



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

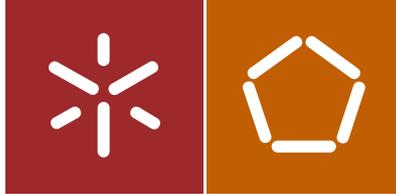
Catarina Cruz Silva

Utilização de betume-espuma na produção
de misturas betuminosas mais sustentáveis

Catarina Cruz Silva Utilização de betume-espuma na produção de misturas betuminosas mais sustentáveis

UMinho | 2014

novembro de 2014



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Catarina Cruz Silva

Utilização de betume-espuma na produção de misturas betuminosas mais sustentáveis

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Joel Ricardo Martins de Oliveira
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem a ajuda de um conjunto de pessoas a quem gostaria de agradecer.

Ao Grupo de Vias de Comunicação da Universidade do Minho pela disponibilidade e meios colocados à disposição.

Ao Professor Joel Oliveira e Professor Hugo Silva, pela orientação, colaboração, ensino e esclarecimentos, muito obrigada.

Aos técnicos do laboratório, Eng. Carlos Palha e Hélder Torres pela ajuda, disponibilidade e esclarecimentos prestados no Laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho.

À Eng^a. Liliana Abreu, sem a sua orientação, ajuda, persistência, ensinamentos e disponibilidade não teria sido possível a realização deste trabalho, por todas as horas passadas comigo no Laboratório, o meu muito obrigada.

À Eng^a. Daniela Palha pela ajuda e esclarecimentos prestados, obrigada.

À empresa GALP pelo fornecimento dos betumes utilizados para o betume-espuma e para a realização das misturas betuminosas.

À empresa MonteAdriano, Engenharia e Construção, SA, pelo fornecimento dos agregados utilizados para a produção das misturas betuminosas.

À minha família, em especial aos meus pais, sem o seu apoio financeiro ao longo destes anos não seria possível estar onde estou hoje. Pelo apoio e carinho sempre presentes, obrigada. Ao meu irmão Tiago e à minha irmã de coração Maria Rosa, obrigada pelo apoio.

Ao Bruno, pelo seu amor e apoio incondicional ao longo de todos os anos, por nunca me ter deixado desistir, pela paciência, o meu obrigada.

A todos os amigos e colegas que de alguma maneira me ajudaram durante o percurso académico.

Utilização de betume-espuma na produção de misturas betuminosas mais sustentáveis

RESUMO

Este trabalho teve como principal objetivo estudar misturas betuminosas temperadas com o uso de betume-espuma. O uso de misturas betuminosas temperadas (MBT) em vez de misturas betuminosas a quente (MBQ) prende-se com a sustentabilidade das primeiras. As misturas betuminosas temperadas são produzidas a temperaturas mais baixas do que as MBQ, tornando-se assim menos prejudiciais ao ambiente.

No entanto, para a sua utilização generalizada é necessário comprovar o seu desempenho em relação às misturas a quente, uma vez que são novas tecnologias que conduzem a dúvidas. Neste trabalho é feita uma comparação entre duas misturas, uma convencional e outra temperada. Esta última foi produzida com betume-espuma, que permite envolver melhor os agregados a baixas temperaturas. Para a produção de betume-espuma foi utilizado um aditivo, devido à falta de estabilidade da espuma.

Foram realizados vários ensaios, ao nível do desempenho e comportamento das misturas betuminosas. Os ensaios “Anel & Bola”, viscosidade dinâmica, penetração a 25°C e reologia foram realizados aos betumes. As misturas betuminosas foram ensaiadas para medição das baridades máxima teórica e aparente, compactabilidade, sensibilidade à água (resistência à tração indireta), módulo de rigidez e resistência à fadiga e à deformação permanente.

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que é viável o uso de betume-espuma para as misturas betuminosas temperadas. No entanto, são necessários estudos mais aprofundados para que estas misturas (MBT) sejam melhores do que as MBQ, uma vez que são mais sustentáveis.

Palavras-chave:

Mistura betuminosa temperada; Betume-espuma; Desempenho; Temperaturas reduzidas.

The use of foamed bitumen in the production of more sustainable asphalt mixtures

ABSTRACT

The main objective of this work is to study warm mix asphalts produced with foamed bitumen. The use of Warm Mix Asphalt (WMA) instead of Hot Mix Asphalt (HMA) is related to the sustainability of the WMA. The WMA mixtures are produced at lower temperatures than those of HMA, making them less harmful to the environment.

However, for its generalized use it is necessary to prove its performance in relation to HMA mixtures, since new technologies always raise doubts about their efficiency. In this work, a comparison is made between two mixtures, one HMA and one WMA. The latter was produced with foamed bitumen, which coats the aggregates more efficiently at lower temperatures. For the production of the foamed bitumen an additive was used to stabilise the foam.

Several tests were performed to assess the performance of the asphalt mixtures. Softening point (Ring & Ball), dynamic viscosity, penetration at 25°C and rheology tests were performed to determine bitumen's properties. The asphalt mixtures were tested in order to evaluate the maximum theoretical and bulk densities, and also their compactability, water sensitivity (indirect tensile strength), stiffness modulus and fatigue and the rutting resistance.

Based on the results obtained, it was possible to conclude that it is feasible to use foamed bitumen on warm mix asphalt. However, further studies are needed for these mixtures (WMA), to prove that they can perform better than HMA, since they are more sustainable.

Key Words:

Warm Mix Asphalt; Foamed Bitumen; Performance; Reduced Temperatures.

ÍNDICE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 | Enquadramento Geral..... | 1 |
| 1.2 | Objetivos | 2 |
| 1.3 | Organização da dissertação | 3 |
| 2 | REVISÃO DO ESTADO DA ARTE..... | 5 |
| 2.1 | Introdução..... | 5 |
| 2.2 | Pavimentos rodoviários | 5 |
| 2.2.1 | Constituição e comportamento dos Pavimentos flexíveis | 6 |
| 2.3 | Misturas betuminosas | 7 |
| 2.3.1 | Misturas betuminosas a quente | 8 |
| 2.3.2 | Misturas betuminosas temperadas | 11 |
| 2.4 | Betume Espuma..... | 12 |
| 2.4.1 | Técnicas de produção de betume-espuma..... | 19 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODOS | 25 |
| 3.1 | Equipamento para a produção de betume-espuma..... | 25 |
| 3.2 | Materiais utilizados | 26 |
| 3.3 | Caraterização do betume | 27 |
| 3.3.1 | Ensaio Anel & Bola | 27 |
| 3.3.2 | Ensaio de viscosidade dinâmica..... | 27 |
| 3.3.3 | Ensaio de Penetração a 25°C..... | 28 |
| 3.3.4 | Ensaio de Reologia | 29 |
| 3.4 | Estudo de formulação, preparação das misturas betuminosas, preparação dos provetes e determinação das baridades | 30 |
| 3.4.1 | Estudo granulométrico da mistura | 30 |
| 3.4.2 | Processo de fabrico das misturas betuminosas | 30 |
| 3.4.3 | Preparação dos provetes para o compactador de Marshall | 32 |
| 3.4.4 | Determinação da Baridade Aparente | 33 |
| 3.4.5 | Determinação da Baridade Máxima Teórica | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.4.6 | Determinação do volume de vazios da mistura..... | 34 |
| 3.5 | Ensaio de caracterização mecânica de misturas betuminosas..... | 35 |
| 3.5.1 | Ensaio de Compactabilidade | 35 |
| 3.5.2 | Sensibilidade à água | 35 |
| 3.5.3 | Ensaio de Pista – resistência à deformação permanente | 36 |
| 3.5.4 | Ensaio de módulo de rigidez – flexão em quatro pontos..... | 37 |
| 3.5.5 | Ensaio de resistência à fadiga – flexão em quatro pontos | 37 |
| 3.5.6 | Determinação da percentagem de betume por ignição..... | 38 |
| 3.6 | Caraterização do betume-espuma | 39 |
| 4 | ANÁLISE DE RESULTADOS | 41 |
| 4.1 | Caracterização da mistura betuminosa | 41 |
| 4.1.1 | Análise granulométrica..... | 41 |
| 4.1.2 | Análise do ligante | 42 |
| 4.1.3 | Estudo do betume-espuma..... | 44 |
| 4.1.4 | Betume espuma com aditivo | 51 |
| 4.2 | Reologia..... | 58 |
| 4.3 | Fabrico e compactação da mistura..... | 60 |
| 4.4 | Resistência à tração indireta | 62 |
| 4.5 | Compactabilidade | 64 |
| 4.6 | Sensibilidade à água..... | 65 |
| 4.7 | Resistência à deformação permanente | 69 |
| 4.8 | Módulo de Rigidez..... | 72 |
| 4.9 | Resistência à fadiga | 73 |
| 4.10 | Determinação da percentagem de betume por ignição | 74 |
| 5 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 75 |
| 5.1 | Conclusões | 75 |
| 5.2 | Trabalhos Futuros | 76 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 79 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 – Constituição tipo de um pavimento flexível (adaptado de Silva (2010)) | 7 |
| Figura 2.2 – Tipos de misturas betuminosas e temperaturas das mesmas (Ferreira, 2009) | 8 |
| Figura 2.3 – Produção de betume-espuma (adaptado de Plati <i>et al.</i> (2010))..... | 13 |
| Figura 2.4 – Otimização da taxa de expansão, tempo de meia-vida e percentagem de água (Jenkins, 2000)..... | 15 |
| Figura 2.5 – Curva de decaimento do betume espuma com 2% de água (Jenkins <i>et al.</i> , 2000)..... | 16 |
| Figura 2.6 – Exemplo de cálculo do Índice de Espuma (Foam Index – FI= A1+A2)..... | 16 |
| Figura 2.7 – Relação entre a viscosidade e a taxa de expansão (Jenkins <i>et al.</i> , 2000)..... | 17 |
| Figura 2.8 – Índice de espuma para betumes com e sem aditivo (Teixeira, 2006) | 18 |
| Figura 2.9 – Equipamento Double Barrel Green (esquerda), Bicos injetores e câmara de expansão (direita)..... | 20 |
| Figura 2.10 – Processo LEA (adaptado de D'Angelo <i>et al.</i> (2008))..... | 21 |
| Figura 2.11 – Processo Terex (Adaptado de (Terex, 2011))..... | 22 |
| Figura 2.12 – Processo LEAB | 22 |
| Figura 2.13 – Dispositivo para produção de betume-espuma pelo processo Ultrafoam GX (Ferreira, 2009) | 23 |
| Figura 3.1 – Equipamento laboratorial de produção de betume-espuma (Wirtgen WLB 10 S)..... | 25 |
| Figura 3.2 – Escala e balde utilizado para o betume-espuma..... | 26 |
| Figura 3.3 – Várias fases do ensaio Anel e Bola: fase inicial do ensaio (esquerda); fase em que o betume começa a deformar com o peso da esfera (centro); fase final do ensaio em que se regista a temperatura a que o betume tocou na parte inferior do suporte (direita)..... | 27 |
| Figura 3.4 – Viscosímetro rotacional de Brookfield | 28 |
| Figura 3.5 – Equipamento para o ensaio de penetração a 25°C..... | 28 |
| Figura 3.6 – Ensaio de penetração a 25 °C..... | 29 |
| Figura 3.7 – Reómetro de corte dinâmico | 29 |
| Figura 3.8 – Curva granulométrica da mistura AC 14 surf (BB) | 30 |
| Figura 3.9 – Processo de fabrico de misturas betuminosas com betume espuma | 31 |
| Figura 3.10 – Amostra de mistura betuminosa para ensaios de BMT e percentagem de betume..... | 31 |
| Figura 3.11 – Compactador de Marshall | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.12 – Colocação de papéis para que a amostra não cole ao compactador | 33 |
| Figura 3.13 – Colocação de folha de alumínio no recipiente com amostra de betume-espuma..... | 33 |
| Figura 3.14 – Equipamento de pesagem para o método B..... | 33 |
| Figura 3.15 – Picnómetro usado para a determinação da BMT de misturas betuminosas (Esquerda) e equipamento de produção de vácuo (Direita) | 34 |
| Figura 3.16 – Placa de aquisição de dados e computador de registo da compactabilidade | 35 |
| Figura 3.17 – Ensaio de Tração Indireta | 36 |
| Figura 3.18 – Ensaio do módulo de rigidez | 37 |
| Figura 3.19 – Ensaio de resistência à fadiga..... | 38 |
| Figura 3.20 – Ensaio de determinação da percentagem de betume: aspeto da mistura inicial (em cima); aspeto da mistura (sem betume) depois da queima, em baixo; Forno incinerador usado para a queima (direita)..... | 39 |
| Figura 4.1 – Curva granulométrica da mistura AC 14 Surf (BB)..... | 42 |
| Figura 4.2 – Viscosidade dinâmica dos 3 betumes | 44 |
| Figura 4.3 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida do betume 50/70 | 45 |
| Figura 4.4 – Índice de espuma do betume 50/70 | 46 |
| Figura 4.5 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida do betume 70/100 | 46 |
| Figura 4.6 – Índice de espuma do betume 70/100 | 47 |
| Figura 4.7 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida do betume 160/220 | 48 |
| Figura 4.8 – Índice de espuma do betume 160/220 | 48 |
| Figura 4.9 – Análise dos resultados para uma temperatura de 160 °C para os 3 betumes | 49 |
| Figura 4.10 – Índice de espuma dos 3 betumes à temperatura de 160 °C | 50 |
| Figura 4.11 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida para viscosidades idênticas (100cP) | 50 |
| Figura 4.12 – Índice de espuma para viscosidades idênticas..... | 51 |
| Figura 4.13 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida para 0,1% de aditivo | 52 |
| Figura 4.14 – Índice de espuma para 0,1% de aditivo | 52 |
| Figura 4.15 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida para 0,2% de aditivo..... | 53 |
| Figura 4.16 – Índice de espuma para 0,2% de aditivo | 53 |
| Figura 4.17 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida para 0,3% de aditivo | 54 |
| Figura 4.18 – Índice de espuma para 0,2% de aditivo | 54 |
| Figura 4.19 – Taxa de expansão para 0,1, 0,2 e 0,3% de aditivo com betume a 160°C | 55 |
| Figura 4.20 – Índice de espuma para 0,1, 0,2 e 0,3% de aditivo com betume a 160°C | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.21 – Taxa de expansão para 0,1, 0,2 e 0,3% de aditivo com betume a 170°C..... | 56 |
| Figura 4.22 – Índice de espuma para 0,1, 0,2 e 0,3% de aditivo com betume a 170°C | 57 |
| Figura 4.23 – Viscosidade do betume 50/70 com e sem aditivo | 58 |
| Figura 4.24 – Módulo de corte complexo do betume 50/70 com e sem aditivo | 59 |
| Figura 4.25 – Ângulo de fase para o betume 50/70 com e sem aditivo..... | 59 |
| Figura 4.26 – Grau PG do betume 50/70 com e sem aditivo | 60 |
| Figura 4.27 – Valores da tração indireta e volume de vazios..... | 63 |
| Figura 4.28 – Adensamento dos provetes..... | 64 |
| Figura 4.29 – Volume de vazios dos provetes..... | 65 |
| Figura 4.30 – Valores de ITSd e ITRSR das diferentes misturas | 67 |
| Figura 4.31 – Valor de ITSd e volume de vazios das várias misturas..... | 67 |
| Figura 4.32 - Valores de ITSd e ITRS..... | 69 |
| Figura 4.33 – Valores de ITSd e volume de vazios..... | 69 |
| Figura 4.34 – Evolução da deformação das lajetas de BC e BE ao longo do ensaio WTT..... | 71 |
| Figura 4.35 – Deformação permanente das lajetas de BC no fim do ensaio WTT | 71 |
| Figura 4.36 – Deformação permanente das lajetas de BE no fim do ensaio WTT | 71 |
| Figura 4.37 – Módulo de deformabilidade das misturas BE e BC a 20 °C..... | 72 |
| Figura 4.38 – Ângulo de fase das misturas BE e BC | 72 |
| Figura 4.39 – Resultados do ensaio à fadiga BE e BC..... | 73 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Classificação dos diferentes tipos de pavimentos, material usado e respetiva deformabilidade (Branco <i>et al.</i> , 2005) | 6 |
| Tabela 2.2 – Temperatura das misturas consoante o tipo de betume (CEN, 2006)..... | 9 |
| Tabela 2.3 – Betumes a utilizar para camada de base (Jiménez, 2010) | 10 |
| Tabela 4.1 – Fuso granulométrico e curva da mistura..... | 41 |
| Tabela 4.2 – Fórmula de trabalho (MonteAdriano)..... | 42 |
| Tabela 4.3 – Ensaio de Anel e Bola e Penetração– resultados obtidos. | 43 |
| Tabela 4.4 – Temperaturas do betume-espuma 1 minuto após a expansão..... | 57 |
| Tabela 4.5 – Controlo das temperaturas de mistura, agregados e compactação | 61 |
| Tabela 4.6 – Valores de BMT, baridade aparente e volume de vazios | 62 |
| Tabela 4.7 – Tração indireta e deformação dos provetes | 63 |
| Tabela 4.8 – Valores de sensibilidade à água das misturas em estudo..... | 66 |
| Tabela 4.9 – Valores de sensibilidade à água e volume de vazios | 68 |
| Tabela 4.10 – Resultados obtidos do ensaio de pista | 70 |
| Tabela 4.11 – Resultados do ensaio de resistência à fadiga das misturas BC e BE (flexão em quatro pontos) | 74 |
| Tabela 4.12 – Resultados do ensaio da mufla | 74 |

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- BA – Baridade aparente
- BMT – Baridade máxima teórica
- Vv – Volume de vazios
- WTT – Ensaio de Pista (Wheel Tracking Test)
- ITSR – Resistência conservada em tração indireta
- ITS – Resistência à tração por compressão diametral (Indirect Tensile Strength)
- WTSAIR – Deformação em ensaio de pista
- PRDAIR – Profundidade média proporcional da rodeira
- RDAIR – Profundidade do cavado da rodeira
- BE – Betume-espuma (mistura com)
- BC – Betume convencional (mistura com)
- FI – Índice de espuma (*Foam Index*)
- $\tau_{1/2}$ – Tempo de meia-vida
- ER – Taxa de expansão
- LVDT – Linear Variable Differential Transformer (Dispositivo para medição de deslocamentos)
-

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento Geral

O elemento que mais influencia os investimentos realizados na construção e conservação de uma rede rodoviária é o pavimento. Para cada tipo de pavimento existe uma constituição genérica com várias camadas com diferentes finalidades. O pavimento flexível é constituído por camadas betuminosas (superiores) e por camadas granulares (inferiores, de fundação). Para ligar as camadas betuminosas é necessário um ligante betuminoso, o betume. O ligante tem a função de ligação entre os agregados para que a mistura tenha resistência à tração, como o betume é flexível confere esta característica à mistura, impermeabiliza e também lhe dá trabalhabilidade (Silva, 2010). É um material muito viscoso e praticamente sólido à temperatura ambiente. No entanto, quando aquecido a temperaturas da ordem dos 150 a 180 °C torna-se suficientemente fluído para envolver os agregados e funcionar como elemento aglutinante. (Lesueur, 2009)

Existem várias técnicas de colocação do betume nas misturas. Podem ser a quente, com temperaturas a rondar os 120°C-130°C, podem ser semi-temperadas com temperaturas por volta dos 100°C e podem ser a frio. Nas misturas a frio a mistura é produzida à temperatura ambiente (Soenen *et al.*, 2010). É referido por que razão as misturas a frio são mais aplicadas para estradas com baixo a médio volume de tráfego.

A preocupação ambiental e económica que advém dos elevados consumos energéticos na produção de misturas betuminosas a quente faz com que se tente encontrar novas soluções para estes problemas. A emissão de poluentes além de se tratar de uma preocupação ambiental é igualmente uma questão de saúde e conforto para os intervenientes na pavimentação (van de Ven *et al.*, 2012)

Branco (2013), Maccarrone *et al.* (1994) e He e Wong (2007) apresentam estudos sobre uma forma menos comum de utilizar o betume, sob a forma de espuma. Assim gasta-se menos energia no aquecimento dos agregados, visto não ser necessário utilizar temperaturas elevadas para reduzir a viscosidade do betume para que o envolvimento dos agregados possa ser realizado de uma forma eficiente e rápida.

O betume é o principal ligante utilizado nas misturas betuminosas, então o Professor L. H. Csanyi (Csanyi, 1957, 1959) descobriu que injetando-lhe vapor de água o fazia espumar. Mais

tarde a técnica foi desenvolvida e em vez de se juntar vapor de água, adiciona-se ar e água ao betume quente. O betume-espuma pode expandir até um máximo de 10 a 15 vezes o seu volume original, o que faz com que a sua viscosidade diminua significativamente. Este betume-espuma é então o ideal para envolver os agregados e pode ser misturado com qualquer tipo de agregado, seja ele virgem ou reciclado.

O índice de vazios também tem grande influência no comportamento da mistura, se este for diminuído a durabilidade da mistura pode ser aumentada (Yuan *et al.*, 2012) No que diz respeito a misturas produzidas com material reciclado e betume-espuma, Katman *et al.* (2013) referem que as propriedades das misturas com e sem material reciclado têm desempenhos mecânicos similares. Refere também que para misturas de qualidade superior se deve ter uma quantidade ótima de betume-espuma.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho consiste na obtenção de uma mistura betuminosa temperada, produzida com betume-espuma, com características mecânicas idênticas ou melhores que as obtidas numa mistura tradicional a quente.

Para conseguir esse objetivo é necessário relacionar os parâmetros que condicionam o comportamento do betume-espuma, sendo que neste estudo se analisaram o teor de água, temperaturas do betume, tipo de betume e o uso de aditivos estabilizadores de expansão.

Após o estudo do betume-espuma e das suas características serão produzidas misturas betuminosas, com betume-espuma e com betume convencional a quente. As misturas desenvolvidas serão comparadas em termos de desempenho mecânico e determinar-se-á se o betume-espuma é realmente uma mais-valia para a produção de misturas betuminosas. As misturas serão produzidas apenas com material virgem. Na mistura com betume-espuma pretende-se que as temperaturas de produção sejam mais baixas, logo espera-se uma mistura temperada em vez da normal mistura quente, tornando a mistura mais sustentável uma vez que o consumo de energia para o aquecimento dos agregados é significativamente inferior que o consumo quando se trata da produção de uma mistura a quente.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos: Introdução, Revisão do Estado da Arte, Materiais e Métodos, Análise de Resultados e Considerações Finais.

No primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema desta dissertação, a utilização de betume-espuma na produção de misturas betuminosas mais sustentáveis.

No segundo capítulo são referidos quais os vários tipos de misturas betuminosas com uma breve introdução sobre elas. De seguida apresentam-se informações sobre o que se tem vindo a fazer com o betume-espuma e métodos de produção.

No Capítulo 3 é feita uma descrição dos materiais que serão usados nas misturas betuminosas assim como os métodos de produção e ensaios das misturas.

No penúltimo capítulo são apresentados os resultados obtidos. Primeiramente o estudo do betume-espuma, com e sem aditivo. Depois as várias misturas betuminosas a diferentes temperaturas e por último a análise resultante dos ensaios ao comportamento das misturas.

No quinto capítulo expõe-se as considerações finais deste estudo, assim como trabalhos futuros para a continuação do estudo sobre este tema.

2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.1 Introdução

O transporte rodoviário é o modo de transporte predominante na maioria dos países europeus. Como Portugal não é exceção, 96,6% do transporte terrestre é feito em rodovias (medido em passageiro/km), que inclui o transporte em veículos privados e em autocarros, sendo que a restante percentagem (3,4%) refere-se a transporte ferroviário (Teixeira, 2006).

Devido à atual conjuntura económica, a construção de novas infraestruturas rodoviárias será bastante reduzida, sendo que as já existentes necessitam de manutenção e reparação quando chegam a um elevado estado de degradação. Sendo assim torna-se imperativo gastar o menos possível na produção de misturas betuminosas para pavimentos flexíveis. Tendo em conta as preocupações mencionadas anteriormente, verificou-se que em 2012 foram produzidas 6,4 milhões de toneladas de misturas betuminosas a quente e temperadas em Portugal (EAPA, 2012).

Xu *et al.* (2011) e Sunarjono (2013) referem que o pavimento ligado com betume-espuma é mais sustentável pois os agregados são, normalmente, misturados à temperatura ambiente (quando aplicados a misturas a frio) e o betume é adicionado sob a forma de espuma. Sendo que é então mais sustentável, económico e amigo do ambiente.

2.2 Pavimentos rodoviários

A função essencial de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança. Os pavimentos têm dois tipos de qualidade, a funcional e a estrutural. A funcional está ligada com as exigências dos utentes, isto é, o conforto e segurança e visa a criação de uma superfície regular e resistente com aderência e resistência ao desgaste. A estrutural está relacionada com a capacidade do pavimento para suportar cargas dos veículos sem sofrer alterações para além de determinados valores limite e visa reduzir as tensões verticais aplicadas ao nível da fundação para que resista às solicitações do tráfego e impedir que a água penetre no pavimento e tenha acesso às camadas granulares (Branco *et al.*, 2005).

De acordo com Branco *et al.* (2005) existem vários tipos de pavimentos, em função da sua deformabilidade (rigidez) podem classificar-se em pavimentos flexíveis, pavimentos

semirrígidos ou pavimentos rígidos. Na Tabela 2.1 está a classificação dos pavimentos quanto à deformabilidade e o respetivo material.

Tabela 2.1 – Classificação dos diferentes tipos de pavimentos, material usado e respetiva deformabilidade (Branco *et al.*, 2005)

| Pavimento | Material | Deformabilidade |
|-------------|-------------------------|-----------------|
| Flexível | Betuminoso | Elevada |
| Semirrígido | Betuminoso e hidráulico | Reduzida |
| Rígido | Hidráulico | Muito reduzida |

Nos pavimentos flexíveis, as camadas superiores são formadas por misturas betuminosas – materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados – seguidas por uma ou duas camadas constituídas por material granular.

Os pavimentos rígidos têm uma camada superior constituída por betão de cimento – material estabilizado com ligantes hidráulicos – seguida de uma ou duas camadas inferiores constituídas por material granular.

Os pavimentos semirrígidos apresentam características dos dois tipos de pavimentos referidos acima, têm uma ou duas camadas superiores constituídas por misturas betuminosas, seguidas de uma camada constituída por agregado estabilizado com ligante hidráulico, podendo existir ainda uma camada de sub-base granular (Branco *et al.*, 2005).

Para o presente trabalho interessam os pavimentos flexíveis, pois são os que contêm ligantes betuminosos, mais especificamente o betume-espuma. Para cada tipo de pavimento existe uma constituição genérica com várias camadas com diferentes finalidades.

2.2.1 Constituição e comportamento dos Pavimentos flexíveis

O pavimento flexível é constituído por camadas betuminosas e por camadas granulares, como mostra a Figura 2.1. A camada de desgaste tem uma função funcional e deve resistir à ação direta do tráfego, à temperatura e proteger as camadas por baixo dela. A camada de regularização tem a função de regularizar a superfície. A base betuminosa tem função estrutural, como tal deve distribuir as cargas verticais, diminuindo assim as tensões passadas às camadas granulares abaixo, e resistir à ação da temperatura. As camadas granulares têm função estrutural, como tal devem resistir às compressões e devem aguentar a circulação de

obra. Dependendo da composição do tráfego esperado e das condições ambientais a constituição do pavimento pode ser diferente de caso para caso (Silva, 2010).

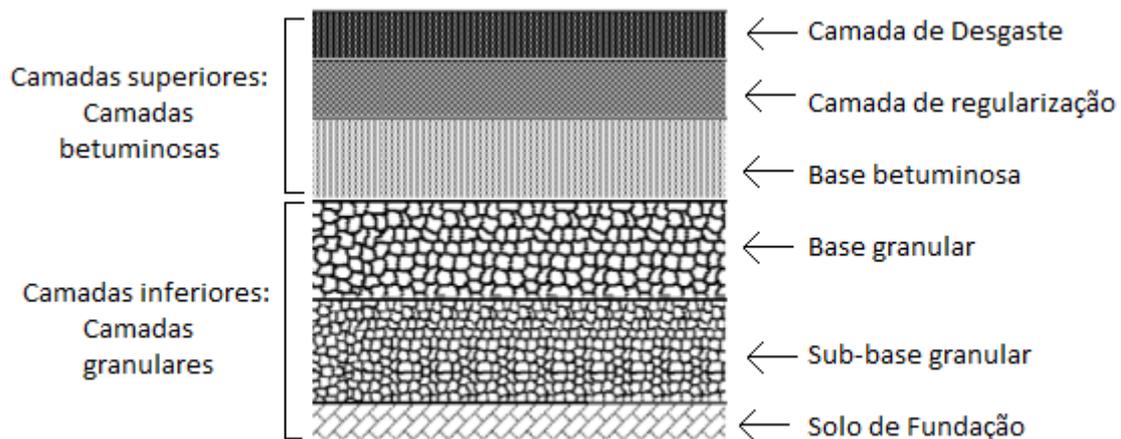


Figura 2.1 – Constituição tipo de um pavimento flexível (adaptado de Silva (2010))

Quando o tráfego é pouco agressivo podem ser projetados e construídos pavimentos onde é dominante a componente granular. Ao contrário, quando o tráfego é intenso, será necessário considerar um pavimento integrando várias camadas betuminosas, com espessura total significativa.

2.3 Misturas betuminosas

As misturas betuminosas são compostas por material granular e um ligante, o betume. O betume é um ligante classificado como adesivo e material de impermeabilização derivado de petróleo bruto. É considerado muito viscoso ou praticamente sólido à temperatura ambiente (Lesueur, 2009).

Conforme se apresenta na Figura 2.2, as misturas betuminosas podem ser classificadas como: misturas a frio (temperatura ambiente); misturas semi-temperadas (na língua inglesa usa-se o termo *half-warm*), aquecidas acima da temperatura ambiente, por volta dos 70°C, mas abaixo dos 100°C; misturas temperadas (na língua inglesa usa-se o termo de *warm mix*), com temperaturas acima dos 100°C mas abaixo dos 140°C; misturas a quente, para temperaturas superiores a 140°C (*hot mix* na língua inglesa). A designação quanto à temperatura refere-se à temperatura a que é feita a mistura. Dentro destas misturas a mais sustentável do ponto de

vista ambiental é a mistura a frio, pois não existe um gasto de energia para que os agregados sejam aquecidos, o que acontece nas outras duas misturas (EAPA, 2010, Van De Ven *et al.*, 2007).

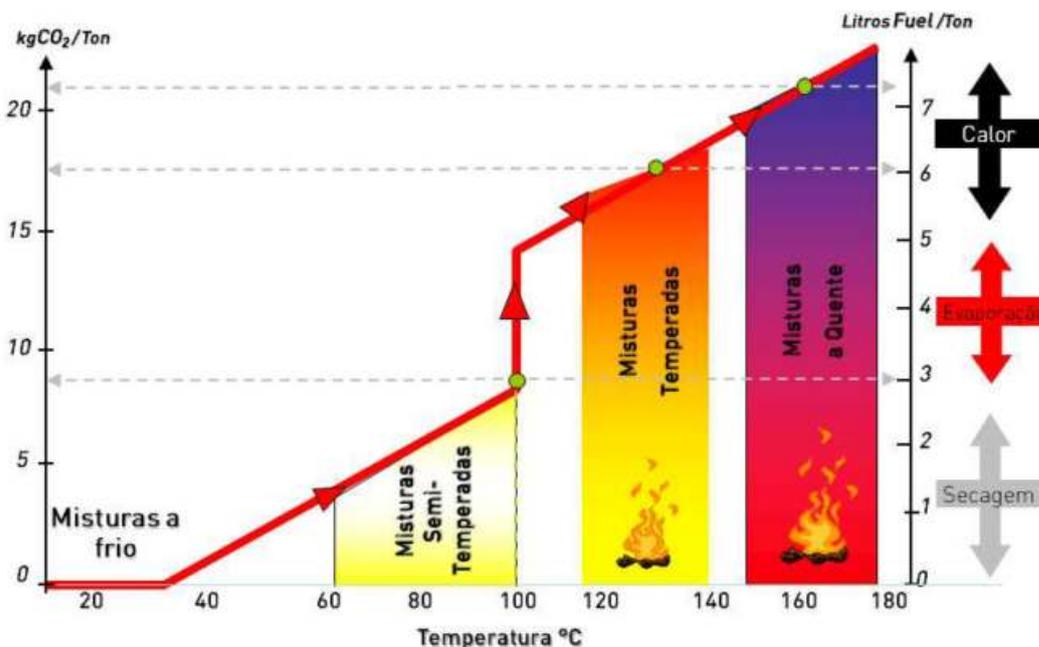


Figura 2.2 – Tipos de misturas betuminosas e temperaturas das mesmas (Ferreira, 2009)

Em Portugal a maior parte da colocação de misturas betuminosas é feita a quente, qualquer que seja o tipo de mistura (granulometria e tipo de agregados e de betume) (Branco, 2013)

Consoante o tipo de camada a construir, podem ser exigidas boas características mecânicas ou melhor conforto e segurança para o utente. Em todos os casos devem ser garantidos determinados critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução. Às misturas betuminosas são exigidas as seguintes características: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade (Branco *et al.*, 2005).

2.3.1 Misturas betuminosas a quente

As misturas a quente são preparadas a partir do aquecimento dos agregados e do betume, sendo a produção executada em níveis elevados de temperatura, da ordem de 150 a 180°C dependendo do tipo de betume usado como mostra a Tabela 2.2. O valor mínimo de betume nas misturas deve ser de 3% (CEN, 2006), apesar de ser necessário proceder a um estudo de formulação para determinar o valor ótimo para a percentagem de ligante.

Tabela 2.2 – Temperatura das misturas consoante o tipo de betume (CEN, 2006)

| Tipo de betume | Temperatura (°C) |
|------------------|------------------|
| 20/30 | 160 a 200 |
| 30/45 | 155 a 195 |
| 35/50, 40/60 | 150 a 190 |
| 50/70, 70/100 | 140 a 180 |
| 100/150, 160/220 | 130 a 170 |
| 250/330, 330/340 | 120 a 160 |

De acordo com Jiménez (2010) em Portugal o termo mistura betuminosa a quente aplica-se a grande parte das misturas betuminosas aplicadas em obras de pavimentação, tais como argamassas betuminosas, fabricadas apenas com agregados finos, filer e betume, betões betuminosos entre outros. Existem diversos tipos de designações para as misturas betuminosas a quente consoante o tipo de aplicação - misturas betuminosas para camada de base, de regularização ou de desgaste – e consoante o tipo de betume ou granulometria dos agregados – betão betuminoso drenante, mistura betuminosa densa ou macadame betuminoso. Em que o betão betuminoso drenante é aplicado nas camadas de desgaste, a mistura betuminosa densa pode ser aplicada em vários tipos de camadas, por exemplo nas de regularização e nas de ligação.

Misturas betuminosas consoante a camada onde é aplicada (Jiménez, 2010):

- Camada de base: estas camadas têm essencialmente função estrutural, isto é, absorvem as tensões induzidas pelas ações do tráfego e transmitem-nas de forma atenuada à fundação. Para classes de tráfego mais elevadas e zonas térmicas correspondentes a temperaturas mais elevadas, devem ser usados betumes mais duros. Por exemplo para a zona climática média e para uma classe de tráfego T2 (com tráfego médio diário anual de veículos pesados no ano de abertura, por sentido e na via mais solicitada, entre os valores de 800 a 1200 veículos), para um AC32 ou AC20 o betume a utilizar é um 35/50 e 50/70, respetivamente. Mais exemplos estão indicados na Tabela 2.3 (as classes de tráfego são as consideradas no Manual de Conceção de Pavimentos).
- Camada de regularização e de ligação: estas camadas são colocadas entre as camadas de base e de desgaste. Contribuem para garantir uma boa regularidade superficial do pavimento e impermeabilizar as camadas inferiores. Podem ter espessuras variáveis

pelo que são úteis para a reabilitação, devem então ser pouco permeáveis e ter uma boa resistência às deformações permanentes. As recomendações para o tipo de betume são idênticas às apresentadas para camada de base, no entanto, mesmo para tráfegos menos intensos (T3 ou inferior), poder-se-á ter necessidade de recorrer preferencialmente a betumes da classe 35/50, uma vez que o bom comportamento à deformação é muito importante neste tipo de camadas.

- Camada de desgaste: este tipo de camada desempenha uma função estrutural e funcional. Para a formulação de misturas para camada de desgaste as características funcionais são preponderantes, o que tem levado a um desenvolvimento de misturas betuminosas especiais, tais como misturas drenantes ou rugosas, de elevada textura e excelente comportamento em vias rápidas e em presença de água. Em Portugal, para camada de desgaste aplica-se geralmente o betão betuminoso (BB), o betão betuminoso drenante (BBD) e os betões betuminosos rugosos. Atualmente utiliza-se predominantemente o betume da classe 35/50 na execução de betão betuminoso para camadas de desgaste, podendo utilizar-se o 50/70 para as classes de tráfego mais ligeiro e para zonas climatéricas favoráveis. O uso de betumes mais duros na camada de desgaste tem como vantagem o aumento da resistência à deformação permanente, podendo contribuir para uma maior fragilidade da mistura.

Tabela 2.3 – Betumes a utilizar para camada de base (Jiménez, 2010)

| Zona climática | Mistura | Classe de tráfego | | |
|----------------|--------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| | | T1 ou superior | T2 | T3, T4, T5, T6 |
| Quente | AC 32 (MB) AC 20 (MB) | 35/50 | 35/50 | 35/50 50/70 |
| | AC 20 (MBAM) | 10/20 | 10/20 | 10/20 |
| Média | AC 32 (MB) AC 20 (MB) | 35/50 | 35/50 50/70 | 35/50 50/70 |
| | AC 20 (MBAM) | 10/20 | 10/20 | 10/20 |
| Temperada | AC 32 (MB) AC 20 (MB) | 35/50 50/70 | 35/50 50/70 | 35/50 50/70 |
| | AC 20 (MBAM) | 10/20 | 10/20 | 10/20 |

2.3.2 Misturas betuminosas temperadas

As misturas betuminosas temperadas são produzidas de forma idêntica às misturas a quente com a exceção da temperatura, sendo produzidas a temperaturas que rondam os 100 até aos 140 C, sendo mais baixas que as misturas betuminosas a quente cerca de 20 a 55 ° C (D'Angelo *et al.*, 2008, Neves *et al.*, 2013).

A redução da temperatura na produção das misturas tem vantagens económicas, sociais e ambientais. Reduzindo a temperatura na produção das misturas, os custos relativos a essa tarefa são reduzidos, uma vez que não é requerida tanta energia. A emissão de gases é reduzida significativamente contribuindo para uma melhoria das condições de trabalho dos operários, e do ambiente. Espera-se uma redução de 30 a 40% de CO₂ (dióxido de carbono) e de uma redução do uso de combustíveis de 11 a 35%, sendo que existe a possibilidade de a redução ser ainda maior se os agregados não forem aquecidos a temperaturas superiores à temperatura de ebulição da água (D'Angelo *et al.*, 2008).

De acordo com D'Angelo *et al.* (2008) as misturas betuminosas temperadas, que já foram alvo de estudo por estes autores, apresentam desempenhos idênticos ou melhores do que as misturas betuminosas a quente. Como as misturas temperadas podem ser compactadas a baixas temperaturas, existe mais tempo disponível para as compactar, no caso das misturas a quente existe pouco tempo para a compactação, uma vez que a mistura tem de ser compactada a temperaturas altas. No entanto alguns elementos das misturas betuminosas temperadas devem ainda ser estudados.

Outros autores referem os benefícios das misturas temperadas, quando comparadas com as misturas a quente (Chowdhury e Button, 2008):

- Baixas temperaturas de produção e colocação das misturas;
- Menor consumo de combustível/energia, levando a menores custos;
- Menor envelhecimento do ligante durante a produção e colocação, isto faz com que aumente a longevidade do pavimento;
- Diminuição de emissões/odores provenientes da mistura durante a colocação;
- Diminuição da produção de pó, devido às baixas temperaturas e reduzido tempo de aquecimento;
- Possibilidade de colocação de pavimento durante todo o ano, isto é, possibilidade de pavimentação nas estações frias;

- Maior distância de transporte (devido a uma menor diferença de temperatura entre a temperatura da mistura e a temperatura ambiente), podendo assim alargar a área de negócios de uma central;
- Facilita a compactação para misturas mais rígidas, com material reciclado, e para pavimentação a baixas temperaturas;
- Melhoria de condições de trabalho para os operários da central e da pavimentação;
- Rápida abertura da estrada ao público.

No entanto as misturas temperadas também têm desvantagens (Barbosa, 2012):

- Reservas quanto aos custos globais de produção, ainda não é claro que a produção de misturas betuminosas temperadas conduza a redução dos custos, uma vez que as tecnologias de produção conduzem a gastos com novos equipamentos. A aquisição de aditivos também acresce o custo das misturas;
- Emissões geradas na produção dos aditivos, uma vez que é necessário o uso de aditivos nas misturas temperadas. A produção de aditivos gera emissões, minimizando assim o impacto positivo da redução de emissões de misturas temperadas;
- Presença de água. Muitas tecnologias de produção de misturas temperadas utilizam água numa fase inicial, como essa água pode não vaporizar completamente podem ocorrer problemas de desagregação do pavimento e assentamentos prematuros causados pela presença de água.

2.4 Betume-Espuma

O betume-espuma foi originalmente proposto pelo Professor L. H. Csanyi na universidade de Iowa na década de 50 e trata-se de uma mistura de ar, água e betume quente. Quando a água quente entra em contacto com o betume faz com que este se expanda, e fique com a forma de espuma. Este pode expandir mais de 10 vezes o seu volume original, o que faz com que a sua viscosidade diminua significativamente, tornando assim este betume o ideal para envolver os agregados. Este pode ser usado para vários tipos de misturas (betuminosas), com vários tipos de agregados, sejam eles virgens ou reciclados. Também podem existir diferentes tipos de cura, a diferentes temperaturas, o que irá fazer com que as misturas tenham diferentes características mecânicas (Plati *et al.*, 2010, Ramanujam e Jones, 2007, Xu *et al.*, 2011).

De forma simplificada, a quantidade de água usada (cerca de 2% sobre a massa do betume) na presença de betume quente transforma-se em vapor. Conforme se dá uma rápida expansão da água (de líquido em vapor) são criadas umas bolhas de filme de betume, que se encontram preenchidas com vapor de água, designadas de betume-espuma. Posto isto, a viscosidade do betume é reduzida, possibilitando o recobrimento dos agregados a temperatura mais baixas.

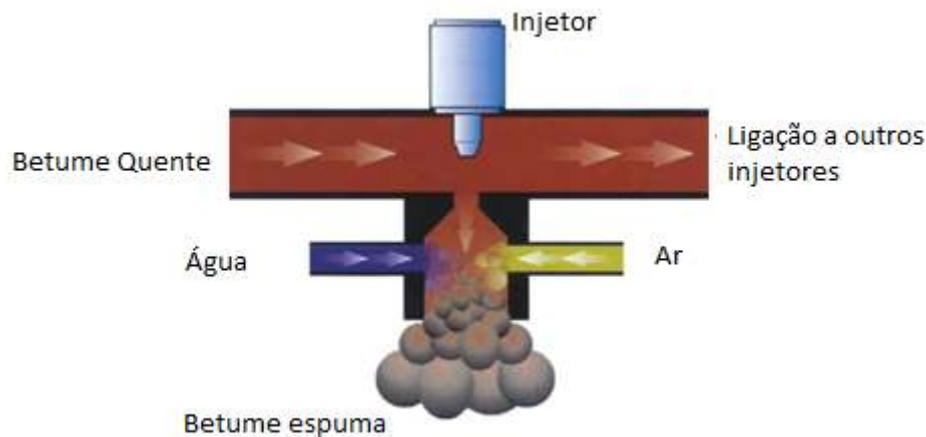


Figura 2.3 – Produção de betume-espuma (adaptado de Plati *et al.* (2010))

O betume-espuma pode ser utilizado na produção de misturas novas ou na reciclagem de pavimentos. Para o segundo caso existem dois tipos de métodos de uso do betume-espuma: uma delas é *in situ* em que é utilizado o pavimento existente como forma de reciclagem, sendo o betume-espuma é adicionado à mistura escarificada; outro método é fresar o pavimento, levar os agregados para uma central, misturá-los com betume-espuma e depois levar a mistura para o local de origem para ser aplicada (Ramanujam e Jones, 2007).

Vários autores já estudaram as características do betume-espuma, sendo recorrente avaliar os seguintes parâmetros: a capacidade do betume expandir ou taxa de expansão, quantidade de água usada para o betume espumar e tempo de meia-vida (Branco, 2013, Ramanujam e Jones, 2007, Teixeira, 2006).

A taxa de expansão é calculada pela relação entre o volume máximo do betume em forma de espuma e o volume inicial do betume que foi usado para essa espuma. O tempo de meia-vida corresponde ao tempo que ocorre entre o instante em que a espuma está com o seu volume máximo até ao momento em que atinge metade desse volume. Esta característica é um indicador do tempo disponível para proceder à mistura dos agregados (Branco, 2013).

No entanto, Sunarjono (2013) refere que a forma de compactação das misturas pode ser mais importante do que os parâmetros/caraterísticas envolvidos na produção de betume-espuma. Refere também que o teor em água não é significativo para a resistência à deformação permanente, para agregados de 20 mm. A resistência à deformação permanente está mais relacionada com a energia de compactação do que com as propriedades do betume-espuma.

Tipicamente o betume-espuma é composto por 97% de betume, 2,5% de água e 0,5% de aditivos (Branco, 2013, Huan *et al.*, 2010, Plati *et al.*, 2010, Ramanujam e Jones, 2007, Xu *et al.*, 2011). Outros autores (Xiao *et al.*, 2011) referem os 2% de teor de água como sendo o ideal para a mistura contendo o betume-espuma. Sunarjono (2013) e Xu *et al.* (2011) referem que o pavimento ligado com betume-espuma é mais sustentável pois os agregados são, normalmente misturados à temperatura ambiente, evitando gastos energéticos de aquecimento dos agregados. Yu *et al.* (2013) referem que um vasto número de estudos de laboratório foram efetuados de forma a caracterizar as misturas com betume-espuma. Os estudos sugerem que usando o betume-espuma haja uma redução de 10% de emissão de CO, CO₂ e NO_x, redução de 24% no consumo de energia e no entanto as propriedades da mistura mantêm-se quando comparados com uma mistura convencional a quente. Huan *et al.* (2010) referem que para valores de 2,5% de teor de água e betume da classe 170, o coeficiente de expansão seria 15 a 20 vezes o volume original, para uma pressão do ar a 4 bar e da água a 5 bar, e o tempo de meia-vida do betume-espuma seria à volta de 20 segundos. A viscosidade tem um grande impacto na capacidade do betume espumar, isto é, a taxa de expansão (He e Wong, 2006).

Segundo Jenkins *et al.* (2000) o betume-espuma pode ser produzido pela injeção de pequenas quantidades de água fria que em contacto com o betume quente criam o betume-espuma que tem uma duração de 20 segundos na forma de espuma. Refere também que o betume deve estar a uma temperatura à volta dos 170°C. De acordo com o mesmo autor, as principais aplicações para o betume-espuma são:

- Acabamentos de superfície de pavimento especiais;
- Misturas convencionais a frio com boa qualidade dos agregados;
- Misturas frias com fresado;
- Misturas temperadas;
- Encapsulamento ou imobilização de contaminantes tais como o amianto ou alcatrão mineral (não usado em Portugal).

Para cada uma destas aplicações, as características do betume-espuma (tipo de betume, temperatura do betume, percentagem de água para espumar e/ou aditivos) devem ser otimizadas (Jenkins *et al.*, 2000). O intervalo para o teor de água que apresenta melhores resultados de desempenho mecânico é de 2% a 3%. A mistura é considerada viável quando comparada com uma mistura tradicional produzida a quente (Branco, 2013).

Na Figura 2.4 está representado uma possível otimização da taxa de expansão, teor em água e tempo de meia-vida. Deste exemplo pode concluir-se que a quantidade de água a ser usada anda à volta dos 2 a 3% da massa de betume, a taxa de expansão será então de 12 a 15 vezes o volume original de betume e o tempo de meia-vida será de 21 a 15 segundos, respetivamente (Jenkins *et al.*, 2000).

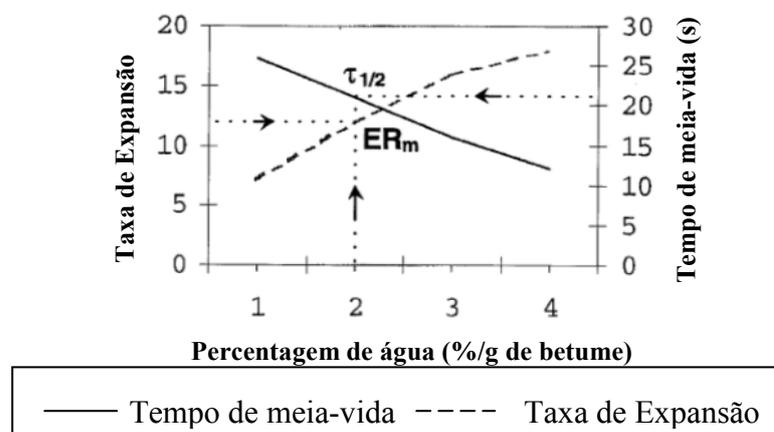


Figura 2.4 – Otimização da taxa de expansão, tempo de meia-vida e percentagem de água (Jenkins, 2000)

Depois do betume estar na forma de espuma, vai perdendo parte do ar e água (pela evaporação desta), o que faz com que vá perdendo volume até voltar à sua forma e volume inicial. Este processo pode ser descrito por uma curva, a que se dá o nome de curva de decaimento. Na Figura 2.5 está representada uma curva de decaimento para 2% de água, onde estão também representados a taxa de expansão e tempo de meia-vida do betume-espuma. Pode ver-se que o betume expandiu (ER_m) 12 vezes o volume inicial e teve um tempo de meia-vida ($\tau_{1/2}$) de 21 segundos. Neste tipo de imagem consegue-se ter melhor perceção do que se passa no betume-espuma do que os gráficos em que é apresentada a relação entre o tempo de meia-vida, a taxa de expansão e a quantidade de água (Jenkins, 2000).

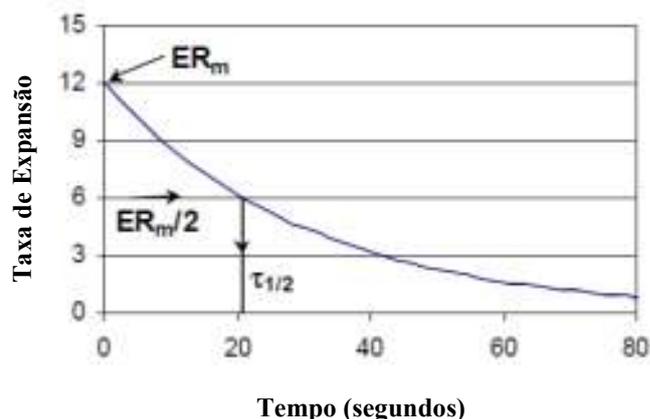


Figura 2.5 – Curva de decaimento do betume-espuma com 2% de água (Jenkins *et al.*, 2000)

Da curva de decaimento é retirado outro parâmetro para avaliar o betume-espuma, o Índice de Espuma (*Foam Index* - FI). Este caracteriza a capacidade do betume expandir. A Figura 2.6 mostra como se calcula este índice, tratando-se da soma das áreas abaixo da curva de decaimento, sendo no entanto limitada esta área por uma taxa de expansão mínima (ER_{min}). Este parâmetro (FI) é mais geral e engloba mais informação, uma vez que quanto maior for o FI, maior é a capacidade do betume espumar e uma maior quantidade de energia consegue ser armazenada no betume, isto quando comparado com um betume com um menor FI (Jenkins, 2000).

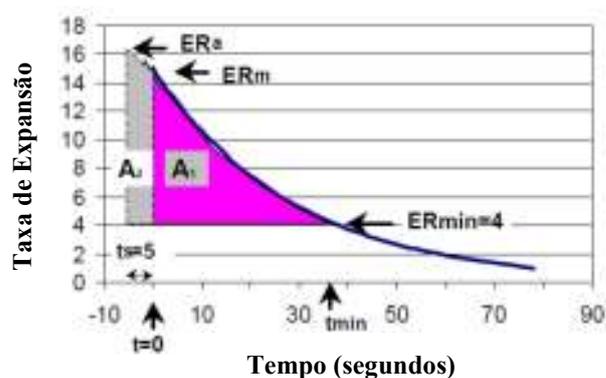


Figura 2.6 – Exemplo de cálculo do Índice de Espuma ($FI = A1 + A2$)

Segundo Jenkins (2000) a viscosidade dos betumes, para uma adequada mistura e envolvimento dos agregados, deve estar entre 0,2 Pa.s e 0,55 Pa.s. Para que se cumpra o mínimo da viscosidade, o valor da taxa de expansão deverá ser no mínimo 4, conforme a Figura 2.7. Este valor de 4 é o que se vê na Figura 2.6 como ER_{min} , e é usado para limitar a

área de cálculo do FI. O valor de ERa é dado em função da máxima taxa de expansão, e não da máxima taxa de expansão medida (ERm), então é necessário fazer uma interpolação entre estes valores de modo a ter um valor de referência ERm (Figura 2.6).

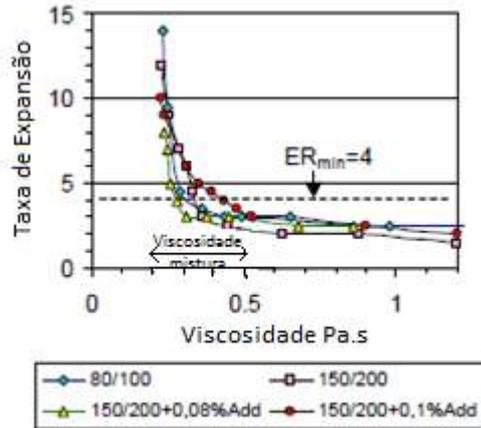


Figura 2.7 – Relação entre a viscosidade e a taxa de expansão (Jenkins *et al.*, 2000)

Na equação 2.1 (Jenkins, 2000, Jenkins *et al.*, 2000) está apresentada a expressão do cálculo do Índice de Espuma, em que a primeira parcela resulta do cálculo de A1 e a segunda parcela resulta de A2. Todos os parâmetros estão identificados depois da expressão. O t_s é o tempo de spray do betume, isto é, é o tempo que demora, desde o início da produção de betume-espuma até ao seu final. No presente caso será usado o bico injetor de 50 g/s, pretendendo-se no final 500 gramas de betume, então o tempo de spray – t_s – deverá ser de 10 segundos.

$$FI = \frac{-\tau_{1/2}}{\ln 2} \left(4 - ER_m - 4 \times \ln \left(\frac{4}{ER_m} \right) \right) + \left(\frac{1+c}{2c} \right) \times ER_m \times t_s \quad (2.1)$$

Em que:

FI – Índice de Espuma;

$\tau_{1/2}$ – Tempo de meia-vida;

ER_m – Taxa de Expansão medida;

c – ER_m/ER_a ;

ER_a – Taxa de Expansão máxima;

t_s – tempo de spray.

A utilização de betume simples para a produção de betume-espuma pode não ser eficaz em termos de tempo de meia-vida e de taxa de expansão e consequentemente para FI, então o uso de um aditivo pode alterar esta situação fazendo com que a espuma produzida com o mesmo betume se torne mais estável, tornando-o apto a ser utilizado para a produção de misturas betuminosas temperadas com betume-espuma. Na Figura 2.8 está o resultado de FI de dois betumes, um sem aditivo e outro com 0,1% de aditivo. Como o betume aditivado tem maior valor de FI terá também maiores valores de taxa de expansão e tempo de meia-vida pois são proporcionais, o que resulta num maior tempo para a produção da mistura. No entanto os aditivos muitas vezes não são considerados por terem valores elevados (Teixeira, 2006).

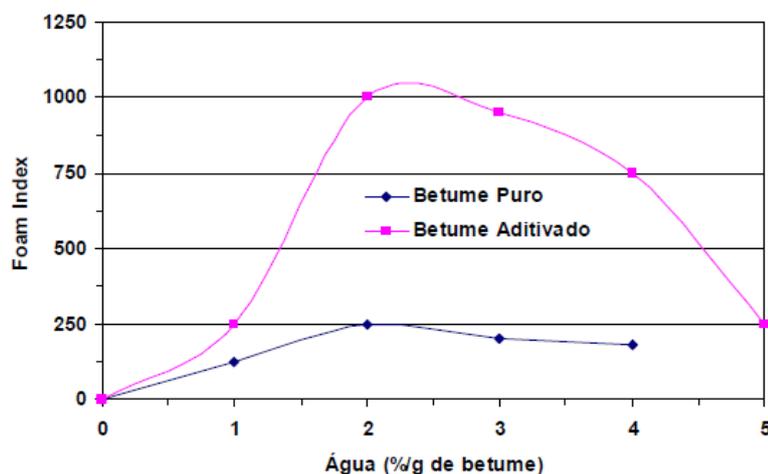


Figura 2.8 – Índice de espuma para betumes com e sem aditivo (Teixeira, 2006)

Existem desvantagens e vantagens para o uso do betume-espuma. É, portanto necessário que as vantagens para o seu uso sejam mais do que as desvantagens (Jenkins, 2000), conforme se apresenta de seguida.

Vantagens:

- Redução da poluição atmosférica;
- Redução na quantidade de energia utilizada devido às reduções de temperatura;
- Conservação da energia não renovável e redução dos riscos para a saúde, no caso das emulsões e do betume espuma, estes ligantes não requerem um solvente com origem

no petróleo para reduzir a viscosidade da mistura (comparado com as misturas a frio produzidas com betumes fluidificados);

- Uma grande variedade de agregados é compatível com este tipo de ligante;
- Menor envelhecimento do ligante, aliado às menores temperaturas dos agregados, o envelhecimento é menor do que nas misturas a quente;
- Menores problemas na compactação, uma vez que a mistura é feita a baixas temperaturas existe mais tempo para a compactar;
- Podem ser aplicados materiais virgens ou reciclados, desde que os reciclados sejam de boa qualidade, assim como os virgens devem ser;
- Sem desperdício, grandes quantidades de material reciclado na mistura com betume-espuma resulta num menor impacto ambiental;
- Grande resistência inicial, depois da compactação a mistura com betume espuma tem resistência suficiente para que a estrada seja aberta ao tráfego sem que o pavimento se deteriore;
- Capacidade para ser “armazenada”, as misturas de betume-espuma podem ser produzidas e depois armazenadas perto do local de aplicação para que sejam colocadas e compactadas numa outra fase (para misturas a frio).

Desvantagens (Jenkins, 2000):

- É necessária formação do pessoal para produção deste tipo de misturas, para que tenha sempre um determinado nível de qualidade;
- A formulação das misturas ainda não está otimizada, fazendo com que a experiência na sua produção dite a sua formulação;
- Alguns betumes contêm aditivos para não espumar, que são colocados no processo de refinação;
- Custo dos benefícios é difícil de provar, sem previsões de desempenho a longo prazo o custo do ciclo de vida é difícil de determinar. Por esta razão muitos clientes não estão abertos a correr o risco de usar um produto pouco utilizado/investigado.

2.4.1 Técnicas de produção de betume-espuma

Existem várias tecnologias para a produção de betume-espuma com injeção de água, salientando-se as seguintes:

- WAM-Foam;

- Double Barrel Green;
- LEA / EBE e EBT;
- Terex WMA system;
- LEAB;
- Ultrafoam GX.

WAM-Foam ou *Warm Asphalt Mix Foam* é um processo de produção de misturas betuminosas que resulta de uma parceria entre a *Shell International Petroleum Company Ltd.*, Reino Unido, e a empresa *Kolo-Veidekke* da Noruega. Este processo consiste na adição de dois tipos de ligante em fases diferentes na produção da mistura. Um ligante mole é adicionado à mistura numa primeira fase para que os agregados sejam envolvidos por ele, numa segunda fase outro ligante extremamente duro sob a forma de espuma é adicionado à mistura. Esta combinação confere trabalhabilidade à mistura (Joe W. Button, 2007).

Double Barrel Green criado pela empresa *Astec Inc.* é um dispositivo criado para a produção de betume-espuma. Este equipamento (Figura 2.9) consiste numa série de bicos de injeção e câmaras de expansão sendo controlados por computador para controlo da produção de espuma. A injeção de água através dos bicos cria um vapor que rodeia o ligante resultando na formação de espuma (D'Angelo *et al.*, 2008).

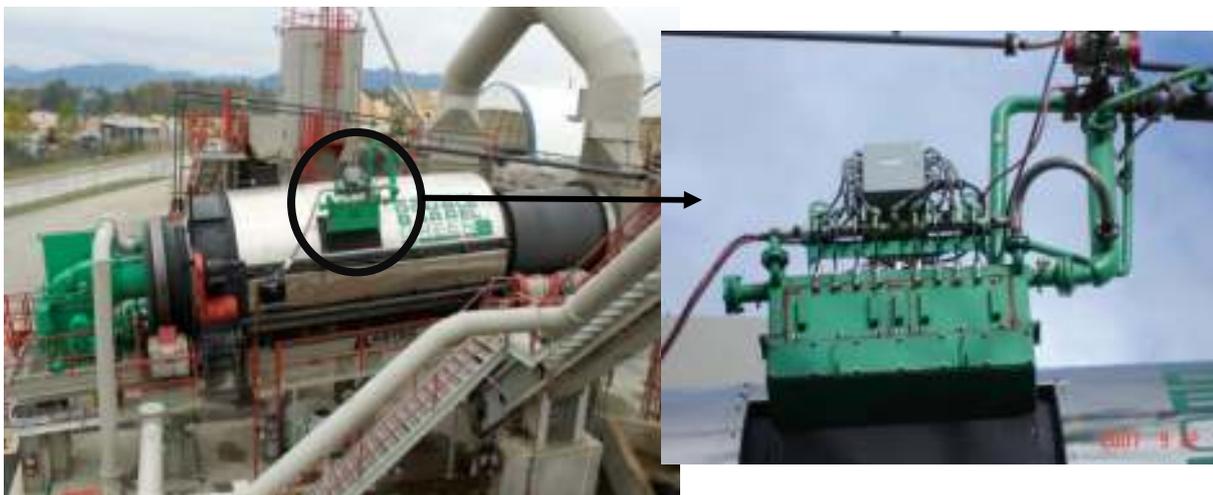


Figura 2.9 – Equipamento Double Barrel Green (esquerda), Bicos injetores e câmara de expansão (direita)

Low Energy-Asphalt ou LEA, também conhecido como EBE (Enrobé à Basse Energy) é outra das tecnologias de produção de misturas temperadas, foi desenvolvida pela *Fairco*, *LEACO* e

EIFFAGE Travaux Publics. Numa das variantes, o processo LEA consiste em aquecer os agregados grossos e cobri-los com betume quente, de seguida é introduzida uma fração de agregados (fração miúda) molhados/húmidos na mistura. A humidade presente nestes agregados vai fazer com que o betume presente na mistura espume, permitindo que estes novos agregados sejam cobertos pelo ligante. Este processo pode ser visto graficamente na figura seguinte (Figura 2.10).

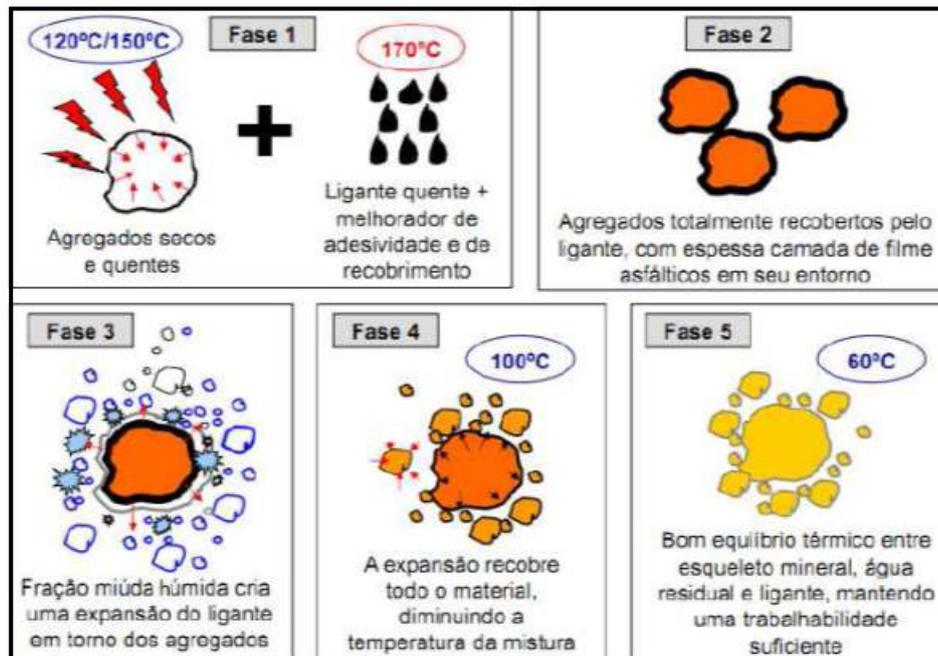


Figura 2.10 – Processo LEA (adaptado de D'Angelo *et al.* (2008))

Terex WMA system foi desenvolvido pela *Terex Roadbuilding Division of Terex Corporation* (Westport, CT). Este sistema utiliza uma única câmara de expansão, que assegura uma consistência igual para toda a mistura betume-água. O betume-espuma é produzido fora do tambor e é imediatamente injetado na câmara de mistura, isto para que seja garantido um bom envolvimento dos agregados com o betume, o equipamento de produção de betume-espuma encontra-se na Figura 2.11. Larry Santucci (2010) afirma que o *Terex WMA system* pode ser aplicado a qualquer central de produção de misturas betuminosas. Os seus produtores afirmam que as misturas podem baixar para valores de 32°C sem o uso de aditivos.

LEAB foi desenvolvido pela *Royal BAM Group* na Holanda, resultante de investigação anteriormente conduzida por Kim Jenkins (D'Angelo *et al.*, 2008). Em ensaios de laboratório os agregados são divididos em frações grossas e finas, água é adicionada aos agregados de

modo a facilitar o envolvimento pelo betume, a mistura é realizada em duas fases. Este processo foi testado inicialmente *in situ*, mas sem sucesso. No processo LEAB não é utilizada água adicional nos agregados. A espuma de betume é produzida por um bico injetor, a empresa *BAM* utiliza uma serie de seis bicos injetores para o processo LEAB, a Figura 2.12 mostra como é esse processo. É colocado 0,1% de aditivo sobre o peso do betume para conferir estabilidade da espuma e melhorar a adesão.

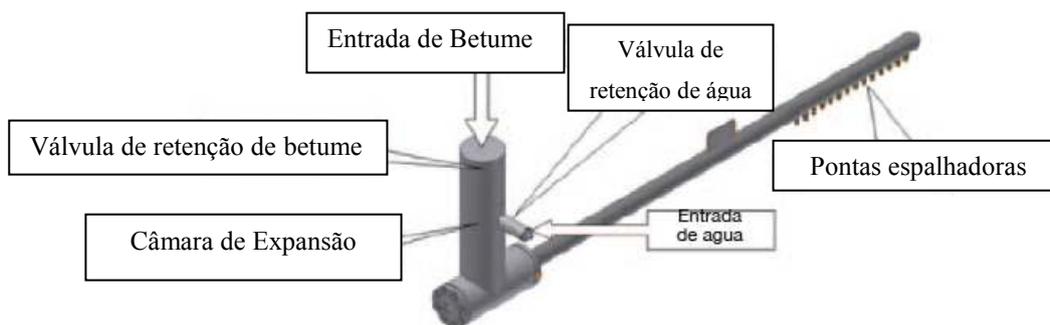


Figura 2.11 – Processo Terex (Adaptado de (Terex, 2011))

Tipicamente são utilizados 50% de RAP, tanto para WMA como HMA, na Holanda. O material RAP é aquecido num tambor-secador à parte do material virgem, sendo aquecido de 110 a 115°C. São reportadas poupanças de energia de 40% para material virgem e 30% para misturas com 50% de RAP (D'Angelo *et al.*, 2008).



Figura 2.12 – Processo LEAB

Por último a tecnologia *Ultrafoam GX*, desenvolvida e patenteada pela *Gencor Industries* consiste na produção de betume-espuma com um dispositivo, produzindo-o através da introdução de betume e vapor de água a taxas de fluxo, pressões e temperaturas distintas. Este mecanismo pode ser acoplado à central existente, o dispositivo representa-se na Figura 2.13. A mistura de betume e água criam pequenas bolhas que resultam num betume-espuma estável e consistente (Larry Santucci, 2010).



Figura 2.13 – Dispositivo para produção de betume-espuma pelo processo Ultrafoam GX (Ferreira, 2009)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Equipamento para a produção de betume-espuma

Para a produção de betume-espuma é utilizado um equipamento específico, neste caso o laboratório dispõe da *Wirtgen WLB 10 S* (Figura 3.1). Para esta produção, além do betume são necessários dois ingredientes: ar pressurizado e água. A máquina tem incorporado um reservatório para a água e possui uma bomba que faz a pressurização do ar. A produção de betume-espuma é feita misturando estes dois últimos ingredientes e betume, fazendo com que este expanda pela formação de espuma. Toda a máquina possui resistências que podem aquecer qualquer componente a uma determinada temperatura. Assim por onde quer que o betume passe, nunca vai arrefecer pois todo o sistema está aquecido e mantém a temperatura regular.



Figura 3.1 – Equipamento laboratorial de produção de betume-espuma (Wirtgen WLB 10 S)

Este equipamento veio munido de um balde e escala para que a medição do tempo de meia-vida e da taxa de expansão possa ser realizada adequadamente. Na escala pode ver-se gravado os números 6, 12, 18, 24 e 30 que correspondem a valores de taxas de expansão (Figura 3.2)



Figura 3.2 – Escala e balde utilizado para o betume-espuma

3.2 Materiais utilizados

Os materiais utilizados neste estudo são de três tipos: agregados de várias frações; betumes; e aditivo. Os agregados utilizados para o estudo são de origem granítica e proveem da empresa MonteAdriano, uma vez que este estudo se enquadra num projeto conjunto entre a universidade e a empresa já referida. No que respeita aos betumes foram estudados três betumes da mesma origem mas com classes de penetração distintas: 160/220, 50/70 e 70/100 (obtido pela mistura entre o 160/220 e o 50/70) da GALP.

Foi também usado um aditivo com a capacidade de estabilizar o betume-espuma, pois previa-se que apenas o uso de betume simples não seria suficiente para a produção das misturas betuminosas. Este aditivo deverá aumentar o tempo de meia-vida, conferindo mais tempo para a produção das misturas betuminosas.

No que respeita às misturas betuminosas, foram estudados dois tipos de misturas, uma convencional e outra com betume-espuma. Sendo que ambas foram produzidas tendo por base a mesma formulação de modo a que seja possível comparar os resultados obtidos.

3.3 Caraterização do betume

3.3.1 Ensaio Anel & Bola

O ensaio Anel e Bola permite calcular o ponto de amolecimento do betume e assim ficar a saber a que temperatura (elevada) o betume perde a sua estabilidade. Este conhecimento permite obter informação sobre a temperatura a partir da qual a mistura betuminosa fica mais suscetível à ocorrência de deformações permanentes por perda de estabilidade do betume.

Este ensaio está especificado pela norma EN 1427 e consiste na colocação de uma amostra de betume num anel, seguida da colocação de uma esfera por cima deste, tudo dentro de um recipiente com água (num suporte adequado). A fase seguinte consiste em aquecer a água gradualmente em 5°C por cada minuto até que o betume toque na parte inferior do suporte por ação do peso da esfera, como mostra na Figura 3.3. Quando este momento acontece é chamado de ponto de amolecimento do betume e é o valor da temperatura nesse momento que fica registado.



Figura 3.3 – Várias fases do ensaio Anel e Bola: fase inicial do ensaio (esquerda); fase em que o betume começa a deformar com o peso da esfera (centro); fase final do ensaio em que se regista a temperatura a que o betume tocou na parte inferior do suporte (direita)

3.3.2 Ensaio de viscosidade dinâmica

O ensaio de viscosidade dinâmica é baseado na norma EN 13302 e o procedimento utilizado neste trabalho foi desenvolvido por Silva *et al.* (2009), consistindo em fazer rodar um *spindle* – objeto cilíndrico – dentro de uma amostra de betume. Para isso é usado o viscosímetro rotacional de *Brookfield*, que vai medindo a força exercida entre o betume e a parede do recipiente cilíndrico, onde se encontram o *spindle* e o betume (Figura 3.4). O estudo foi

repetido para várias temperaturas, começando por 100°C e gradualmente foi aumentado de 10°C até chegar à temperatura de 180°C. Em cada intervalo espera-se que a temperatura e os valores medidos se estabilizem para fazer um registo.



Figura 3.4 – Viscosímetro rotacional de Brookfield

3.3.3 Ensaio de Penetração a 25°C

O ensaio de penetração a 25°C está definido na norma EN 1426 e é uma medida indireta da viscosidade dos betumes (Figura 3.5 e Figura 3.6). Consiste em medir a profundidade a que uma agulha com um peso associado de 100 gramas entra no betume. Deixa-se a agulha sobre o betume durante 5 segundos, e é repetido em três pontos diferentes da amostra, fazendo-se depois a média desses três valores. A profundidade a que a agulha vai é medida em décimas de milímetro.



Figura 3.5 – Equipamento para o ensaio de penetração a 25°C.



Figura 3.6 – Ensaio de penetração a 25 °C.

3.3.4 Ensaio de Reologia

Na norma EN 14770 estão especificados os métodos para a utilização do reómetro de corte dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer*), apresentado na Figura 3.7, que mede as propriedades reológicas de ligantes betuminosos. O reómetro determina o módulo de corte complexo e o ângulo de fase do betume, para diferentes temperaturas e uma frequência de 10 rad/s.

Para este ensaio são usadas dois tipos de amostras, uma para o chamado prato pequeno e outra para o prato grande. Isto é, amostras com 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura e outras com 8 mm de diâmetro e com 2 mm de espessura. Cada tipo de amostra tem temperaturas de ensaio associadas e por ordem específica, para a amostra de 25 mm as temperaturas são 46, 52, 58, 64, 70, 76 e 82 °C, para a amostra de 8 mm as temperaturas são 40, 37, 31, 25 e 19 °C, por essa ordem.



Figura 3.7 – Reómetro de corte dinâmico

3.4 Estudo de formulação, preparação das misturas betuminosas, preparação dos provetes e determinação das baridades

3.4.1 Estudo granulométrico da mistura

Como este estudo está inserido num projeto entre a universidade e uma empresa, a formulação para as misturas betuminosas será a formulação já utilizada pela empresa na fase inicial dos trabalhos. Optou-se por fazer uma mistura do tipo AC 14 pois pode ser usada como camada de desgaste. No Caderno de Encargos está o fuso granulométrico que este tipo de mistura tem de respeitar (Figura 3.8).

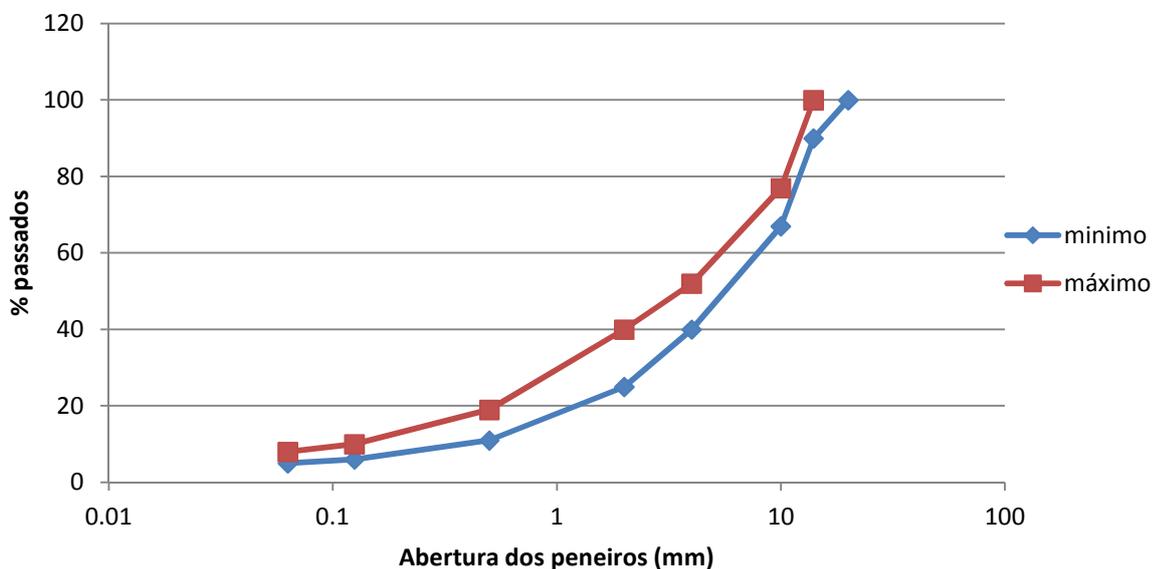


Figura 3.8 – Curva granulométrica da mistura AC 14 surf (BB)

Depois dos cálculos para determinar a quantidade de cada agregado e cumprindo o fuso granulométrico representado acima, pode-se proceder ao fabrico das misturas betuminosas. Na empresa que forneceu os agregados foi já realizado o estudo de formulação da mistura com betume convencional, tendo resultado uma percentagem de betume de 4,8%.

3.4.2 Processo de fabrico das misturas betuminosas

Conforme já foi referido, as misturas a produzir neste trabalho são de dois tipos, uma convencional a quente e outra temperada com betume-espuma, para que depois se possa fazer uma comparação entre elas. A mistura a quente será feita a uma temperatura de 150°C (a recomendada para o betume 50/70). A sua preparação consiste em colocar todos os agregados, previamente aquecidos a 160°C, na panela misturadora, mexe-se durante um minuto para que

a consistência da mistura seja o mais homogênea possível, de seguida coloca-se o betume e mistura-se durante dois minutos.

O mesmo processo ocorre para as misturas com betume-espuma, mas em vez de se colocar o betume na misturadora, pega-se na panela da misturadora, colocando-a em cima de um suporte que existe na máquina de betume-espuma e faz-se a injeção do betume (Figura 3.9). Antes de se fazer a injeção de betume-espuma, pesa-se a panela com os agregados, subtraindo a tara ao peso obtido na balança, de seguida o betume é colocado na panela e volta-se a pesar, de forma a ser conhecida com algum rigor qual a quantidade de betume que foi injetado, por fim mistura-se durante dois minutos como acontece nas misturas betuminosas a quente.



Figura 3.9 – Processo de fabrico de misturas betuminosas com betume-espuma

No caso do betume espuma terá que se fazer um estudo para se determinar qual a temperatura ideal de produção da mistura. Inicialmente faz-se para os 150°C, apenas para comparar com a mistura convencional, sendo que não é esta temperatura que se pretende para o estudo. Para que a mistura seja considerada temperada foram escolhidas mais duas temperaturas, a 130°C e a 110°C.

Quando a mistura está pronta é retirada uma amostra para determinar a baridade máxima teórica e para a determinação da percentagem de betume da mistura por ignição (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Amostra de mistura betuminosa para ensaios de BMT e percentagem de betume.

3.4.3 Preparação dos provetes para o compactador de Marshall

A preparação dos provetes para o compactador de Marshall (Figura 3.11) consiste em colocar amostras da mistura em moldes que têm 101,6 mm de largura interna e 63,4 mm de altura.

Depois da produção da mistura são colocadas amostras em recipientes metálicos que estavam numa estufa à temperatura da mistura, com o objetivo de deixar a mistura dividida para a colocação nos moldes, sendo guardados na estufa pois os provetes são compactados um a um. Com a preparação dos moldes, vão sendo retirados os recipientes e colocada a mistura nos moldes à medida que se compacta mais um provete. Na parte de baixo dos moldes são colocados papéis para evitar que a mistura fique colada ao compactador, assim como na parte de cima para que não cole ao peso que faz a compactação (Figura 3.12). São então aplicadas 75 pancadas de cada lado do provete, sendo realizado o controlo da temperatura antes de se começar a compactar cada provete. Depois de terminada a compactação procede-se à numeração do provete. O procedimento para a mistura com o betume-espuma é em tudo idêntico ao apresentado para a mistura convencional, com a exceção de ao ser colocada a mistura nos recipientes, estes serem cobertos com um filme de alumínio para evitar que se verifique evaporação de parte da água presente na mistura nas amostras que ficam mais tempo dentro da estufa, uma vez que a mistura é preparada acima do ponto de ebulição da água (Figura 3.13).



Figura 3.11 – Compactador de Marshall



Figura 3.12 – Colocação de papéis para que a amostra não cole ao compactador



Figura 3.13 – Colocação de folha de alumínio no recipiente com amostra de betume-espuma

3.4.4 Determinação da Baridade Aparente

A determinação da baridade aparente pode ser feita por 4 métodos diferentes segundo a norma EN 12697-6, o método A, seco – consiste em pesar o provete seco e imerso - o método B, saturado com superfície seca – consiste em pesar o provete seco, imerso e saturado mas com superfície seca – o método C, provete selado – consiste em pesar o provete seco com parafilm e imerso selado com parafilm – por fim o método D, através das dimensões do provete – consiste em determinar a baridade pelas dimensões do provete.

Para este estudo optou-se por fazer a determinação da baridade aparente pelo método B (Figura 3.14).



Figura 3.14 – Equipamento de pesagem para o método B.

3.4.5 Determinação da Baridade Máxima Teórica

A determinação da baridade máxima teórica (BMT) está definida pela norma EN 12697-5 e consiste no uso de um picnómetro submetido a vácuo.

Para BMT colocam-se 2 kg de amostra da mistura betuminosa no picnómetro, coloca-se água e submete-se o picnómetro a vibração e vácuo durante um determinado período de tempo. Isto vai fazer com que todos os vazios da amostra sejam preenchidos por água (Figura 3.15). De seguida coloca-se o picnómetro com a amostra em banho-maria a 25°C durante 30 minutos. Sabendo o peso inicial do picnómetro, o peso do picnómetro com amostra e do picnómetro com amostra cheio de água, pode-se obter o volume ocupado pela mistura e assim obter também a baridade máxima teórica.



Figura 3.15 – Picnómetro usado para a determinação da BMT de misturas betuminosas (Esquerda) e equipamento de produção de vácuo (Direita)

3.4.6 Determinação do volume de vazios da mistura

Para a determinação do volume de vazios (V_v) de uma mistura é necessário conhecer a baridade aparente (BA) e a baridade máxima teórica (BMT) e pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$V_v = \frac{BMT - BA}{BMT} \quad (3.1)$$

3.5 Ensaios de caracterização mecânica de misturas betuminosas

3.5.1 Ensaio de Compactabilidade

O ensaio de compactabilidade é muito semelhante à compactação de Marshall, pois a preparação, o processo e o equipamento são iguais, com exceção no número de pancadas, que passa de 75 pancadas de cada lado para 200 pancadas apenas num dos lados. Estas 200 pancadas dadas num dos lados visam simular o que se passa *in situ*, pois só é possível fazer a compactação por cima da mistura e não dos dois lados.

O processo de compactação é monitorizado num computador que faz o registo do número de pancadas e do adensamento do provete (Figura 3.16), com a ajuda de uma placa de aquisição de dados que recebe o sinal de um LVDT está ligado ao compactador de Marshall. Para cada mistura são preparados e compactados 3 provetes, de modo a melhorar a representatividade dos resultados.



Figura 3.16 – Placa de aquisição de dados e computador de registo da compactabilidade

3.5.2 Sensibilidade à água

Para o ensaio de sensibilidade à água são necessários 6 provetes, 3 serão ensaiados saturados e outros 3 secos, os seis provetes devem ter dimensões idênticas. Estes dois grupos para ensaiar secos e saturados, dentro do seu grupo devem ser semelhantes, isto é, ter o valor de baridade aparente muito próximo e alturas também idênticas.

Segundo a norma EN 12697-12 o grupo de provetes a seco é mantido à temperatura ambiente, enquanto o outro grupo é colocado em água a uma temperatura de 40°C, durante um tempo mínimo e máximo de 68 horas a 72 horas, respetivamente. Antes deste procedimento o grupo de provetes que vai ficar imerso é submetido a vácuo durante 40 minutos, sendo que os provetes e o picnómetro são colocados na mesa vibratória para que melhor se consiga

remover todo o ar dos provetes. Posteriormente os provetes são deixados em repouso em água durante 30 minutos, antes de serem submetidos ao processo de acondicionamento referido. Depois de passadas 68 a 72 horas, a temperatura da água é reduzida para 15°C e os provetes a seco são colocados num frigorífico a 15°C, durante duas horas. Depois das duas horas os provetes são ensaiados à tração indireta (Figura 3.17).



Figura 3.17 – Ensaio de Tração Indireta

Com este ensaio pretende-se calcular a percentagem de resistência conservada por tração indireta (ITSR). Consiste em dividir a média da resistência dos provetes imersos pela média da resistência dos provetes secos.

3.5.3 Ensaio de Pista – resistência à deformação permanente

Ensaio de pista ou WTT (*Wheel Tracking Test*) consiste em fazer passar repetidamente uma roda, com um determinado peso associado, em cima de uma mistura betuminosa. A roda simula a passagem de veículos, a qual vai provocar uma deformação permanente na camada de mistura betuminosa.

A preparação do ensaio começa por se medir as lajetas, a altura em vários pontos e a largura nas 4 arestas da lajeta, devendo esta também ser pesada. De seguida é colocada numa plataforma de ensaio com gesso em toda a sua envolvente, isto para que as condições de ensaio sejam idênticas ao que acontece na realidade (confinamento lateral promovido pela camada do pavimento). O ensaio está normalizado pela norma EN 12697-22, tendo como temperatura de ensaio os 50°C, a força aplicada é de 700 N e são aplicados 10000 ciclos de carga.

3.5.4 Ensaio de módulo de rigidez – flexão em quatro pontos

O módulo de rigidez que uma mistura betuminosa depende da temperatura a que o material se encontra no momento, da frequência de carregamento e das características dos materiais que foram usados na mistura (Figura 3.18).

Neste estudo foram ensaiadas 12 vigas, 6 de mistura produzida com betume-espuma, mais 6 da mistura convencional. As doze vigas foram ensaiadas da mesma forma para assim poder existir uma comparação entre as duas misturas betuminosas. Todas as vigas de cada mistura foram ensaiadas à temperatura de 20°C. O ensaio percorre várias frequências de acordo com a norma EN 12697-26, nomeadamente, 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 8, 10 Hz, repetindo-se novamente a frequência de 0,1 Hz para confirmar que o provete não sofreu dano durante o ensaio, uma vez que se trata de um ensaio não destrutivo.



Figura 3.18 – Ensaio do módulo de rigidez

3.5.5 Ensaio de resistência à fadiga – flexão em quatro pontos

A resistência à fadiga tem como principais agentes a ação do tráfego e ações causadas pela temperatura (diferencial).

As vigas utilizadas neste ensaio são as mesmas que foram utilizadas para a determinação do módulo de rigidez, contudo tem que ser primeiramente feito o ensaio para a determinação do módulo e só depois o ensaio de resistência à fadiga uma vez que este ensaio é destrutivo (Figura 3.19).

Este ensaio é feito a uma temperatura de 20°C com a aplicação de uma carga repetida com a frequência de 10 Hz. Com o ensaio pretende-se saber ao fim de quantos ciclos o provete atinge a rotura. Uma vez que se utilizou uma configuração de ensaio em “extensão controlada”, a rotura está convencionada para se observar quando o módulo de rigidez diminui para 50% do valor inicial, então a rotura define-se pelo número de ciclos que foram precisos para chegar a esse valor de módulo.



Figura 3.19 – Ensaio de resistência à fadiga

3.5.6 Determinação da percentagem de betume por ignição

Para a determinação da percentagem de betume presente na mistura betuminosa usa-se um conjunto de cestos, com e sem mistura betuminosa, distribuída pelos 3 cestos, que são colocados num forno incinerador (mufla) onde vão ser submetidos a uma temperatura tão elevada que origina a queima do betume (Figura 3.20). No cesto de cima coloca-se a mistura com agregado mais grosso, no cesto do meio coloca-se a mistura de dimensões intermédias, e no cesto de baixo coloca-se a mistura de dimensões mais finas. A diferença de peso antes e depois da queima representa o peso do betume que foi queimado. A mufla contém uma balança interna que permite calcular essa diferença.



Figura 3.20 – Ensaio de determinação da percentagem de betume: aspeto da mistura inicial (em cima); aspeto da mistura (sem betume) depois da queima, em baixo; Forno incinerador usado para a queima (direita)

De referir que este ensaio é usualmente utilizado pela necessidade de verificar se a quantidade de betume presente na mistura final é a pretendida, sendo um ensaio essencial para a caracterização de material fresado, mas que no caso de estudo se mostrou essencial pela dificuldade em controlar com bastante precisão a quantidade de betume-espuma injetado na mistura pelo equipamento de betume-espuma.

3.6 Caraterização do betume-espuma

Com os equipamentos descritos acima é possível determinar o tempo de meia-vida e a taxa de expansão do betume-espuma. A taxa de expansão corresponde ao volume máximo que o betume-espuma atinge, quando comparado com o volume normal do betume. Utilizando o balde e a escala é mais facilmente perceptível qual é esse valor. Por exemplo, se o ponto médio da superfície do betume-espuma ficar na altura do primeiro traço da escala, a taxa de expansão é de 6 vezes o volume inicial. O tempo de meia vida é o tempo que o betume demora até atingir metade do valor máximo obtido, seguindo o exemplo acima, inicia-se contagem com um cronómetro no momento em que o betume tem o volume máximo e quando a altura de betume estiver perto da metade do traço correspondente ao 6, deve parar-se a contagem e esse tempo corresponde ao tempo de meia-vida.

Para a avaliação destes parâmetros foram utilizados dois operadores (pessoas), para que as medições fossem mais exatas e para caso um operador não conseguisse fazer a medição, não se dava por perdida a injeção de betume para poder obter outra medição. No final fez-se a média dos valores obtidos pelos dois operadores.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Caracterização da mistura betuminosa

4.1.1 Análise granulométrica

No presente trabalho a curva da mistura granulométrica dos agregados foi determinada previamente pela empresa que forneceu os agregados e que está inserida num projeto em parceria com a Universidade do Minho. Foi então representada a curva granulométrica da mistura (Figura 4.1) com os valores da Tabela 4.1, juntamente com os valores mínimos e máximos definidos pelo *Caderno de Encargos Tipo Obra, da Estradas de Portugal 14.03 Pavimentação* (EP, 2009).

Tabela 4.1 – Fuso granulométrico e curva da mistura

| Abertura das malhas dos peneiros (mm) | Curva da mistura de agregados | Fuso granulométrico AC 14 Surf (BB) (EP, 2009) | |
|---------------------------------------|-------------------------------|--|-----|
| 20 | 100 | 100 | 100 |
| 14 | 99,4 | 100 | 90 |
| 10 | 76,8 | 77 | 67 |
| 4 | 46,6 | 52 | 40 |
| 2 | 34,3 | 40 | 25 |
| 0,5 | 17,4 | 19 | 11 |
| 0,125 | 8,5 | 11 | 6 |
| 0,063 | 5,8 | 8 | 5 |

A empresa MonteAdriano propõe uma fórmula de trabalho derivada do fuso e curva granulométrica representados no quadro acima. Esta fórmula de trabalho revela que percentagem de cada material deve ser colocada na mistura. O tipo de agregados a utilizar é brita 8/14, brita 4/10, pó 0/4, filer comercial e betume. Na Tabela 4.2 está a percentagem de cada material que deve ser utilizado numa mistura betuminosa do tipo AC14 surf (BB), incluindo o betume.

Tabela 4.2 – Fórmula de trabalho (MonteAdriano)

| Fração | Agregado 8/14 | Agregado 4/10 | Agregado 0/4 | Filer Comercial | Betume |
|-----------------------------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|--------|
| Percentagem na Mistura betuminosa | 38,1% | 9,5% | 46,2% | 1,4% | 4,8% |

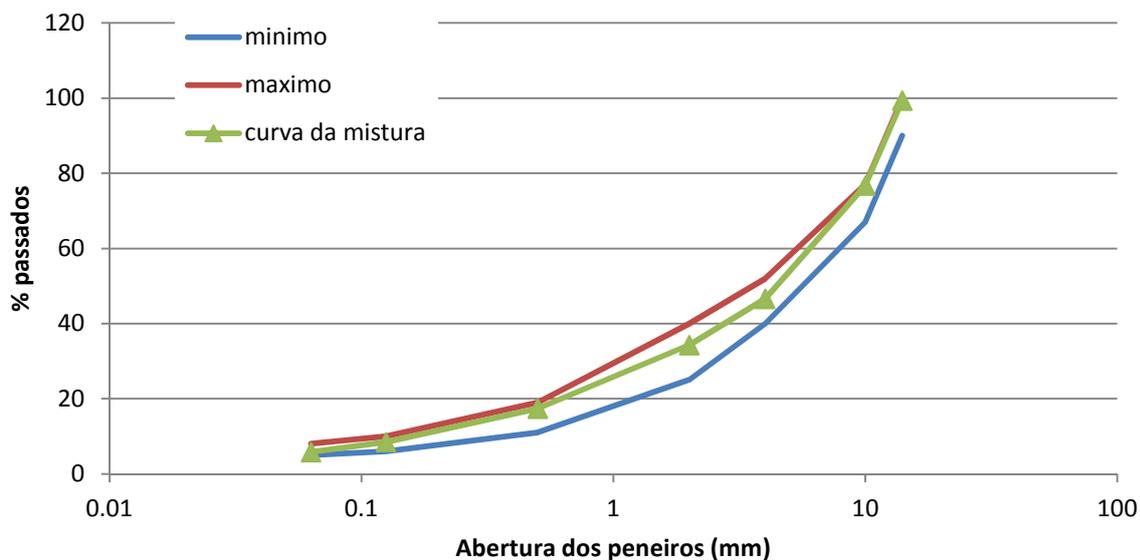


Figura 4.1 – Curva granulométrica da mistura AC 14 Surf (BB)

Da análise da Figura 4.1 pode-se ver que a curva da mistura indicada pela empresa Monte Adriano cumpre o exposto no Caderno de Encargos, isto é, cumpre os valores máximos e mínimos.

Os agregados e a curva granulométrica serão os mesmos, tanto para a mistura convencional a quente, como para a mistura com betume-espuma. Caso as misturas fossem preparadas com agregados diferentes, os ensaios podiam ter resultados diferentes devido ao facto de um tipo de agregado ser mais ou menos resistente do que outro, o que iria influenciar os resultados obtidos no final. Para reduzir a incerteza na análise dos resultados obtidos com as misturas, o tipo de agregados é o mesmo para as ambas.

4.1.2 Análise do ligante

Para o presente trabalho foram escolhidos 3 tipos de betume para se avaliar qual o melhor a ser usado para o fabrico do betume-espuma e conseqüentemente o mesmo seria utilizado na mistura convencional.

Os betumes utilizados foram o 50/70, o 70/100 e o 160/220, todos da marca GALP e sendo o primeiro mais duro e o último mais mole. Para cada tipo de betume foram feitos vários ensaios, nomeadamente, de anel e bola, penetração, viscosidade e reologia, cujos resultados vão ser apresentados de seguida de forma a retirar as respetivas conclusões.

Considerando os valores mínimos e máximos para a temperatura de amolecimento de cada tipo de betume são apresentados os resultados do ensaio anel e bola na Tabela 4.3. Pode-se ver que o betume 50/70, o 70/100 e o 160/220 cumprem os valores máximos e mínimos.

O ensaio da penetração a 25°C para os 3 tipos de betume teve um resultado que se apresenta na Tabela 4.3. Segundo a norma EN 12591 os três betumes, 50/70, 70/100 e 160/220 obtiveram valores entre o máximo e o mínimo estipulado nessa norma.

Tabela 4.3 – Ensaio de Anel e Bola e Penetração– resultados obtidos.

| Referência da amostra | 50/70 | | 50/70 GALP | 70/100 | | 70/100 GALP | 160/220 | | 160/220 GALP |
|-----------------------|-------|-----|------------|--------|-----|-------------|---------|-----|--------------|
| | Min | Max | Média | Min | Max | Média | Min | Max | Média |
| Anel e Bola (°C) | 46 | 54 | 50,1 | 43 | 51 | 44,7 | 35 | 43 | 38,4 |
| Penetração (mm) | 50 | 70 | 51,37 | 70 | 100 | 76,5 | 160 | 220 | 173,33 |

A viscosidade dinâmica determina a consistência dos betumes para um leque de temperaturas. Estes valores ajudam a decidir qual a temperatura adequada para a produção e compactação das misturas betuminosas. Tendo como referência o valor de 100cP (valor retirado de estudos feitos anteriormente) para a produção de misturas betuminosas é apresentado na Figura 4.2 os resultados da viscosidade dinâmica dos três tipos de betumes. Pode-se concluir que a temperatura de produção para o betume 50/70 anda à volta dos 170°C, para o betume 70/100 anda à volta dos 165°C e o betume mais mole anda à volta dos 150°C. Pode-se também concluir que quanto mais mole o betume, menor a temperatura de produção para o mesmo valor de viscosidade. Isso também é denotado no gráfico pois todas as curvas apresentam um comportamento linear, ficando o betume 50/70 na parte superior do gráfico, isto é, acima das outras curvas e o betume mais mole na parte inferior do gráfico. Daqui tira-se que as temperaturas do betume que importa estudar para a continuação do trabalho, para o betume 50/70 vão ser usadas 3 temperaturas, uma intermédia, uma acima e uma abaixo, assim como

para os restantes betumes. Para o 50/70 as temperaturas são 160°C, 170°C e 180°C; para o 70/100 as temperaturas são 150°C, 160°C e 170°C; e para o betume 160/220 as temperaturas são 140°C, 150°C e 160°C.

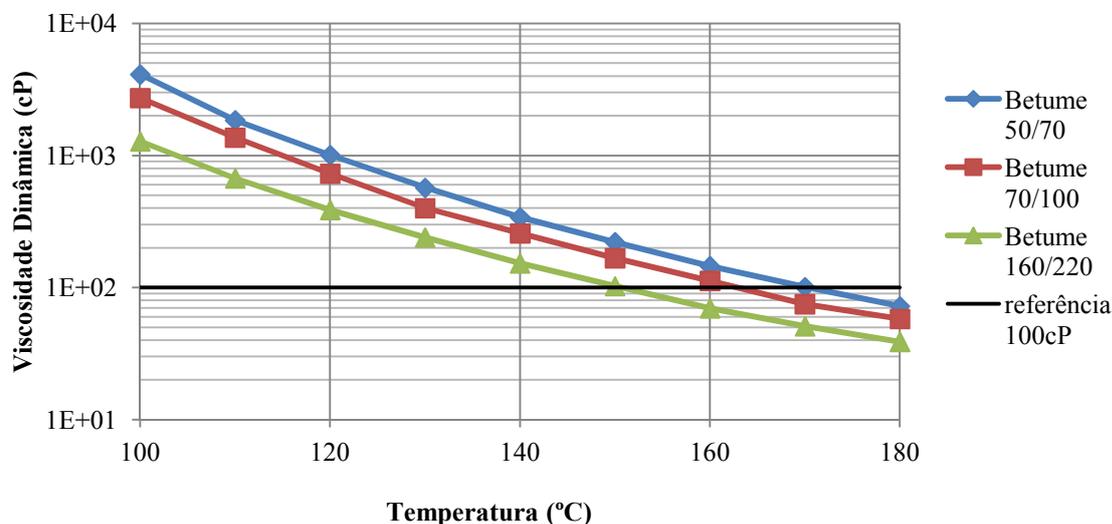


Figura 4.2 – Viscosidade dinâmica dos 3 betumes

Neste ponto todos os betumes são aptos para que se continue o estudo, isto é, esta caracterização foi feita para que se perceba o estado dos betumes e as diferenças entre eles. O próximo ponto a estudar é a influência do tipo de betume na produção do betume-espuma, e é nesse ponto que será decidido qual o betume a usar nos dois tipos de misturas, a convencional e a de betume-espuma.

Mais à frente neste estudo será também colocada a hipótese da utilização de aditivos, podendo fazer com que as propriedades do betume sejam alteradas. Para isso serão feitos ensaios para verificação das propriedades do betume em causa.

4.1.3 Estudo do betume-espuma

Para o estudo do betume-espuma foram usados os três tipos de betumes atrás expostos. Para cada um deles foram realizadas injeções para a produção de betume-espuma com diferentes percentagens de água. As percentagens de água usadas são 1, 2, 3, 4, 5 e 6%. Dentro destas percentagens de água foram selecionadas três para aprofundar e continuar o estudo. As temperaturas a usar para cada betume foram expostas no ponto anterior e vão ser agora alvo de estudo.

Começando pelo betume 50/70, foram feitas no total 18 injeções de betume-espuma para cada temperatura, 3 para cada percentagem de água. Optou-se por 3 injeções de betume espuma para cada percentagem de água para depois ser feita uma média destes 3 valores, o que conduz a valores finais mais fiáveis. Foram então feitas injeções de betume-espuma para 3 temperaturas, 6 percentagens de água com 3 repetições, num total de 54 injeções.

Usando valores médios para cada temperatura os valores da taxa de expansão e tempo de meia vida são apresentados na Figura 4.3. Onde do lado esquerdo é representado o eixo da taxa de expansão, que se definiu como valor mínimo de 12,3 e do lado direito o tempo de meia-vida com valor de referência mínimo de 13 (segundo as referencias bibliográficas (Jenkins *et al.*, 2000)). Para o índice de espuma o valor de referência é de 180.

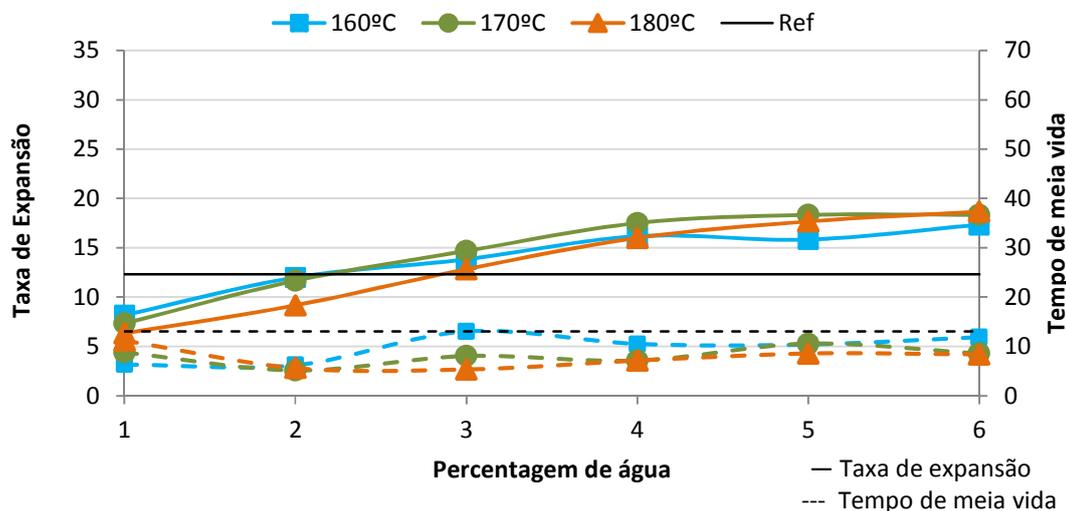


Figura 4.3 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida do betume 50/70

Pode-se observar que nenhuma linha do gráfico satisfaz o requisito do tempo de meia-vida, a qualquer temperatura e a qualquer percentagem de água, o que leva a concluir que é necessário o uso de um aditivo estabilizador da espuma.

Relativamente à taxa de expansão quase todas as percentagens de água e diferentes temperaturas cumprem o requisito mínimo. A partir dos 3% de água todas as temperaturas cumprem os mínimos.

O índice de expansão (Figura 4.4) às temperaturas de 160 e 170°C anda perto do valor mínimo de 180 para percentagem de 2% de água, para as percentagens de água superiores, o

índice de expansão é também superior ao mínimo. Para a temperatura de 180°C só a partir dos 3% de água é que o valor de FI é superior a 180.

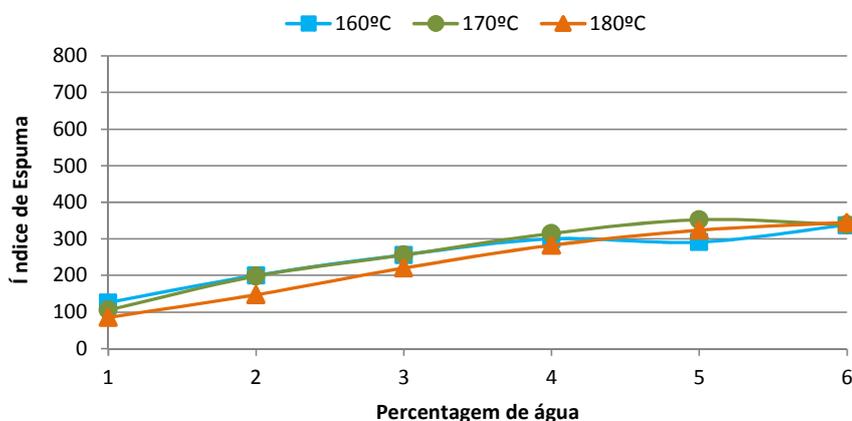


Figura 4.4 – Índice de espuma do betume 50/70

O mesmo estudo foi feito para o betume 70/100, às temperaturas de 150°C, 160°C e 170°C, e percentagens de água de 1 a 6%. Na Figura 4.5 estão os resultados das injeções de betume-espuma efetuadas, sendo usados os mesmos requisitos mínimos para taxa de expansão e tempo de meia-vida.

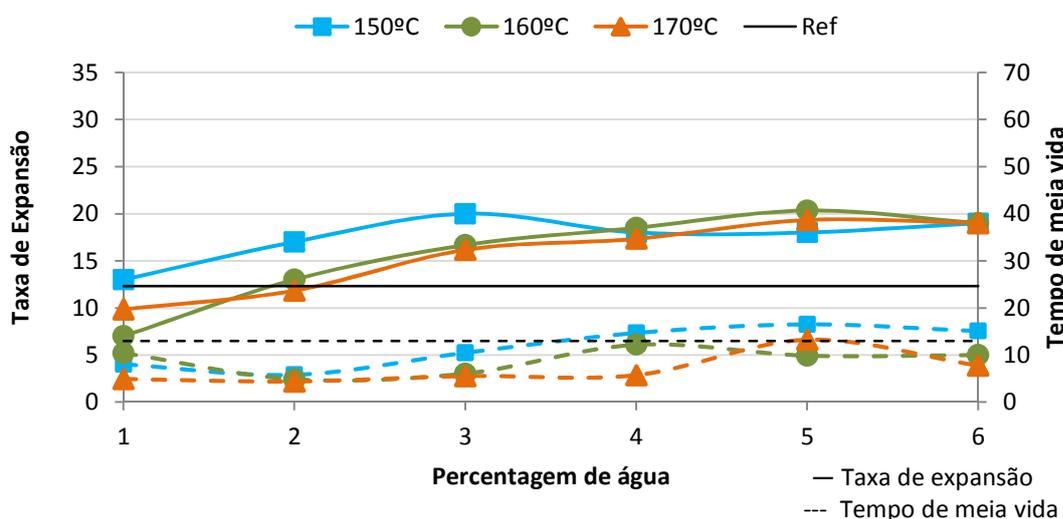


Figura 4.5 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida do betume 70/100

Da Figura 4.5 pode observar-se uma melhoria em relação à Figura 4.3. Existem mais partes da taxa de expansão que cumprem os requisitos assim como uma parte do tempo de meia vida. À temperatura de 150°C é sempre cumprido o mínimo para a taxa de expansão e para percentagens de água acima de 4% também é cumprido o tempo de meia vida. O tempo de meia vida não é cumprido para as restantes temperaturas. A taxa de expansão cumpre para percentagens de água acima dos 2%.

No que respeita ao índice de espuma (Figura 4.6) para todas as temperaturas cumpre o mínimo de 180 a partir de 2% de água. Sendo que a curva mais próxima da teórica é a de 160°C. Ao analisar as restantes curvas (150 e 170°C) verifica-se que o ponto ótimo será de 5%, valor que é elevado para a produção de misturas betuminosas pois prejudicará a sensibilidade das misturas.

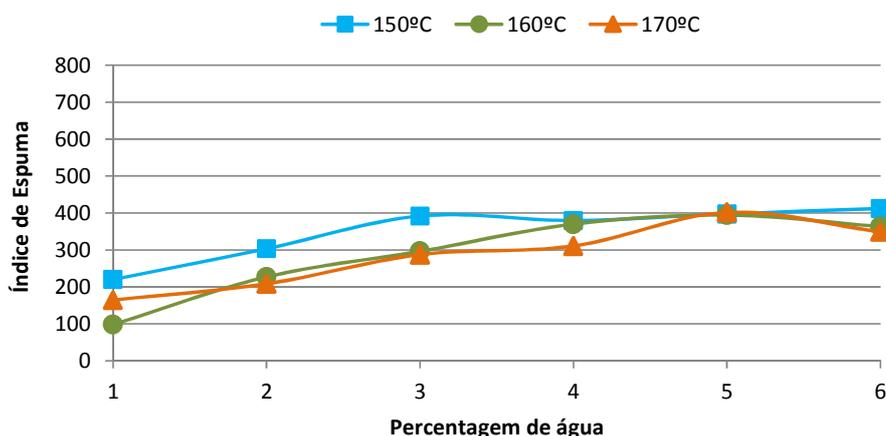


Figura 4.6 – Índice de espuma do betume 70/100

Finalmente o betume 160/220 que também foi alvo do mesmo estudo com a diferença nas temperaturas, são estas de 140°C, 150°C e 160°C. Na Figura 4.7 estão representados os dados obtidos da taxa de expansão e tempo de meia vida.

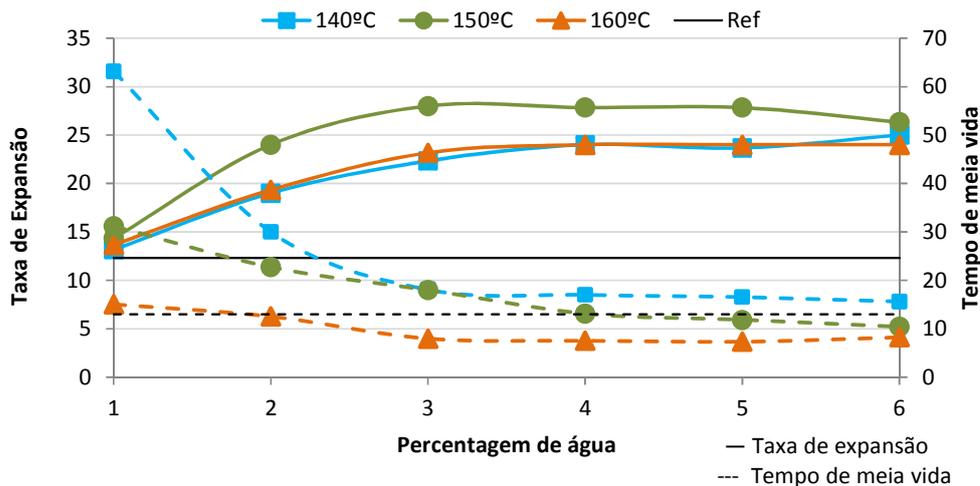


Figura 4.7 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida do betume 160/220

Pela observação da Figura 4.7 pode reter-se que todas as temperaturas cumprem o exigido para a taxa de expansão. Relativamente ao tempo de meia-vida a temperatura de 160°C apenas cumpre para uma percentagem de água (1%), para a temperatura de 140°C, os valores estão sempre acima do requisito, quanto à temperatura de 150°C cumpre para as percentagens de água de 1 a 4%.

No que respeita ao índice de espuma (Figura 4.8) e segundo a curva dos 150°C a percentagem de água ótima seria de 2 ou 3% (observando o topo da curva). As restantes curvas não seguem um desenvolvimento teórico previsto.

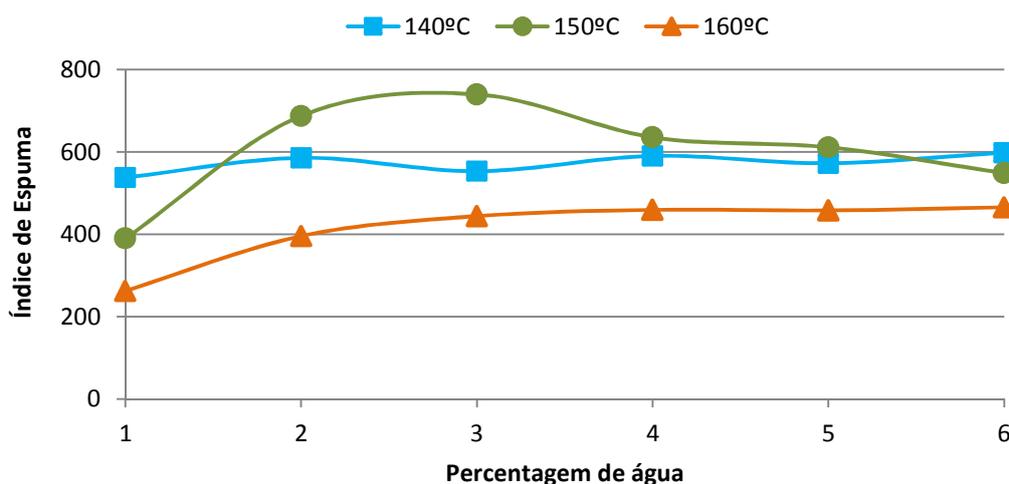


Figura 4.8 – Índice de espuma do betume 160/220

Depois deste estudo inicial pegou-se nos 3 tipos de betumes e para uma mesma temperatura de 160°C juntaram-se no mesmo gráfico (Figura 4.9), tendo melhor perceção para a mesma temperatura, da taxa de expansão e tempo de meia-vida a várias percentagens de água.

Como a análise é feita para a mesma temperatura importa referir que as viscosidades dos betumes são diferentes, no caso do betume 50/70 o valor é de 145,3 cP, o betume 70/100 o valor é de 112,5 cP e o do betume 160/220 é de 69,9 cP.

Pela análise da Figura 4.9 e Figura 4.10 (índice de espuma) é possível concluir que o betume mais mole tem melhores resultados a nível da taxa de expansão e do índice de espuma. Este resultado pode dever-se à sua menor viscosidade em relação aos outros betumes, fazendo com que se expanda mais facilmente. Em relação ao tempo de meia-vida nenhum betume cumpre o exigido contudo o betume que apresenta melhores resultados é o 50/70 (mais duro), isto pode dever-se ao facto de o betume ter maior viscosidade o que dificulta o betume-espuma de voltar à sua posição inicial.

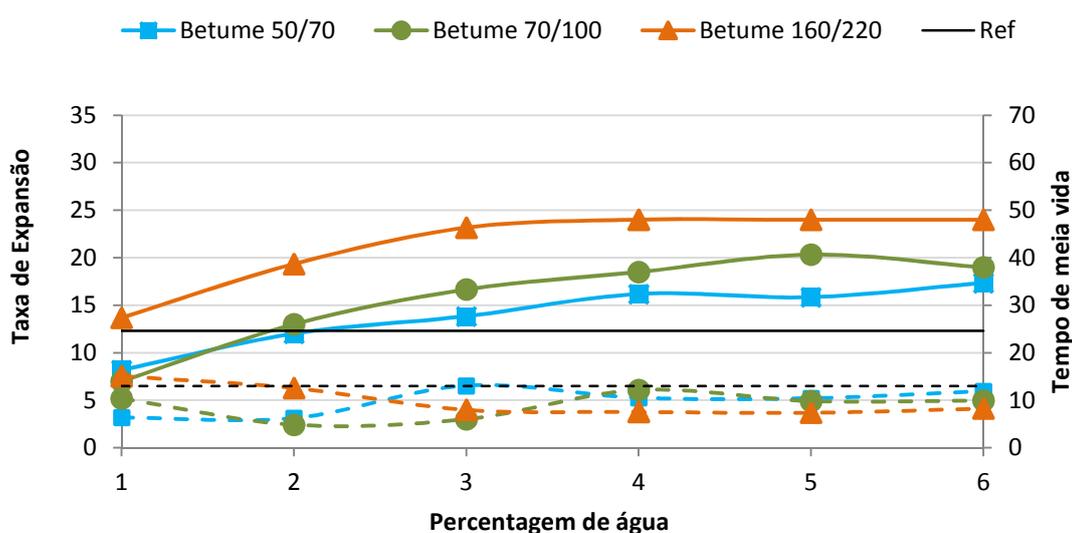


Figura 4.9 – Análise dos resultados para uma temperatura de 160 °C para os 3 betumes

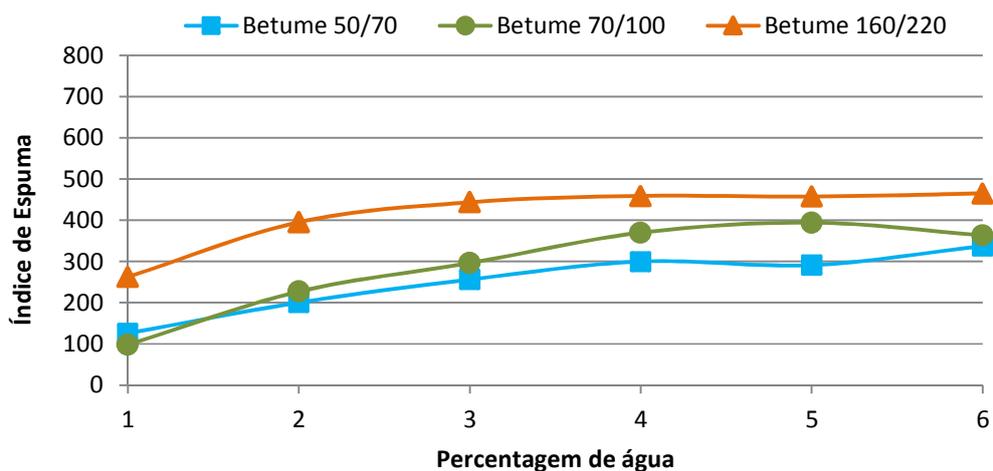


Figura 4.10 – Índice de espuma dos 3 betumes à temperatura de 160 °C

Analisando agora os 3 tipos de betume para uma viscosidade idêntica (Figura 4.11 e Figura 4.12), conseqüentemente para diferentes temperaturas, e usando como referência a viscosidade de 100cP, o betume 50/70 está à temperatura de 170°C, o 70/100 à temperatura de 160°C e o 160/220 à temperatura de 150°C.

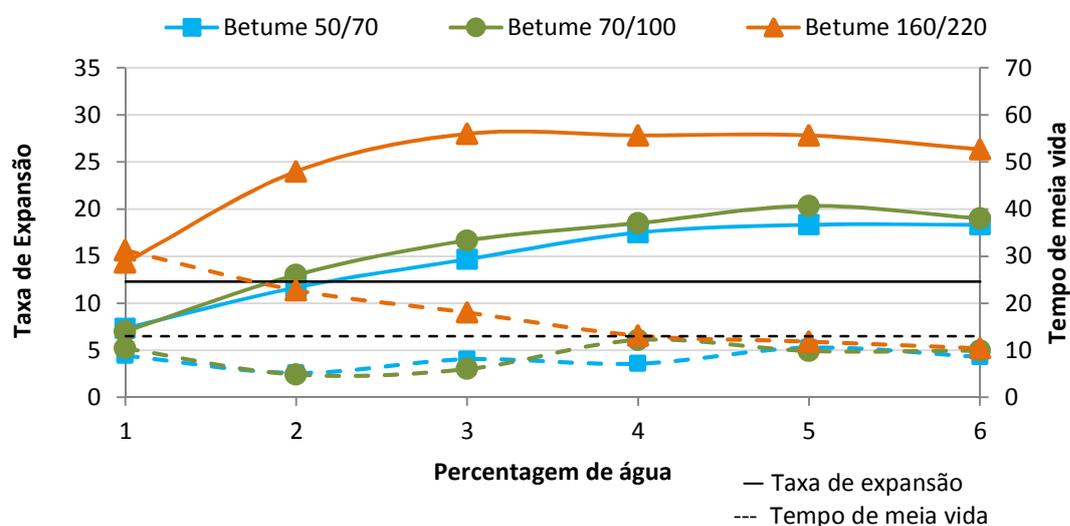


Figura 4.11 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida para viscosidades idênticas (100cP)

Os betumes apresentam um comportamento sequencial de acordo com o grau de penetração, o betume mais mole está sempre acima dos restantes e o 70/100 no intermédio, isto relativamente à taxa de expansão. Quanto ao tempo de meia vida não se observa um comportamento linear.

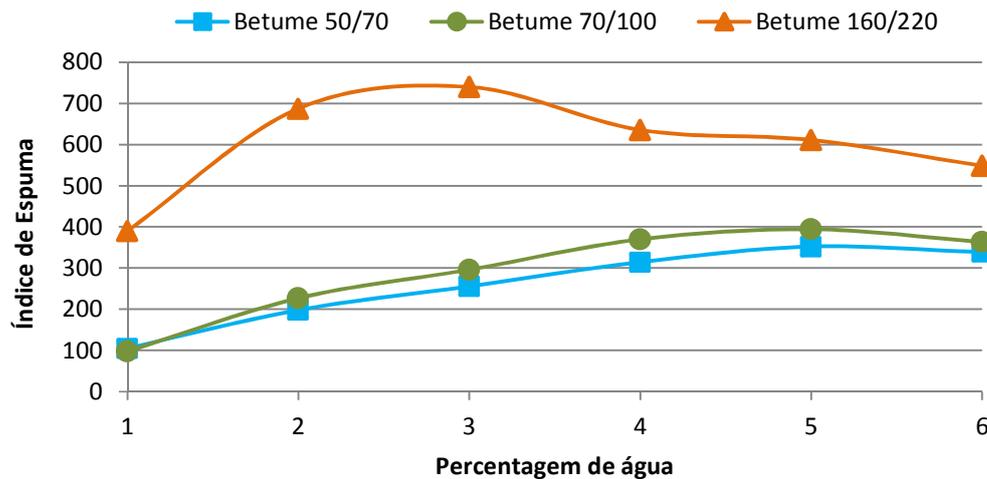


Figura 4.12 – Índice de espuma para viscosidades idênticas

Deste estudo inicial com betume-espuma optou-se por utilizar o betume 50/70 por ser o betume convencional e que é mais utilizado nas misturas betuminosas a quente. Contudo nunca são satisfeitos os requisitos para o tempo de meia vida, o que levou a pensar-se na utilização de um aditivo para ajudar a aumentar o tempo de meia vida, e assim satisfazer os critérios mínimos.

Conclui-se também que o uso de 5 e 6% de água é excessivo para as misturas betuminosas, apresentando sempre resultados inferiores, de tempo de meia vida e taxa de expansão, em relação às restantes percentagens. O uso de 1% de água também não vai ser continuado no estudo uma vez que não produz resultados satisfatórios em relação ao tempo de meia vida.

Quanto às temperaturas a utilizar optou-se pelos 170°C e pelos 160°C. Os 170°C pois é a temperatura a que a viscosidade do betume 50/70 ronda o valor de 100cP, e os 160°C porque se pretende testar temperaturas de produção mais baixas.

4.1.4 Betume-espuma com aditivo

O betume a utilizar é então o 50/70 e o aditivo a utilizar é um produto comercial desenvolvido para o efeito, o TEGO[®]. A empresa que vende o aditivo recomenda o uso de 0,25% em relação à quantidade de betume. De forma a aferir o efeito que diferentes dosagens de aditivo terão no betume-espuma considerou-se o uso de 3 percentagens de modo a aferir qual a

melhor para este estudo, as percentagens de aditivo são 0,1, 0,2 e 0,3%. Nesta avaliação utilizaram-se também as percentagens de água de 2, 3 e 4%.

Para 0,1% de aditivo (Figura 4.13 e Figura 4.14) todos os critérios são cumpridos. Para a temperatura de 170 °C é possível determinar um valor ótimo para a percentagem de água (3%) uma vez que a curva da taxa de expansão apresenta o valor máximo para essa percentagem. Para a temperatura de 160 °C já não é possível uma vez que a curva não chega a inverter a tendência de crescimento dentro das percentagens de água estudadas. Relativamente ao índice de espuma (FI) as duas temperaturas satisfazem largamente o especificado.

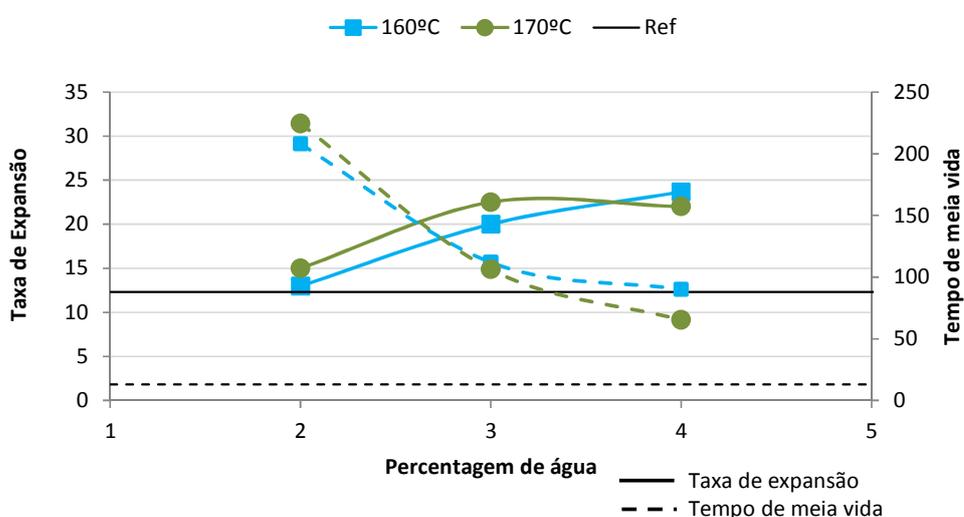


Figura 4.13 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida para 0,1% de aditivo

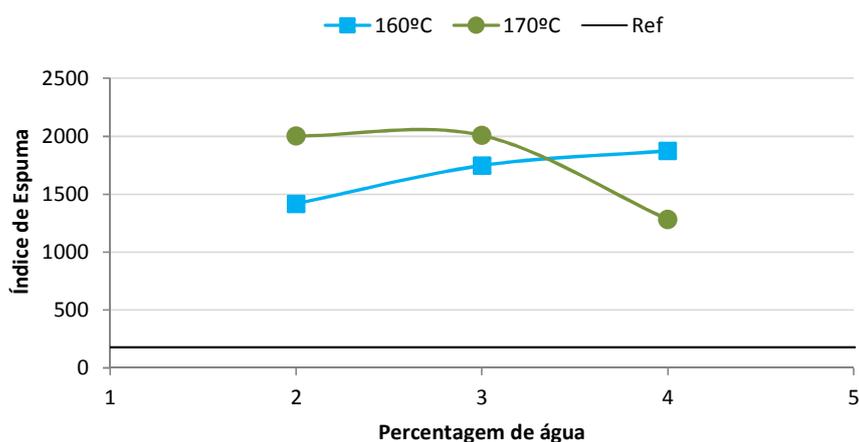


Figura 4.14 – Índice de espuma para 0,1% de aditivo

Para 0,2% de aditivo (Figura 4.15 e Figura 4.16), e usando as mesmas temperaturas todos os requisitos exigidos são cumpridos para a taxa de expansão e o tempo de meia-vida. Analisando os resultados entre as temperaturas verifica-se que para 3% de água, a curva dos 170 °C tem maior valor de taxa de expansão. Relativamente ao tempo de meia-vida acontece o contrário, para 3% de água, a curva dos 160 °C tem maior valor de tempo de meia-vida do que a curva da temperatura de 170 °C.

Os valores do índice de espuma são sempre cumpridos, sendo superiores para a temperatura de 170°C.

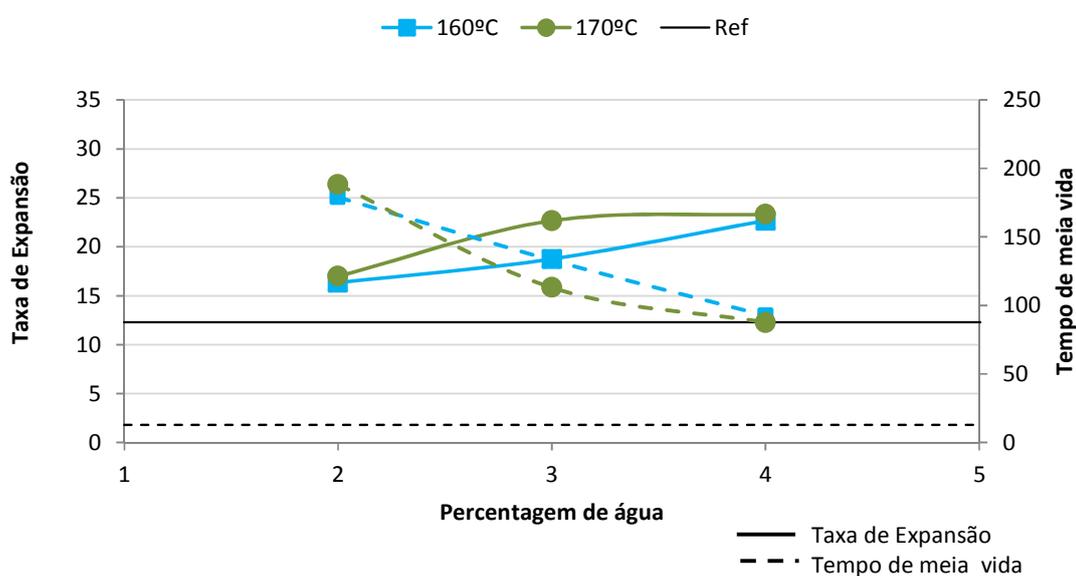


Figura 4.15 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida para 0,2% de aditivo

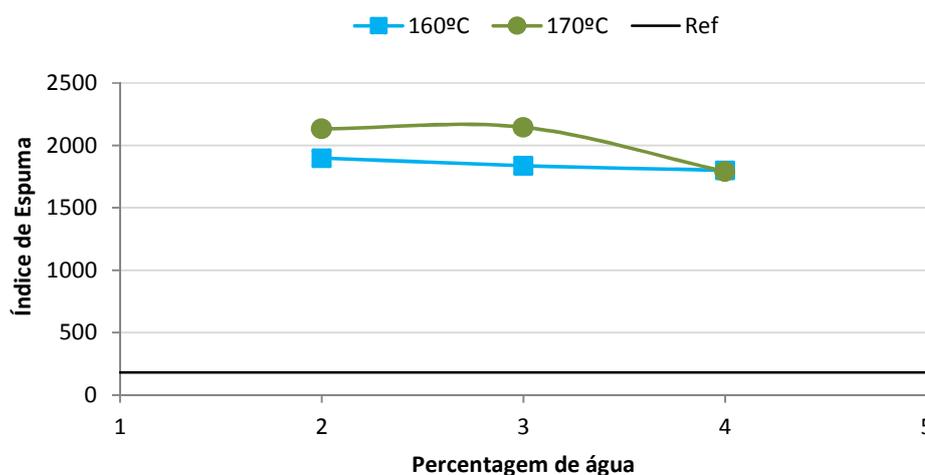


Figura 4.16 – Índice de espuma para 0,2% de aditivo

Por último o uso de 0,3% de aditivo no betume 50/70 produz os resultados obtidos na Figura 4.17 e Figura 4.18. Para as duas temperaturas a taxa de expansão é sempre cumprida, sendo maior para a temperatura de 170 °C. O tempo de meia-vida também é sempre cumprido, e é maior para a temperatura de 160 °C para 3 e 4% de água.

Relativamente ao índice de espuma os valores mínimos são cumpridos, de notar que a curva dos 170 °C não percorre um caminho esperado em termos teóricos, pois diminui o seu valor consoante se aumenta a percentagem de água, em vez que aumentar.

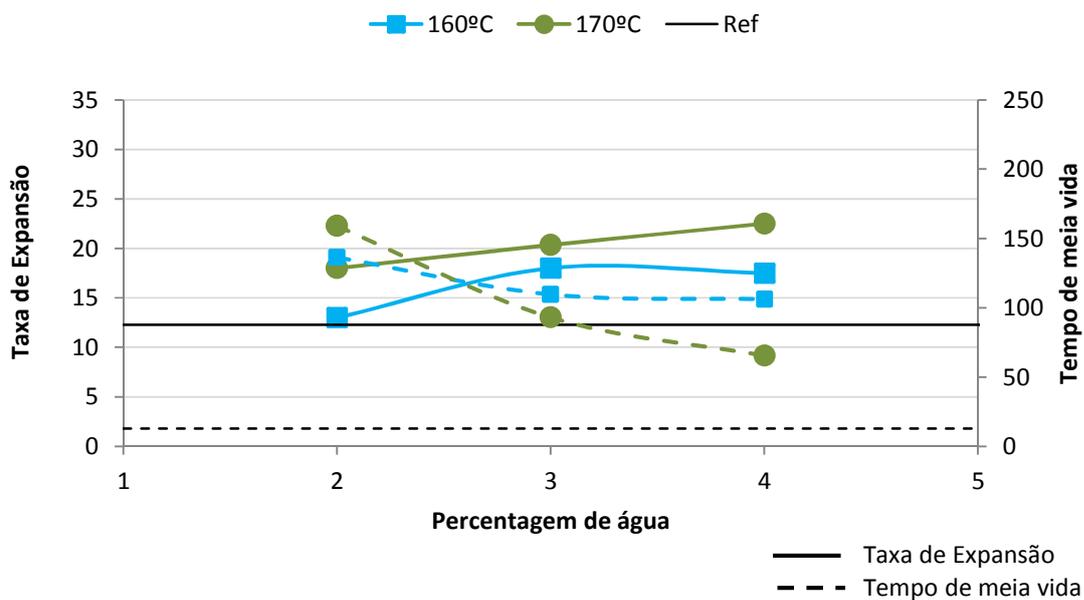


Figura 4.17 – Taxa de expansão e tempo de meia-vida para 0,3% de aditivo

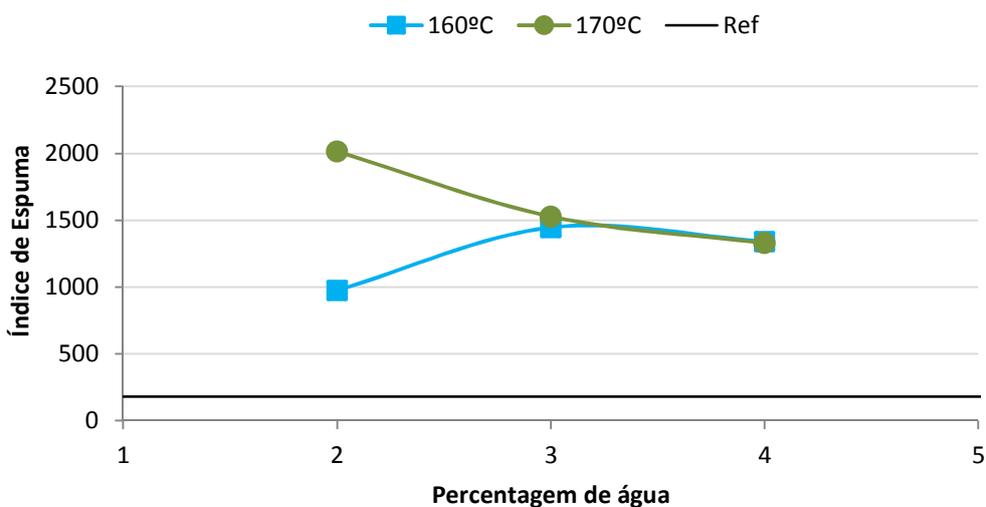


Figura 4.18 – Índice de espuma para 0,2% de aditivo

Deste estudo inicial com o aditivo percebe-se que a utilização deste altera em muito o tempo de meia-vida do betume, para as mesmas temperaturas e percentagens de água. Fazendo agora uma análise para cada temperatura, e juntando as 3 percentagens de aditivo numa mesma figura a 160°C (Figura 4.19).

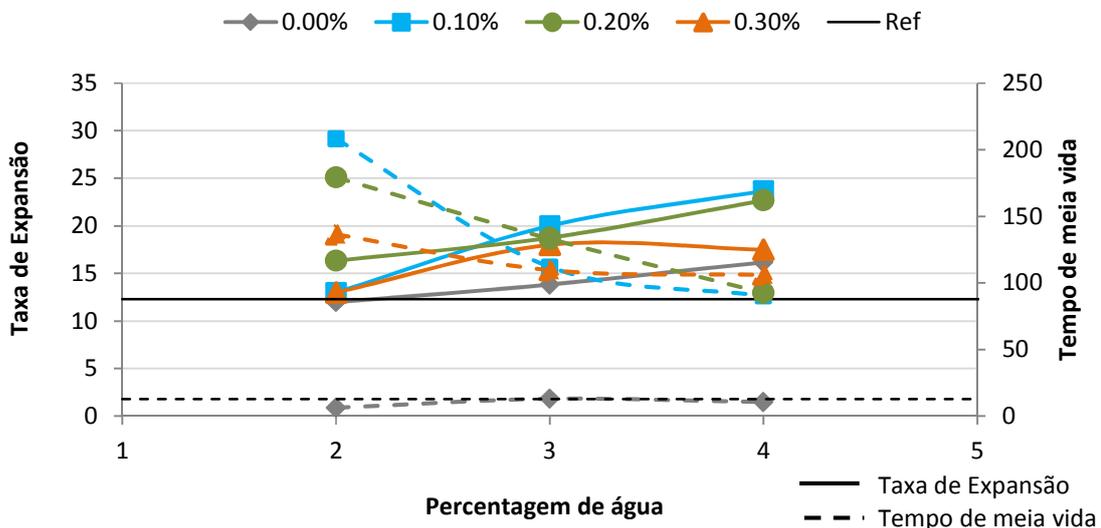


Figura 4.19 – Taxa de expansão para 0,1, 0,2 e 0,3% de aditivo com betume a 160°C

Percebe-se pela análise da Figura 4.19 que a taxa de expansão é maior para 0,1% de aditivo e que o tempo de meia-vida é maior entre duas percentagens de aditivo (0,1 e 0,2% de aditivo).

Fazendo agora a análise ao índice de espuma para as 3 percentagens de aditivo (Figura 4.20), verifica-se que a percentagem de 0,2% de aditivo é a que apresenta melhores resultados para as percentagens de 2 e 3% de água. Denota-se claramente um aumento do índice de espuma comparando os resultados do betume-espuma sem aditivo, que anda perto dos valores de referência, com o betume-espuma produzido com recurso ao uso do aditivo, em que os valores aumentam para valores da ordem de 1500 (aproximadamente dez vezes superiores).

Fazendo o mesmo tipo de análise, mas desta vez para 170°C (Figura 4.21) é possível verificar uma melhoria significativa com a adição do aditivo, pois tanto a taxa de expansão como o tempo de meia-vida têm aumentos significativos em relação ao uso do betume sem aditivo. Pode concluir-se que quer para a taxa de expansão, quer para o tempo de meia-vida a percentagem ideal de aditivo é de 0,2%, sendo que a percentagem de 0,1% tem valores muito próximos aos de 0,2%.

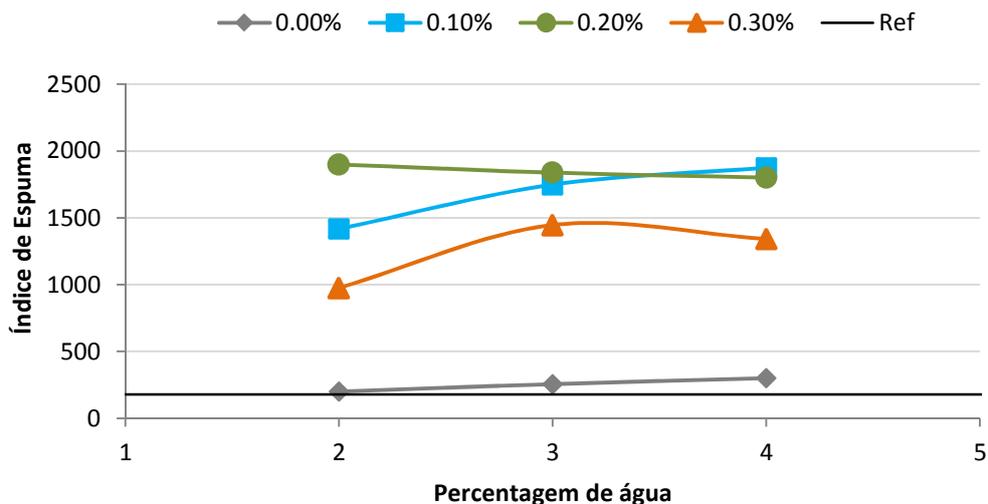


Figura 4.20 – Índice de espuma para 0,1, 0,2 e 0,3% de aditivo com betume a 160°C

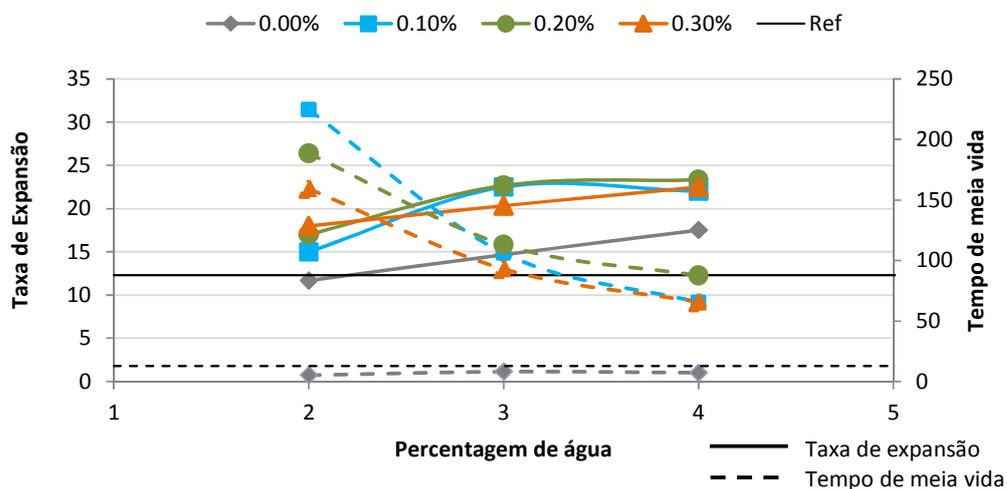


Figura 4.21 – Taxa de expansão para 0,1, 0,2 e 0,3% de aditivo com betume a 170°C

Para o índice de espuma (Figura 4.22) os valores mais altos são para a percentagem de 0,2% de aditivo, sendo que para as percentagens de 2 e 3% de água o valor é muito parecido. A curva de 0,1% de aditivo segue a mesma tendência da curva 0,2% embora ligeiramente abaixo.

Como o objetivo deste estudo é a produção de misturas betuminosas a temperaturas mais baixas, optou-se pelo uso do betume a uma temperatura de 160°C. Esta decisão tem por base a pouca diferença de temperaturas do betume a 160°C e a 170°C, um minuto após a expansão (ver Tabela 4.4) e uma vez que o betume que está a ser utilizado (50/70) é normalmente usado a estas temperaturas para a produção de misturas convencionais.

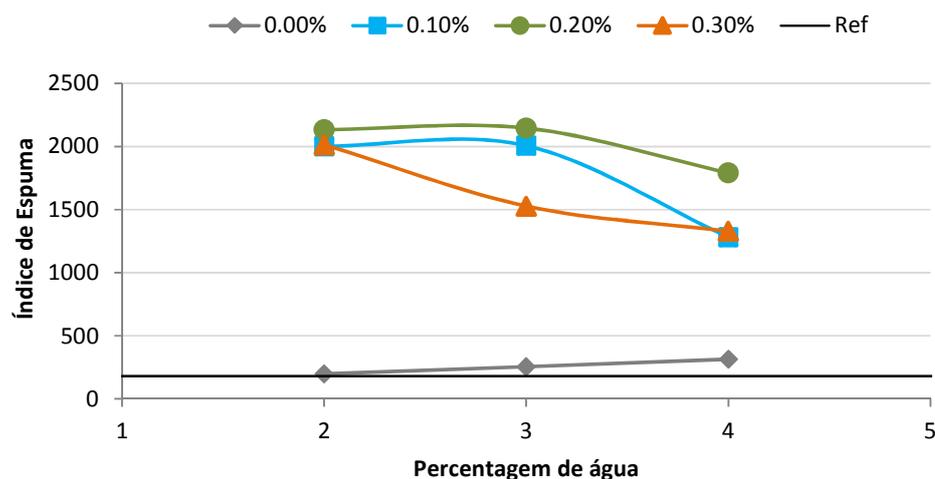


Figura 4.22 – Índice de espuma para 0,1, 0,2 e 0,3% de aditivo com betume a 170°C

Tabela 4.4 – Temperaturas do betume-espuma 1 minuto após a expansão

| Percentagem de água | Amostra | Temperatura superficial do betume após 1 minuto (°C) | | | | | |
|---------------------|---------|--|--------|--------------|--------|--------------|--------|
| | | 0.1% ADITIVO | | 0.2% ADITIVO | | 0.3% ADITIVO | |
| | | 160 °C | 170 °C | 160 °C | 170 °C | 160 °C | 170 °C |
| 2 | a | 89.7 | 91.8 | 91.1 | 94.5 | 92.4 | 90.0 |
| | b | 93.2 | 89.8 | 91.7 | 91.0 | 93.1 | 89.6 |
| | c | 91.9 | 90.3 | 94.0 | - | 92.0 | 88.5 |
| 3 | a | 92.7 | 89.1 | 88.1 | 90.1 | 92.5 | 87.5 |
| | b | 92.1 | 94.4 | 90.5 | 95.2 | 94.3 | 90.3 |
| | c | 97.3 | 97.0 | 93.1 | 91.9 | 94.5 | 87.4 |
| 4 | a | 96.5 | 89.7 | 88.6 | 86.6 | 88.1 | 91.6 |
| | b | 95.9 | 95.0 | 88.8 | 86.9 | 91.7 | 93.5 |
| | c | 90.1 | 94.0 | 88.8 | 88.4 | 90.4 | 94.4 |

Devido à necessidade de determinar as temperaturas a que serão produzidas as misturas betuminosas, numa primeira fase realizaram-se ensaios para a avaliação da compactabilidade, onde o betume estava a uma temperatura de 160°C. Para o betume espumar foi usado 0,1% de aditivo para uma quantidade de 3% de água (foi a percentagem de água que obteve maioritariamente melhores resultados). Optou-se pelo uso de 0,1% de aditivo uma vez que a diferença na taxa de expansão e tempo de meia vida não é significativa quando comparada com o uso de 0,2%, o que implica usar o dobro do aditivo, com as consequências económicas associadas.

4.2 Reologia

Para determinar as propriedades reológicas dos betumes para uma gama de temperaturas de 19°C a 90°C utilizou-se o reómetro dinâmico de corte (prato pequeno de 19°C a 40°C, prato grande de 46°C a 90°C). Neste ensaio foram usados dois betumes, o 50/70 usado para a mistura convencional e o 50/70 com 0,1% de aditivo usado na mistura produzida com betume-espuma. Pretende-se com este ensaio verificar se a adição do aditivo ao betume não altera as suas propriedades.

A viscosidade é uma das propriedades que se podem determinar através do reómetro, para temperaturas superiores a viscosidade é determinada pelo viscosímetro rotacional de Brookfield. Com a junção dos dois é possível desenhar um gráfico como o representado abaixo (Figura 4.23), que engloba a viscosidade para temperaturas de 19°C a 180°C. Pela observação do gráfico pode-se concluir que a viscosidade não é alterada com a adição de aditivo ao betume.

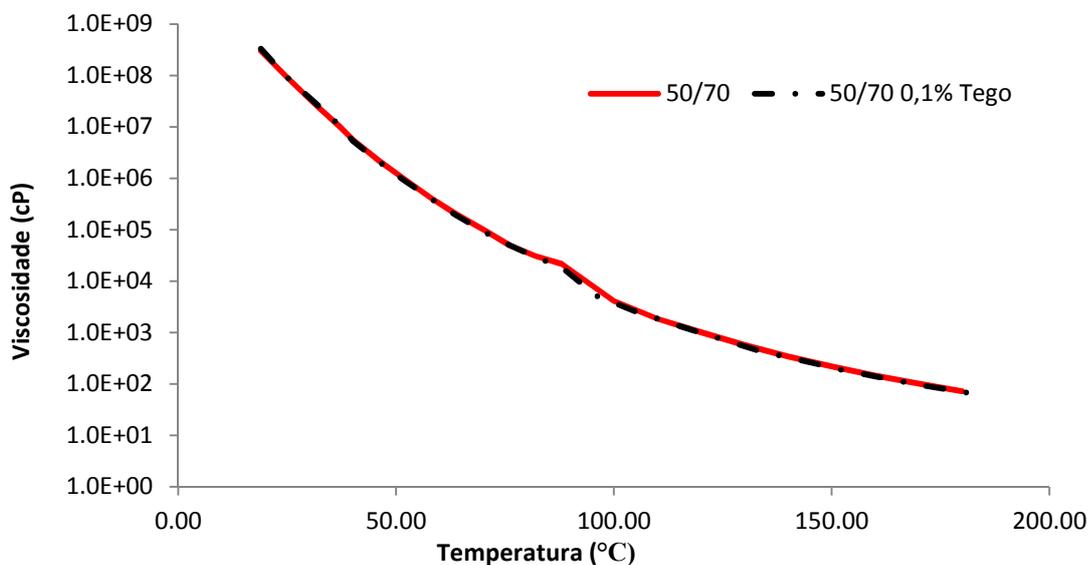


Figura 4.23 – Viscosidade do betume 50/70 com e sem aditivo

O módulo de corte complexo (G^*) é outra propriedade que o reómetro determina, assim como o ângulo de fase (δ) e o valor que define o grau PG dos betumes ($G^*/\text{sen}\delta$). Pelas figuras abaixo (Figura 4.24 e Figura 4.25) pode ver-se que o aditivo não alterou significativamente o módulo de corte complexo e o ângulo de fase do betume. De referir que quase não houve

alteração no módulo de corte. Quanto à Figura 4.26, para a determinação do grau PG (Performance Grade) do betume utilizou-se como referência o valor de $G^*/\text{sen}\delta$ de 1,0 kPa. Isto é, se o valor de $G^*/\text{sen}\delta$ for superior a 1,0 kPa, o valor de PG é o valor da temperatura a que está associado esse valor de $G^*/\text{sen}\delta$. Basta que o valor seja de 0,99 kPa que já não é verificado e passa para o valor seguinte. O grau PG para os dois betumes é o mesmo, sendo PG64. Os dois betumes têm valores superiores ao exigido em Portugal (PG64) (Fonseca *et al.*, 2011).

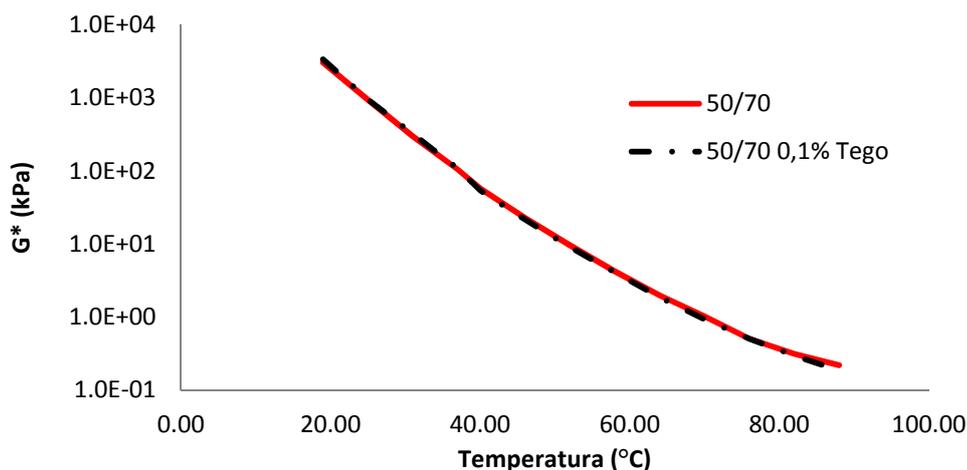


Figura 4.24 – Módulo de corte complexo do betume 50/70 com e sem aditivo

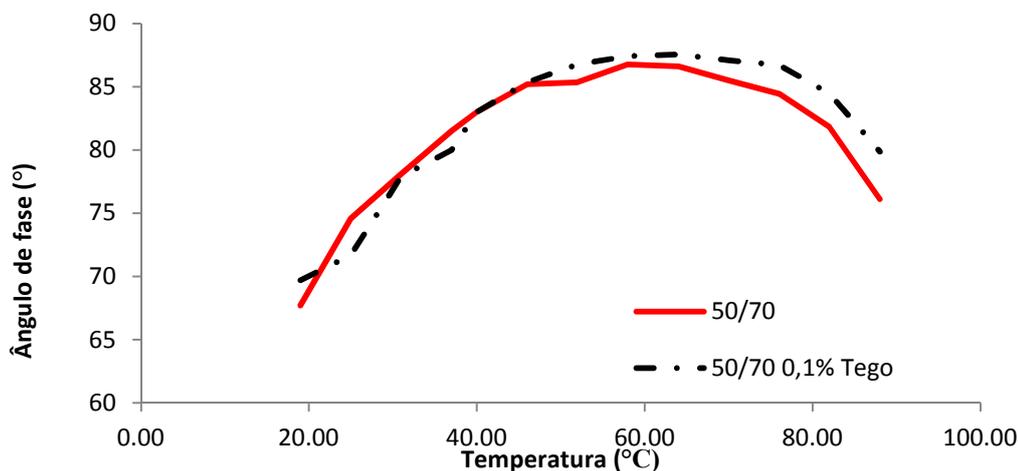


Figura 4.25 – Ângulo de fase para o betume 50/70 com e sem aditivo

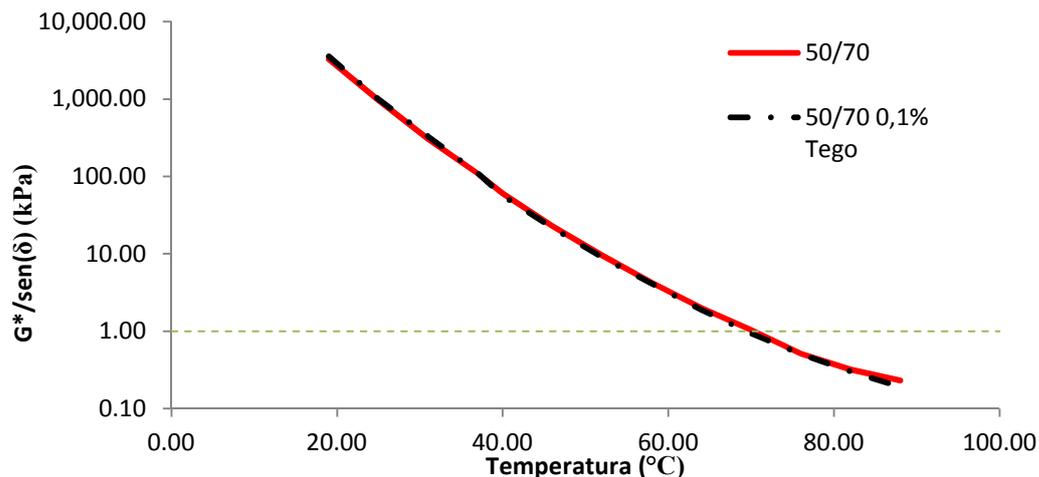


Figura 4.26 – Grau PG do betume 50/70 com e sem aditivo

4.3 Fabrico e compactação da mistura

Para o fabrico da mistura betuminosa com betume-espuma optou-se pela produção a 3 temperaturas, 110°C, 130°C e 150°C. Optou-se por duas temperaturas baixas uma vez que o objetivo desta dissertação é o fabrico de misturas betuminosas temperadas. Para que exista uma mistura de referência foi também produzida uma mistura convencional a quente (temperatura dos agregados a 150°C e temperatura do betume a 160°C).

Nas Secções 3.3.3 e 3.3.4 foi explicado o modo de fabrico das misturas betuminosas, tanto para a convencional como para a mistura com betume-espuma. Como é importante que as temperaturas estejam dentro do previsto foram realizados controlos de temperatura à medida que foram produzidas as misturas e na compactação destas (Tabela 4.5), a temperatura do betume é de 160°C. Foi também feita a pesagem do betume para controlo da sua percentagem na mistura betuminosa. As medições de temperatura dos agregados foram feitas quando estes foram colocados na misturadora depois de uma pré-mistura. Depois dos agregados estarem na misturadora é adicionado betume e é feita a mistura durante 2 minutos, sendo que ao fim do primeiro minuto é feita uma verificação da temperatura da mistura. A temperatura de compactação é controlada logo depois de a mistura ser colocada no molde para compactação.

Tabela 4.5 – Controlo das temperaturas de mistura, agregados e compactação

| Provetes | Betume | | % de betume | | Temperatura (°C) | | | Média |
|----------|------------|-------|-------------|------|------------------|---------|---------|-------|
| | Pretendida | Real | Pretendida | Real | Agregado | Mistura | Compact | |
| BC150_1 | 408 | 408,5 | 4,8% | 4,8% | 148 | 150 | 133 | 134 |
| BC150_2 | | | | | | | 135 | |
| BC150_3 | | | | | | | 133 | |
| BE150_1 | 503 | 503 | 4,8% | 4,8% | 158 | 145 | 134 | 127 |
| BE150_2 | | | | | | | 123 | |
| BE150_3 | | | | | | | 125 | |
| BE130_1 | 503 | 534,5 | 4,8% | 5,1% | 137 | 129 | 122 | 119 |
| BE130_2 | | | | | | | 119 | |
| BE130_3 | | | | | | | 116 | |
| BE110_1 | 503 | 505,5 | 4,8% | 4,8% | 120 | 116 | 112 | 109 |
| BE110_2 | | | | | | | 109 | |
| BE110_3 | | | | | | | 106 | |

Quanto à pesagem do betume tiveram que ser usados dois métodos, um para a mistura convencional e outro para a mistura com betume-espuma. Para a mistura convencional a forma de pesagem consiste em colocar a lata com o betume na balança e colocá-la a zero, depois vai-se adicionando betume na mistura e vê-se qual o peso que a lata tem a menos. Para o betume-espuma a forma de pesagem do betume já foi referida na Secção 3.3.2.

Pela análise da Tabela 4.5 pode ver-se que as temperaturas estipuladas para os agregados, para a mistura e para a compactação são as espectáveis. A percentagem de betume para a produção de espuma também é um fator difícil de controlar uma vez que o seu ajuste, na máquina que o produz, é realizado manualmente e pouco preciso. No entanto obtiveram-se valores próximos do esperado.

4.4 Resistência à tração indireta

Depois de produzidos os provetes no compactador de Marshall podem ser então avaliadas as suas baridades (BMT, baridade aparente e volume de vazios), mencionadas nas Secções 3.3.4., 3.3.5. e 3.3.6. Os valores das baridades e volume de vazios encontram-se na Tabela 4.6. Os resultados para o volume de vazios são favoráveis ao que se pretendia para as misturas betuminosas, apresentando valores menores para o betume convencional e de seguida para o betume-espuma a 150°C, aumentando o seu valor quanto menor a temperatura da mistura.

Tabela 4.6 – Valores de BMT, baridade aparente e volume de vazios

| Provetes | Baparente (kg/m ³) | BMT (kg/m ³) | Volume Vazios (%) |
|----------|--------------------------------|--------------------------|-------------------|
| BC150_1 | 2332 | 2418 | 2,5% |
| BC150_2 | 2348 | | 2,9% |
| BC150_3 | 2329 | | 2,7% |
| BE150_1 | 2295 | 2407 | 3,1% |
| BE150_2 | 2304 | | 3,0% |
| BE150_3 | 2296 | | 2,9% |
| BE130_1 | 2336 | 2416 | 3,3% |
| BE130_2 | 2332 | | 3,4% |
| BE130_3 | 2325 | | 3,8% |
| BE110_1 | 2323 | 2423 | 4,1% |
| BE110_2 | 2330 | | 3,9% |
| BE110_3 | 2313 | | 4,5% |

Os valores da tração indireta e da deformação de cada provete encontram-se na Tabela 4.7. Tendo por referência o valor da tração indireta dos provetes com betume convencional (BC150), os valores dos provetes com betume-espuma à temperatura de 150°C obtiveram valores próximos, apesar de inferiores aos convencionais.

Tabela 4.7 – Tração indireta e deformação dos provetes

| Provetes | Tração indireta (kPa) | | Deformação (mm) | |
|----------|-----------------------|---------|-----------------|-------|
| | Resistência | Média | | Média |
| BC150_1 | 970,84 | 1083,01 | 1,62 | 1,64 |
| BC150_2 | 1106,29 | | 1,65 | |
| BC150_3 | 1171,89 | | 1,66 | |
| BE150_1 | 1091,94 | 1075,2 | 1,65 | 1,73 |
| BE150_2 | 1041,10 | | 1,71 | |
| BE150_3 | 1092,57 | | 1,82 | |
| BE130_1 | 943,83 | 959,86 | 1,61 | 1,77 |
| BE130_2 | 973,40 | | 1,93 | |
| BE130_3 | 962,34 | | 1,77 | |
| BE110_1 | 896,09 | 882,33 | 1,81 | 1,79 |
| BE110_2 | 905,20 | | 1,71 | |
| BE110_3 | 845,69 | | 1,86 | |

Na Figura 4.27 apresentam-se os valores de tração indireta e volume de vazios graficamente. Tendo melhor percepção da informação apresentada nas tabelas acima. Denota-se que à medida que se baixa a temperatura dos provetes, a resistência à tração indireta também vai diminuindo

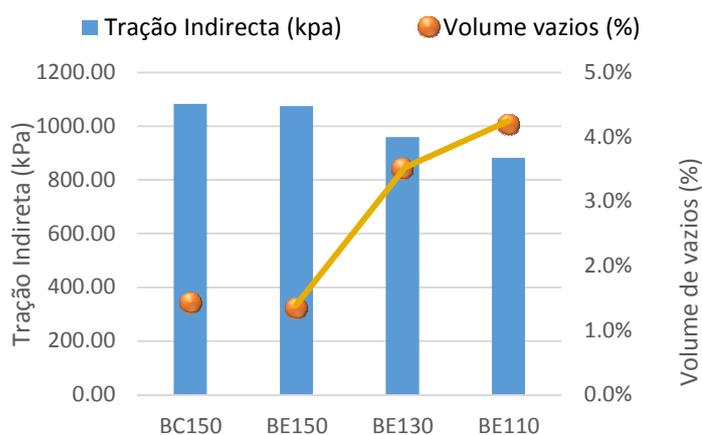


Figura 4.27 – Valores da tração indireta e volume de vazios

4.5 Compactabilidade

Durante a produção dos provetes para compactabilidade (200 pancadas num dos lados), determinou-se o adensamento e o volume de vazios dos provetes. O adensamento dos provetes está representado na Figura 4.28, e pode-se concluir pela sua análise que os provetes com melhor maior adensamento são os de betume convencional, seguindo-se os de betume-espuma a 150°C, depois os de betume-espuma a 110°C e por fim a 130°C. Seria de esperar que os provetes com betume-espuma produzidos a 130°C tivessem maior adensamento do que os produzidos a 110°C, o que não se verificou. Sendo que o adensamento dos provetes de betume-espuma e betume convencional andam muito próximos.

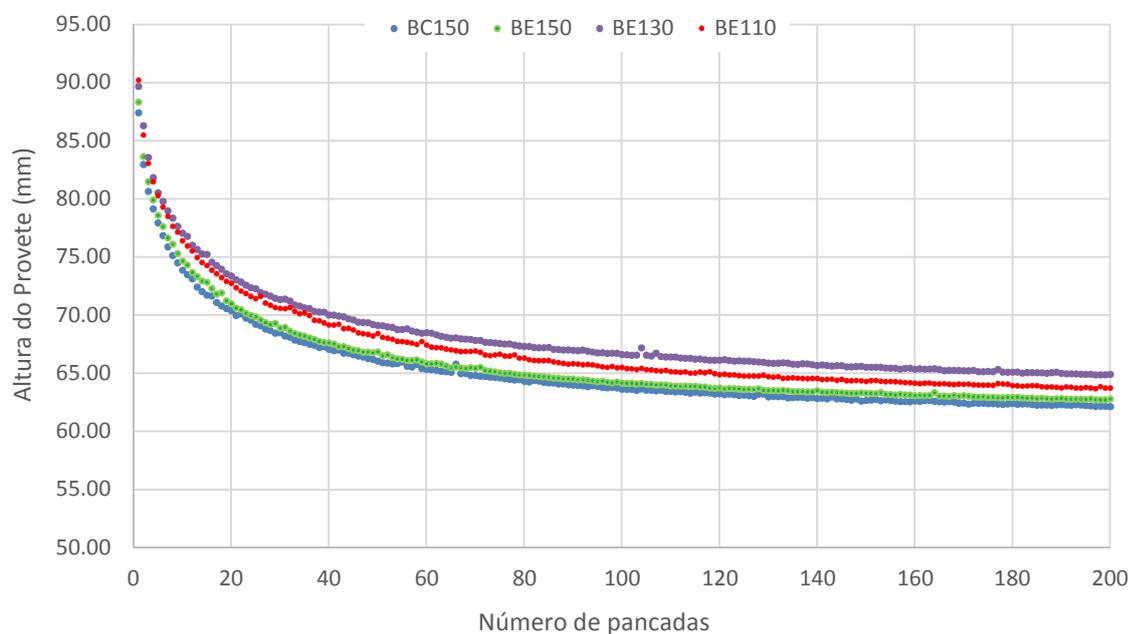


Figura 4.28 – Adensamento dos provetes

Quanto ao volume de vazios medido (Figura 4.29) acontece a mesma situação que no adensamento, tendo os provetes de betume convencional maior desempenho do que os de betume-espuma, seguindo-se os provetes de betume-espuma produzidos a 150°C. De referir que os valores de mistura convencional e da mistura com betume-espuma a 150°C são muito próximos.

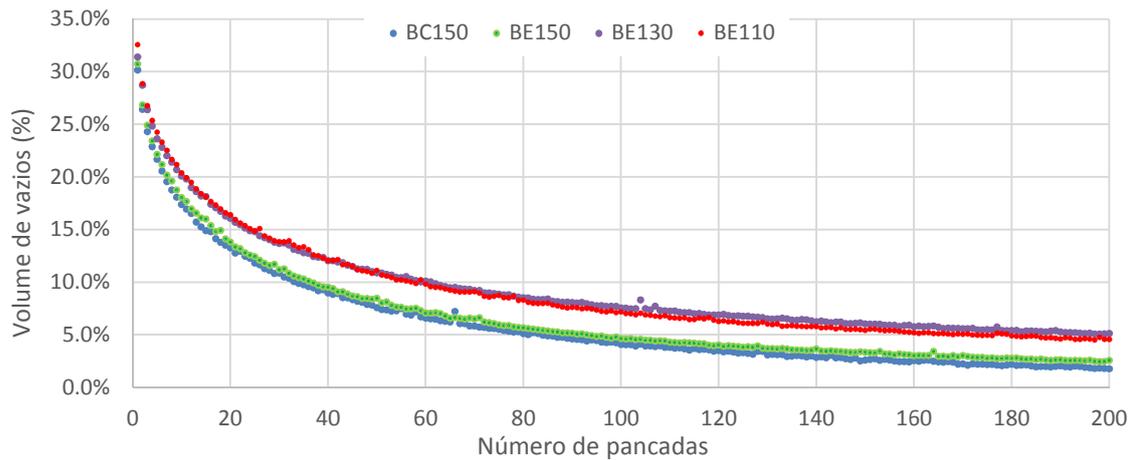


Figura 4.29 – Volume de vazios dos provetes

Como conclusões finais e tendo agora que selecionar uma temperatura de produção de betume-espuma para a continuação do estudo desta dissertação, ao pretender uma mistura betuminosa temperada a escolha da temperatura recairá para 130°C ou 110°C. Embora a temperatura de 150°C para a produção de misturas com betume-espuma tenha tido sempre melhores resultados, essa temperatura não pode ser a escolhida pois a esta temperatura é uma mistura betuminosa a quente e não temperada como se pretende.

Entre as temperaturas de 130°C e 110°C o volume de vazios assim como a deformação são ligeiramente melhores (isto é, menores) na mistura de 110°C, tendo menor resistência à tração indireta. No entanto, as misturas apresentam valores relativamente próximos. No que refere à diferença de temperatura, esta é relativamente grande para as reduzidas diferenças obtidas nas características estudadas acima. Tendo em conta que o gasto energético para a produção de uma temperatura a 130°C será certamente bastante superior ao gasto para a produção de uma mistura a 110°C, optou-se por continuar os estudos com a temperatura de 110°C para a produção de misturas betuminosas com betume-espuma.

4.6 Sensibilidade à água

Depois do estudo da compactabilidade é agora a vez de avaliar os resultados de resistência conservada em tração indireta nos ensaios de sensibilidade à água. Os provetes ensaiados são provetes de mistura convencional a 150°C, mistura com betume-espuma a 110°C com 0,1%

de aditivo, tendo sido produzidos para 2 (BE0.1_2), 3 (BE0.1_3) e 4% (BE0.1_4) de água. Foi também produzida uma mistura com 0,2% (BE0.2_3) de aditivo, com percentagem de água de 3%, para se verificar se não é necessário o uso de uma percentagem de aditivo superior.

Os valores das baridades, aparente e máxima teórica, temperaturas de agregados, mistura e compactação não serão apresentados, pois essas características já foram alvo de estudo. Como se produz novas misturas é sempre importante ter o estudo destas características das misturas betuminosas. Todos os resultados das novas misturas encontram-se próximos dos valores obtidos anteriormente, assim como as temperaturas dentro dos valores pretendidos.

Na Tabela 4.8 apresentam-se os resultados da tração indireta dos provetes secos e molhados (ITSd e ITSw, respetivamente), assim como a resistência conservada em tração indireta (ITSR). Verifica-se que o melhor comportamento é dos provetes de mistura convencional e dos provetes de mistura com betume-espuma com 0,1% de aditivo e percentagem de água igual a 4. O provete de betume-espuma com 0,1% de aditivo e 3% de água também apresenta um resultado muito perto dos anteriores, diferindo apenas em um ponto percentual. Verifica-se também que o provete com 0,2% de aditivo não é melhor do que os restantes, confirmando-se assim a escolha realizada aquando do estudo das características do betume-espuma (0,1% de aditivo).

Tabela 4.8 – Valores de sensibilidade à água das misturas em estudo

| Mistura | Deformação (mm) | ITSw (kPa) | ITSd (kPa) | ITSR (%) |
|---------|-----------------|------------|------------|----------|
| BC110 | 2,63 | 725,19 | 2561,07 | 28% |
| BC150 | 2,51 | 1311,93 | 2778,32 | 47% |
| BE0.1_2 | 2,63 | 868,70 | 2393,91 | 36% |
| BE0.1_3 | 2,87 | 1166,56 | 2549,99 | 46% |
| BE0.1_4 | 2,85 | 1233,10 | 2607,70 | 47% |
| BE0.2_3 | 2,65 | 775,90 | 2433,22 | 32% |

Na Figura 4.30 pode ver-se que as misturas com melhor comportamento à água são a BC150 seguida da BE0,1_4 e da BE0,1_3. Estas duas últimas são de mistura produzida com betume-espuma a 110°C, com 0,1% de aditivo e com 4 e 3% de água, respetivamente. Estes resultados mostram que para as percentagens de água de 3 e 4% usadas na produção do betume-espuma,

os resultados são muito idênticos, tanto de ITSD como ITSR, assim como para o volume de vazios apresentado na Figura 4.31.

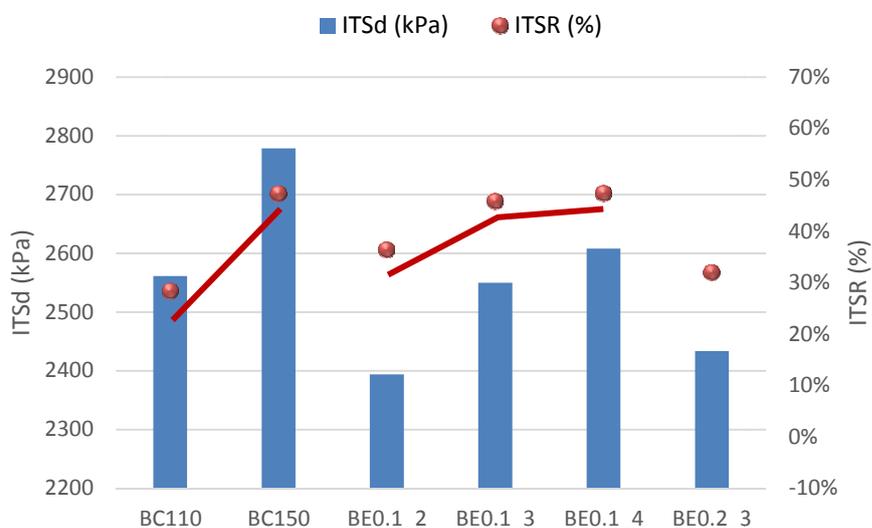


Figura 4.30 – Valores de ITSD e ITSR das diferentes misturas

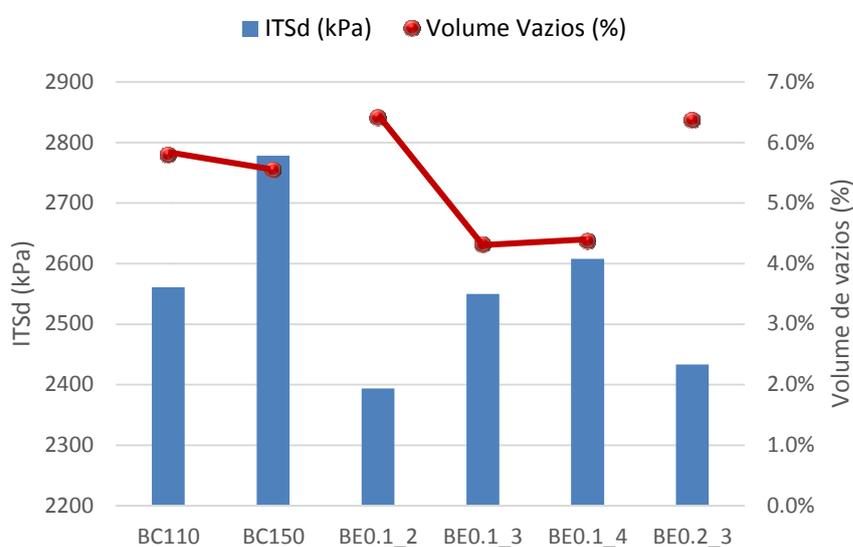


Figura 4.31 – Valor de ITSD e volume de vazios das várias misturas

Este estudo permitiu que se pudesse escolher a percentagem de água ótima para a produção das misturas betuminosas com betume-espuma. De entre os 2, 3 e os 4% de água, a percentagem que apresentou melhores resultados foi a de 3%, embora sempre muito idêntica à de 4%.

Depois de reunidas todas as informações necessárias para a produção de lajetas, continuou-se o estudo preparando provetes para os ensaios de módulo de rigidez e resistência à fadiga e à deformação permanente. Assim, a produção de lajetas foi realizada com uma mistura com betume-espuma (50/70), a 110°C (temperatura da mistura), com 0,1% de aditivo, aquecendo o betume à temperatura de 160°C, de seguida foram caroteados provetes das lajetas para a análise de sensibilidade à água. Assim obtiveram-se os dados apresentados na Tabela 4.9 para a mistura BE (betume-espuma) e BC (betume convencional).

Denota-se um melhor comportamento à água da mistura com betume convencional, tendo maior valor de ITSR (74%) do que a mistura com betume-espuma. Esta diferença pode dever-se à não tão boa compactação da mistura de betume-espuma, por estar a baixas temperaturas. Assim sendo a água consegue entrar muito mais facilmente nos poros dos provetes fazendo com que estes fiquem mais fracos, logo resistem menos a trações.

Tabela 4.9 – Valores de sensibilidade à água e volume de vazios

| Mistura | Deformação (mm) | ITSw (kPa) | ITSd (kPa) | ITSR (%) | Volume de vazios (%) |
|---------|-----------------|------------|------------|----------|----------------------|
| BC150 | 3,00 | 1653,187 | 2242,469 | 74% | 4,41% |
| BE110 | 2,77 | 1003,983 | 2026,375 | 50% | 4,76% |

Na Figura 4.32 pode ver-se a diferença que existe entre as duas misturas, no que respeita à resistência por tração indireta dos provetes secos e à resistência conservada à tração indireta. O volume de vazios (Figura 4.33) também é melhor (mais baixo) na mistura de BC, estando o valor entre os 4 e 5% para as duas misturas.

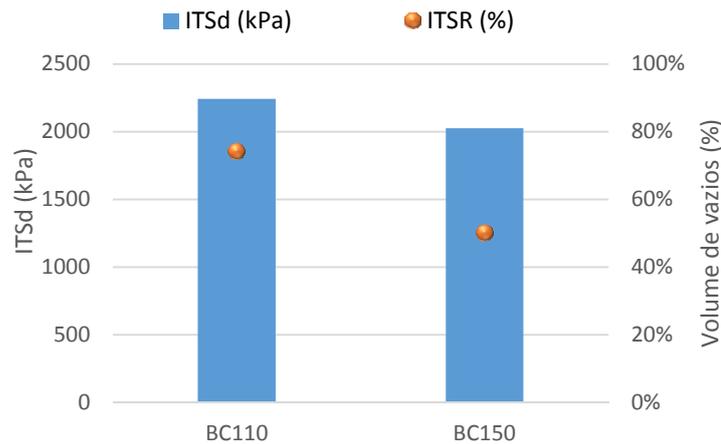


Figura 4.32 - Valores de ITSD e ITRS

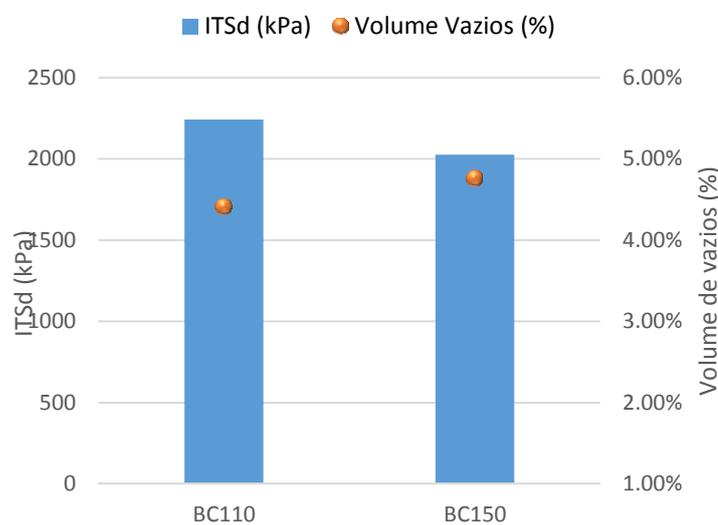


Figura 4.33 – Valores de ITSD e volume de vazios

4.7 Resistência à deformação permanente

A resistência à deformação permanente obtém-se pelo ensaio de pista, que simula a passagem do tráfego em cima de uma lajeta de mistura betuminosa. A temperatura usada neste ensaio foi de 50°C.

Foram ensaiadas 4 lajetas, duas da mistura convencional e duas da mistura com betume-espuma. As condicionantes do ensaio foram as mesmas tanto para a mistura convencional como para a mistura de betume-espuma. Na Tabela 4.10 estão os resultados obtidos pelo ensaio de pista para as lajetas, correspondendo à média dos valores obtidos para as duas

lajetas produzidas com mistura convencional assim como para as da mistura com betume-espuma.

Tabela 4.10 – Resultados obtidos do ensaio de pista

| Característica | BC_150 | BE_110 |
|--|--------|--------|
| Espessura média (mm) | 40,975 | 40,875 |
| BMT (kg/m ³) | 2395 | 2322 |
| WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos) | 0,14 | 0,295 |
| PRD _{AIR} (%) | 9,83 | 15,65 |
| PR _{AIR} (mm) | 4,03 | 6,4 |

Os resultados obtidos mostram que a mistura produzida com betume-espuma não teve tão bom comportamento quanto a mistura convencional. Nos três parâmetros a analisar neste tipo de ensaio (taxa de deformação em ensaio de pista (WTS_{AIR}), percentagem da profundidade de rodeira máxima (PRD_{AIR}) e profundidade máxima da rodeira (PR_{AIR})), a mistura convencional teve sempre valores inferiores aos da mistura com betume-espuma (BE), isso leva a que a deformação final (Figura 4.34) seja menor para as lajetas com betume convencional (BC).

A deformação é maior na lajeta com betume-espuma, mas é necessário avaliar duas partes do gráfico. A parte inicial mostra a deformação inicial da lajeta (para os primeiros ciclos), se o ângulo da linha da deformação for muito acentuado, isso quer dizer que a deformação é elevada. Neste caso a deformação para os primeiros ciclos é muito parecida (170 ciclos), depois a mistura BE sofre uma deformação mais acentuada que a mistura BC. A segunda parte do gráfico que importa avaliar é a inclinação final das linhas, quanto maior for a inclinação maior é a tendência para a deformação. A inclinação da deformada da BE é aproximadamente o dobro da inclinação de BC, isto quer dizer que a tendência para se deformar em relação à convencional é o dobro. Esta diferença pode dever-se às baixas temperaturas de compactação da mistura BE em relação à mistura BC, a mistura ao não ser bem compactada não tem tão bom comportamento quanto a uma mistura bem compactada. Nesse caso talvez se tivesse de abandonar a ideia os 110°C e subir um pouco a temperatura para que a compactação fosse mais eficaz e, conseqüentemente, o comportamento da mistura melhorasse.

Outra razão para que possa ter ocorrido uma deformação permanente tão diferente entre as misturas é que a mistura com betume-espuma pode ainda conter partículas de ar/água no interior da mistura que não se conseguiram soltar com a compactação. Isto leva a que aquando da passagem do pneu, sobre a mistura a temperaturas de 50°C, as partículas de ar/água se soltem e a deformação permanente seja maior, pois os espaços destas partículas ficam assim vazios fazendo com que a mistura tenha um maior assentamento.

Na Figura 4.35 e na Figura 4.36 pode ver-se a deformação provocada pela passagem do eixo nas lajetas de BC e BE. Denota-se a maior deformação nas lajetas com betume-espuma, sendo que variam entre elas. Assim como nas lajetas de BC existe uma diferença entre as duas lajetas, sendo a deformação sempre menor do que as de BE.

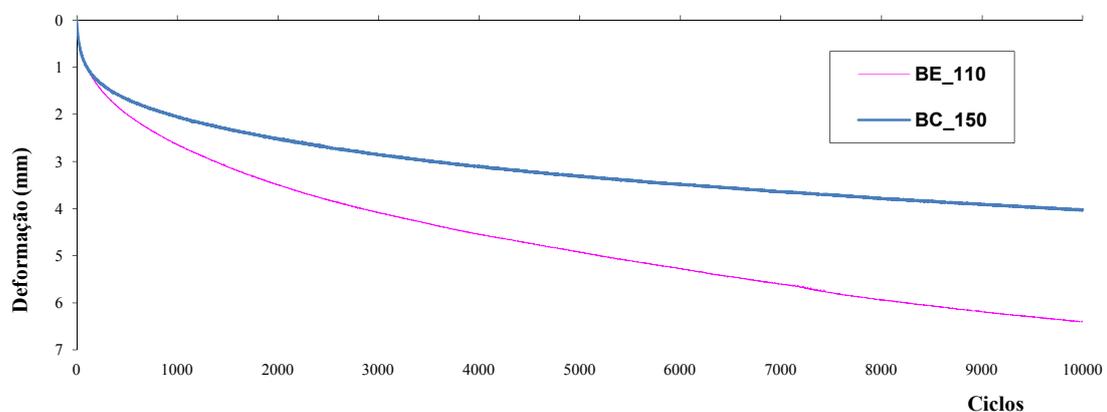


Figura 4.34 – Evolução da deformação das lajetas de BC e BE ao longo do ensaio WTT



Figura 4.35 – Deformação permanente das lajetas de BC no fim do ensaio WTT



Figura 4.36 – Deformação permanente das lajetas de BE no fim do ensaio WTT

4.8 Módulo de Rigidez

Foram ensaiadas doze vigas a uma mesma temperatura (20°C) a diferentes frequências para as duas misturas (seis de cada mistura). Os resultados obtidos para o módulo de rigidez e ângulo de fase estão apresentados na Figura 4.37 e Figura 4.38 e pode-se observar que a mistura com betume convencional tem maior módulo de rigidez do que a mistura com betume-espuma. Mostrando assim que a mistura convencional é mais rígida, comprovando o ensaio anterior de deformação permanente.

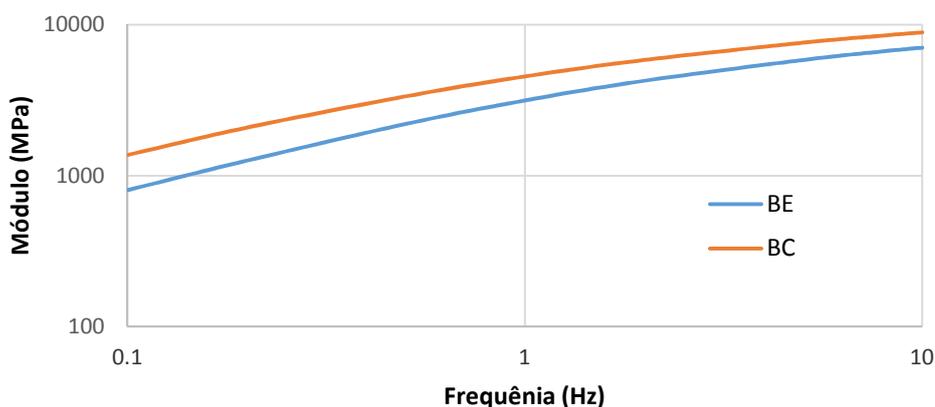


Figura 4.37 – Módulo de deformabilidade das misturas BE e BC a 20 °C

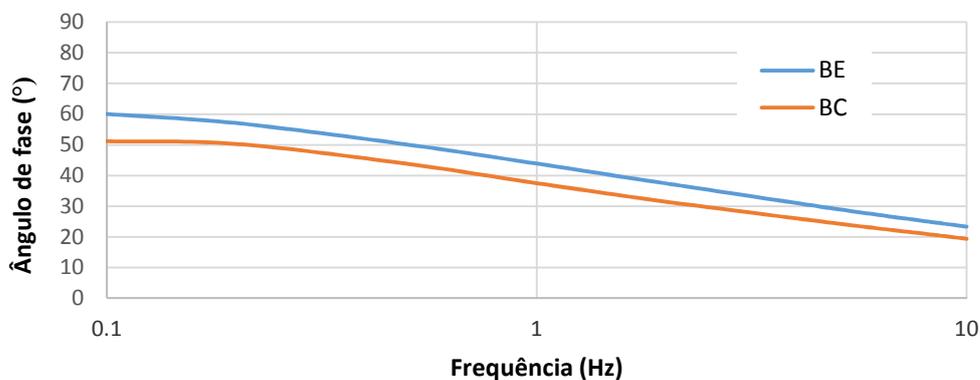


Figura 4.38 – Ângulo de fase das misturas BE e BC

Verifica-se portanto que o ângulo de fase da mistura BE é maior do que a mistura BC, tendo portanto um comportamento mais viscoso e a mistura convencional um comportamento mais elástico.

4.9 Resistência à fadiga

Depois de concluído o ensaio que permite calcular o módulo pode ser então realizado o ensaio de fadiga, uma vez que este último é destrutivo e as vigas dos ensaios são as mesmas. Deste ensaio foram obtidos os resultados que estão na Figura 4.39 e na Tabela 4.11. Dos resultados obtidos pode concluir-se que a mistura com betume-espuma tem resultados muito similares à mistura convencional, ainda que ligeiramente inferiores. Assim, conseguiu verificar-se que é possível obter misturas produzidas com betume-espuma, a temperaturas significativamente mais baixas (40°C) do que as utilizadas na produção da mistura convencional.

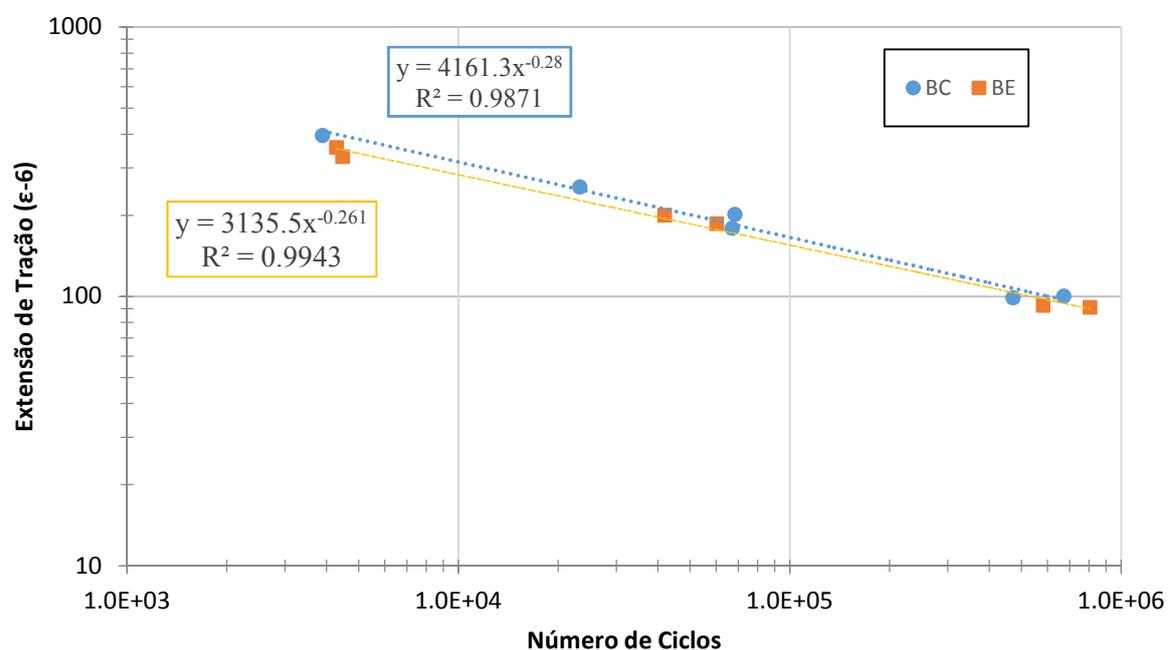


Figura 4.39 – Resultados do ensaio à fadiga BE e BC

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.39, foi possível calcular os seguintes parâmetros: resistência ao fendilhamento por fadiga (número de ciclos) para uma extensão de tração de 100×10^{-6} (N100) e a extensão de tração que origina uma resistência ao fendilhamento por fadiga de 1×10^6 ciclos (ϵ_6). Estes valores encontram-se na Tabela 4.11. A equação genérica da lei de fadiga é a seguinte (Equação 4.1):

$$N = a \times \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^b \quad (4.1)$$

Em que:

N - resistência ao fendilhamento por fadiga (número de ciclos);

a, b – parâmetros determinados experimentalmente

ε - extensão de tração

Tabela 4.11 – Resultados do ensaio de resistência à fadiga das misturas BC e BE (flexão em quatro pontos)

| Vigas | Parâmetros da Lei de fadiga | | | N100 | ε_6 |
|--------|-----------------------------|-------|-------|----------|-----------------|
| | a | b | r^2 | | |
| BE_110 | 2,176E+14 | 3,807 | 0,994 | 5,29E+06 | 85 |
| BC_150 | 6,58E+12 | 3,524 | 0,987 | 5,88E+05 | 86 |

4.10 Determinação da percentagem de betume por ignição

Para a determinação da percentagem de betume utilizou-se um forno incinerador (mufla). Os resultados obtidos estão na Tabela 4.12. Os resultados obtidos mostram a difícil tarefa de regular a quantidade de betume-espuma que a máquina injeta na mistura. A quantidade pretendida para todas as misturas era de 4,8% de betume, é visível que a quantidade de betume na mistura convencional também não foi a pretendida. Apesar de haver pouca diferença nos valores, em termos de misturas betuminosas uma diferença pequena pode influenciar bastante no comportamento da mistura, e se as misturas que se querem comparar tiverem comportamentos diferentes (nos vários ensaios) pode dever-se parcialmente a essa diferença de betume.

A determinação da percentagem de betume pela mufla é um processo moroso pois tem-se que deixar arrefecer os cestos com os agregados saídos da mufla (atinge temperatura à volta dos 540°C)

Tabela 4.12 – Resultados do ensaio da mufla

| Amostra | BC150 | BE110 | BE130 | BE150 |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Peso do cesto (gr) | 4076,0 | 4196,0 | 4195,5 | 4076,0 |
| Peso do cesto e amostra (gr) | 5583,0 | 5610,5 | 5782,5 | 5587,0 |
| Peso da amostra (gr) | 1507,0 | 1414,5 | 1587,0 | 1511,0 |
| Peso do cesto e agregados (gr) | 5505,5 | 5540,5 | 5700,0 | 5508,0 |
| Massa de agregados (gr) | 1429,5 | 1344,5 | 1504,5 | 1432,0 |
| Percentagem de betume (%) | 5,0 | 4,8 | 5,0 | 5,1 |

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Com base nos resultados obtidos neste trabalho foi possível obter um conjunto de conclusões relativamente ao processo de produção de betume-espuma e de misturas betuminosas que o utilizam como ligante, que se apresentam de seguida.

Os estudos realizados sobre o betume 50/70 da Galp estão dentro dos valores admissíveis, viabilizando a sua escolha. Mesmo o betume depois de ser aditivado não apresentou diferenças significativas que justificassem não utilizar o aditivo.

Os valores da viscosidade não foram alterados com o aditivo, mostrando sempre um comportamento similar entre os dois betumes, sendo assim estes têm o mesmo valor para a produção e compactação.

Aquando do fabrico de betume-espuma encontrou-se uma dificuldade, a de fazer o betume ter um tempo de meia-vida razoável para a produção das misturas, já que a expansão era próxima do admissível. Primeiramente foi estudado o tempo de meia-vida e taxa de expansão para 1, 2, 3, 4, 5 e 6% de água sobre o peso do betume a várias temperaturas do betume. Destes estudos obtiveram-se resultados que apontavam que o intervalo de percentagem ótima de água seria os 2 a 4. Mas mesmo para estes valores o tempo de meia-vida e taxa de expansão não eram favoráveis. A solução para este problema passaria pela adição de um aditivo capaz de estabilizar a espuma de betume e aumentar a taxa de expansão, aumentando assim o Índice de espuma (FI).

Depois de realizado o estudo com o aditivo foram escolhidas temperaturas para a produção de misturas com betume-espuma consoante a viscosidade do betume. Foram fabricadas misturas de betume-espuma a 110, 130 e 150°C, assim como uma mistura com betume convencional a 150°C.

No ensaio da compactabilidade os valores de adensamento e volume de vazios foram sempre melhores para a mistura convencional (a 150°C) do que para a mistura com betume-espuma às várias temperaturas. Sendo de referir que apesar dos valores serem diferentes são muito próximos para as misturas a 150°C. A mistura a 130°C teve sempre piores resultados do que a mistura com betume-espuma a 110°C. Dos resultados obtidos concluiu-se ser possível a

produção de misturas betuminosas com betume-espuma a 110°C, sendo que foi essa temperatura que avançou no estudo.

Com a produção de uma mistura betuminosa com betume-espuma a 110°C e uma mistura betuminosa convencional (a 150°C) fizeram-se vários estudos, entre eles a resistência conservada em tração indireta (ITSR) obtiveram-se valores de 74% para a mistura convencional e 50% para a mistura com betume-espuma. Esta diferença pode dever-se à compactação insuficiente da mistura com betume-espuma, por estar a temperaturas bastante baixas.

No ensaio de deformação permanente foram obtidos valores de deformação menores para a mistura convencional, sendo a profundidade de rodeira máxima (PRAIR) de 4,03 mm para a mistura convencional e de 6,4 mm para a mistura com betume-espuma. Os valores obtidos para a mistura com betume-espuma ficaram aquém do desejado. Mantendo-se a mesma justificação de que, muito provavelmente, as temperaturas muito baixas não ajudaram na melhor compactação da mistura, de modo a melhorar a sua resistência à deformação, sob a ação de cargas repetidas.

Nos resultados do módulo de rigidez os valores foram muitos próximos, apresentando a mistura convencional módulo de rigidez ligeiramente superior ao da mistura com betume-espuma. Como consequência, a mistura convencional tem menor ângulo de fase.

No ensaio de fadiga as misturas tiveram resultados muito similares. Conseguiu-se produzir uma mistura com betume-espuma a uma temperatura 40°C abaixo da temperatura da mistura convencional sem comprometer o seu comportamento à fadiga.

Com este estudo foi possível perceber a problemática associada à produção e ao uso de betume-espuma no fabrico de misturas betuminosas, deixando boas perspectivas para a sua utilização na produção de misturas betuminosas mais sustentáveis.

5.2 Trabalhos Futuros

Apesar da relevância dos resultados obtidos neste trabalho, muito mais haverá para estudar no domínio da produção e utilização de betume-espuma. De seguida apresentam-se

resumidamente alguns dos aspetos que necessitam de ser investigados de uma forma mais profunda.

Os tipos de betumes utilizados têm influência no comportamento da mistura, neste trabalho foram apenas usados três tipos de betumes e o escolhido foi o mais duro dos três (por ser um daqueles que é tradicionalmente utilizado na produção de misturas betuminosas convencionais). No entanto, deverão ser testados betumes ainda mais duros (eventualmente com o uso de aditivos) de modo a verificar se é possível melhorar o comportamento mecânico das misturas finais, nomeadamente, em relação à resistência à deformação permanente.

Este tipo de ligante é muitas vezes utilizado em processos de reciclagem de pavimentos/misturas betuminosas envelhecidas. Assim, apesar de não ter sido possível avaliar essa possibilidade ao longo do decorrer do presente trabalho, esta é certamente uma área a explorar, uma vez que o uso de material fresado pode ter influência positiva nas misturas betuminosas, uma vez que a mistura reciclada possui betume mais duro (já presente no fresado) e pode trazer à mistura uma maior rigidez.

A otimização das temperaturas de fabrico das misturas betuminosas com betume-espuma também devem ser estudadas, de modo a melhorar o seu comportamento e, se possível, avaliar a redução da temperatura abaixo dos 100°C, que corresponde à produção de misturas semi-temperadas e assim, ainda mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, F.C.A.T. (2012). *Contribuição para o estudo do desempenho de misturas betuminosas temperadas*, Universidade Técnica de Lisboa.
- Branco, D.T.F. (2013). *Estudo de Misturas Betuminosas Semi-temperadas por Injeção de Água*, Dissertação de Mestrado Integado em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L.P. (2005). *Pavimentos Rodoviários*, Coimbra.
- CEN (2006). *EN13108 - 1, Bituminous mixtures - Material specifications - Part 1: Asphalt Concrete*, European Committee for Standardization, Brussels.
- Chowdhury, A., Button, J.W. (2008). *A Review of Warm Mix Asphalt*, Southwest Region University Transportation Center.
- Csanyi, L.H. (1957). Foamed Asphalt in Bituminous Paving Mixes, *Highway Research Board Bulletin*, Vol. 10, pp. 108-122.
- Csanyi, L.H. (1959). Foamed Asphalt, *American Road Builders Association (ARBA) Technical Bulletin*, Vol. 240, pp. 3-14.
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B. (2008). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*, Report No. FHWA-PL-08-007, Federal Highway Administration, Washington, DC.
- EAPA (2010). *The use of Warm Mix Asphalt*, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EAPA (2012). *Asphalt in Figures*, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EP (2009). *Caderno de Encargos Tipo Obra - 14.03 - Pavimentação - Características dos materiais*, Estradas de Portugal S.A., Almada.
- Ferreira, C.I.G. (2009). *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*, Mestrado em Engenharia Rodoviária, Universidade do Minho.
- Fonseca, P., Guimarães, C., Gomes, V., Palha, D., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Abreu, L. (2011). Estudo de Material Fresado para Incorporação em Misturas Betuminosas a Quente com Altas Taxas de Reciclagem, *7º Congresso Rodoviário Português - Novos desafios para a atividade rodoviária*, Lisboa.
- He, G.p., Wong, W.g. (2006). Decay properties of the foamed bitumens, *Construction and Building Materials*, Vol. 20 (10), pp. 866-877.
- He, G.p., Wong, W.g. (2007). Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (8), pp. 1809-1819.
- Huan, Y., Siripun, K., Jitsangiam, P., Nikraz, H. (2010). A preliminary study on foamed bitumen stabilisation for Western Australian pavements, *Scientific Research and Essays*, Vol. 5 (23), pp. 3687-3700.
- Jenkins, K.J. (2000). *Mix Design Considerations For Cold and Half-Warm Bitumen Mixes With Emphasis On Foamed Bitumen*, PhD Thesis, University of Stellenbosch.

Jenkins, K.J., Molenaar, A.A.A., Groot, J.L.A., Ven, M.F.C.v.d. (2000). Developments in the uses of foamed bitumen in road pavements, *HERON*, Vol. 45.

Jiménez, F.E.P. (2010). *Manual de Pavimentação*, Cepsa.

Joe W. Button, C.E., Andrew Wimsatt (2007). *A Synthesis of Warm-Mix Asphalt*, Report No. FHWA/TX-07/0-5597-1, Texas Transportation Institute, Texas.

Katman, H.Y., Ibrahim, M.R., Matori, M.Y., Norhisham, S., Ismail, N. (2013). *Effects of reclaimed asphalt pavement on indirect tensile strength test of foamed asphalt mix tested in dry condition*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1 ed.

Larry Santucci, P. (2010). *Warm Mix Asphalt Hits the Road*, Technology Transfer Program, University of California, Pavement Research Center

Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 145 (1–2), pp. 42-82.

Losa, M., Bacci, R., Terrosi Axerio, A., Leandri, P. (2009). *Design of pavements containing foamed bitumen recycled layers*, Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields - Proceedings of the 8th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, p. 387-396.

Maccarrone, S., Holleran, G., Leonard, D.J., Hey, S. (1994). *Pavement recycling using foamed bitumen*, Proceedings - Conference of the Australian Road Research Board, 3 ed, p. 349-365.

Neves, J., Picado-Santos, L., Alves, M.C., Martinho, F., Barbosa, F. (2013). Estudo Experimental Sobre o Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas, *7º Congresso Rodoviário Português*, Lisboa.

Plati, C., Loizos, A., Papavasiliou, V., Kaltsounis, A. (2010). Investigating in situ properties of recycled asphalt pavement with foamed asphalt as base stabilizer, *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2010.

Ramanujam, J.M., Jones, J.D. (2007). Characterization of foamed-bitumen stabilisation, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 8 (2), pp. 111-122.

Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Peralta, E.J., Ferreira, C.I.G. (2009). Evaluation of the rheological behaviour of Warm Mix Asphalt (WMA) modified binders, *7th International RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials (ATCBM09)*, Rhodes, Greece, pp. 661-673.

Silva, H.M.R.D.d. (2010). *VIAS DE COMUNICAÇÃO II, Texto de Apoio à Unidade Curricular do Mestrado Integrado em Engenharia Civil*

Soenen, H., de Visscher, J., Vervaecke, F., Vanelstraete, A., Redelius, P. (2010). Foamed bitumen in half-warm asphalt: A laboratory study, *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 3 (4), pp. 199-206.

Sunarjono, S. (2013). *Performance of foamed asphalt under repeated load axial test*, Procedia Engineering, p. 698-710, Solo, Jawa Tengah.

Teixeira, M.S. (2006). *A utilização de Espumas de Betume na Reciclagem de Pavimentos Flexíveis*, Dissertação de Mestrado em Vias de Comunicação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Terex (2011). *Warm Mix Asphalt*, Terex.

- Van De Ven, M.F.C., Jenkins, K.J., Voskuilen, J.L.M., Van Den Beemt, R. (2007). Development of (half-) warm foamed bitumen mixes: State of the art, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 8 (2), pp. 163-175.
- van de Ven, M.F.C., Sluer, B.W., Jenkins, K.J., van den Beemt, C.M.A. (2012). New developments with half-warm foamed bitumen asphalt mixtures for sustainable and durable pavement solutions, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 13 (4), pp. 713-730.
- Xiao, F., Punith, V.S., Putman, B., Amirghanian, S.N. (2011). Utilization of Foaming Technology in Warm-Mix-Asphalt Mixtures Containing Moist Aggregates, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23 (9), pp. 1328-1337.
- Xu, J.Z., Hao, P.W., Ma, Y.F., Liu, N. (2011). Study on the optimization design of mixing moisture content in foamed asphalt mix, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 45 (7), pp. 1071-1085.
- Yu, X., Wang, Y., Luo, Y. (2013). Impacts of water content on rheological properties and performance-related behaviors of foamed warm-mix asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 48 (0), pp. 203-209.
- Yuan, K., Li, L., Lü, T. (2012). Study on the compaction characteristics of foamed asphalt mixture, *Wuhan Ligong Daxue Xuebao (Jiaotong Kexue Yu Gongcheng Ban)/Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)*, Vol. 36 (2), pp. 399-402.