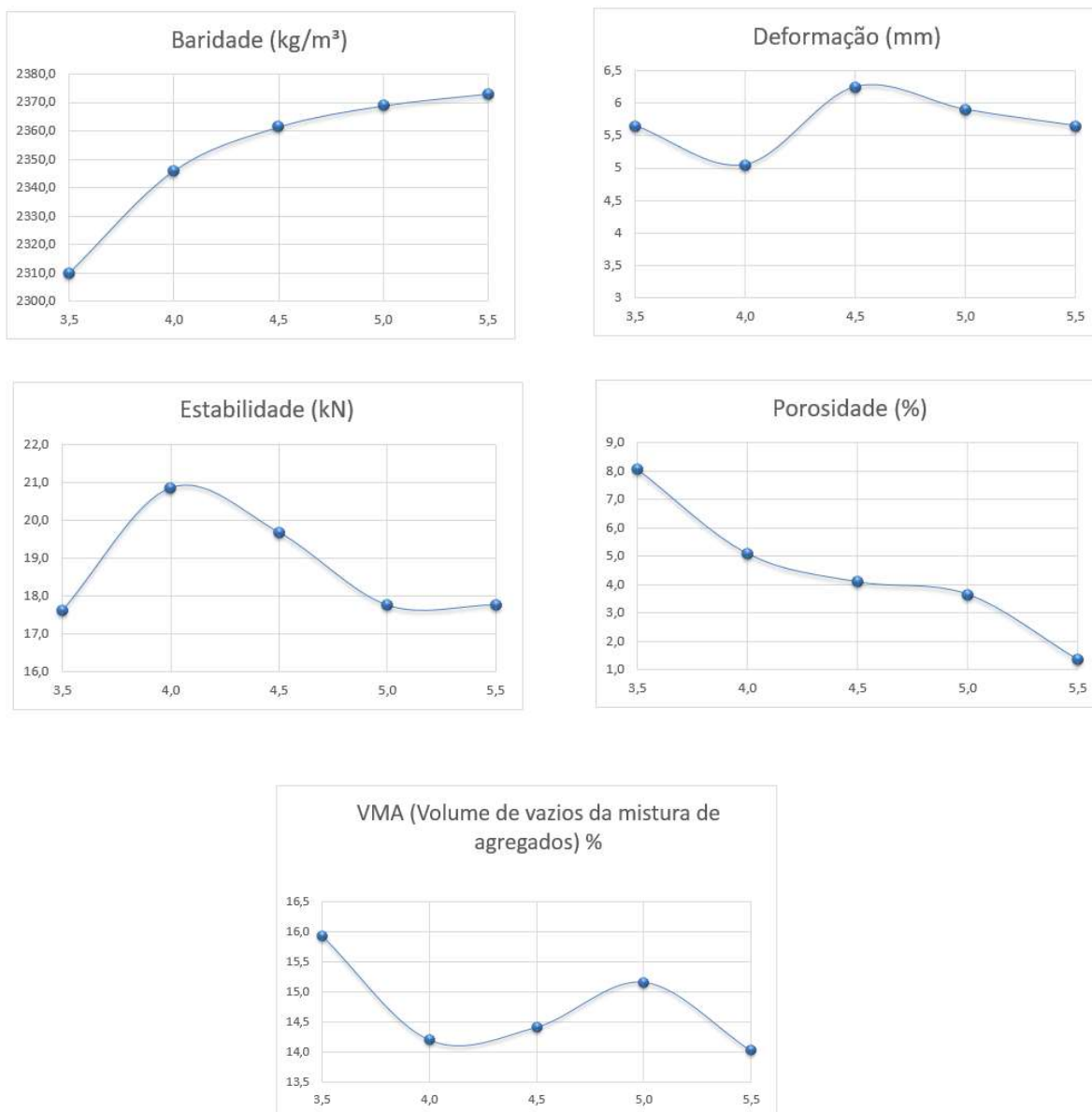


Figura 3.21 Propriedades Marshall da mistura em estudo

3.4.4. Percentagem ótima de betume

A percentagem “ótima” em betume determinada pelo método de Marshall é determinada a partir das percentagens de betume correspondentes à máxima estabilidade, à máxima baridade e ao valor médio dos limites da porosidade desejados (por exemplo os do CEEP). O valor encontrado deverá corresponder a uma deformação e a um VMA dentro de certos limites impostos pelas especificações aplicáveis. Caso estes critérios não sejam atingidos, será necessário produzir outra mistura que verifique todos os critérios (Branco *et al*, 2011). Neste caso, a percentagem ótima em betume é de 4,9%, como é possível observar no Quadro 3.17.

Quadro 3.17 Resumo do cálculo da percentagem ótima de betume pelo método de Marshall

		% betume		
máxima estabilidade		4,05		
máxima baridade		5,50		4,9
média valores limites da porosidade		5,0		
Verificação	—————→			Quando Pb=4,9%
Deformação	Limites*	2-4 mm	5,9	✓
VMA		>14	15,2	✓

* para misturas fabricadas a quente

A mistura betuminosa em estudo foi, como se referiu, produzida com betume aditivado em refinaria, de modo a poder utilizar-se temperaturas de fabrico e compactação mais baixas que as usadas para as misturas a quente. Considerando a percentagem de betume de 4,9%, verifica-se que a deformação excede o limite habitual de 4 mm e a estabilidade é de 17,8 kN, portanto, superior ao máximo admitido pelo CEEP. A porosidade (3,66 %) e o VMA (15,2%) encontram-se dentro das categorias admissíveis pelo CEEP, respetivamente, Vmin2 – Vmax6, e VMamin14. Os resultados mostram que o betume utilizado é mais deformável que o betume convencional de base, embora conduza a valores elevados da estabilidade.

Tendo em conta os resultados obtidos nesta fase, e uma vez que se pretendia avaliar a variação das características da mistura dentro de uma gama de percentagens de betume, optou-se por prosseguir os estudos de avaliação com uma percentagem de betume centrada em 5%, o que, na prática, não difere muito do valor indicativo de 4,9 obtido pelo método de Marshall.

3.4.5. Sensibilidade á agua

O ensaio de sensibilidade à água permite avaliar a perda de resistência mecânica de uma mistura betuminosa quando sujeita a condições hídricas desfavoráveis, podendo ser relacionada com a durabilidade dos pavimentos. Para essa avaliação foram realizados ensaios de compressão diametral em provetes sujeitos a um acondicionamento prévio, tal como descrito na norma EN 12697-12. A avaliação consiste na comparação entre os valores médios das resistências à tração em compressão diametral, determinadas de acordo com a norma EN 12697-23, de dois grupos de provetes cilíndricos mantidos em condições distintas.

Foram fabricados 6 provetes cilíndricos para uma percentagem ótima de betume de 5% e mais 6 provetes com menos 0,5% de betume. Cada um dos grupos de provetes foi separado em dois subconjuntos de três provetes, acondicionados em condições distintas, como se referiu. Três amostras, designadas por “provetes a seco”, foram acondicionadas ao ar a uma temperatura de 25°C. O segundo subgrupo designado por “provetes imersos”, foi submetido a uma pressão negativa em água, no interior de um picnómetro, a uma temperatura de 40±1°C, por um período de 68 a 72 horas (Figura 3.22).



Figura 3.22 Provetes imersos a 40°C e prensa utilizada no ensaio

Uma vez concluído o período de acondicionamento, os provetes foram sujeitos a ensaios para determinar a resistência à tração indireta. Apresentam-se os resultados nos quadros 3.18 a 3.20, e ilustra-se o ensaio na Figura 3.23.



Figura 3.23 Aplicação da tração indireta e aspeto dos provetes após o ensaio

A partir dos valores médios das resistências à tração indireta dos provetes “imersos” e “a seco”, é calculada a resistência conservada em tração indireta através da equação (7):

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_D} \times 100 (\%) \quad (7)$$

Onde:

ITSR- é a resistência conservada em tração indireta, em percentagem (%);

ITS_w - é a média das resistências de tração indireta dos provetes “imersos” (kPa);

ITS_D- é a média das resistências de tração indireta dos provetes “a seco” em (kPa).

Quadro 3.18 Baridades dos provetes submetidos ao ensaio de sensibilidade à água

	proвете	h (mm)	diâm (mm)	massa do provete (g)			T água (° C)	baridade (kg/m ³)
				ar	imerso	sup. seca		
4,5%	J1	63,7	101,5	1190,2	698,2	1192,4	12,0	2407,4
	J1A	61,9	101,7	1169,6	676,0	1180,5	12,0	2317,4
	J2	62,6	101,2	1192,2	699,2	1192,8	12,0	2414,3
	J3	65,0	101,1	1192,5	694,8	1194,4	12,0	2385,9
	J4	66,0	101,6	1194,3	697,5	1198,8	13,0	2381,0
	J5	66,4	101,5	1193,0	697,2	1198,2	13,0	2379,8
5,0%	J6	62,5	101,7	1165,4	682,3	1166,7	13,2	2405,6
	J7	64,9	101,5	1173	679,5	1176,8	13,2	2358,5
	J8	64,2	101,8	1187,2	691,3	1190,2	13,2	2379,4
	J9	64,3	101,4	1187,2	693,7	1190,3	12,4	2389,5
	J10	64,4	101,6	1162,9	674,4	1167,9	12,4	2355,3
	J11	65,2	101,3	1171,7	681,2	1176,2	12,4	2365,9
	J12	62,3	101,75	1172,3	686,2	1173,6	12,4	2404,0

Quadro 3.19 Resultados dos ensaios de sensibilidade à água para provetes com 5% de betume

Grupo	Prov.	Vol. cm ³	Var.Vol (%)	Carga (kN)	Rotura dos provetes		ITSméd. (kPa)	ITSR (%)
					tipo	Superf.agr.		
Seco	J7	524,710	-	20,52	Comb.	Partidas	1988,5	94,9
	J8	522,363	-	21,63	Comb.	Partidas		
	J9	518,831	-	19,17	Comb.	Partidas		
Húm.	J10	522,096	0,1550	17,53	Comb.	Partidas	1886,4	
	J11	525,304	0,0307	19,88	Comb.	Partidas		
	J12	506,564	0,0982	20,28	Comb.	Partidas		

Quadro 3.20 Resultados dos ensaios de sensibilidade à água para provetes com 4,5% de betume

Grupo	Prov.	Vol. cm ³	Var.Vol (%)	Carga (kN)	Rotura dos provetes		ITSméd. (kPa)	ITSR (%)
					tipo	Superf.agr.		
Seco	J1	515,405	-	16,95	Comb.	Partidas	1763,2	80,7
	J3	521,786	-	17,84	Comb.	Partidas		
	J2	503,515	-	18,83	Comb.	Partidas		
Húm.	J4	535,067	0	12,94	Comb.	Partidas	1423,7	
	J5	537,251	0	12,50	Comb.	Partidas		
	J6	507,690	0	18,59	Comb.	Partidas		

Para os provetes com 5 % de betume, o valor médio da resistência dos provetes (ITS) “a seco” foi de 1988,5 kPa. Os provetes “imersos” apresentam um valor médio de 1886,4 kPa. Relativamente à resistência conservada em tração indireta (ITSR), esta foi de 94,9 %. No que diz respeito aos provetes com 4,5% de betume, o valor médio ITS a “a seco” foi de 1763,2 kPa e o ITS dos provetes “imersos” foi de 1423,7 kPa. Consequentemente, o valor de ITSR para a mistura com 4,5 % de betume foi de 80,7 %. É possível concluir que os resultados obtidos para a resistência conservada em tração indireta representam valores bastante aceitáveis. Note-se que, embora com base num procedimento de ensaio diferente do preconizado nas normas do CEN, o CEEP estabelece um valor mínimo de 80% para a resistência conservada para misturas a quente do tipo AC 20.

Os resultados obtidos permitiram verificar que, mesmo utilizando uma percentagem de betume inferior à que resultou da aplicação do método de Marshall, ainda foi possível obter uma boa resistência à ação da água para a mistura AC 20 base produzida com betume aditivado em refinaria.

3.4.6. Ensaio de compressão uniaxial cíclico

Para a avaliação da resistência à deformação permanente das misturas, realizaram-se ensaios de compressão uniaxial, com aplicação cíclica de cargas, segundo a EN 12697-25, tendo-se utilizado um equipamento pneumático com capacidade para aplicação de cargas repetidas (Figura 3.24).



Figura 3.24 Equipamento e provete durante ensaio

Foram realizados em laboratório dois conjuntos de 4 provetes, com 4,5 % de betume (0,5% abaixo da percentagem ótima de betume) e com 5% (percentagem ótima de betume). Os provetes foram compactados em moldes cilíndricos com um diâmetro de 150 mm, utilizando um vibro-compactador, nas condições anteriormente descritas.

No Quadro 3.21 é possível observar as principais características dos provetes moldados em laboratório e compactados por vibro-compressão. Nota-se uma ligeira diminuição do valor da baridade nestes provetes quando comparados com os compactados no compactador Marshall, estando a diferença relacionada com o método de compactação.

Quadro 3.21 Caracterização dos provetes ensaiados

proвете	h (mm)	diâmetro (mm)	massa do provete (g)			Temp. água (°C)	Baridade (kg/m ³)	Baridade Média (kg/m ³)
			ar	imerso	sup seca			
5,00%	JB 1.1	80,8	152	3298,8	1902,3	3312,1	13,0	2338,5
	JB 1.2	79,6	152	3224,5	1853,2	3238,8	14,0	2325,5
	JB 1.3	81,5	151	3298,1	1888,6	3309,9	14,0	2318,8
	JB 1.4	81,8	151,5	3333,8	1922,5	3349,0	14,0	2335,4
4,50%	JB 2.1	82,0	153	3295,7	1886,2	3318,0	14,0	2300,2
	JB 2.2	81,6	152,2	3275,6	1872,5	3297,5	14,0	2297,0
	JB 2.3	80,9	153,5	3281,1	1870,9	3302,9	14,0	2289,7
	JB 2.4	80,2	153	3202,2	1830,2	3224,5	14,0	2295,0

Os provetes cilíndricos foram submetidos a impulsos cíclicos de carga de compressão, aplicados na direção do eixo do provete, durante um determinado intervalo de tempo. O diâmetro da placa que aplica o carregamento é inferior ao diâmetro do provete, de modo a ser criado um determinado grau de confinamento do material durante o ensaio, com o objetivo de reproduzir de forma mais próxima as condições de solicitação dos pavimentos, nos quais o material das camadas betuminosas também tem um certo grau de confinamento originado pela continuidade da camada no seu plano.

Com o objetivo de diminuir o atrito entre as placas e o provete, foi colocado um lubrificante à base de glicerina na interface, diminuindo assim o efeito de cintagem e permitindo uma distribuição de tensões mais homogénea na face do provete.

O ensaio foi realizado a uma temperatura de 60°C, o que corresponde a um cenário muito exigente de condições térmicas dos pavimentos em Portugal. Os provetes foram primeiramente condicionados em estufa a uma temperatura de 60°C ao ar, durante um período de 5 horas, após o qual foram submetidos ao ensaio. O equipamento de ensaio encontra-se instalado numa câmara térmica na qual a temperatura é mantida constante ao longo de todo o ensaio.

O carregamento foi aplicado através de placas circulares, em que a placa superior tem um diâmetro de 96 mm, inferior ao do provete. A placa inferior serve de apoio à face inferior do provete, havendo contacto com a totalidade da superfície do mesmo.

Adotou-se um carregamento formado por impulsos com uma tensão máxima de 100 kPa, com tempos de carregamento e de repouso iguais, com 1 segundo de duração, de acordo com a norma EN 12697-25. Durante o tempo de carregamento o provete deforma-se, recuperando a parte reversível da deformação no período de repouso (Figura 3.25).

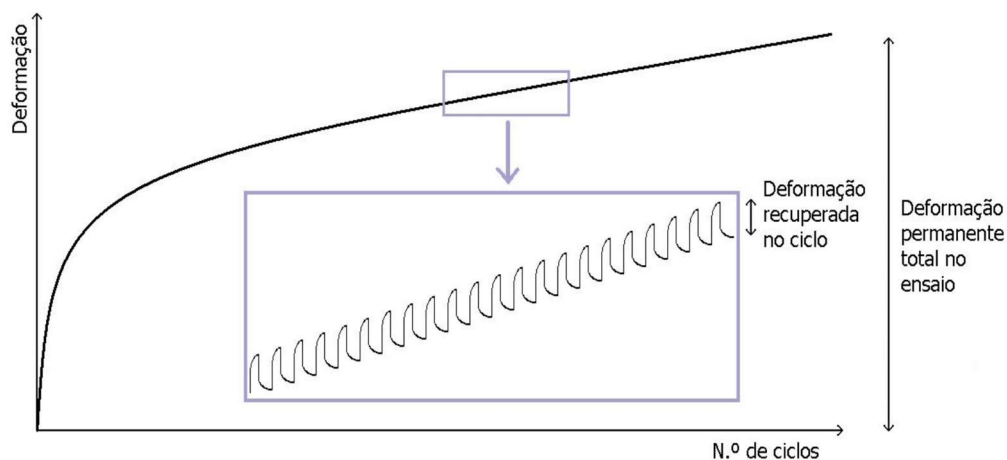


Figura 3.25 Representação esquemática da evolução da deformação num ensaio de compressão uniaxial cíclico (Gardete, 2006)

Seguindo as indicações da EN 12697-25, para realizar um ajuste das placas à superfície da amostra, cada provete é submetido a um pré-carregamento com uma tensão de 10% do valor máximo a atingir durante o ensaio. Os ensaios tiveram a duração de 2 horas, o que corresponde à aplicação dos 3600 ciclos. O equipamento faz a aquisição de dados do ensaio durante a sua realização, incluindo as leituras da deformação axial do provete medidas por dois LVDT.

A realização dos ensaios permite traçar gráficos das curvas que relacionam a deformação axial com o número de ciclos de carga aplicados no provete. Nas figuras 3.26, 3.27, 3.28 e 3.29 são apresentadas as diferentes curvas médias de deformação – número de ciclos obtidas para cada percentagem de betume para os provetes realizados. As curvas médias das figuras 3.28 e 3.29 foram obtidas com base nas curvas individuais observadas para cada um dos provetes representadas nas figuras 3.26 e 3.27.

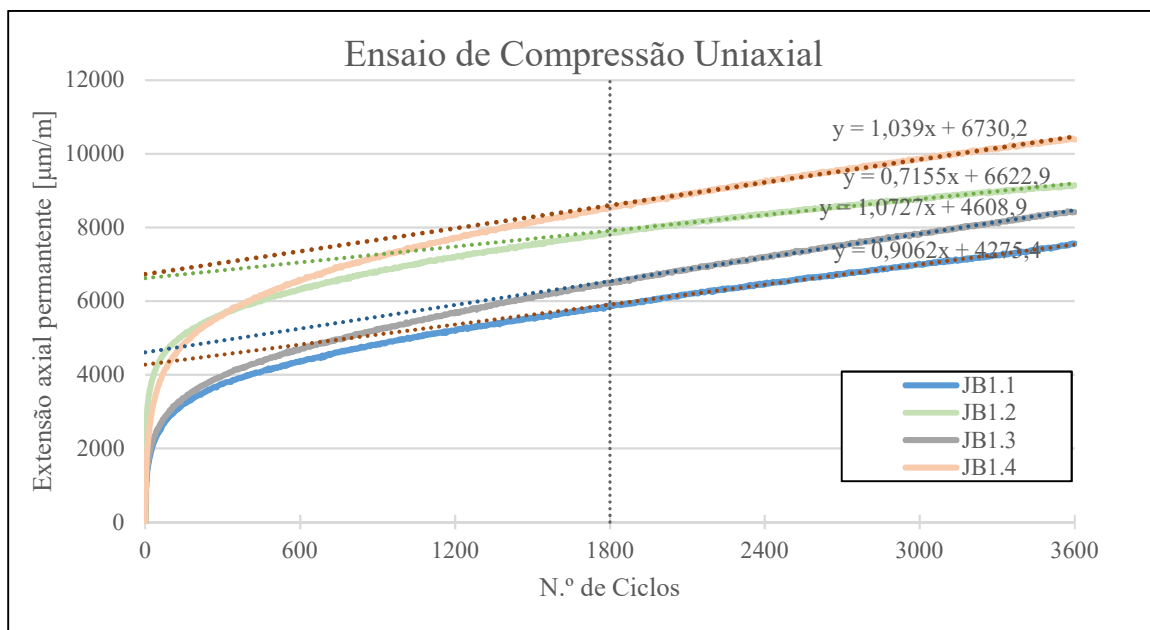


Figura 3.26 Curvas de deformação para cada provete no ensaio de compressão uniaxial cíclico para provetes com 5% de betume

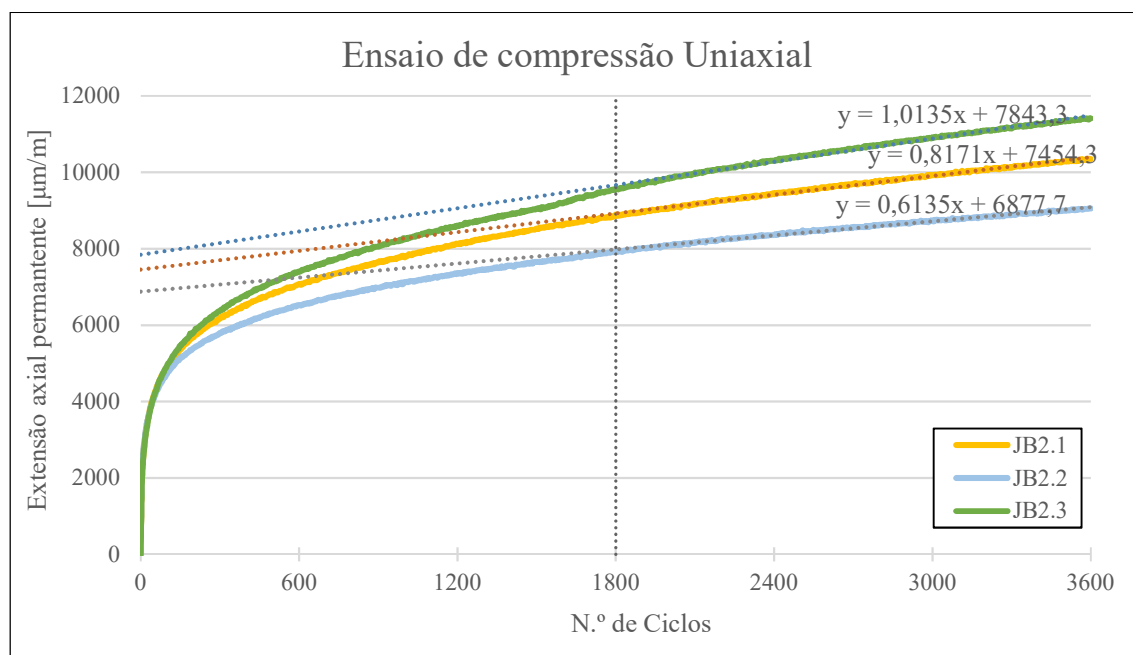


Figura 3.27 Curvas de deformação para cada provete no ensaio de compressão uniaxial cíclico para provetes com 4,5% de betume

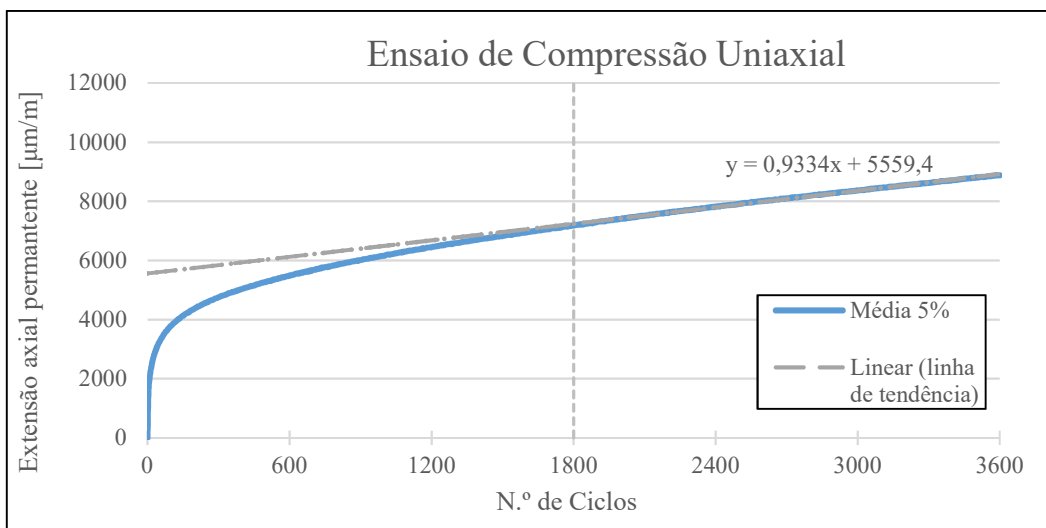


Figura 3.28 Curva de deformação média obtida no ensaio de compressão uniaxial cíclico para provetes com 5% de betume

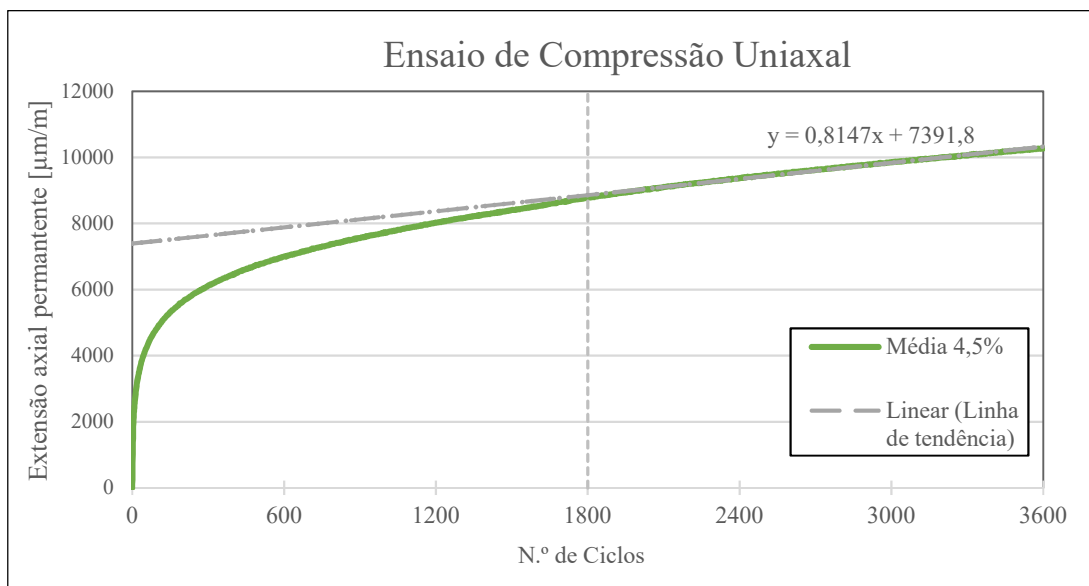


Figura 3.29 Curva de deformação média obtida no ensaio de compressão uniaxial cíclico para provetes com 4,5% de betume

O ensaio de compressão uniaxial possibilita a medição de diversos parâmetros para caracterizar as misturas à deformação permanente. Um dos parâmetros considerados é a extensão medida ao fim de 3600 s, ou seja, a extensão axial permanente, ε_N , dada pela equação (8):

$$\varepsilon_N = 100 \left(\frac{h_0 - h_N}{h_0} \right) \quad (8)$$

Onde,

ε_N – extensão axial permanente acumulada após N ciclos [%];

h_N – altura do provete ao fim de N ciclos [mm];

h_0 – altura inicial do provete [mm].

Neste caso apresenta-se o valor ε_{3600} , que é a extensão permanente axial total medida no final do ensaio.

Outro parâmetro que pode medir-se é a velocidade de deformação, f_c , calculado através da equação (9). Este parâmetro representa o acréscimo de extensão que ocorreu por ciclo de carregamento na zona quase linear da curva. Neste trabalho utilizou-se uma regressão linear para determinar a velocidade de deformação entre os ciclos 1800 e 3600. Em nenhum dos provetes foi atingida a rotura durante o ensaio, sendo assim possível aplicar este procedimento em todos os provetes.

$$f_c = \frac{\varepsilon_{n1} - \varepsilon_{n2}}{n_1 - n_2} \quad (9)$$

Onde:

f_c – velocidade de deformação [$\mu\text{ext./ciclo}$];

ε_{n1} ; ε_{n2} - extensão axial permanente acumulada após n_1 e n_2 ciclos [$\mu\text{ext.}$];

n_1 ; n_2 - número de ciclos.

Os resultados dos ensaios laboratoriais relativos aos provetes utilizados para caracterizar a resistência à deformação estão apresentados nos quadros 3.22, 3.23 e 3.24.

Quadro 3.22 Resultados laboratoriais da porosidade

Provetes	Pb(%)	Porosidade (%)	
		Valor	Média
JB1.1	5,0%	4,89%	5,26%
JB1.2		5,42%	
JB1.3		5,70%	
JB1.4		5,02%	
JB2.1	4,5%	6,58%	6,77%
JB2.2		6,71%	
JB2.3		7,01%	

Quadro 3.23 Resultados laboratoriais de ϵ_{3600}

Provetes	Pb(%)	ϵ_{3600} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	
		Valor	Média
JB1.1	5%	7563,68	8879,78
JB1.2		9148,97	
JB1.3		8418,75	
JB1.4		10387,72	
JB2.1	4,5%	10343,55	10269,53
JB2.2		9052,46	
JB2.3		11412,57	

Quadro 3.24 Resultados laboratoriais de f_c

Provetes	Pb(%)	f_c [$\mu\text{ext.}/\text{ciclo}$]	
		Valor	Média
JB1.1	5%	1,04	0,93
JB1.2		0,72	
JB1.3		1,07	
JB1.4		0,91	
JB2.1	4,5%	1,01	0,81
JB2.2		0,82	
JB2.3		0,61	

Geralmente, as misturas betuminosas mais ricas em betume, quando sujeitas a carregamentos repetidos, a temperaturas elevadas, tendem a deformar-se mais que as menos ricas em ligante. Analisando os resultados, verifica-se uma tendência oposta àquela quando se toma o parâmetro ϵ_{3600} para avaliar a resistência à deformação permanente das misturas estudadas. Após 3600 ciclos de carga, os provetes com 4,5% de betume deformaram-se, em termos médios, cerca de 16% mais que os provetes com 5% de ligante.

A diferença observada ocorreu particularmente na fase inicial do ensaio, nos primeiros 300 ciclos de carga. Aparentemente a maior porosidade da mistura com 4,5% face à de 5% de

betume conduziu a uma deformação inicial mais elevada na primeira por efeito de sobrecompactação. De facto, na segunda metade dos ensaios, e em termos médios, a velocidade de deformação da mistura com menos betume foi menor que a da mistura mais rica em ligante.

A avaliação da resistência à deformação permanente com base no parâmetro f_c (velocidade de deformação) mostrou que, em termos médios, a mistura com 4,5% de betume é mais resistente. Seria necessário realizar um maior número de ensaios, com uma gama de variação de porosidades mais alargada, para ter verificar se a tendência observada seria consistente.

3.4.7. Ensaio de determinação do módulo de rigidez

O ensaio para a determinação do módulo de rigidez foi realizado de acordo com a EN 12697-26, através do ensaio de flexão em 4 pontos, também conhecido por 4PB (*Four-Point-Bending*). Para este ensaio foram produzidos, em laboratório, dois conjuntos de 5 vigas, um com 4,5% e outro com 5% de betume.

Durante o processo de corte as vigas estiveram em contacto com a água, pelo que houve necessidade de as deixar secar à temperatura ambiente durante cerca de uma semana, tendo-se monitorizado o peso das mesmas até se verificar que não havia variações. Depois foram determinadas as baridades das mesmas, segundo a norma EN 12697-6+A1. No Quadro 3.25 e 3.26, observam-se as principais características das vigas.

Quadro 3.25 Características das vigas

provete	Comp. (mm)	h (mm)	largura (mm)	massa do provete (g)			Temp. Água (°C)	Baridade (kg/m ³)	Baridade Média (kg/m ³)
				Ar (g)	Imerso (g)	Sup. seca (g)			
5,00%	JB 1.1	415,0	51,3	49,1725	2287,3	1317,9	2295,7	16,4	2327,3
	JB 1.2	415,0	51,5	49,225	2308,1	1329,2	2320,4	16,4	
	JB 1.3	415,0	50,9	51,3125	2388,9	1382,6	2401,0	16,2	
	JB 1.4	415,0	50,9	50,4275	2323,7	1334,8	2332,2	16,2	
	JB 1.5	415,0	49,9	49,65	2168,7	1250,4	2188,2	16,2	
4,50%	JB 2.1	415,0	50,5	49,9175	2174	1253,2	2197,0	16,8	2307,5
	JB 2.2	415,0	51,5	48,25	2193,2	1265,0	2212,4	16,8	
	JB 2.3	415,0	51,5	49,925	2291,4	1315,9	2310,4	17,2	
	JB 2.4	415,0	50,6	48,14	2153,8	1240,0	2170,2	17,2	
	JB 2.5	415,0	51,4	49,055	2221,6	1280,6	2240,9	17,2	

Quadro 3.26 Características das vigas (Pb e Porosidade)

Provetes	Pb(%)	Porosidade (%)	
		Valor	Média
JB1.1	5%	4,97%	5,10%
JB1.2		5,40%	
JB1.3		4,70%	
JB1.4		5,35%	
JB1.5		6,05%	
JB2.1	4,5%	4,97%	5,02%
JB2.2		5,40%	
JB2.3		4,70%	
JB2.4		5,35%	
JB2.5		6,05%	

▪ Equipamento de flexão em 4 pontos

Os ensaios para a medição do módulo de rigidez foram realizados no Instituto Superior Técnico, num equipamento servo-hidráulico com capacidade de realizar ensaios de 4PB.

Para a descrição do equipamento seguiu-se de perto a apresentação feita por Crucho (2011). O equipamento é constituído por:

- Computador e software de ensaio;
- Unidade de controlo;
- Unidade de aquisição de dados;
- Câmara climática;
- Reservatório de ar comprimido;
- Unidade de flexão.

O provete é colocado na unidade de flexão para ser ensaiado (Figura 3.30). De seguida a unidade de flexão é colocada no interior da câmara climática (Figura 3.31) para o ensaio ser realizado à temperatura pretendida.



Figura 3.30 Unidade de flexão (Cooper, 2011)



Figura 3.31 Câmara climática (Crucho, 2011)

A unidade de controlo (Figura 3.32) controla a unidade de flexão. Esta unidade possui os instrumentos de medida, possuindo duas sondas de temperatura para registo da mesma e permite o controlo da abertura e fecho dos mecanismos de fixação do provete. Esta unidade também controla o reservatório de ar comprimido (Figura 3.33).



Figura 3.33 Unidade de controlo
(Crucho, 2011)



Figura 3.32 Reservatório de ar
comprimido (Crucho, 2011)

A unidade de aquisição de dados (Figura 3.34) está ligada à unidade de controlo e permite a comunicação entre a unidade de controlo e o computador, através da transmissão de dados que são registados no software. O software permite mandar as instruções necessárias para a unidade de controlo, em função dos dados obtidos da unidade de aquisição.



Figura 3.34 Unidade de aquisição de dados e computador e software (Crucho, 2011)

Descrição do ensaio

O ensaio consiste em aplicar um carregamento cíclico através de dois apoios internos do provete, colocados na vertical e perpendicularmente ao eixo longitudinal da amostra. Os dois apoios localizados nos extremos da viga impedem o deslocamento vertical do provete. Assim, o provete é materializado numa viga simplesmente apoiada em quatro pontos, com livre rotação e translação, como é possível observar no esquema da Figura 3.35.

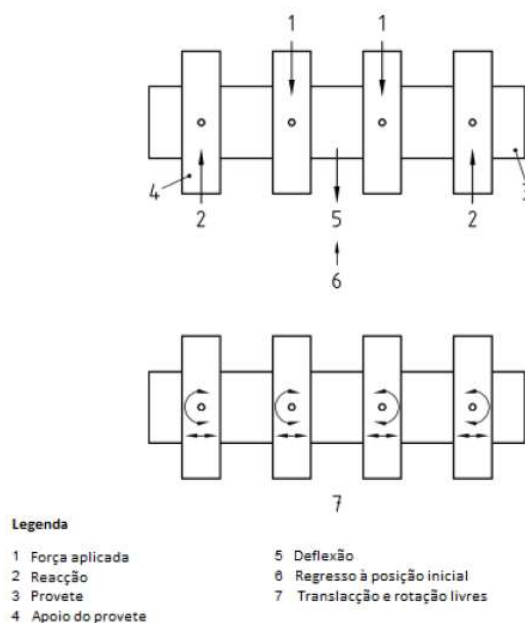


Figura 3.35 Esquema do ensaio de flexão em quatro pontos (norma EN 12697-26)

Seguiram-se as condições de ensaio especificadas na norma EN 12697-26. O ensaio consiste na aplicação no provete prismático de uma força a variar de forma sinusoidal ao longo do tempo. O módulo de rigidez das misturas betuminosas é influenciado pela temperatura a que se encontram na altura do ensaio, da frequência de carregamento e da própria composição da mistura.

Temperatura

A temperatura influencia em grande medida os valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase da mistura. Os materiais betuminosos apresentam um comportamento altamente dependente da temperatura, tendo um comportamento quase elástico a baixas temperaturas, comportamento viscoso a temperaturas mais elevadas e um comportamento viscoelástico para temperaturas intermédias. O ângulo de fase – desfasamento entre a “onda de carga” e a “onda da deformação” – é um indicador daqueles comportamentos, apresentando geralmente valores baixos e próximos de zero para materiais com comportamento quase elástico, e valores elevados, com um máximo de 90°, para materiais de comportamento viscoso. Neste caso de estudo optou-se por realizar os ensaios a uma temperatura de 20°C, uma vez que é uma temperatura usual noutros casos de estudo, permitindo a comparação de resultados.

Frequência

Relativamente à frequência de carregamento, a norma EN 12697-26 indica que esta deve estar compreendida entre, 0,1Hz e 50Hz. Neste ensaio optou-se por testar as seguintes frequências: 1 Hz, 3Hz, 5Hz, 10Hz, 20Hz, 30Hz e subsequentemente 1Hz, de forma a verificar se as vigas foram danificadas durante os carregamentos anteriores. Teve-se em atenção não ultrapassar os 3000 ciclos de aplicação de carga para todas as frequências juntas, de modo prevenir possíveis danos prematuros por fadiga.

Modo de carregamento

No que diz respeito aos modos de carregamento (Figura 3.36), o software do equipamento permite escolher entre ensaios com extensão controlada ou com tensão controlada. No ensaio com tensão controlada é fixada a amplitude da carga que dá a tensão desejada, podendo a extensão variar durante o ensaio.

Neste ensaio foi utilizado o modo de carregamento com extensão controlada, isto é, é fixada a amplitude de deslocamento que aplica a extensão desejada, podendo a tensão variar no decorrer do ensaio. Neste trabalho foi definida uma amplitude máxima de deformação por flexão de 50 µm/m, de forma cumprir as indicações da norma EN 12697-26, evitando o dano dos provetes.

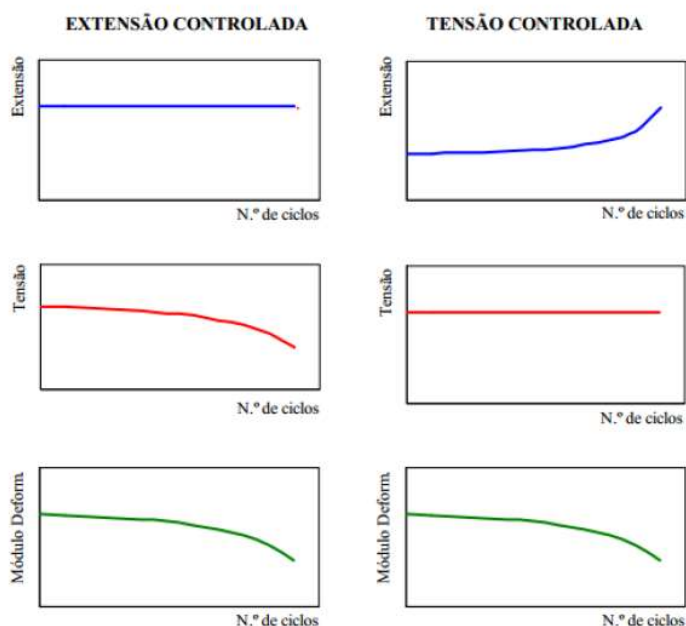


Figura 3.36 Evolução típica da tensão, da extensão e do modulo de rigidez em ensaios 4PB longos, conduzidos com extensão controlada e tensão controlada (Baptista, 2006)

Nos quadros 3.27 e 3.28 e nas figuras 3.37 e 3.38 estão representados os resultados obtidos a partir das vigas ensaiadas a 20°C, para cada percentagem de betume. Os módulos de rigidez e os ângulos de fase estão expressos em termos dos valores médios observados, apresentando-se também nos quadros o desvio-padrão e o coeficiente de variação como medidas de dispersão dos resultados.

Quadro 3.27 Valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase para provetes com 5% de betume

Freq. (Hz)	Percentagem de betume (%)	Módulos rigidez (MPa)			Ângulos de fase (graus)		
		Média	desvio padrão	CV (%)	Média	desvio padrão	CV (%)
1	5,0	4601,89	919,53	20	24,30	3,16	13,0
3		5929,51	1082,15	18	19,24	1,07	5,6
5		6501,95	1153,74	18	17,73	1,16	6,5
10		7347,71	1282,02	17	14,73	0,98	6,7
20		8242,60	1414,86	17	9,96	1,16	11,6
30		8724,42	1396,43	16	5,93	1,31	22,0
1		4512,96	853,68	19	19,42	0,65	3,4

Quadro 3.28 Valores do módulo de rigidez e do ângulo de fase para provetes com 4,5% de betume

Freq. (Hz)	Percentagem de betume (%)	Módulos de rigidez (MPa)			Ângulos de fase (graus)		
		Média	desvio padrão	CV (%)	Média	desvio padrão	CV (%)
1	4,5%	5318,94	884,55	17	18,85	1,04	5,5
3		6464,32	1040,63	16	15,92	0,67	4,2
5		7014,85	1104,51	16	14,87	0,75	5,1
10		7857,38	1217,29	15	11,82	0,70	5,9
20		8691,17	1259,07	14	6,67	0,68	10,2
30		9048,74	1377,09	15	3,59	0,89	24,8
1		5200,00	871,70	17	19,28	1,01	5,2

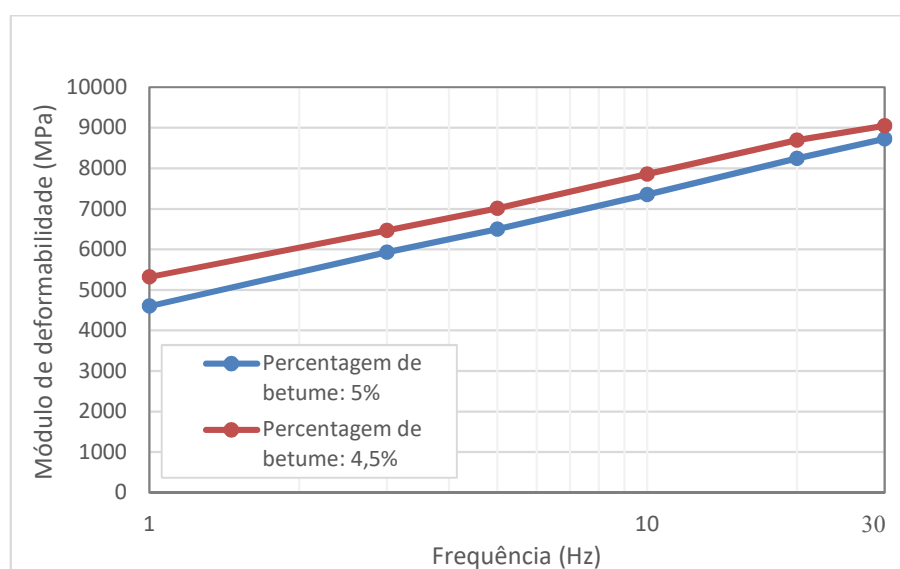


Figura 3.37 Representação gráfica do módulo de rigidez para as misturas betuminosas com 5% e 4,5% de betume, em função da frequência de carregamento

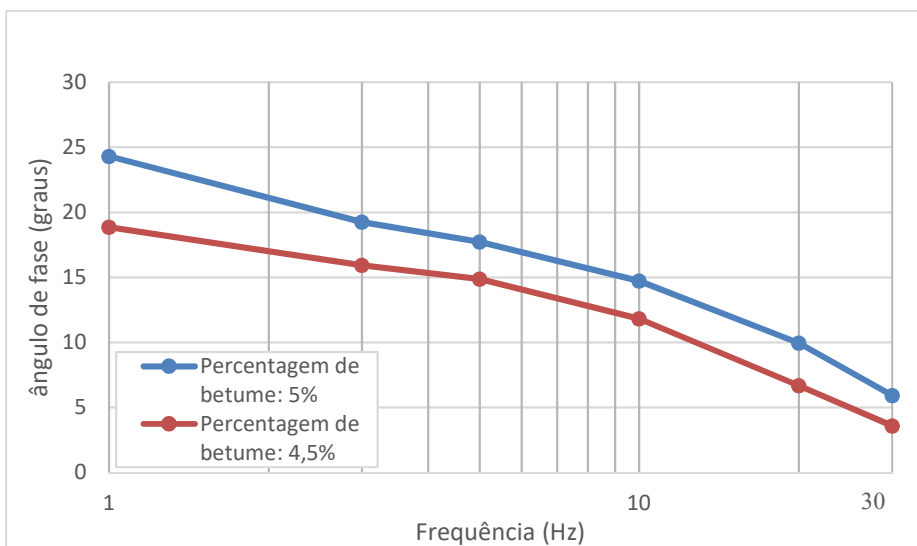


Figura 3.38 Representação gráfica do ângulo de fase para as misturas betuminosas em função da frequência de carregamento

Na Figura 3.39 representa-se a evolução do módulo de rigidez das misturas ensaiadas (4,5 e 5% de betume) com o ângulo de fase, verificando-se que para ângulos de fase relativamente baixos, até cerca de 14 graus, obtidos para frequências de carregamento acima de 10 Hz, a variação do módulo de rigidez é muito semelhante para as duas composições ensaiadas. Em comparação com a mistura com 4,5% de betume, a mistura mais rica em ligante originou ângulos de fase superiores e módulos de rigidez mais baixos, evidenciando um comportamento menos elástico que a primeira.

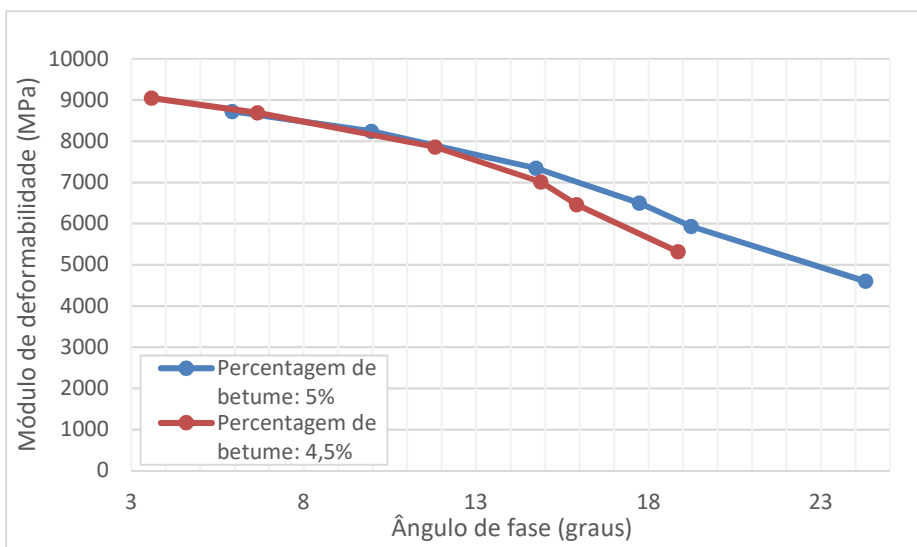


Figura 3.39 Relação entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase para misturas betuminosas

Os resultados apresentados permitem verificar que, tal como acontece geralmente para as misturas betuminosas a quente, o módulo de rigidez aumenta e o ângulo de fase diminui com o aumento da frequência de carregamento. A figura 3.37 mostra que as duas misturas betuminosas

apresentam uma variação do módulo de rigidez com a frequência relativamente próxima, embora a mistura mais rica em ligante seja mais sensível à variação de frequência.

3.4.8. Previsão do comportamento à fadiga

Relativamente ao comportamento à fadiga não foi possível realizar ensaios laboratoriais para esse efeito. Mesmo assim, aproveitaram-se os resultados do módulo de rigidez para estimar o comportamento à fadiga das misturas betuminosa em estudo, utilizando a lei de fadiga da Shell. Com base nos valores do módulo de rigidez observados aplicou-se a lei da Shell para determinar o número admissível de eixos-padrão que se espera que as misturas em estudo possam suportar.

As leis de fadiga são normalmente representadas por expressões do tipo da equação (10):

$$\varepsilon = a \times N^b \quad (10)$$

Onde:

ε – Extensão de tração (m/m);

N – Número repetições de carga;

a,b – constantes que dependem do material em estudo.

A lei de fadiga da Shell é representada pela equação (11):

$$\varepsilon_t = (0,856 \times V_b + 1,08) \times E_m^{-0,36} \times N^{-0,2} \quad (11)$$

Onde:

ε_t – Extensão de tração (m/m);

N – Número de eixos-padrão de 80 kN;

V_b – Percentagem volumétrica de betume no volume total (%);

E_m – Módulo de rigidez da mistura betuminosa (Pa).

Segundo Shell (Claesen et al., 1997), são necessários alguns ajustamentos para aproximar os resultados da equação (11) à realidade das condições de solicitação dos pavimentos em serviço. Aqueles ajustes podem ser resumidos do seguinte modo, levando em linha de conta os fenómenos apontados (Branco et al., 2011):

- Distribuição lateral do tráfego: deve multiplicar-se a vida útil por 2,5;
- Tempo de recuperação da deformação/carregamento não continuado: para misturas densas com grande teor em betume deve multiplicar-se a vida útil por 10 e para misturas abertas e pobres em betume deve multiplicar-se a vida útil por 1,25.

No caso da mistura em estudo, além da utilização direta da expressão (11), isto é, com um fator de ajustamento unitário, optou-se também por considerar um fator de ajustamento (F) igual a 7,5, o qual corresponde ao somatório dos efeitos acima descritos (2,5 para a distribuição lateral

do tráfego; 5 para a recuperação entre carregamentos, visto tratar-se de uma mistura moderadamente rica em ligante).

Como se observa na equação (11), a resistência à fadiga das misturas (N) depende do nível de extensão aplicado (ϵ_t), da percentagem volumétrica de betume (V_b) e do módulo de rigidez (E_m). Para as composições em análise, V_b varia de cerca de 10 a 11%, pelo que se tomou o valor intermédio na realização do estudo. Além disso, uma vez que se dispunha de resultados do módulo de rigidez para uma gama de frequências, optou-se por estudar a variação da resistência à fadiga com base na lei da Shell para as frequências de 5, 10 e 20 Hz.

Os valores do módulo de rigidez disponíveis foram medidos experimentalmente para extensões de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$. Ora, sabe-se que para extensões mais elevadas os valores daquele módulo tendem a baixar. Assim, de modo a poder utilizar os valores do módulo de rigidez medidos, avaliou-se a resistência à fadiga até 150 $\mu\text{m}/\text{m}$ de extensão, não se tendo considerado na análise a pequena variação dos módulos que poderia esperar-se para as extensões de 100 e 150 $\mu\text{m}/\text{m}$, uma vez que essa diferença não tem uma influência significativa na estimativa da resistência à fadiga que pretendia realizar-se. Assim, os resultados que se mostram nas figuras 3.40 e 3.41, respetivamente para valores de F de 7,5 e de 1, foram obtidos para valores E_m medidos para as frequências de 5, 10 e 20 Hz, fazendo-se variar os níveis de extensão, ϵ_t , na expressão (11). Os resultados designados por “lei da Shell”, foram também obtidos com base na expressão (11), mas considerando o módulo de rigidez calculado pelas expressões de previsão da Shell, disponíveis em Branco et al. (2011), para a frequência de 10 Hz.

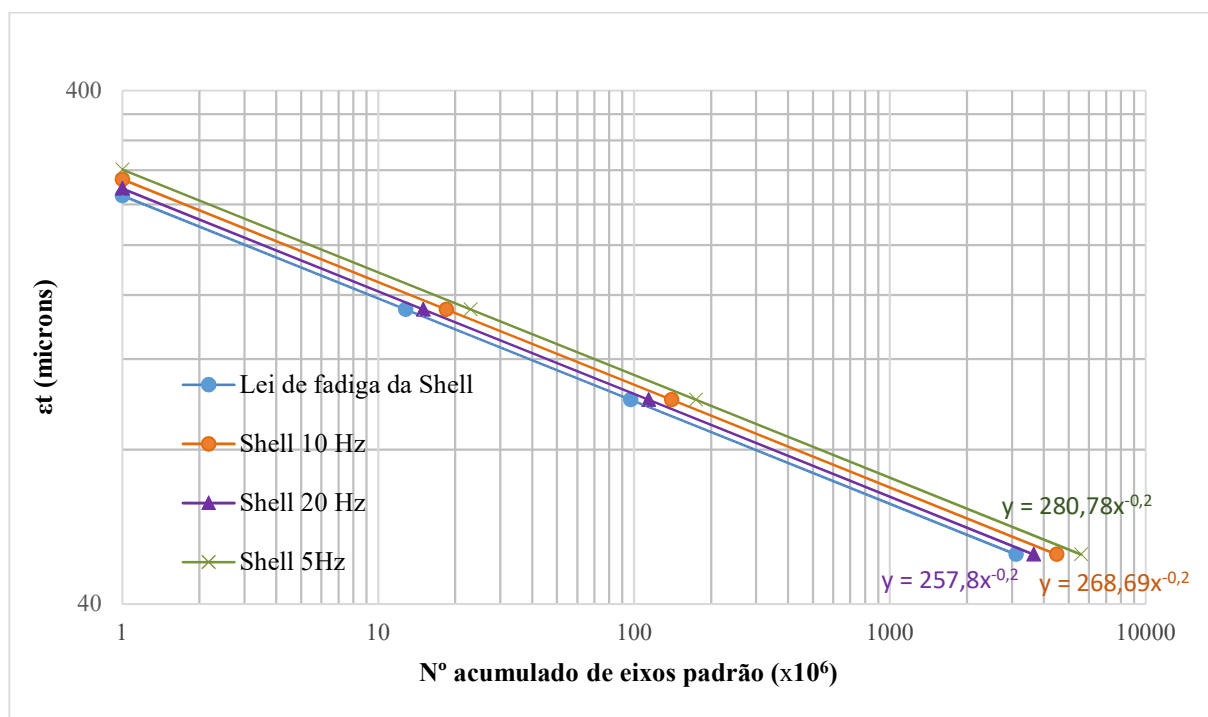
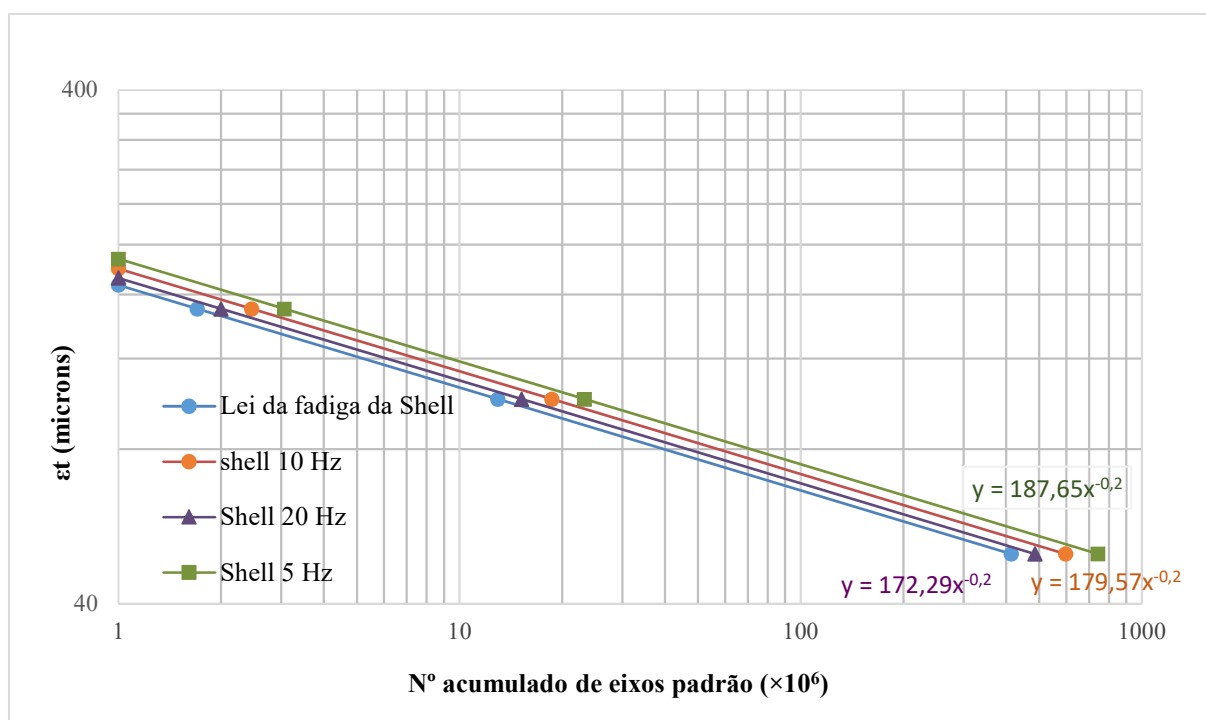


Figura 3.40 Representação das leis da Shell para F=7,5

Figura 3.41 Representação das leis da Shell para $F=1$

É possível observar que as curvas determinadas diretamente através da lei da Shell apresentam resultados mais conservadores que os obtidos com base nos módulos de rigidez medidos experimentalmente, isto é, a resistência à fadiga estimada a partir dos resultados experimentais é superior.

Traduzindo a resistência à fadiga estimada com base no parâmetro ϵ_6 , o qual corresponde ao valor da extensão para uma vida à fadiga de um milhão de ciclos (para $N=1 \times 10^6$), obtêm-se os resultados apresentados nos quadros 3.29 e 3.30.

Quadro 3.29 Extensão para um milhão de ciclos ($N=1 \times 10^6$) e leis de fadiga para $F=7,5$

Frequência	equação	ϵ_6 ($\mu\text{m/m}$)
Lei da shell "10Hz"	$\epsilon = 249,69x^{-0,2}$	249,69
10 Hz	$\epsilon = 268,69x^{-0,2}$	268,69
20 Hz	$\epsilon = 257,80x^{-0,2}$	257,8
5 Hz	$\epsilon = 280,78x^{-0,2}$	280,78

Quadro 3.30 Extensão para um milhão de ciclos ($N=1 \times 10^6$) e leis de fadiga para $F=1$

Frequência	equação	ϵ_6 ($\mu\text{m/m}$)
Lei da shell "10Hz"	$\epsilon = 166,87x^{-0,2}$	166,87
10 Hz	$\epsilon = 179,57x^{-0,2}$	179,57
20 Hz	$\epsilon = 172,29x^{-0,2}$	172,29
5 Hz	$\epsilon = 187,65x^{-0,2}$	187,65

Tem-se consciência de que o exercício de análise efetuado, relativamente à resistência à fadiga esperada para as misturas betuminosas estudadas, é um pouco especulativo. Mesmo assim, julga-se que permite antever uma resistência à fadiga adequada de misturas do tipo AC 20 base produzidas com “betume temperado” aditivado em refinaria e incorporando MBR.

3.5. Considerações finais

Neste capítulo foram abordadas as questões relacionadas com a composição das misturas de agregados e das misturas betuminosas, nomeadamente da MBR, sendo aplicada a metodologia de Marshall, numa primeira fase do trabalho experimental, de forma a proceder a avaliação das propriedades volumétricas. Numa ultima fase foram realizados trabalhos de avaliação das características mecânicas.

Após a realização dos ensaios, verificou-se que, em geral, todas a MBT com incorporação de MBR apresentavam resultados satisfatórios nos vários parâmetros avaliados.

4. Comparação das Características das Misturas em Estudo com as Obtidas em Estudos Similares

4.1. Considerações Iniciais

No presente capítulo é feita uma análise das características das misturas em estudo, comparando-as com as de outras misturas betuminosas estudadas no âmbito de outros trabalhos experimentais, de forma a compreender melhor os resultados obtidos nos ensaios, podendo observar-se como se relacionam.

4.2. Propriedades Volumétricas

Neste subcapítulo apresenta-se a comparação das propriedades volumétricas das misturas em estudo comparadas com os resultados obtidos noutros estudos semelhantes na literatura.

Para efeitos de comparação é analisada a mistura estudada por Sousa (2015), na qual utilizou o mesmo betume aditivado em refinaria para produzir uma mistura temperada, embora não incorporando MBR. Consideram-se ainda as misturas produzidas nos trabalhos experimentais realizados por Martinho (2014), nos quais aquele autor estudou misturas betuminosas temperadas com incorporação de vários subprodutos. Complementarmente, também será utilizado para comparação o trabalho experimental realizado por Gardete (2016), no qual foi estudada uma mistura betuminosa a quente convencional, do tipo AC 20. Nos quadros 4.1, 4.2 e 4.3 estão descritas as composições das diferentes misturas betuminosas que são utilizadas para comparação com as misturas em estudo nesta dissertação.

No Quadro 4.1 é apresentado um resumo das composições das misturas betuminosas em estudo nesta dissertação, assim como a mistura estudada por Sousa (2015), que se designa E01. A mistura betuminosa E01 é temperada, do tipo AC 14 surf, produzida com um betume 35/50 aditivado em refinaria, típica de uma camada de desgaste. Foi produzida à temperatura de 125 °C e compactada a 110°C. Os agregados utilizados nesta mistura têm a mesma origem dos agregados novos utilizados na mistura em estudo nesta dissertação.

Quadro 4.1 Quadro resumo das composições das MBT em comparação, produzidas com betume aditivado em refinaria

Materiais	Designação	Ref.	MBT		
			E01 (%)	J01 (%)	J02 (%)
Ligante	Betume aditivado	35/50	5	5	4,5
Agregados Naturais (em % da massa de agregado)	Gnaisse	8/20	10	25	25
	Gnaisse	4/12	40	20	20
	Gnaisse	0/4	48	22	22
	Calcário	Filer	2	3	3
MBR	Mistura Betuminosa Recuperada	0/20	-	30	30
Aditivos (em % do ligante)	Orgânico		-	-	-
	Químico		-	-	-

E01- MBT, do tipo AC 14 surf (Sousa, 2015);

J01- MBT em estudo com 5% de betume (AC 20 base).

J02- MBT em estudo com 4,5% de betume (AC 20 base).

Na sequência do trabalho efetuado por Martinho (2014), foram selecionadas as quatro misturas betuminosas temperadas caracterizadas no Quadro 4.2 para comparação. Estas misturas betuminosas são do tipo AC 20 base/bin/reg, tendo sido produzidas com um betume 35/50 e com diferentes aditivos adicionados na produção. Estas MBT foram preparadas a uma temperatura de 120°C e compactadas a cerca de 110 °C.

Quadro 4.2 Quadro resumo das composições das MBT em comparação, produzidas com betume 35/50 e aditivo adicionado no processo de produção da mistura

Materiais	Designação	Ref.	MBT			
			M02 (%)	M03 (%)	M05 (%)	M06 (%)
Ligante	Betume	35/50	4,5	4,5	4,5	4,5
Agregados Naturais (em % da massa de agregado)	Calcário	10/20	21	21	25	25
	Calcário	4/10	25	25	15	15
	Calcário	0/4	54	54	30	30
MBR	Mistura Betuminosa Recuperada	0/20	-	-	30	30
Aditivos (em % do ligante)	Orgânico		4	-	4	-
	Químico		-	2	-	2
	Misto					

M02- MBT, do tipo AC 20 bin/reg/base, sem MBR (Martinho, 2014);

M03- MBT, do tipo AC 20 bin/reg/base, sem MBR (Martinho, 2014);

M05- MBT, do tipo AC 20 bin/reg/base, com MBR (Martinho, 2014);

M06- MBT, do tipo AC 20 bin/reg/base, com MBR (Martinho, 2014).

No âmbito da análise comparativa, julgou-se oportuno selecionar uma mistura betuminosa convencional a quente, tal como a estudada por Gardete (2016) e descrita no Quadro 4.3, uma vez que é um tipo de material de utilização muito corrente, podendo servir como ponto de referência relativamente aos resultados obtidos para MBT com betume aditivado em refinaria. Trata-se de uma mistura do tipo AC 20 bin/reg/base, produzida com um betume 35/50, produzida a cerca de 160°C e compactada a 145 °C.

Quadro 4.3 Quadro resumo da composição da MBQ em comparação, produzida com betume 35/50

			MBQ
Materiais	Designação	Ref.	D01 (%)
Ligante	Betume	35/50	5
Agregados Naturais (em % da massa de agregado)	Granito	11/22	25
	Granito	11/16	30
	Granito	8/16	45
	Calcário	4/8	-
MBR	Mistura Betuminosa Recuperada	-	-
Aditivos (em % do ligante)	Orgânico	-	-
	Químico	-	-

D01- MBQ, do tipo AC 20 base (Gardete, 2016)

As propriedades volumétricas consideradas na análise comparativa que se realizou são as seguintes: baridade, baridade máxima teórica, porosidade e VMA. Embora as composições estudadas, também do ponto de vista das propriedades mecânicas, tenham sido as indicadas nos quadros 4.1 a 4.3, para efeitos de comparação das propriedades volumétricas dispunha-se de resultados para uma gama mais alargada de percentagens em betume, pelo que se consideraram todos esses resultados na análise.

No Quadro 4.4 e na Figura 4.1 comparam-se os valores obtidos para a baridade da mistura em estudo com os valores das restantes misturas betuminosas consideradas para análise.

Quadro 4.4 Quadro comparativo da baridade

Betume (%)	Baridade (kg/m ³)						
	J0*	E01	M02	M03	M05	M06	D01
3,5	2310	2278	2245	2233	2373	2353	2257
4,0	2346	2286	2268	2255	2382	2373	2319
4,5	2361	2300	2262	2249	2373	2400	2333
5,0	2369	2331	2330	2251	2423	2393	2360
5,5	2376	2314	2337	2284	2413	2398	2372

* as MBT J01 e J02 têm 5 e 4,5% de betume, respetivamente.

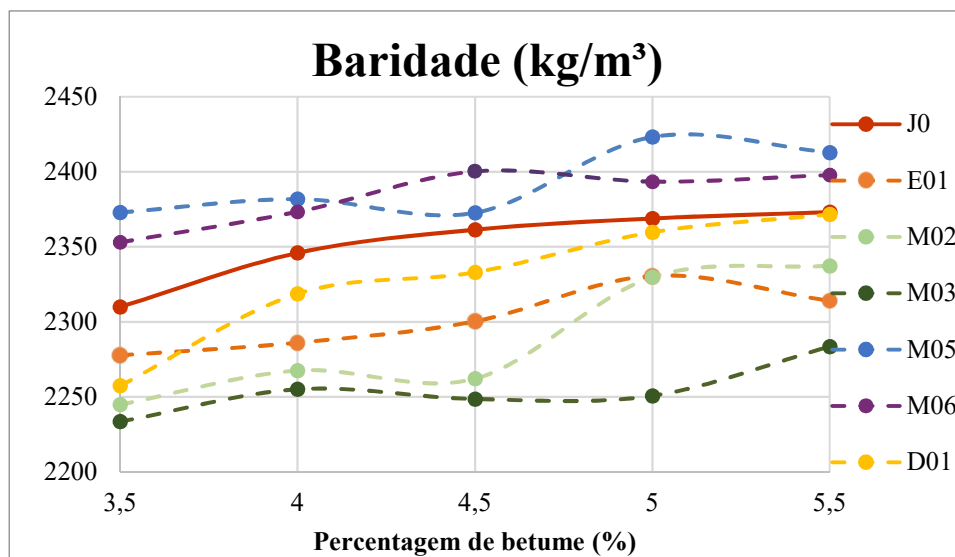


Figura 4.1 Comparação da variação da baridade das MBT em estudo com outras seis misturas

Observa-se que a mistura em estudo apresenta uma curva crescente, sendo que atinge a máxima baridade para cerca 5,5% de betume, não se observando a zona descendente típica da curva. Relativamente à gama de valores obtidos é possível verificar que os valores são semelhantes aos correntemente obtidos para MBQ e, no caso em apreço, próximos da MBQ designada D01. No caso de comparar com as restantes MBT, verifica-se que as misturas que possuem MBR (M05 e M06) apresentam valores para baridade mais elevados. Assinala-se que as baridades obtidas para as MBT em estudo (J0) evidenciam características típicas das misturas do tipo AC 20.

Os resultados da baridade máxima teórica estão representados no Quadro 4.5 e na Figura 4.2.

Quadro 4.5 Quadro comparativo da baridade máxima teórica

Baridade máxima teórica (kg/m³)							
Betume (%)	J0	E01	M02	M03	M05	M06	D01
3,5	2513	2527	2412	2427	2519	2506	-
4,0	2472	2480	2421	2431	2479	2495	-
4,5	2462	2466	2408	2392	2461	2461	-
5,0	2459	2443	2403	2376	2476	2476	-
5,5	2406	2430	2389	2374	2443	2443	-

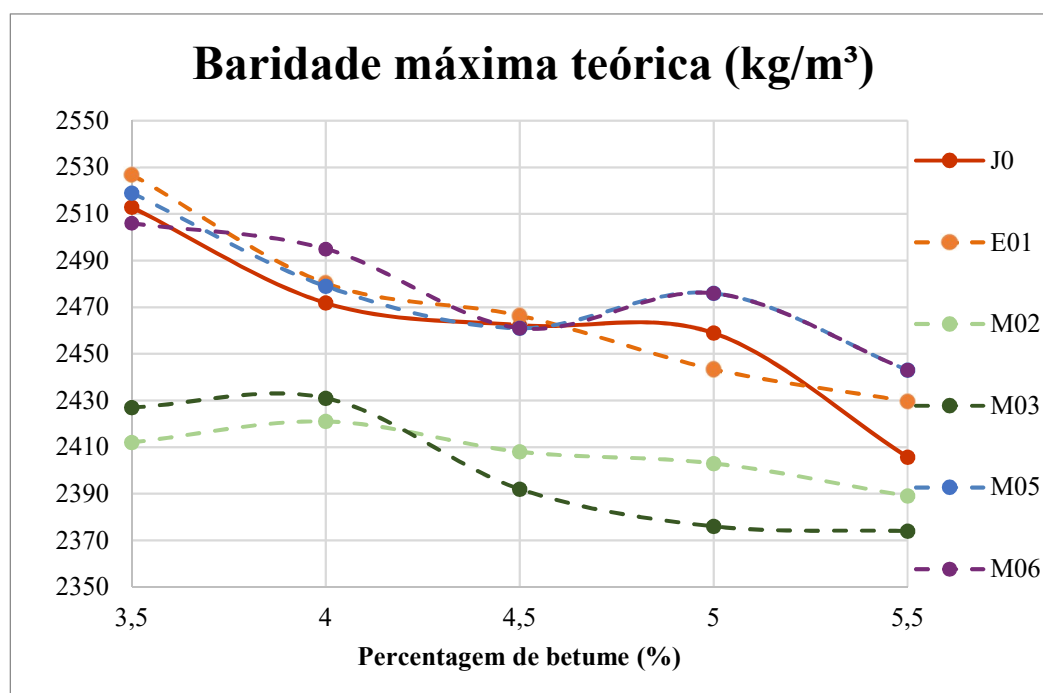


Figura 4.2 Comparação da variação da baridade máxima teórica das MBT em estudo com outras cinco misturas

Analisando a Figura 4.2 é possível concluir que os valores das MBT em estudo (J0) têm uma tendência semelhante às outras misturas. Também se verifica que as misturas que não possuem MBR apresentam valores de baridade máxima teórica mais baixos.

No Quadro 4.6 e na Figura 4.3 compara-se a variação da porosidade em função da percentagem de betume para as diferentes misturas betuminosas em análise.

Quadro 4.6 Quadro comparativo da porosidade

Betume (%)	Porosidade (%)						
	J0	E01	M02	M03	M05	M06	D01
3,5	8,1	9,9	6,9	8,0	5,8	6,1	9,6
4,0	5,1	7,8	6,3	7,2	3,9	4,9	6,7
4,5	4,1	7,0	6,1	6,0	3,6	2,5	5,2
5,0	3,7	5,3	3,0	5,3	2,1	3,3	3,6
5,5	1,4	5,4	2,2	3,8	1,2	1,8	2,7

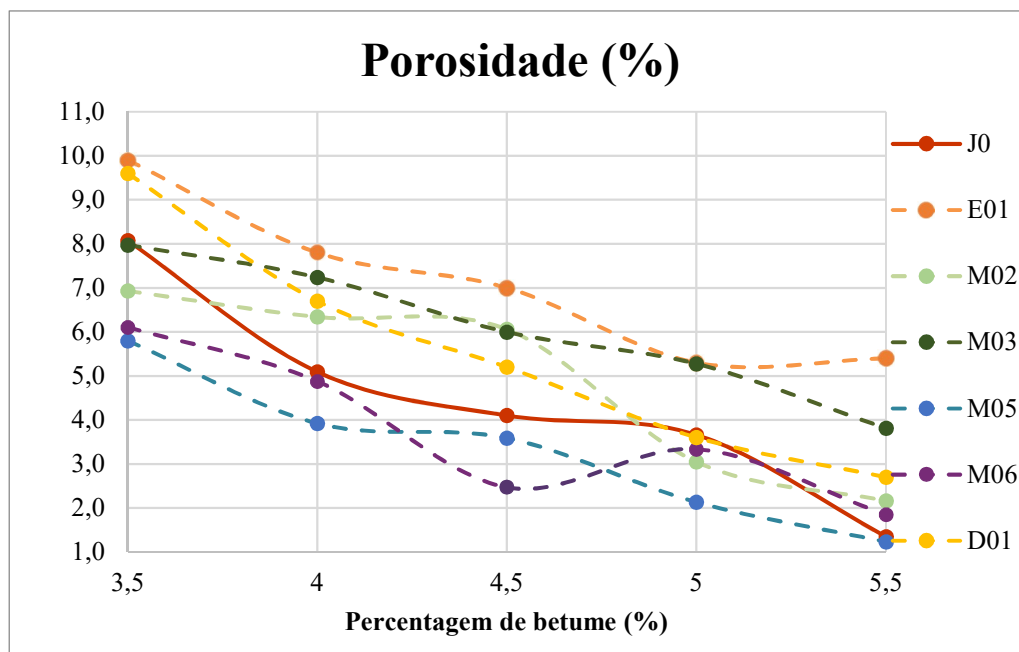


Figura 4.3 Comparação da variação da porosidade das MBT em estudo com outras seis misturas

É possível verificar na Figura 4.3 que os valores de porosidade obtidos para as MBT em estudo (J0) são globalmente semelhantes a misturas deste género, apresentando também valores muito próximos da mistura convencional a quente (D01). Note-se que as misturas com MBR (J0, M05 e M06) apresentam valores de porosidade tendencialmente mais baixos, o que seria de esperar face aos resultados apresentados anteriormente. É de salientar que a curva das MBT em estudo encontra-se localizada entre as curvas das misturas com e sem MBR.

No Quadro 4.7 e na Figura 4.4 apresentam-se os valores médios de vazios da mistura de agregados (VMA) para cada mistura.

Quadro 4.7 Quadro comparativo do VMA

Betume (%)	VMA (%)						
	J0	E01	M02	M03	M05	M06	D01
3,5	15,9	17,5	14,6	15,6	13,9	14,1	17,2
4,0	14,2	16,6	15,1	16,0	13,2	14,1	15,6
4,5	14,4	16,9	15,9	15,8	14,2	13,0	15,2
5,0	15,2	16,5	14,4	16,2	13,9	15,0	14,9
5,5	14,0	17,6	14,6	16,0	14,1	14,6	15,2

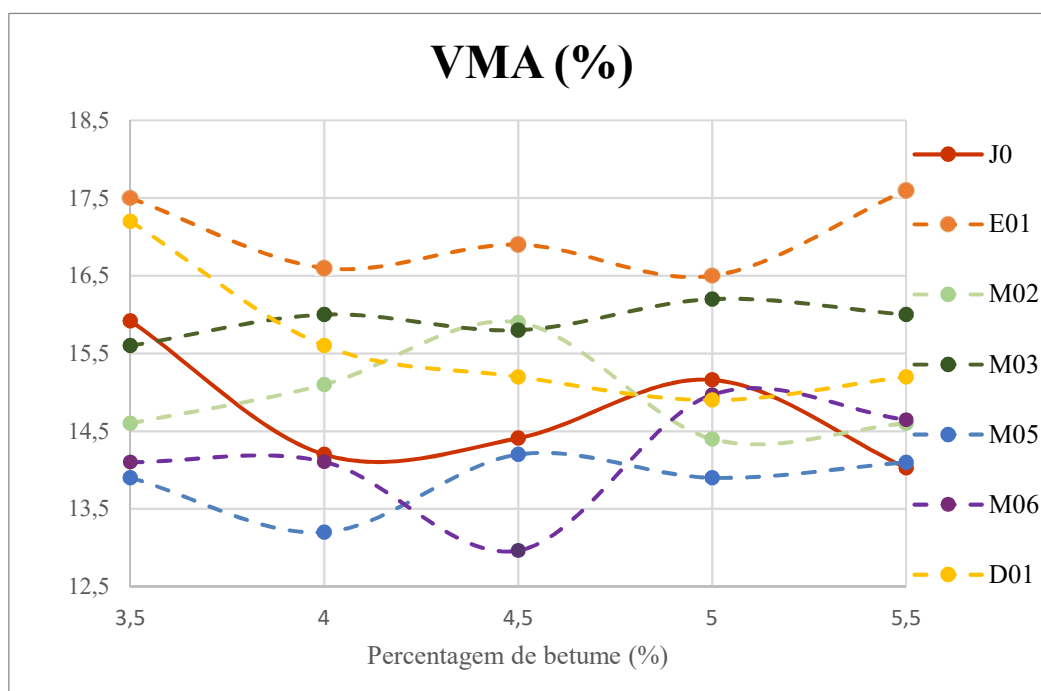


Figura 4.4 Comparação da variação de VMA das MBT em estudo com outras seis misturas

Na Figura 4.4 é possível verificar que a curva das MBT em estudo (J0) apresentaram valores acima de 14%, o que é geralmente adequado tendo em conta aos requisitos dos cadernos de encargos. Os valores de VMA são também próximos dos da MBQ (D01).

4.3. Ensaio de Compressão de Marshall

Os resultados da força máxima medida no momento da rotura, isto é, da estabilidade Marshall, são apresentados no Quadro 4.8 e na Figura 4.5, sendo os valores da deformação Marshall sintetizados no Quadro 4.9 e na Figura 4.6.

Quadro 4.8 Quadro comparativo da estabilidade Marshall

Betume (%)	Estabilidade (kN)						
	J0	E01	M02	M03	M05	M06	D01
3,5	17,6	10,8	8,0	6,4	10,0	9,7	16,5
4,0	20,9	12,0	8,6	6,9	10,3	9,9	21,1
4,5	20,3	12,8	7,6	6,6	9,7	9,6	21,8
5,0	17,8	13,7	8,6	5,6	9,8	8,9	22,5
5,5	17,8	10,6	5,4	5,0	9,5	8,2	22,0

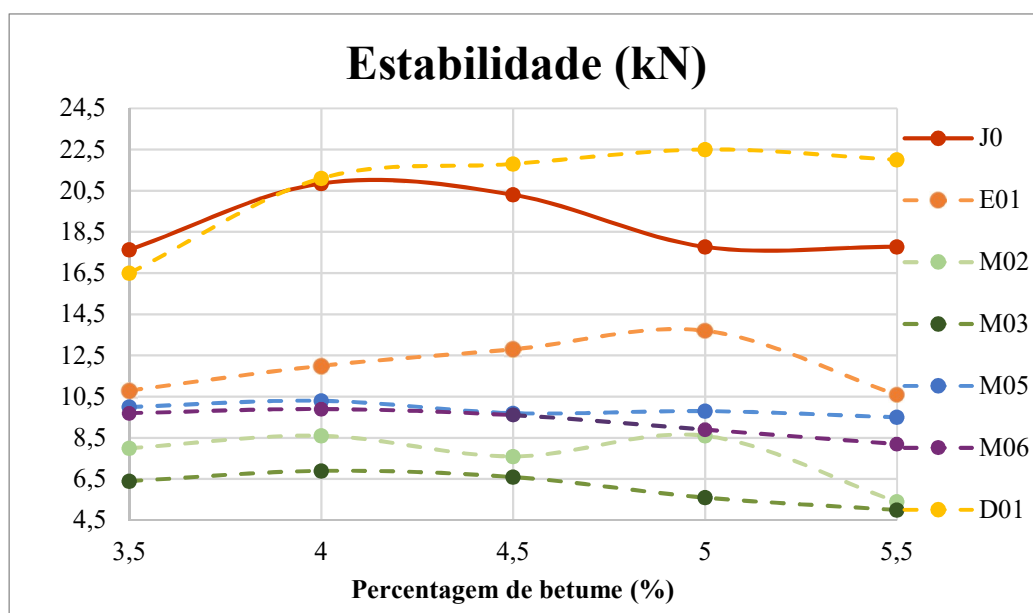


Figura 4.5 Comparação da variação do valor de estabilidade Marshall das MBT em estudo com outras seis misturas

Analisando as MBT em estudo (J0) na Figura 4.5, verifica-se que os valores correspondentes à estabilidade Marshall encontram-se situados na gama de valores da mistura a quente convencional (D01), embora para as percentagens de betume de 4,5 e 5%, ou seja, as que foram consideradas para uma avaliação mecânica mais detalhada, as composições J0 originaram valores mais baixos. Comparativamente às outras MBT estudadas em outros trabalhos (E01, M03 M05 e M06), as J0 originaram valores de estabilidade mais próximos da mistura E01, a qual foi produzida com o mesmo betume aditivado em refinaria que a mistura em estudo, mas sem incorporação de MBR.

Quadro 4.9 Quadro comparativo de deformação Marshall

Betume (%)	Deformação (mm)						
	J0	E01	M02	M03	M05	M06	D01
3,5	5,7	4,4	3,4	4,0	3,4	3,9	3,4
4,0	5,1	5,4	3,7	3,5	3,6	4,3	3,5
4,5	6,0	4,9	3,3	3,3	3,1	3,8	3,5
5,0	5,9	5,1	3,8	3,4	4,3	5,1	3,9
5,5	5,7	5,6	3,5	3,2	4,7	4,9	4,5

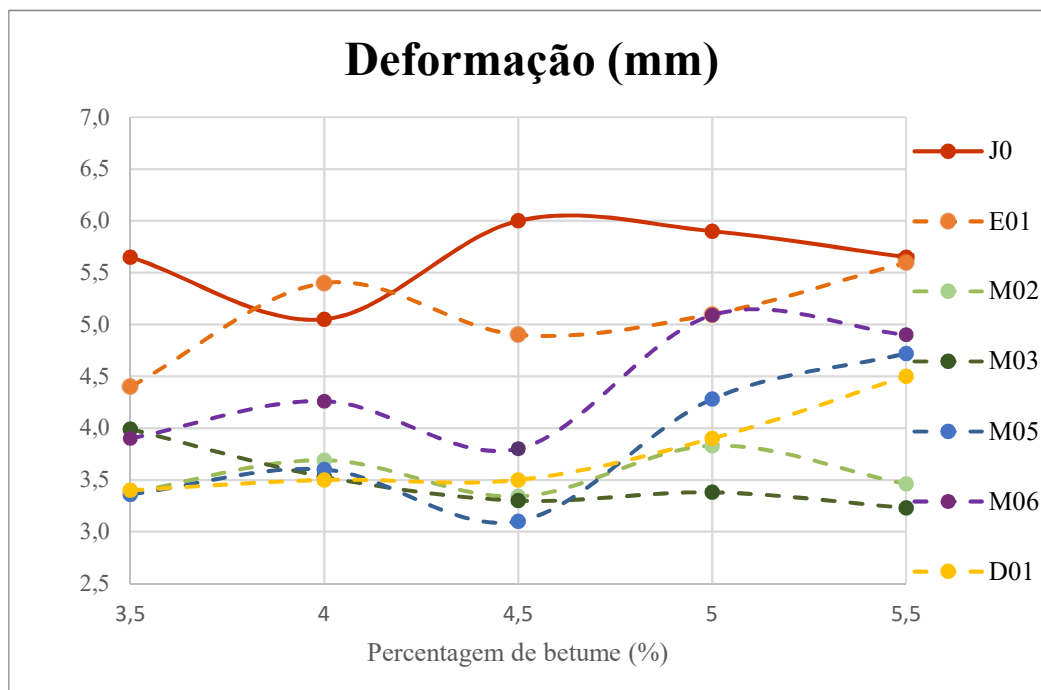


Figura 4.6 Comparação da variação do valor de deformação Marshall das MBT em estudo com outras seis misturas

A Figura 4.6 permite tirar as seguintes ilações relativamente às MBT em estudo (J0): apresentaram valores para a deformação Marshall genericamente mais elevados que as outras MBT, com e sem MBR; originaram deformações consideravelmente mais altas que a observadas para a mistura a quente convencional (D01); apresentaram deformações também elevadas e da ordem de grandeza das MBT produzidas com betume de refinaria, sem MBR (E01); deformaram-se muito mais que as MBT produzidas com aditivos e sem MBR (M02 e M03); apresentaram uma deformação próxima da MBT produzida com aditivo químico e MBR (M06), para as percentagens de betume de 5% ou mais.

4.4. Sensibilidade à Água

Para a comparação de resultados são analisadas as misturas E01 e D01 descritas em 4.2. Uma vez que não dispõe de resultados de sensibilidade à água mas as MBT M02, M03, M05 e M06 do trabalho experimental realizado por Martinho (2014), optou-se por apresentar para comparação as misturas M20, M24 e M26 cujas composições são apresentadas no Quadro 4.10.

Os resultados obtidos nos ensaios de determinação da resistência conservada no ensaio de tração indireta (ITSR) estão expostos no Quadro 4.11 e na Figura 4.7.

Quadro 4.10 Quadro resumo das composições consideradas para comparação da sensibilidade à água

Materiais	Designação	Ref.	MBT		MBQ
			M20 (%)	M24 (%)	M26 (%)
Ligante	Betume	35/50	4,5	3,5	4,5
Agregados Naturais (em % da massa de agregado)	Calcário	10/20	30	25	30
	Calcário	4/10	26	15	26
	Calcário	0/4	44	25	44
MBR	Mistura Betuminosa Recuperada	0/20	-	35	-
Aditivos (em % do ligante)	Orgânico		2	-	-
	Químico		-	-	-
	Misto		-	6	-

M20- MBT sem MBR (Martinho, 2014)

M24- MBT com MBR (Martinho, 2014)

M26- MBQ (Martinho, 2014).

Quadro 4.11 Resultados obtidos através do ensaio de tração indireta

	betume (%)	Baridade (kg/m ³)	ITSR (%)
J01	5,0	2375,4	94,9
J02	4,5	2384,5	80,7
E01	5,0	2301,8	92,0
M20	4,5	2353,9	94,2
M24	4,5	2373,4	89,7
M26	4,5	2383,9	93,1
D01	5,0	-	95,8

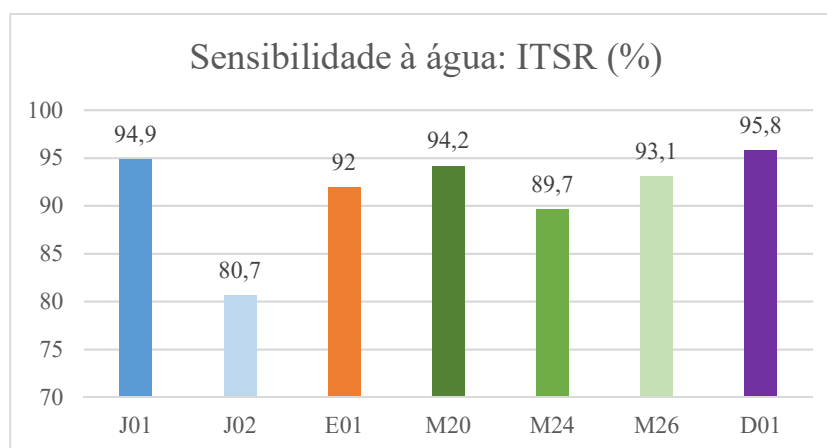


Figura 4.7 Comparação da sensibilidade à água das MBT em estudo com outras cinco misturas

Analisando os resultados da Figura 4.7, verifica-se que as MBT em estudo apresentam valores satisfatórios, embora a composição J02, com 4,5%, ou seja, menos ligante que o ótimo determinado pelo método de Marshall tenha um valor de ITSR mais baixo. Com isto pode concluir-se que a MBT em estudo, J01, apresenta pouca sensibilidade à ação da água, estando em linha com os valores típicos das MBQ convencionais (M26 e D01) e com as restantes MBT sem e com MBR (E01, M20 e M24).

4.5. Resistência à Deformação Permanente em Ensaio de Compressão Uniaxial

Tal como foi referido, a avaliação da resistência das MBT em estudo foi feita através de ensaios de compressão uniaxial cíclica, segundo a norma EN 12697-25, tendo-se ensaiado provetes com 5 e 4,5% de betume.

Para a comparação dos resultados de resistência à deformação permanente obtidos foi considerado o trabalho realizado pelo Sousa (2015), uma vez que o tipo e as condições de ensaio foram semelhantes. O estudo foi realizado para dois grupos de provetes com percentagens de betume diferentes e os ensaios foram realizados para a temperatura de 60°C. Como já foi referido anteriormente, o betume utilizado por Sousa (2015) foi igual ao utilizado na mistura em estudo. No Quadro 4.12 indicam-se os resultados obtidos para composições com 5 e 4,5% de betume, mostrando-se graficamente os mesmos parâmetros na Figura 4.8.

Quadro 4.12 Resultados obtidos através do ensaio de compressão uniaxial cíclica realizados a 60°C

	betume (%)	Baridade (kg/m ³)	Deformação média (mm)	f _c (mm/10 ³ ciclo)
J01 (60°C)	5,0	2329,60	0,53	0,93
J02 (60°C)	4,5	2295,50	0,62	0,81
E01 (60°C)	5,0	2337,27	0,40	1,02
E02 (60°C)	4,5	2369,16	0,31	0,52

Na Figura 4.8 é possível verificar que as MBT em estudo (com MBR) apresentam valores de deformação permanente mais elevados relativamente às MBT sem MBR estudadas por Sousa (2015). Em termos de deformação axial dos provetes, as MBT sem MBR apresentam maior deformação permanente para a composição com maior percentagem de betume, não se verificando o mesmo para as MBT com MBR em estudo. Já no que diz respeito ao parâmetro f_c , ou seja, à velocidade de deformação, a maiores percentagens de betume nas misturas correspondeu maior valor de f_c , tal como se ilustra na Figura 4.9.

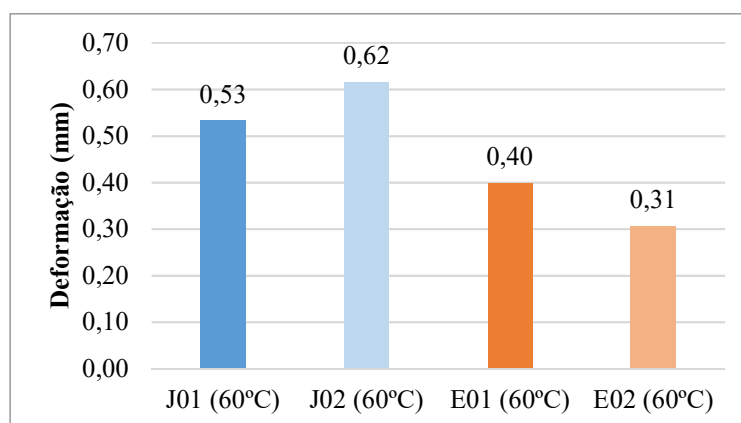


Figura 4.8 Comparação da resistência à deformação permanente das MBT em estudo com as avaliadas por Sousa (2015)

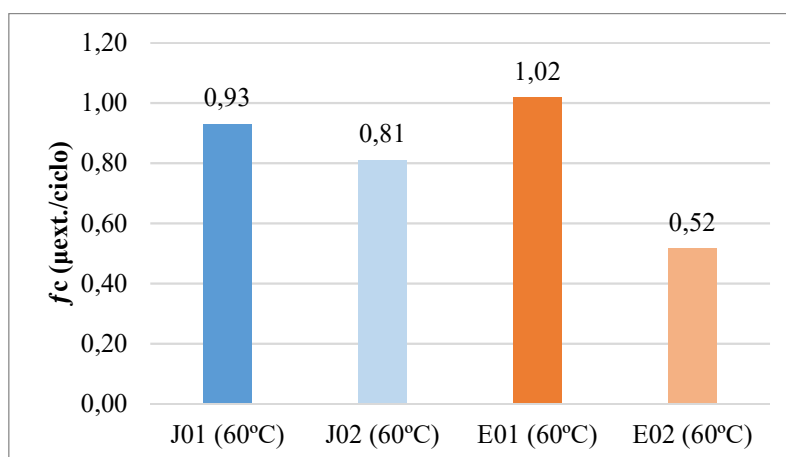


Figura 4.9 Comparação dos resultados do parâmetro f_c das MBT em estudo com as avaliadas por Sousa (2015)

Analisando os resultados apresentados na Figura 4.9, conclui-se que as MBT com MBR em estudo apresentam valores que se encontram dentro da gama de valores da mistura estudada por Sousa (2015). Na composição J01, cuja percentagem de betume é praticamente igual ao ótimo obtido pelo método de Marshall, a velocidade de deformação é ligeiramente inferior à média por Sousa (2015) para uma composição idêntica, mas sem MBR. Já quando a percentagem de

betume nas misturas é mais baixa, ou seja, de 4,5% de betume, a composição sem MBR apresentou uma velocidade de deformação consideravelmente inferior à composição sem MBR.

4.6. Módulo de Rigidez com Base em Ensaio de Flexão em 4 Pontos

Neste subcapítulo comparam-se os resultados do módulo de rigidez das MBT com MBR em estudo (J01 e J02) com os obtidos para outras MBT (com e sem MBR), através de ensaios de flexão em 4 pontos (4PB). Selecionaram-se trabalhos realizados em condições semelhantes, designadamente o nível de extensão aplicado (50 $\mu\text{m/m}$) e a temperatura de ensaio de 20 °C. A gama de frequências utilizada nos trabalhos considerados foi o seguinte: 1, 3, 5, 10, 20 e 30Hz. No Quadro 4.13 e na Figura 4.10 estão resumidos os resultados obtidos nos ensaios de determinação do módulo de rigidez e do ângulo de fase.

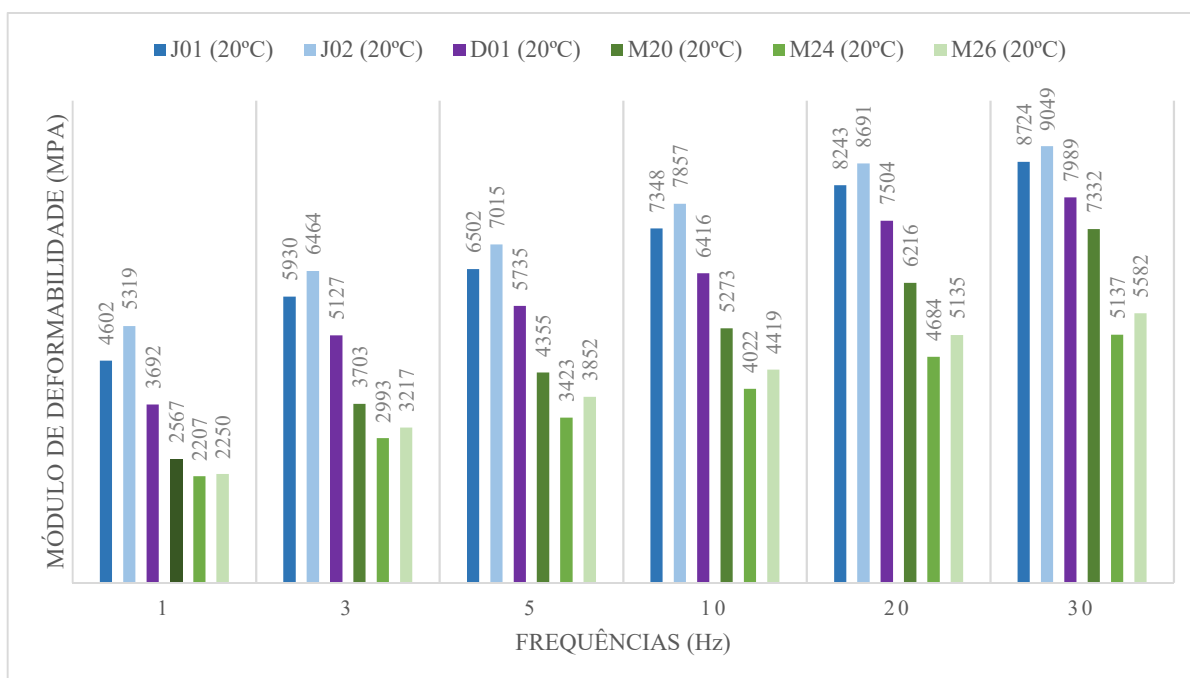


Figura 4.10 Comparação dos valores do módulo de rigidez das MBT em estudo com outras quatro misturas

Na Figura 4.10 mostra-se um gráfico no qual se observa que, para todas as frequências, as MBT em estudo (J01 e J02) apresentam valores mais elevados para o módulo de rigidez que as outras misturas consideradas para comparação. No entanto, verifica-se que as MBT em estudo têm módulos que se aproximam mais dos resultados obtidos para a mistura convencional a quente, D01, estudada por Gardete (2016) que das MBT e MBQ estudadas por Martinho (2014). Note-se que a mistura M26 (MBQ) tinha uma porosidade mais elevada que o habitual, da ordem de 8%.

Quadro 4.13 Resultados do módulo de rigidez obtidos a 20°C através do ensaio 4PB

Mistura	Betume (%)	Média das baridades (kg/m ³)	Frequência (Hz)	Módulo de rigidez (MPa)	Ângulo de fase (graus)
				Média	Média
J01	5,0%	2327,3	1	4602	24,3
			3	5930	19,24
			5	6502	17,73
			10	7348	14,73
			20	8243	9,96
			30	8724	5,93
J02	4,5%	2307,5	1	5319	18,85
			3	6464	15,92
			5	7015	14,87
			10	7857	11,82
			20	8691	6,67
			30	9049	3,59
D01	5,0%	-	1	3692	-
			3	5127	-
			5	5735	-
			10	6416	-
			20	7504	-
			30	7989	-
M20	4,5%	-	1	2567	35
			3	3703	30,3
			5	4355	28
			10	5273	23,2
			20	6216	16,7
			30	7332	12
M24	4,5%	-	1	2207	29,9
			3	2993	25,1
			5	3423	23,3
			10	4022	19,2
			20	4684	14,2
			30	5137	10,2
M26	4,5%	-	1	2250	29,4
			3	3217	25,2
			5	3852	22,8
			10	4419	19,2
			20	5135	14,9
			30	5582	11,4

Relativamente ao ângulo de fase, os resultados estão apresentados na Figura 4.11.

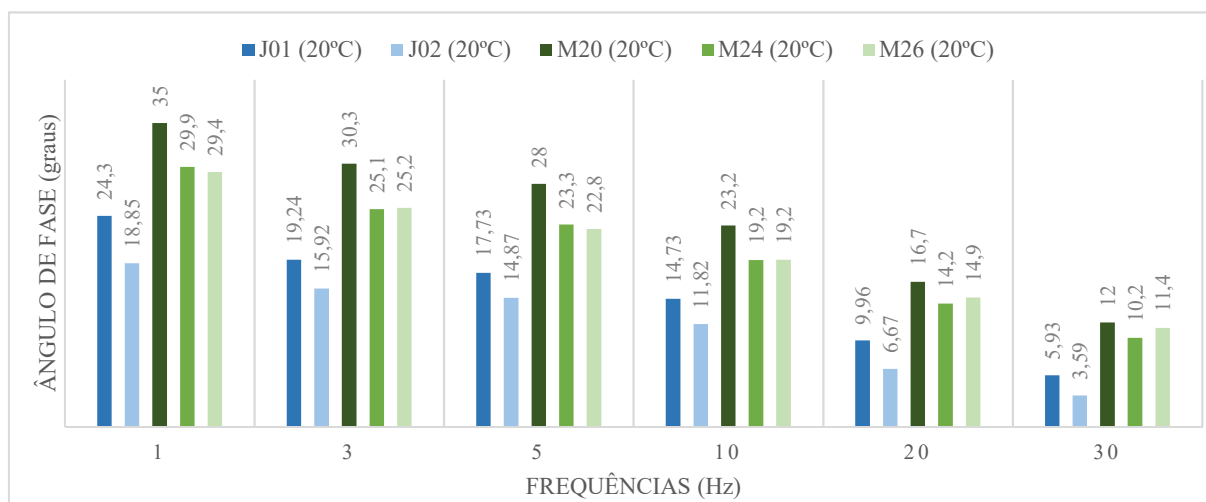


Figura 4.11 Comparação dos valores do módulo de rigidez das MBT em estudo com outras quatro misturas

De forma coerente com os resultados obtidos para o módulo de rigidez, verifica-se que os valores do ângulo de fase para as MBT em estudo, apresentam valores inferiores às misturas estudadas por Martinho (2014).

4.7. Considerações finais

Neste capítulo foi feita a comparação dos resultados obtidos, em cada grupo de ensaios realizados, com outros trabalhos referenciados na bibliografia assinalada. As misturas comparadas foram escolhidas de forma criteriosa de forma a poder relacionar os resultados obtidos.

Relativamente às propriedades volumétricas das misturas em estudo verificou-se que os resultados se encontram, geralmente dentro da gama de valores esperados, sendo que relativamente a deformação de Marshall se notam valores ligeiramente superiores às misturas comparadas. No que se refere aos ensaios de sensibilidade a água, conclui-se que as MBT em estudo apresentam valores satisfatórios, embora a mistura em estudo que possui menos ligante que o ótimo determinado pelo método de Marshall tenha um valor de ITSR mais baixo. Isto permite concluir que a MBT em estudo com 5% de betume, apresenta pouca sensibilidade a água.

Quanto aos resultados a deformação permanente, verificou-se que as MBT com incorporação de MBR em estudo apresentam valores de deformação permanente superior às MBT sem MBR comparadas. Relativamente ao parâmetro a velocidade de deformação (f_c), conclui-se que a maiores percentagens de betume nas misturas correspondeu a maior valor de velocidade de deformação.

Em relação aos resultados obtidos para os módulos de rigidez, conclui-se que para todas as frequências, as MBT em estudo (J01 e J02) apresentam valores mais elevados para o módulo de rigidez que as outras misturas selecionadas como comparação. Relativamente ao ângulo de fase das MBT em estudo, apresentam valores inferiores às misturas comparadas.

5. Conclusões Gerais e Trabalhos Futuros

5.1. Síntese do Trabalho e Conclusões Gerais

Atualmente, as questões relacionadas com o meio ambiente têm tido um relevo muito importante, sendo impossível ignorar a necessidade de criar soluções mais sustentáveis e menos poluidoras para a generalidade dos setores. Já em 1995, Porter e van der Linde afirmavam que “não existe incompatibilidade entre o desenvolvimento empresarial ou a competitividade e preservação ambiental, sendo conciliáveis e, até, complementares. A proteção ambiental terá uma dimensão económica que se traduz por incentivos à reestruturação e inovação no seio das empresas, induzindo melhorias de produtividade e eficiência no uso de recursos, podendo, em última instância conduzir à redução de custos, a qual acabará por tornar as empresas mais competitivas, e não menos, como alega a maioria dos empresários”.

Esta linha de pensamento demonstra uma realidade atual, na qual o conceito de preservação ambiental tem ganho uma importância à escala das organizações, sendo exigido que se faça uma utilização racional dos recursos naturais, que se aposte na tecnologia de forma a reduzir os consumos de energia e que exista uma redução dos agentes poluidores.

Neste sentido, surgiu o interesse em estudar as misturas betuminosas temperadas, uma vez que estas permitem obter reduções dos consumos de energia, podendo ser produzidas com base em diversas tecnologias, permitindo incorporar ou não subprodutos industriais, nomeadamente misturas betuminosas recuperadas (MBR), constituindo uma possível alternativa às misturas tradicionais a quente (MBQ).

Com a realização do presente trabalho pretendeu-se contribuir para o estudo e desenvolvimento de misturas betuminosas temperadas, com incorporação de material betuminoso recuperado, ao mesmo tempo que se utilizou um betume “temperado”, aditivado em refinaria, conhecido internacionalmente por “*terminal blend*”.

No âmbito desta dissertação, inicialmente realizaram-se trabalhos de pesquisa bibliográfica, de modo a conhecer o que tem sido feito na área das MBT e da utilização de MBR. A revisão da literatura permitiu sintetizar informação relativa às diversas tecnologias de MBT e à forma como estas permitem a redução das temperaturas de produção e de compactação, deixando em aberto algumas questões que ainda permanecem sobre o tema das misturas temperadas, tais como as associadas à utilização de betumes aditivados em refinaria.

No capítulo 2, de revisão da literatura, foram abordados aspetos relacionados com as MBT, tais como as técnicas de produção, os aditivos utilizados, as principais vantagens e desvantagens. Além disso, fez-se uma súmula da utilização de MBR como constituintes de novas misturas, destacando-se as diversas vantagens a nível económico e ambiental que aquela utilização permite. Embora as MBR já sejam utilizadas em MBQ, é necessário aumentar a incorporação daquele tipo de resíduos, quer em MBQ, quer em MBT.

A partir da revisão da literatura realizada foi possível retirar algumas conclusões relacionadas com a aplicação de misturas betuminosas temperadas, tais como:

- As MBT podem ser fabricadas com agregados naturais ou reciclados e, geralmente, podem ser aplicadas de forma idêntica às MBQ, exceto quando se utilizam técnicas de betume espuma;
- Existe um conjunto de soluções que permite a redução da temperatura das MBT, desde técnicas de formação de espuma de betume à utilização de aditivos (aditivos químicos, aditivos orgânicos ou mistos); estas técnicas permitem obter reduções de temperatura na ordem dos 30°C;
- As principais vantagens das MBT estão relacionadas com o menor consumo de energia e, conseqüentemente, com uma menor emissão de GEE.;
- As MBT produzidas através da introdução de aditivos são realizadas com os mesmos equipamentos utilizados no fabrico de MBQ;
- São apontadas algumas desvantagens às MBT, tais como o custo do equipamento a adquirir para a produção de espuma de betume e a compra de aditivos;
- O desempenho mecânico das MBT é geralmente adequado mas, face às MBQ, podem exibir uma menor resistência à deformação permanente e uma maior sensibilidade à água.

A revisão da literatura permitiu concluir também que a inclusão de MBR no fabrico de MBT acrescenta um conjunto de benefícios diretos tais como:

- A diminuição do consumo de matérias-primas naturais e dos correspondentes custos, bem como uma redução de energia na transformação daquelas;
- Redução do volume de resíduos a levar a vazadouro;
- Diminuição da energia utilizada na produção e aquecimento dos agregados, conduzindo a reduções de emissões de GEE.

Os trabalhos experimentais realizados no âmbito desta dissertação foram desenvolvidos para o estudo de uma MBT produzida com betume 35/50 aditivado em refinaria, e com incorporação de MBR, de modo a obter um betão betuminoso do tipo AC 20 base 35/50.

Inicialmente, procedeu-se à caracterização dos diferentes materiais constituintes da MBT com MBR, procedendo-se à análise granulométrica dos materiais granulares e à determinação da percentagem de betume residual da MBR.

Seguiu-se um estudo da formulação do AC20 base, para as várias composições, de acordo com o fuso selecionado do CEEP, recorrendo ao método de Marshall. Realizaram-se 20 provetes Marshall, 4 para cinco percentagens de betume, a variar de 3,5 a 5,5%, com intervalos de 0,5%. Após o estudo de formulação, decidiu-se prosseguir os ensaios de caracterização mecânica para composições com 4,5 e 5% de betume.

Posteriormente ao fabrico dos provetes realizaram-se os ensaios de caracterização das misturas produzidas. Em termos de propriedades volumétricas determinou-se a baridade, a baridade máxima teórica, a porosidade e VMA. No que diz respeito às propriedades mecânicas, avaliou-

se a estabilidade e a deformação de Marshall, a sensibilidade à água em ensaios de tração indireta, a resistência à deformação permanente em ensaios de compressão uniaxial cíclica, o módulo de rigidez e o ângulo de fase em ensaio de flexão, do tipo 4PB. Após a realização dos ensaios de caracterização mecânica foi possível concluir o seguinte:

- Os valores de estabilidade de Marshall obtidos situaram-se entre 17,6 e 20,9 kN;
- A deformação de Marshall resultou em valores compreendidos entre 5,1 e 6 mm, o que é considerado elevado para os valores típicos obtidos em MBQ do tipo AC 20;
- As MBT em estudo apresentaram um bom comportamento em relação à sensibilidade à água, uma vez que se obteve um valor de ITSR de 94,9% para a MBT com 5% de betume e de 80,7% para a MBT com 4,5 % de betume;
- As MBT com MBR estudadas mostraram boa resistência à deformação permanente, tendo como termo de comparação a resistência de uma MBT sem MBR, do tipo AC 14 surf; também as curvas deformação – número de ciclos de carga nunca atingiram a chamada fase 3, a qual corresponde a uma aceleração rápida da deformação após a ocorrência de uma zona quase linear;
- As deformações permanentes médias, a 60°C, foram determinadas com base em curvas de variação da deformação com o número de cargas, sendo que para a MBT com 4,5 % de betume obtiveram-se valores de deformação permanente de 0,62 mm e para a MBT com 5% betume o valor de 0,53 mm;
- Os valores do parâmetro f_c – velocidade de deformação por cada ciclo de carga na zona linear da curva de deformação – número de ciclos, foram de 0,93 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ para a MBT com 5 % de betume e 0,81 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ para a MBT com 4,5% de betume;
- Os valores do parâmetro ϵ_{3600} – extensão (de diminuição a altura) que o provete sofre ao longo do ensaio, foram de 8880 $\mu\text{m}/\text{m}$ para 5% de betume e de 10270 $\mu\text{m}/\text{m}$ para 4,5% de betume;
- Determinou-se o módulo de rigidez e o ângulo de fase em provetes com 4,5 e 5%, a 20°C e com uma extensão de 50 $\mu\text{m}/\text{m}$, varrendo frequências entre 1 e 30 Hz, tendo-se verificado que a MBT mais rica em ligante apresentou módulos mais baixos e ângulos de fase mais elevados, embora com magnitudes próximas; a mistura com 5% de betume foi mais sensível à variação da frequência de ensaio no que diz respeito ao módulo de rigidez e ao ângulo de fase; para a frequência de 10 Hz, muitas vezes utilizados no âmbito de dimensionamento de pavimentos, obtiveram-se valores de cerca de 7300 e 7900 MPa, respetivamente, para a MBT com 5% de betume e para a MBT com 4,5% de betume;
- Verificou-se que o comportamento esperado das MBT estudadas relativamente à fadiga é adequado, embora não tenham sido realizados ensaios laboratoriais de avaliação de resistência à fadiga para o efeito; a estimativa realizada, tendo em consideração os ensaios realizados para o módulo de rigidez “inicial” e utilizando-se a lei de fadiga do

método de dimensionamento da Shell, permitiram inferir extensões para um milhão de ciclos, ϵ_6 , superiores a 166 $\mu\text{m}/\text{m}$, o que configura um bom comportamento à fadiga.

Finalmente, após a conclusão dos trabalhos experimentais e a apresentação dos mesmos, e uma vez que as MBT produzidas com betume aditivado em refinaria e com incorporação de MBR constituem de uma técnica pouco divulgada, considerou-se útil comparar os resultados obtidos com outras misturas betuminosas estudadas em trabalhos anteriores. Procurou-se estabelecer comparações pertinentes, comparando os resultados das MBT em estudo com outros betões betuminosos, quer do tipo MBQ, quer do tipo MBT. Além disso, a análise comparativa incluiu misturas com e sem MBR. As principais conclusões foram as seguintes:

- Relativamente às propriedades volumétricas, destacam-se os valores obtidos para a porosidade, próximos de 4% para as percentagens de betume de 4,5 e 5%, ou seja, para as composições com mais possibilidades de utilização; esta gama de porosidades é muito próxima da determinada para a MBQ (D01) considerada para comparação e está no intervalo (3 a 6%) indicado no CEEP para betões betuminosos do tipo AC20; os valores da porosidade das MBT com MBR estudadas também estão próximos, embora um pouco abaixo, dos obtidos para as MBT (com aditivos) e sem MBR tomadas para comparação;
- Os valores de VMA foram superiores a 14%, tal como considera o CEEP para misturas do tipo AC20;
- Os resultados obtidos para a estabilidade Marshall da MBT com MBR em estudo foram elevados (17,8 kN para a mistura com 5% de betume) e um pouco mais baixos que os obtidos para a MBQ considerada para comparação; todas as restantes MBT, com e sem MBR, com as quais se comparou a estabilidade Marshall se caracterizaram por valores inferiores (entre 5,6 e 13,7 kN);
- A deformação Marshall das MBT em estudo foi superior às restantes, da ordem de 6 mm (para 5% de betume), e maior que o limite máximo de 4 mm geralmente admitido para misturas AC20; esta tendência também já se tinha verificado para a MBT sem MBR produzida com betume de refinaria, o que aparenta ser uma característica própria das misturas produzidas com betume temperado aditivado em refinaria;
- As MBT em estudo apresentam valores satisfatórios de sensibilidade à água, sendo que a mistura em estudo com 5 % de betume aditivado em refinaria apresentou uma resistência à ação da água bastante melhor que a mistura com 4,5% de betume aditivado em refinaria, o que mostra que a percentagem de betume influenciou bastante a sensibilidade à água das MBT em estudo;
- Quanto à resistência à deformação permanente, as MBT com MBR em estudo apresentaram um desempenho ligeiramente inferior às MBT sem MBR produzidas com o mesmo tipo de betume, embora o parâmetro f_c (velocidade de deformação), usado para medir aquela resistência, tenha conduzido a resultados semelhantes em ambos os casos;

- Relativamente ao módulo de rigidez foi possível concluir que as MBT em estudo apresentaram valores elevados (cerca de 7400 MPa para a composição com 5% de betume, à temperatura de 20°C e para a frequência de 10Hz) que outras misturas analisadas, verificando-se que os módulos das MBT estudadas se aproximaram de uma das MBQ com a qual se fez a comparação. Já em relação ao “ângulo de fase”, as misturas em estudo apresentam valores inferiores às misturas com as quais se comparou, o que é coerente com módulos observados de magnitude mais elevada, evidenciando um comportamento mais elástico que as restantes.

5.2. Prosseguimento de Trabalhos Futuros

Este tipo de trabalhos deixa sempre em aberto novas possibilidades. Este estudo teve como objetivo o aprofundamento do conhecimento relativo às MBT produzidas com betume aditivado em refinaria e incorporação de MBR. Sendo esta uma técnica pouco divulgada, será muito importante continuar a desenvolver trabalhos de investigação de modo a aprofundar os conhecimentos sobre este tipo de misturas. Assim, indicam-se a seguir alguns pontos importantes para trabalhos futuros:

- Recorrer a um maior número de ensaios e realizá-los de uma forma mais extensa, com maior número de amostras e com maior variação de parâmetros de composição e de ensaio, de modo a estudar a sua influência na evolução das propriedades mecânicas;
- Realizar outro tipo de ensaios para a análise de desempenho, nomeadamente o ensaio de pista em laboratório (*Wheel-Tracking*) para avaliar a resistência à deformação permanente, e o ensaio de flexão (4PB) para avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga;
- Construção de trechos experimentais em condições reais de produção, dada a existência de diferentes condições em obra que laboratorialmente não são possíveis de replicar à escala real;
- Avaliar o desempenho a longo prazo de misturas produzidas com betume aditivado em refinaria, por exemplo, através da simulação do seu envelhecimento em laboratório recorrendo a radiação ultravioleta aplicada em condições controladas.

5.3. Considerações Finais

Finalmente, tendo em conta os resultados alcançados, pode-se considerar que os objetivos propostos inicialmente foram atingidos. Numa primeira fase foi realizada uma revisão bibliográfica que permitiu um enquadramento geral do tema das MBT, assim como dos aspetos mais importantes associados à incorporação de MBR. Numa fase seguinte realizaram-se ensaios de caracterização laboratorial das misturas que se estudaram e que permitiram uma posterior comparação com outras MBQ e MBT estudadas em outros trabalhos.

Em síntese, julga-se que o trabalho desenvolvido poderá contribuir para a divulgação e aceitação das MBT produzidas com betume aditivado em refinaria e com incorporação de MBR. Trata-se de uma solução com inúmeras vantagens ambientais e económicas sem, contudo, pôr em causa os desempenhos mecânicos dos pavimentos. Embora ainda exista muito a investigar, pode-se concluir que estas misturas têm potencial para futuramente constituir uma alternativa válida às misturas tradicionais. Comparativamente às MBT que são produzidas com aditivos adicionados durante o processo produtivo, as MBT fabricadas com betume aditivado em refinaria são mais simples de produzir, uma vez que o betume já é aditivado no seu próprio processo de fabrico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alconada, I. (2011). “Contribuição para o estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas Mornas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa, Lisboa.

Alves, M. (2012). “Estudo do desempenho de materiais alternativos na pavimentação rodoviária – O caso das misturas betuminosas temperadas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa, Lisboa.

Antunes, D. (2014). “Misturas betuminosas temperadas, do tipo SMA, com incorporação de material betuminoso reciclado e fibras celulósicas - Contribuição para a sua caracterização”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.

Antunes, M., Batista, F. (2009). “Reciclagem de pavimentos utilizando ligantes betuminosos”, 2^{as} Jornadas Cepsa Betumes/CRP – Poupança: Energia e recursos naturais. LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Disponível em http://www.crp.pt/docs/A25S2-02_M_Antunes_F_Baptista.pdf (consultado em Outubro de 2015).

Baptista, A. (2006). “Misturas betuminosas recicladas a quente em central – Contribuição para o seu estudo e aplicação”. Dissertação para obtenção do Grau de Doutor. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade de Coimbra, Coimbra.

Barbosa, F. (2012). “Contribuição para o estudo do desempenho de misturas betuminosas temperadas”. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa, Lisboa.

Batista, F. A. (2004). “Misturas Betuminosas Densas a Frio.” Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Batista, F., Miranda, H., Antunes, M. L., Lanchas, S., Martinho, F. (2012). Resumos T4 – “Aplicações de misturas betuminosas de elevado desempenho em redes viárias urbanas”. Jornadas LNEC – Engenharia para a Sociedade. Investigação e Inovação. Cidades e Desenvolvimento. Apresentações Posters/T4. LNEC. Lisboa 18-20 de junho de 2012. Disponível em

Bispo, F. (2013) “Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Recicladas Temperadas com Emulsão Betuminosa”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia. Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2011). “Pavimentos rodoviários”. Edições Almedina, 4^a Reimpressão, Coimbra (ISBN 978-972-40-2648-0).

Bueche, N. (2011). “Evaluation des Performances et des Impacts des Enrobés Bitumineux Tièdes”. Grade de Docteur ès Sciences. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

Button, J.; Estakhri, C. e Wimsatt, A. 2007. A Synthesis of Warm-mix Asphalt. Report FHWA/TX-07/0-5597-1. Texas, USA : Texas Transportation Institute, 2007.

- Capitão, S., Picado-Santos, L., Martinho, F. (2012).** “Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt.” *Construction and Building Materials*, 36, pp. 1016-1024.
- Claessen, A.; Edwards, J.; Sommer, P.; Ugé P.; 1977.** *Asphalt Pavement Design Manual: the SHELL Method. Proceedings of 4th International Conference on Structural Design of Asphalt Pavements*, University of Michigan, pp 39-74, Ann Arbor-Michigan.
- Cooper Research Technology, 1990** Disponível em: <https://cooper.co.uk/shop/asphalt-testing/stand-alone-four-point-bending-beam-machine/> (consultado em novembro de 2015).
- Costa, A. (2013).** “Formulação e Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro.
- Croteau, J.-M. and Tessier, B. (2008)** *Warm Mix Asphalt Paving Technologies: A Road Builder’s Perspective*.
- Crucho, J., 2011.** “Contribuição para o Estudo da Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas com Incorporação de ASIC”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- D’Angelo, J.; Harm, E.; Bartoszek, J.; Baumgardner, G.; Corrigan, M.; Cowser, J. 2008.** *Warm-mix Asphalt: European Practice*. Report no. FHWA PL-08-007. Alexandria : FHWA, AASHTO, NCHRP, 2008.
- Dias, J. (2009).** “Influência do Envelhecimento na resistência à fadiga de misturas betuminosas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Dinis-Almeida M. (2010).** *Caracterização e formulação de misturas betuminosas recicladas temperadas em central*. Tese de Doutoramento, Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- EAPA. (1998).** “Heavy Duty Surfaces – The Arguments for SMA”. *European Asphalt Pavement Association*, Breukelen.
- EAPA. (2007).** “Sustainable roads – Long-Life Asphalt Pavements – version for ‘bankers’”. Bruxelas.
- EAPA. (2010).** “The Use of Warm Mix Asphalt”. EAPA position paper. *European Asphalt Pavement Association*. Bruxelas. Disponível em http://www.eapa.org/usr_img/position_paper/llp_bankers_version2007.pdf (consultado em novembro de 2015).
- EAPA. (2010).** “The Use of Warm Mix Asphalt”. EAPA position paper. *European Asphalt Pavement Association*. Bruxelas. Disponível em *Environment-Competitiveness Relationship, Journal of Economic Perspectives*, Vol. 9,
- EP. (2009).** “Caderno de Encargos Tipo Obra”. Estradas de Portugal, Almada.

Fernandes, G. (2012). Utilização de Resíduos de Construção e Demolição como materiais de construção de pavimentos rodoviários – Estado da Arte. Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil - Especialização em Construção Urbana. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Coimbra.

Ferreira, C. (2009). “Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas”. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade do Minho, Guimarães.

FHWA. (2008). “Warm-Mix Asphalt: European Practice”. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation. International Technology Scanning Program.

FHWA. (2010). “Warm Mix Asphalt Technologies and esearch”. Federal Highway Administration – U.S. Department of Transportation.

Fonseca, P., Guimarães, C., Gomes, V., Palha, D., Silva, H., Oliveira, J., Abreu, L. (2008). “Estudo de Material Fresado para Incorporação em Misturas Betuminosas a Quente com Altas Taxas de eciclagem”. II Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica de Fluidos e Termodinâmica. Universidade de Aveiro, 8-9 de maio de 2008.

Fonseca, P.; Barros, R., 2006. A Utilização do Betume Modificado com Borracha (BMB) em Portugal: A Experiência Adquirida ao Longo de 7 Anos nas Obras em Serviço. Estrada 2006 - IV Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

Gameiro, A. (2013). “Produção de Misturas Betuminosas com Betumes Modificados: Compactabilidade e Comportamento Mecânico”. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, Caparica.

Gardete, D. (2006). “Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente”. Tese de Mestrado em Engenharia Rodoviária. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Gardete, D. (2016). “Contribuição para o Estabelecimento duma Mistura Betuminosa Adequada para o Ciclo de Vida Através da Definição na Fase de Formulação duma Parametrização Eficiente.” Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa, Lisboa.

Gardete, D., Picado-Santos, L. e Capitão, S. (2011). “Formulação Volumétrica e Desempenho de Misturas Betuminosas Stone Mastic Asphalt”. XVI CILA – Congresso Ibero – Latinoamericano do Asfalto. Rio de Janeiro, Brasil.

Gardete, D., Picado-Santos, L. e Capitão, S. (2013). “Formulação Volumétrica de Misturas Betuminosas – Análise dos níveis de compactação para formulação de um AC20 e de um SMA”. Disponível em http://www.crp.pt/docs/A45S134-29_Art_T5_7CRP_2013.pdf (consultado em janeiro 2016).

Gomes, L. (2005). “Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Hill 2011, “Performance Evaluation Of Warm Mix Asphalt Mixtures Incorporating Reclaimed Asphalt Pavement”

http://jornadas2012.Inec.pt/site_2_Cidades_e_Desenvolvimento/RESUMOS/T4_BATISTA_r115.pdf (consultado em outubro de 2015).

<http://www.eapa.org/userfiles/2/Asphalt%20in%20Figures/Asphalt%20in%20figures%2029-11-2012.pdf> (consultado em novembro 2015)

<http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>. (consultado outubro 2015)

<http://www.marini.fayat.com/fr/2011/06/enrobés-tièdes-2/> (consultado em novembro 2016)

Hurley, G. e Prowell, B. 2006. Evaluation of Evotherm for use in warm asphalt mixes. NCAT report 06-02. Auburn - USA : Auburn University, 2006.

Jenkins, K. 2000. Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foam bitumen. [PhD Thesis]. Stellenbosch - South Africa : Stellenbosch: University of Stellenbosch, 2000.

Lachambre, S. (2011) “Formulation D’Enrobés Semi-Tièdes Utilisant des Pourcentages Élevés de Granulat Bitumineux Recyclés”. Mémoire de projet de fin d’études – Spécialité Génie Civil. Strasbourg.

Lopes, R. (2015). “Fabrico e Compactação de Misturas Betuminosas Temperadas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, Caparica.

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

Martinho, F., Picado-Santos, L., Capitão, S. e Neves, J. (2013). “Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas Contendo MB”. http://www.crp.pt/docs/A45S134-14_Art_T5_7CRP_2013.pdf (consultado em outubro 2016).

Miranda, H., Batista, F., Antunes, M. L., Neves, J. (2013). “Análise comparativa de métodos de ensaio para avaliação do escorrimento, em misturas betuminosas do tipo Stone Mastic Asphalt, segundo a norma europeia EN 12697-18”. Artigo T5. 7º Congresso Rodoviário Português.

Neves, J. Picado-Santos, L., Alves, M., Martinho, F. e Barbosa, F. (2013) “Estudo Experimental Sobre o Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas”. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Neves, J., Correia, A. (2006). “Caracterização de Misturas Betuminosas em Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral de Provetes Cilíndricos”. Revista Engenharia Civil, artigo n.º 26, pág. 61-74. Universidade do Minho.

nº 4.

NYNAS (2009). Asfalto templado, semi-templado y frio: el caso a favor de la sostenibilidad, Revista Performance - NYNAS Bitumen Magazine, Edición 01, Otoño, 8-9 pp.

Pais, A. (2013). “Misturas Betuminosas Recicladas Temperadas. Validação de uma Nova metodologia de formulação”. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia. Universidade da Beira Interior, Covilhã.

Palma, L. (2015). “Produção de Misturas Betuminosas a Quente com Incorporação de Material Fresasdo”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Universidade Nova de Lisboa, Caparica.

Pereira, F. (2009). “Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.

Picado-Santos, L. (2013). “O Futuro da Pavimentação” – 2º Seminário Engenharia Rodoviária. 2º Seminário de Engenharia Rodoviária organizado pela Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Viseu. Comemoração do 20º aniversário do DEC.

PORTER, M. & VAN DER LINDE, C. (1995a). Toward a New Conception of The

Prowell, B. D., & Hurley, G. C. (2008). National Asphalt Pavement Association Warm Mix Asphalt: Contractors' Experiences. Quality Improvement Series 125.

Prowell, B., Hurley, G., Frank, B. (2011). “Warm-Mix Asphalt: Best Practices”. NAPA – National Asphalt Pavement Association, Second Edition, Lanham, MD – U.S.A.

Prowell, B., Watson, D., Hurley, G., Brown, E. (2009). “Evaluation of Stone Matrix Asphalt (SMA) for airfield pavements”. AAPTP 04-04, Final Report, Prepared for Airfield Asphalt Pavement Technology Program Auburn University.

Silva, A. (2014). “Formulação de Misturas Betuminosas a Quente: Análise Comparativa da Aplicação de Métodos empíricos e Volumétricos”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.

Silva, P. (2005). “Estudo em Laboratório e em Campo de Misturas Asfálticas SMA 0/8S”. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Sousa, E. (2015). “Betão Betuminoso Temperado com Betume Aditivado em Refinaria”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Coimbra, Coimbra.

Zaumanis, M. (2010). “Warm Mix Asphalt Investigation”. Kgs. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark (Department of Civil Engineering) & Riga Technical University (Faculty of Civil Engineering Institute of Transportation) in cooperation with the Danish Road Institute. Master of Science Thesis.