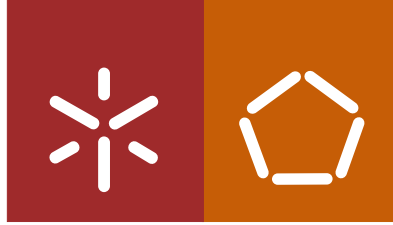




Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Silvestre Gonçalves

**Estudo de Materiais de Pavimentação
Estabilizados com Betume-Espuma**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Silvestre Gonçalves

Estudo de Materiais de Pavimentação Estabilizados com Betume-Espuma

Dissertação de Mestrado
Mestrado em Engenharia Urbana

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

DECLARAÇÃO

Nome: Silvestre Gonçalves

Endereço eletrónico: com Telefone:

Número do Bilhete de Identidade:

Título dissertação: Estudo de Materiais de Pavimentação Estabilizados com Betume-Espuma

Orientador: Professor Doutor Hugo Manuel Ribeiro Dias da Silva

Ano de conclusão: 2015

Designação do Mestrado: Mestrado em Engenharia Urbana

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, 18/12/2015

Assinatura: _____

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 a disposição.

Ao Professor Hugo Silva, pela orientação, colaboração, ensino, esclarecimentos e sobretudo pela paciência e dedicação, muito obrigado.

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

A todos os colegas de laboratório que, sem exceção, se mostraram disponíveis para ajudar sempre que necessário, muito obrigado.

À empresa GALP pelo fornecimento dos betumes utilizados ao longo desta dissertação.

Aos meus pais, pois sem o seu apoio financeiro ao longo destes anos não seria possível chegar onde cheguei. Pelo apoio e carinho sempre presentes, obrigado.

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

Estudo de Materiais de Pavimentação Estabilizados com Betume-espuma

RESUMO

A procura de soluções ambientalmente sustentáveis é um dos temas que atualmente tem sido investigado de forma contínua. Nesse sentido, a produção de materiais de pavimentação a frio é uma solução que vai de encontro a esse objetivo, podendo utilizar-se a tecnologia de betume-espuma, ainda pouco conhecida, para desenvolver materiais estabilizados com esse ligante. De facto, o betume-espuma deve conseguir envolver melhor os agregados a baixas temperaturas.

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo efetuar um estudo sobre o uso de materiais de pavimentação estabilizados a frio com betume-espuma. Para isso procedeu-se ao estudo de duas soluções distintas, uma com estabilização apenas de material granular e outra com estabilização de material granular juntamente com material fresado, de modo a perceber o comportamento deste tipo de soluções em ambos os casos.

Durante este trabalho foi feita uma comparação entre as duas soluções de estabilização referidas (apenas material granular ou material granular juntamente com material fresado). Além disso, fez-se a comparação com outras misturas estudadas em trabalhos anteriores para se avaliar o seu desempenho em relação a misturas já conhecidas. Para a produção de betume-espuma foi utilizado um aditivo devido a falta de estabilidade da espuma. Em seguida, foram realizados vários ensaios para formulação e avaliação do comportamento das misturas estabilizadas com betume-espuma. As misturas estabilizadas com betume-espuma foram ensaiadas para medição da baridade aparente, sensibilidade à água, módulo de rigidez e resistência à fadiga e à deformação permanente.

Com base nos resultados obtidos é possível concluir que é viável e muito interessante o uso de materiais estabilizados com betume-espuma. No entanto, é necessário estudar cuidadosamente as condições de produção e otimização dos teores de betume usados, pois é possível passar de soluções muito boas a soluções más ao seleccionar um teor em betume-espuma desadequado.

Palavras-Chave:

Estabilização; Betume-espuma; Reciclagem; Desempenho; Técnicas de pavimentação a frio.

Study of Road Paving Materials Stabilised with Foamed Bitumen

ABSTRACT

The pursuit of environmentally sustainable solutions is one of the topics that has currently and continuously been investigated. In that sense, the production of cold paving materials is a solution that meets that goal, allowing to use the foamed bitumen technology, little known yet, to develop materials stabilised with this binder. In fact, the foamed bitumen should manage to better involve aggregates at lower temperatures.

In this sense, the present work had as its main goal to undertake a study and on the use of stabilised cold paving materials with foamed bitumen. For that, the study of two different solutions was undertaken, one with stabilisation only of granular material and another of stabilisation of granular material together with reclaimed asphalt material, so as to perceive the behaviour of this type of solutions in both cases.

During this work, a comparison has been made between the two stabilisation solutions (granular material only or granular material along with reclaimed asphalt material). In addition, a comparison has been made with other mixtures studied in previous works to assess their performance in relation to mixtures already known. For the production of foamed bitumen, an additive was used due to the lack of stability of the foam. Then, several tests were carried out for designing and evaluating the behaviour of mixtures stabilised with foamed bitumen. The blends stabilised with foamed bitumen were tested to measure the bulk density, water sensitivity, stiffness modulus and resistance to fatigue and permanent deformation.

Based on the obtained results it can be concluded that the use of road materials stabilised with foamed bitumen is feasible and a very interesting technology. However, it is necessary to carefully study the conditions of production, namely concerning the optimization of the percentages of foamed bitumen used, since it is possible to go from very good solutions to bad solutions when selecting the amount of foamed bitumen inadequately.

Keywords:

Stabilisation; Foamed bitumen; Recycling; Performance; Cold paving techniques.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Enquadramento geral	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Conteúdo da dissertação	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE RECICLAGEM E BETUME-ESPUMA.....	5
2.1. Introdução	5
2.2. Revisão bibliográfica sobre reciclagem de pavimentos.....	5
2.2.1. Breve descrição histórica sobre reciclagem de pavimentos.....	5
2.2.2. Vantagens e desvantagens da reciclagem a frio.....	6
2.2.3. Diferentes tipos de reciclagem de pavimentos.....	7
2.2.4. Descrição das diferentes técnicas de reciclagem de pavimentos a frio	12
2.2.5. Descrição das diferentes técnicas reciclagem de pavimentos a quente	15
2.2.6. Casos de aplicação em Portugal.....	16
2.2.7. Casos de aplicação a nível internacional	16
2.3. Revisão bibliográfica sobre utilização betume-espuma em pavimentação	18
2.3.1. Breve descrição história	18
2.3.2. Vantagens e desvantagens da reciclagem com betume-espuma	20
2.3.3. Metodologia de caracterização do betume-espuma.....	21
2.3.4. Estudo do decaimento do betume-espuma.....	24
2.3.5. Tecnologia de reciclagem a frio com betume-espuma	27
2.3.6. Casos de aplicação em Portugal.....	29
2.3.7. Casos de aplicação a nível Internacional	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	37
3.1. Materiais	37
3.2. Métodos experimentais	39
3.2.1. Estudo dos betumes base utilizados para produzir betume-espuma	39
3.2.2. Estudo do decaimento do betume-espuma.....	41
3.2.3. Caracterização do material granular (<i>tout venant</i> ou ABGE).....	43
3.2.4. Caracterização do material fresado.....	47

3.2.5. Produção das misturas com betume-espuma a estudar neste trabalho	51
3.2.6. Compactação das misturas com betume-espuma para os diversos ensaios.....	55
3.2.7. Formulação das misturas de material tratado com betume-espuma.....	57
3.2.8. Ensaio de caracterização das misturas finais tratadas com betume-espuma	58
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	63
4.1. Caracterização dos betumes base	63
4.2. Análise das condições de produção do betume-espuma	65
4.2.1. Efeito do tipo de betume base	65
4.2.2. Efeito da utilização de aditivos	67
4.3. Caracterização do material granular	68
4.3.1. Análise granulométrica do material granular	68
4.3.2. Análise do ensaio do equivalente de areia do material granular	69
4.3.3. Análise do ensaio do azul-de-metileno ao material granular	70
4.4. Caracterização do material fresado	70
4.4.1. Análise da percentagem de betume do material fresado	70
4.4.2. Análise da granulometria do material fresado após incineração	71
4.4.3. Caracterização do betume recuperado do material fresado	72
4.5. Formulação das misturas de material estabilizado com betume-espuma.....	73
4.5.1. Misturas com 100% material granular estabilizadas com betume-espuma.....	73
4.5.2. Misturas com 50% de material granular e 50% de material fresado estabilizadas com betume-espuma	75
4.5.3. Comparação entre misturas estabilizadas com e sem material fresado.....	77
4.6. Caracterização das misturas finais de material estabilizado com betume-espuma.....	78
4.6.1. Produção das misturas	78
4.6.2. Baridade aparente	79
4.6.3. Sensibilidade à água e resistência à tração indireta a 25 °C	80
4.6.4. Resistência à deformação permanente	82
4.6.5. Módulo de rigidez	84
4.6.6. Resistência à fadiga	88
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS	91
5.1. Considerações finais.....	91

5.2. Perspetivas futuras	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de funcionamento do tambor de uma recicladora (adaptado de Lewis e Collings (1999)).....	8
Figura 2.2 – Fases da reciclagem a quente <i>in situ</i> (Baptista, 2006)	9
Figura 2.3 – Fases da reciclagem a quente em central (Baptista, 2006).....	10
Figura 2.4 – Exemplo de reciclagem a frio em central móvel (Wirtgen, 2012).....	11
Figura 2.5 – Exemplo de reciclagem <i>in situ</i> com cimento em calda (Baptista, 2006)	12
Figura 2.6 – Exemplo de reciclagem <i>in situ</i> com emulsão betuminosa (Baptista, 2006).....	13
Figura 2.7 – Fases da reciclagem <i>in situ</i> com emulsão betuminosa (Baptista, 2006)	14
Figura 2.8 – Fases da reciclagem a quente em central com betume (Cunha, 2010).....	15
Figura 2.9 – Esquema de produção de betume-espuma (Sunarjono, 2013)	22
Figura 2.10 – Relação das propriedades do betume-espuma com a percentagem de água (adaptado de Jenkins <i>et al.</i> (2000))	23
Figura 2.11 – Exemplo da curva de queda do betume-espuma (adaptado de Jenkins <i>et al.</i> , (2000)).....	24
Figura 2.12 – Ciclo de vida de uma espuma betuminosa (Teixeira, 2006)	26
Figura 2.13 – Representação da expansão real (Teixeira, 2006).....	26
Figura 2.14 – Relação entre a expansão real e a expansão medida (adaptado de Jenkins <i>et al.</i> , (2000)).....	27
Figura 2.15 – Mecanismos de injeção e fresagem da recicladora a frio modelo 3800CR da Writgen (Wirtgen, 2012)	28
Figura 2.16 – Mecanismos de injeção e fresagem da recicladora a frio modelo WR 4200 da Writgen (Wirtgen, 2012)	28
Figura 2.17 – Central móvel Wirtgen KMA 220 (Wirtgen, 2012).....	32
Figura 2.18 – Solução adotada para recuperação da rodovia Ayrton Senna (Cipollina, 2015).....	33
Figura 2.19 – Comportamento da rodovia Ayrton Senna nos primeiros 6 meses (Cipollina, 2015)	33
Figura 3.1 – Material fresado (esquerda) e <i>tout venant</i> (direita) utilizados no trabalho	37

Figura 3.2 – Betume 50/70 (esquerda), cimento (centro) e aditivo TEGO (direita) utilizados neste trabalho	38
Figura 3.3 – Fases do ensaio de penetração do betume a 25 °C.....	39
Figura 3.4 – Fases do ensaio anel e bola para determinar o ponto de amolecimento do betume.....	40
Figura 3.5 – Fases do ensaio de viscosidade dinâmica.....	41
Figura 3.6 – Equipamento laboratorial <i>Wirtgen WLB 10 S</i> utilizado para produção de betume-espuma	41
Figura 3.7 – Escala e balde utilizado para a medição do tempo de meia vida e da taxa e expansão do betume-espuma	42
Figura 3.8 – Efeito da injeção de água na expansão e tempo de meia vida do betume-espuma (Wirtgen, 2012)	43
Figura 3.9 – Redução (esquerda) e esquartelamento (direita) da amostra de material granular	43
Figura 3.10 – Preparação do ensaio de granulometria ao material granular.....	44
Figura 3.11 – Ensaio do equivalente de areia	45
Figura 3.12 – Preparação da solução corante para o ensaio de azul-de-metileno.....	46
Figura 3.13 – Manchas com e sem auréola no papel de filtro do ensaio azul-de-metileno	47
Figura 3.14 – Tabuleiro com amostra para determinação da percentagem de ligante do material fresado	48
Figura 3.15 – Peneiros utilizados para determinar a granulometria do material fresado.....	49
Figura 3.16 – Centrifugadora usada na 1ª fase do processo de recuperação de betume.....	50
Figura 3.17 – Centrifugadora de precisão usada na 2ª fase de recuperação do betume.....	50
Figura 3.18 – Evaporador rotativo utilizado na 3ª fase de recuperação do betume	51
Figura 3.19 – Produção da mistura estabilizada com 100% material granular.....	53
Figura 3.20 – Produção da mistura reciclada com 50% material granular e 50% material fresado.....	55
Figura 3.21 – Compactador Marshall e aspeto final dos provetes compactados	56
Figura 3.22 – Compactação das lajes e aspeto final das lajes compactadas	57
Figura 3.23 – Resultados indicados pela <i>Wirtgen</i> como referência para formulação de misturas estabilizadas com betume-espuma recorrendo ao ensaio de	

resistência à tração indireta a 25 °C e à avaliação da sensibilidade à água nessas condições (Wirtgen, 2012).....	58
Figura 3.24 – Aparelho para determinar as dimensões dos provetes para cálculo da baridade aparente pelo método D.....	59
Figura 3.25 – Ensaio de tração indireta	60
Figura 3.26 – Preparação do ensaio de pista para avaliação da deformação permanente	61
Figura 3.27 – Vigas e equipamento utilizado no ensaio do módulo de rigidez e de fadiga	61
Figura 4.1 – Viscosidade dinâmica dos betumes base utilizados	64
Figura 4.2 – Comparação das taxas de expansão do betume-espuma produzido com betume 50/70 a 160 °C ou com o betume 70/100 a 150 °C	65
Figura 4.3 – Comparação dos tempos de meia vida do betume-espuma produzido com betume 50/70 a 160 °C ou com o betume 70/100 a 150 °C	66
Figura 4.4 – Taxa de expansão do betume-espuma produzido a 160 °C com o betume 50/70 para diferentes percentagens de aditivo	67
Figura 4.5 – Tempo de meia vida do betume-espuma produzido a 160 °C com o betume 50/70 para diferentes percentagens de aditivo	68
Figura 4.6 – Fuso granulométrico do material granular em comparação com os limites indicados para esse material	69
Figura 4.7 – Curva granulométrica do material fresado, em comparação com a curva de um material fresado típico e com a curva de uma mistura convencional AC 14 Surf	71
Figura 4.8 – Viscosidade do betume recuperado do material fresado obtida no viscosímetro rotacional em função da temperatura	72
Figura 4.9 – Resultados do ensaio de resistência à tração indireta para misturas com 100% material granular	74
Figura 4.10 – Curva granulométrica do material 50% granular+50% fresado, em comparação com as curvas granulométricas do material fresado e do material granular e com o fuso granulométrico do material granular	75
Figura 4.11 – Resultados do ensaio de resistência à tração indireta para misturas com 50% material granular e 50% material fresado	77
Figura 4.12 – Valores de ITS_{dry} e ITS_{wet} a 25 °C para a duas misturas em estudo.....	81
Figura 4.13 – Valores de ITSR e baridade aparente das duas misturas em estudo	81

Figura 4.14 – Comparação da deformação das duas misturas em estudo no ensaio de pista.....	83
Figura 4.15 – Módulo complexo e ângulo de fase para a mistura com 100% material granular a diferentes temperaturas	84
Figura 4.16 – Aspeto homogêneo das vigas com 100% material granular.....	86
Figura 4.17 – Módulo complexo e ângulo de fase para a mistura com 50% material granular + 50% material fresado a diferentes temperaturas	86
Figura 4.18 – Desagregação evidente das vigas com 50% material granular + 50% material fresado	87
Figura 4.19 – Curvas mestras do módulo complexo para as duas misturas estudadas para uma temperatura de referência de 20 °C	88
Figura 4.20 – Curvas mestras do ângulo de fase para as duas misturas estudadas para uma temperatura de referência de 20 °C	88
Figura 4.21 – Resultados do ensaio à fadiga para as duas misturas estudadas	89
Figura 4.22 – Comparação dos resultados do ensaio de fadiga deste estudo com o observado em misturas temperadas e a quente num estudo anterior	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais obras de reciclagem em Portugal até 2004 (Martinho <i>et al.</i> , 2004).....	17
Tabela 2.2 – Estado da reciclagem na Europa, Japão, EUA e Canadá em 2012 (EAPA, 2013).....	17
Tabela 2.3 – Estado da reciclagem na Europa, Japão e EUA em 2013 (EAPA, 2014).....	18
Tabela 3.1 – Diretrizes para estimar a adição ideal de betume-espuma (Wirtgen, 2012).....	52
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de penetração e anel e bola aos betumes base	63
Tabela 4.2 – Resultado do ensaio do equivalente de areia do material granular.....	70
Tabela 4.3 – Valor do ensaio de azul-de-metileno do material granular.....	70
Tabela 4.4 – Caracterização básica do betume recuperado do material fresado	72
Tabela 4.5 – Percentagens de betume-espuma admitidas e percentagens de betume-espuma realmente injetadas para as misturas com 100% material granular	73
Tabela 4.6 – Valores de sensibilidade à água para misturas com 100% material granular.....	74
Tabela 4.7 – Percentagens de betume-espuma admitidas e percentagem de betume realmente injetadas para as misturas com 50% material granular + 50% material fresado	76
Tabela 4.8 – Valores de sensibilidade à água para misturas com 50% material granular e 50% material fresado.....	76
Tabela 4.9 – Quantidades de betume utilizadas nas misturas com material 100% granular.....	79
Tabela 4.10 – Quantidades de betume utilizadas nas misturas com 50% material granular + 50% material fresado	79
Tabela 4.11 – Baridade aparente dos provetes das misturas produzidas com betume-espuma.....	79
Tabela 4.12 – Principais resultados obtidos no ensaio de pista.....	83
Tabela 4.13 – Resultados do ensaio de resistência a fadiga das misturas 100%, 50% + 50%, MBQ e MBT	90

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral

A rede viária tem enorme importância na vida dos cidadãos. Devido a este facto, ao executar a pavimentação rodoviária devem ser criadas as condições ideais para se oferecer boas condições de segurança e conforto aos seus utentes.

Hoje em dia, praticamente toda a rede viária portuguesa está construída. Assim, o principal investimento a realizar nos próximos anos será na reabilitação das vias existentes. Nesse sentido, ao nível da gestão da rede já construída, é fundamental que se procure formas de reaproveitamento de material existente, pois esta é uma solução que pode reduzir os custos de manutenção e os impactos nocivos a nível ambiental, mas sem comprometer o desempenho estrutural e funcional dos novos pavimentos.

Perante este crescimento intenso da extensão da rede de infraestruturas rodoviárias em Portugal, é necessário refletir sobre a sua manutenção, conservação e reabilitação a curto, médio e longo prazo. Uma das soluções possíveis para reabilitar e conservar alguns pavimentos, em especial quando estão mais degradados, será a sua reciclagem, sendo igualmente possível proceder à estabilização de camadas granulares para aumentar a sua resistência ou para melhorar estradas não revestidas nas quais se prevê um aumento significativo de tráfego. Em ambas as situações é possível recorrer à utilização de um tipo de ligante ainda pouco utilizado em Portugal, que é o betume-espuma, o que esteve na base da elaboração desta dissertação.

Como se referiu, há todo o interesse em estudar a aplicação deste método para estradas não revestidas (conhecidas como estradas de terra batida) ou outro tipo de estradas de baixo volume de tráfego. Também há interesse em avaliar a reciclagem a frio de estradas com espessuras betuminosas reduzidas e que se encontrem significativamente degradadas, considerando nesse caso que se procede à execução duma nova camada ligada com betume-espuma que incorpora o material fresado juntamente com parte da camada granular subjacente. Estas duas abordagens estão na base das soluções estudadas neste trabalho, que consistem na estabilização de material granular com betume-espuma e na estabilização ou reciclagem de material fresado (50%) e de material granular (50%) com betume-espuma. Em

ambas as situações vai ser adicionada uma pequena percentagem de água ao betume para produzir o betume-espuma, o que pode reduzir o desempenho destas soluções em comparação com a utilização de betume a quente numa mistura convencional, embora se reduza significativamente a quantidade de água introduzida por comparação com soluções equivalentes com emulsão betuminosa.

Assim, utilizando este método de produção de materiais de pavimentação ligados com betume-espuma é possível produzir misturas de boa resistência, que poderão servir perfeitamente para utilizar em alternativa a outras misturas a quente mais caras e mais poluentes, ou para reduzir a espessura dessas camadas betuminosas superficiais produzidas a quente.

Ao utilizar betume-espuma é possível produzir novos materiais de pavimentação a frio, *in situ*, semelhantes aos que se pretende estudar neste trabalho (embora o processo utilizado em laboratório se aproxime mais da produção a frio em central). Assim, é possível utilizar materiais já existentes no local e também diminuir custos em termos de transporte do material da central para o local da aplicação. Na solução em que se vai reutilizar material fresado (reciclagem a frio com betume-espuma) ainda é possível reutilizar o betume existente no material fresado, reduzindo assim a quantidade de betume novo a introduzir na mistura.

Em resumo, o que se pretende é avaliar soluções de pavimentação mais sustentáveis recorrendo a soluções de reciclagem ou estabilização a frio com betume-espuma, pelas vantagens que as mesmas podem apresentar. De facto, caso se comprove que o desempenho e a durabilidade destas soluções é elevado, estas soluções serão muito vantajosas para utilização futura na manutenção da rede de estradas nacional (desde que existam equipamentos *in situ* e centrais móveis adequadas para aplicação destas soluções).

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo efetuar um estudo de desempenho sobre o uso de materiais granulares estabilizados com betume-espuma a frio, ou de materiais de pavimentação (material granular juntamente com material fresado) reciclados a frio com betume-espuma. De facto, hoje em dia é essencial encontrar formas alternativas de execução

de pavimentos rodoviários mais baratas e mais amigas do ambiente, o que pretende conseguir pela aplicação desta técnica a frio com betume-espuma.

Outro objetivo desta dissertação identificar vantagens e desvantagens da aplicação de betume-espuma na reciclagem de pavimentos, de forma a perceber a viabilidade desta técnica.

1.3. Conteúdo da dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos distintos incluindo o capítulo atual que serve de introdução à dissertação.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica de suporte à restante dissertação. Dado que a tecnologia de betume-espuma está sobretudo ligada à reciclagem com esse ligante, primeiramente é apresentada uma visão sobre a reciclagem, a sua importância e como esta é realizada. No caso da reciclagem de pavimentos, é feita uma descrição sumária das diversas técnicas existentes bem como das principais vantagens. Em seguida, ainda neste capítulo, é realizada uma análise sobre o que tem vindo a ser investigado de forma mais particular na área de atuação abordada neste trabalho, ou seja, a utilização de betume-espuma em soluções de pavimentação.

No terceiro capítulo, como o próprio nome indica, é realizada uma breve descrição dos materiais a serem incorporados nas misturas estudadas durante os trabalhos laboratoriais, bem como dos métodos utilizados nas diversas fases do trabalho. Relativamente aos métodos, estes abordam não só os métodos de ensaio como os métodos de produção das misturas a analisar.

O Capítulo 4 apresenta e faz a análise dos resultados obtidos, sendo separado pelas diversas etapas, começando pelo estudo do betume-espuma, seguido da análise do material fresado, da formulação das misturas e do estudo do processo de fabrico. Finalmente, e depois de conhecidas as percentagens de betume-espuma que devem ser incluídas nas misturas, é realizada a análise do comportamento das duas misturas estudadas, recorrendo aos ensaios de desempenho habitualmente utilizados para estudo de misturas betuminosas. O desempenho das duas misturas (apenas com material granular ou com uma mistura de material granular e material fresado) é comparado entre si e com misturas de referência obtidas de outros

trabalhos, de forma a ser possível compreender o sucesso das soluções estudadas neste trabalho.

No quinto e último capítulo, apresentam-se as considerações finais bem como trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos no domínio de investigação desta dissertação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE RECICLAGEM E BETUME-ESPUMA

2.1. Introdução

Nesta dissertação apresenta-se o estudo realizado em laboratório duas soluções de pavimentação produzidas a frio com betume-espuma. Numa das soluções simula-se o tratamento ou estabilização duma camada granular com betume-espuma, enquanto na outra situação se simula uma reciclagem a frio com betume-espuma na qual se iria juntar em quantidades iguais o material fresado numa camada superficial já degradada com o material granular subjacente.

A revisão bibliográfica que deve servir de suporte a este estudo deve basear-se em outros casos de aplicação de betume-espuma que tenham sido reportados a nível nacional ou internacional. A tecnologia de betume-espuma tem estado intimamente ligada à reciclagem a frio, enquanto a estabilização de camadas granulares com ligantes betuminosas costuma ser feita com emulsão betuminosa. Nesse sentido, como a aplicação de betume-espuma surge praticamente associada à tecnologia de reciclagem, numa primeira fase será feita uma revisão bibliográfica sobre reciclagem de pavimentos. Posteriormente, será apresentada a revisão bibliográfica mais particular que foi feita sobre a utilização de betume-espuma, referindo-se alguns casos concretos de aplicação a nível internacional.

2.2. Revisão bibliográfica sobre reciclagem de pavimentos

2.2.1. Breve descrição histórica sobre reciclagem de pavimentos

A reciclagem de pavimentos, a quente e a frio, com propósito de manutenção, reabilitação e construção foi reportada pela primeira vez em 1915 nos EUA. Até aos anos 30 reciclou-se uma quantidade considerável de pavimentos, principalmente urbanos. Após esta década, o número de obras com aplicação da técnica de reciclagem foi reduzido em virtude do aumento da oferta de betume no mercado, o que tornava a construção de um revestimento betuminoso mais barato do que a reciclagem do mesmo (Castro, 2003).

A partir da crise do petróleo, na década de 70 do século XX, com a falta de materiais asfálticos e com a crise económica internacional, os técnicos rodoviários, em conjunto com

outros organismos, voltaram-se para a ideia de reprocessar os materiais de pavimentação por meios de reciclagem de forma a restaurar as condições de traficabilidade das vias em níveis satisfatórios, tanto do ponto de vista técnico como financeiro (Bonfim, 2007).

Na década de 1990, iniciou-se a reciclagem a frio *in situ*, com a utilização das recicladoras móveis Caterpillar e Wirtgen, onde a operação se desenvolvia no local, com fresagem a frio do revestimento betuminoso, incorporação de emulsões rejuvenescedoras, homogeneização e espalhamento feito pelo próprio equipamento (Castro, 2003).

Atualmente, a crescente preocupação com a proteção ambiental que se verifica em todas as áreas leva a que, a nível da engenharia rodoviária, sejam já utilizadas técnicas de reciclagem de subprodutos resultantes de trabalhos de beneficiação e reforço de pavimentos flexíveis. Dentro destas, as técnicas de reciclagem a quente são as mais utilizadas. No entanto, estudos recentes têm vindo a demonstrar que as técnicas de reciclagem a frio parecem ser vantajosas em termos de poupança de energia e proteção ambiental. Em Portugal, apesar de já estarem previstas soluções de reciclagem em alguns projetos, verifica-se que a quantidade de material fresado sobra ainda atinge valores apreciáveis (Moreira *et al.*, 2006).

2.2.2. Vantagens e desvantagens da reciclagem a frio

Dado que as técnicas a estudar neste trabalho se enquadram essencialmente no domínio da reciclagem a frio (*in situ* ou em central), apresentam-se em seguida as principais vantagens e desvantagens associadas a essa tecnologia.

Um dos principais benefícios do processo de reciclagem a frio *in situ* é que o material do pavimento existente é reciclado e misturado com o agente estabilizador, permitindo que o pavimento da estrada seja reforçado, sem a necessidade de utilizar novos agregados que iriam aumentar os custos e o impacto ambiental. Outros benefícios incluem um curto período de construção bem como melhorias significativas para a segurança do trânsito. Estas vantagens somam custos unitários significativamente mais baixos para a reabilitação de estradas, em comparação com outros métodos. O processo oferece ainda a vantagem de ser capaz de continuar a funcionar durante períodos de tempo incerto, ou seja, quando a chuva ameaça o trabalho, este pode ser temporariamente interrompido e depois reiniciado novamente assim que seja possível (Lewis e Collings, 1999).

Na reciclagem a frio *in situ* a utilização do material do pavimento existente é total e o volume de novos materiais que precisam ser trazidos a obra proveniente de pedreiras é minimizado. Em consequência disso, o transporte é drasticamente reduzido assim como os danos causados pelos caminhões pesados que circulam na zona da obra. A energia total consumida pela reciclagem é significativamente menor se comparada a todas as outras opções de recuperação. O tempo de construção também é mais curto pois as recicladoras são capazes de altas taxas de produtividade, o que reduz significativamente os tempos de construção em comparação com outros métodos. O curto prazo de execução reduz os custos da obra e oferece outros benefícios ao utilizador da estrada, já que o trânsito sofre interferência por períodos mais curtos (Wirtgen, 2012).

Em relação a algumas desvantagens pode-se referir que, em casos de pavimentos muito heterogêneos, a técnica *in situ* a frio não é uma solução viável de reabilitação. Por exemplo, numa situação em que o pavimento a reabilitar possua camadas que ao longo da sua extensão vão apresentando diferentes constituições em termos de materiais, ou diferentes espessuras, tal obrigaria à realização de um estudo de formulação, acompanhado de um trecho experimental para todas as zonas do pavimento com características diferentes, o que do ponto de vista prático não seria razoável. O que também acontece é que as misturas recicladas *in situ* a frio são mais difíceis de compactar e por vezes apresentam problemas de desagregação (Cunha, 2010).

Também se pode referir que esta técnica necessita de tempo de presa ou cura, não se pode abrir de imediato ao tráfego, não pode aproveitar da melhor forma a capacidade aglomerante residual do betume envelhecido (material fresado) e por último o transporte e o espalhamento não são realizados através de equipamentos convencionais (Cabeças, 2014), limitando a sua aplicação aos casos em que se disponha desses equipamentos.

2.2.3. Diferentes tipos de reciclagem de pavimentos

Existem diferentes técnicas de reciclagem de pavimentos, que se distinguem principalmente quanto ao local onde são aplicadas (*in situ* ou em central) ou quanto à temperatura a que as misturas recicladas são produzidas (a frio, temperada ou a quente). Em seguida resumem-se as principais técnicas de reciclagem de pavimentos existentes atualmente. Posteriormente será

feita uma descrição mais pormenorizada das diferentes técnicas de reciclagem de pavimentos a frio e a quente.

a) Reciclagem *in situ* a frio

Na reciclagem *in situ* a frio, as camadas degradadas do pavimento são fresadas, de modo a serem reduzidas a dimensões apropriadas, para depois serem misturadas a frio com um aglutinante, no próprio local da obra. Este tipo de reciclagem permite que os materiais provenientes do antigo pavimento possam ser novamente utilizados numa camada de base do novo pavimento reabilitado. Uma vez que se trata de uma técnica a frio, os consumos de energia são menores quando comparados com as técnicas a quente, por não haver a necessidade de aquecer o material. A reciclagem *in situ* a frio apresenta também menores níveis de emissão de gases para a atmosfera quando comparada com uma solução tradicional de reabilitação de um pavimento (Cunha, 2010).

Neste tipo de reciclagem o material do pavimento existente é aplicado na sua totalidade para o fabrico da mistura a reciclar. As técnicas da reciclagem *in situ* podem ser feitas a quente ou a frio consoante o estado de degradação do pavimento (degradação estrutural ou funcional). Caso seja a frio, na mistura incorpora-se cimento ou emulsão betuminosa (com ou sem cimento) ou espuma betume (Cabeças, 2014). A reciclagem *in situ* é realizada utilizando máquinas especializadas, que possuem um tambor de fresagem equipado com um grande número de dentes de aço. Este tambor roda e procede à moagem do material existente na estrada como mostra a Figura 2.1 (Lewis e Collings, 1999).

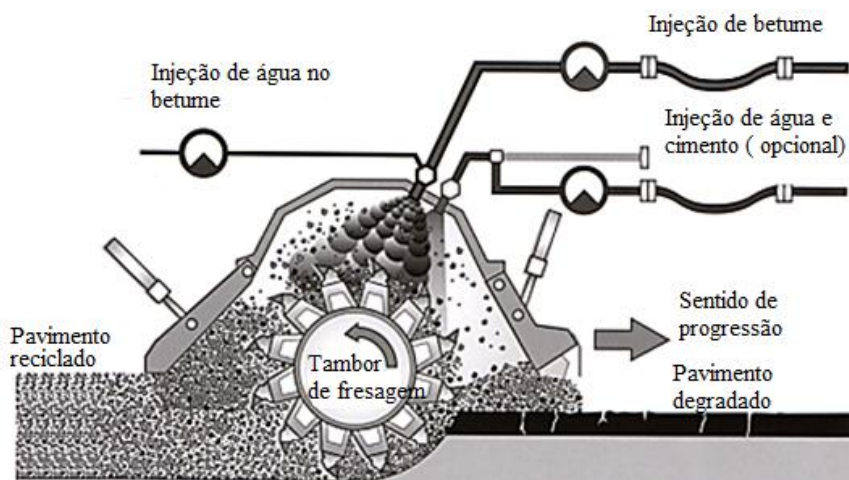


Figura 2.1 – Esquema de funcionamento do tambor de uma recicladora (adaptado de Lewis e Collings (1999))

b) Reciclagem *in situ* a quente

Este tipo de reciclagem difere da reciclagem *in situ* a frio quanto à temperatura de reciclagem, tipo de ligante e equipamento principal de reciclagem. Na verdade, a técnica de reciclagem *in situ* a quente, ao contrário de todos os outros tipos de reciclagem, não permite a reabilitação das características estruturais de pavimentos flexíveis degradados. Trata-se de uma técnica que permite apenas a reabilitação das características funcionais do pavimento ao nível da camada de desgaste, não podendo ser utilizada em situações em que o pavimento apresente defeitos ao nível das camadas estruturais do pavimento. De facto, a reciclagem a quente *in situ* é utilizada para diminuir a permeabilidade do pavimento à água, melhorar as propriedades do ligante envelhecido e aumentar a resistência à derrapagem (Cunha, 2010).

A reciclagem a quente *in situ* é um processo através do qual parte da estrutura do pavimento é removida e reduzida a dimensões apropriadas para depois ser misturada a quente no próprio local. A reciclagem a quente *in situ* é um processo que envolve o aquecimento e a escarificação da superfície do pavimento atingindo profundidades de 2,5 a 5,0 cm. Este método de reciclagem é realizado com equipamento complexo, que é constituído basicamente de duas unidades, uma pré-aquecedora e uma pequena central para reciclagem *in situ* (Figura 2.2). O pré-aquecimento é conseguido através de placas emissoras de raios infravermelhos, que aquecem o revestimento até uma temperatura de 130 °C (Castro, 2003).



Figura 2.2 – Fases da reciclagem a quente *in situ* (Baptista, 2006)

Existem duas variantes desta técnica, que difere dos processos a frio na medida em que o ligante é aquecido. A termorreperfilagem consiste no aquecimento do pavimento seguido da sua compactação, tendo por objetivo selar as fendas existentes e repor a regularidade longitudinal do pavimento. A termorregeneração compreende o aquecimento das camadas betuminosas, a sua escarificação, recomposição, nivelamento e compactação em nova camada. Após a reciclagem da camada existente é aplicada uma mistura nova com características de camada de desgaste. Esta técnica é especialmente adequada para obras de reabilitação funcional do pavimento (Baptista, 2006).

c) Reciclagem em central a quente

A reciclagem a quente em larga escala envolve a utilização de material com uma dispersão de características muito elevadas quando comparada ao processamento de mistura a quente convencional nova em central. Assim sendo, os projetos de reciclagem a quente em central exigem cuidadosa avaliação do pavimento, rigorosa caracterização dos materiais em laboratório e rígido controlo do processo de produção para que se garanta a qualidade do material reciclado (Castro, 2003).

A técnica de reciclagem a quente em central (Figura 2.3) consiste em fabricar uma mistura betuminosa a quente, utilizando materiais fresados de pavimentos antigos de modo a conseguir bons resultados técnico-económicos e ambientais. Para isso, são adicionados novos materiais corretivos, agregados e betume, de modo a conseguir misturas com desempenho idêntico ao das misturas fabricadas a quente sem incorporação de material fresado (Baptista, 2006).



Figura 2.3 – Fases da reciclagem a quente em central (Baptista, 2006)

As misturas recicladas em central a quente apresentam um desempenho aproximadamente equivalente àquele que é verificado para as misturas novas produzidas a quente em central. As misturas recicladas em central podem ser utilizadas no novo pavimento reabilitado em camadas de base, de regularização e até mesmo em camadas de desgaste. Por se tratar de uma técnica em central, este tipo de reciclagem tem início com a fresagem a frio do pavimento, numa espessura que permita a eliminação das fendas existentes no pavimento. De seguida o material fresado é transportado em camiões até à central de produção das misturas betuminosas, e depois de processado numa nova mistura é levado para aplicação a quente num novo pavimento (Cunha, 2010).

d) Reciclagem temperada em central

Esta técnica é bastante recente no nosso país, existindo apenas algumas aplicações em obra, das quais se destacam os trabalhos apresentados por, (Dinis-Almeida e Afonso, 2015, Dinis-Almeida *et al.*, 2012a, Dinis-Almeida *et al.*, 2012b). Tal como acontece nas outras técnicas de reciclagem em central, esta também começa com a fresagem do pavimento antigo a reabilitar, sendo depois o material transportado até à central de produção de misturas betuminosas. Daí a importância de realizar um estudo de viabilidade técnico económico para cada situação, de modo a garantir que os custos de transporte do material fresado não tornem a técnica inviável do ponto de vista económico, comprometendo o sucesso do processo de reciclagem. Depois de transportado até à central o material é misturado com uma emulsão de betume modificado (Cunha, 2010) ou com betume-espuma caso a central disponha desse sistema, de modo a produzir a mistura reciclada a menores temperaturas do que as utilizadas na reciclagem a quente.

e) Reciclagem em central a frio

A reciclagem a frio em central pode ser realizada em centrais estacionárias, valendo-se das centrais de solos, que recebe o material fresado e o processa com a adição de material de enchimento, caso necessário, e agente rejuvenescedor emulsionado. Essa técnica é muito utilizada em países europeus e a percentagem de reaproveitamento do material fresado pode atingir cerca de 90%. Também podem ser utilizadas centrais móveis, que podem produzir misturas com material virgem ou material proveniente de fresagem (Castro, 2003).

Além disso, a reciclagem a frio em centrais móveis (Figura 2.4) possibilita que os materiais de um pavimento existente sejam selecionados e tratados previamente, aumentando assim o nível de confiança que pode ser alcançado no produto final (Wirtgen, 2012).



Figura 2.4 – Exemplo de reciclagem a frio em central móvel (Wirtgen, 2012)

Na técnica de reciclagem em central a frio o material é removido através de uma prévia fresagem do pavimento e, posteriormente, é misturado à temperatura ambiente com um ligante numa central de produção de misturas betuminosas. Este tipo de reciclagem não é muito utilizado dado que normalmente as técnicas de reciclagem a frio são aplicadas *in situ*. A principal vantagem decorrente do processo em central está ligada com o maior controlo de qualidade na adição do ligante no processo de mistura. No entanto, há que transportar o material fresado para o local onde se encontra a central de produção da mistura, e de novo para o local de reabilitação do pavimento. Assim, dado o elevado número de operações envolvidas, é fundamental procurar avaliar todos os custos de modo a que este tipo de reciclagem possa ser viável do ponto de vista económico (Cunha, 2010).

2.2.4. Descrição das diferentes técnicas de reciclagem de pavimentos a frio

Em seguida descreve-se com mais algum pormenor as principais técnicas de reciclagem de pavimentos efetuadas a frio, e que se distinguem principalmente pelo tipo de ligante utilizado em cada situação.

Reciclagem a frio *in situ* com cimento

Em pavimentos degradados, com elevada espessura das camadas granulares, a reciclagem com cimento pode constituir, na maioria dos casos, uma solução económica e tecnicamente adequada. A camada reciclada acaba por constituir uma camada do tipo “agregado de granulometria extensa tratado com cimento” (AGEC) e apresenta resistência muito mais alta que a anterior, passando a estrutura final a ser idêntica a um pavimento semirrígido. A sequência construtiva adotada envolve as fases que se ilustram na Figura 2.5.



Figura 2.5 – Exemplo de reciclagem *in situ* com cimento em calda (Baptista, 2006)

A introdução do cimento na mistura pode ser feita a seco ou em calda (por via húmida). Esta alternativa, apesar de aumentar muito a vida residual da estrutura reabilitada, apresenta

algumas limitações. Obriga sempre à consideração de camadas de reforço, capazes de contrariar o natural fendilhamento da camada reciclada, sendo alternativas as misturas fabricadas com betume modificado com borracha ou a aplicação duma membrana retardadora de propagação de fendas antes da aplicação duma mistura betuminosa convencional (Baptista, 2006).

Este processo é feito numa única operação, em que o pavimento é fresado ou desagregado por uma ou várias máquinas próprias para fresar, conforme a largura da faixa de rodagem e o rendimento que a empresa construtora queira garantir para a execução dos trabalhos. Mistura-se cimento e água formando uma calda, sendo esta incorporada no momento da desagregação do material através dos injetores. Em vez da calda, o cimento pode ser espalhado manualmente no pavimento antes da passagem da recicladora, embora esta operação seja feita normalmente em obras de pequenas dimensões, cuja extensão não justifique outra preparação, nem uma mistura homogénea do cimento (Cabeças, 2014).

Reciclagem a frio *in situ* com emulsão betuminosa

Esta técnica é semelhante à reciclagem com cimento, variando apenas o ligante que é uma emulsão betuminosa de cura lenta. As emulsões são sistemas coloidais, ou seja, dois líquidos imiscíveis, a água e o betume, que coabitam através da dispersão de pequenas gotículas de betume na água, o que é ajudado pela introdução dum sabão ácido ou básico que assegura aquela dispersão. Na Figura 2.6 apresenta-se um esquema de produção de mistura reciclada *in situ* com emulsão betuminosa (Baptista, 2006).

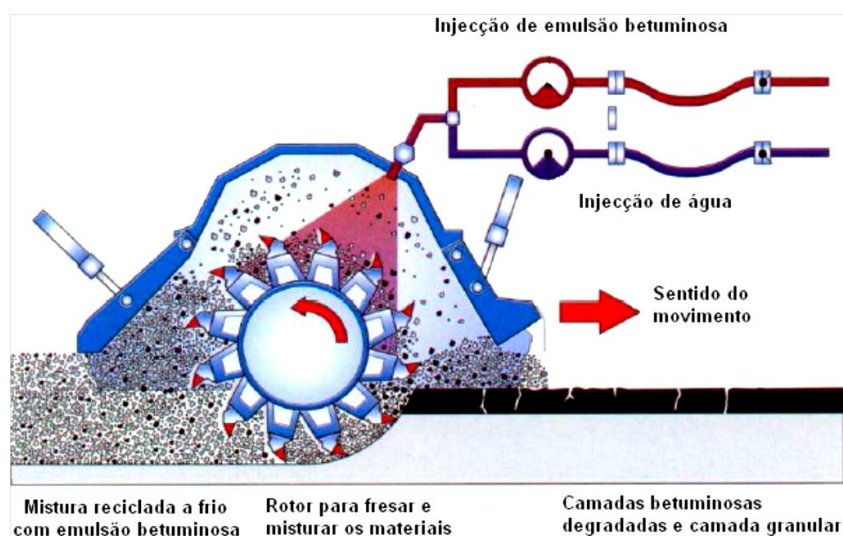


Figura 2.6 – Exemplo de reciclagem *in situ* com emulsão betuminosa (Baptista, 2006)

Quando se trata o material com emulsão betuminosa, o volume do betume aumenta e terá tendência a revestir as partículas individuais do material. Isto pode conduzir a uma ligação contínua, tornando a mistura asfáltica, isto é um material betuminoso produzido com mistura a frio (Wirtgen, 2012).

A sequência do processo de reciclagem envolve as fases que se observam na Figura 2.7. As desvantagens da técnica estão associadas a uma maior sensibilidade às condições meteorológicas. A reciclagem a frio *in situ* com emulsão exige um tempo de cura de duas a três semanas, não devendo nesse período ser aplicada nova camada. Por essa razão, é extremamente importante que os trabalhos se realizem em tempo seco, sendo a técnica não recomendada em zonas húmidas (Baptista, 2006).

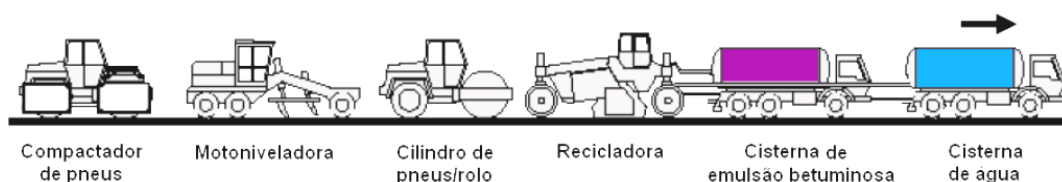


Figura 2.7 – Fases da reciclagem *in situ* com emulsão betuminosa (Baptista, 2006)

Atualmente existem máquinas que fazem essa adição automaticamente, com o mesmo tratamento antes da máquina recicladora fazer a sua passagem. Acoplada à máquina recicladora tem-se a cisterna de emulsão e o tanque de água. Fresa-se o pavimento até a uma determinada profundidade pré-estabelecida, faz-se a mistura com o ligante e água, espalha-se e compacta-se (Cabeças, 2014).

Reciclagem a frio *in situ* com betume-espuma

É uma técnica idêntica às anteriores, sendo, porém, neste caso, usado como ligante o betume-espuma. Tal como a reciclagem com emulsão betuminosa, ambas são de sistema coloidal. A reciclagem a frio *in situ* com betume-espuma é um processo novo e há boas perspectivas de vir a ser uma técnica bastante utilizada, uma vez que tem a vantagem de, contrariamente à reciclagem com emulsão betuminosa, após compactação o pavimento entrar de imediato em serviço, sem que haja tempo de cura e é aplicada à temperatura ambiente. É, desse modo, uma técnica muito usada em países cujas temperaturas são extremas e com bastante rentabilidade na execução dos trabalhos (Cabeças, 2014). Sendo este o tema principal desta dissertação, será tratado com mais rigor no desenvolver deste trabalho.

2.2.5. Descrição das diferentes técnicas reciclagem de pavimentos a quente

A seguir descreve-se com mais pormenor as principais técnicas de reciclagem de pavimentos efetuadas a quente, e que se distinguem principalmente pelo local onde são aplicadas.

Reciclagem a quente em central com betume

O fabrico é idêntico ao de uma mistura betuminosa a quente tradicional. Porém, neste processo de reciclagem o que difere é a incorporação do material fresado proveniente do pavimento antigo, degradado e envelhecido (Figura 2.8), mantendo o objetivo de adquirir excelentes resultados a nível ambiental, técnico e económico. A qualidade das misturas realizadas com os materiais reciclados deve ser comparada à das realizadas com materiais novos, pois ambas as misturas devem apresentar um desempenho aproximadamente equivalente (Cunha, 2010).

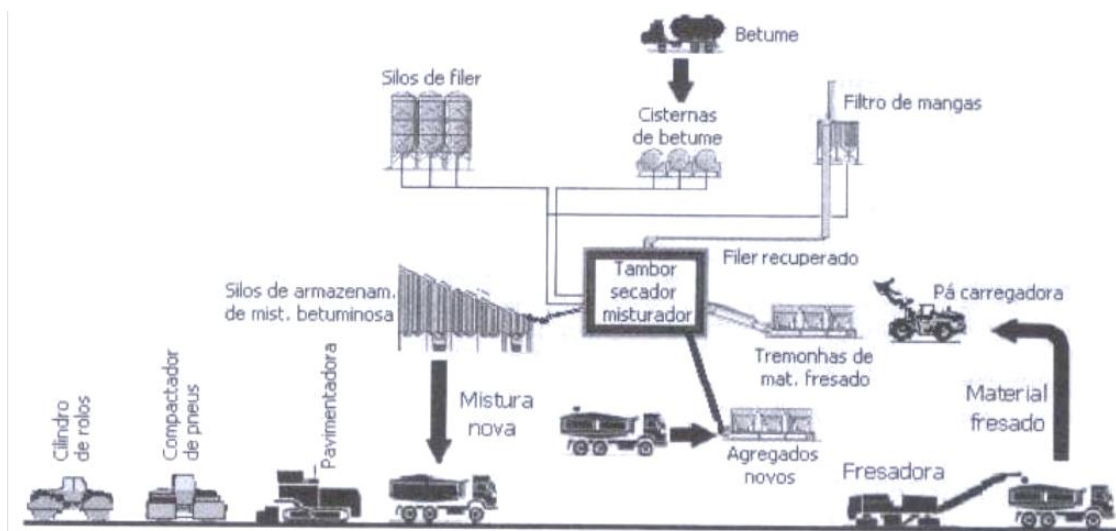


Figura 2.8 – Fases da reciclagem a quente em central com betume (Cunha, 2010)

O objetivo é reduzir o recurso a materiais novos, mas existe uma limitação na quantidade de material fresado (não se pode usar 100%) a incorporar na mistura reciclada. Deve estudar-se a viabilidade económica antes de se aplicar este processo, para verificar custos inerentes ao transporte e ao material novo a incorporar (Cabeças, 2014).

Reciclagem a quente *in situ* com betume e rejuvenescedor

Este tipo de reciclagem é utilizada para diminuir a permeabilidade do pavimento à água, melhorar as propriedades do ligante envelhecido e aumentar a resistência à derrapagem. No

que diz respeito ao ligante para a técnica de reciclagem *in situ* a quente é geralmente utilizado um produto rejuvenescedor, que comporta os componentes do betume que se perderam como consequência do seu envelhecimento, devolvendo ao betume as suas características (físicas e químicas) perdidas. Consoante a composição do betume envelhecido, ter-se-á a composição do rejuvenescedor, uma vez que se trata de produtos feitos à medida para as circunstâncias concretas de cada projeto. A reciclagem *in situ* a quente, envolve um “comboio” de equipamentos bastante complexos (ver Figura 2.2), sendo que um deles está munido de painéis radiantes, que no local elevam a temperatura da superfície do pavimento, facilitando assim, a desagregação do material superficial, por uma fresadora (Cunha, 2010).

Este tipo de reciclagem não é viável em Portugal, visto que exige um equipamento específico e bastante dispendioso. Além disso, trata-se de uma técnica complexa, exigente e incómoda devido às dimensões da maquinaria não sendo aconselhável em termos ambientais, uma vez que durante o fabrico do pavimento emite substâncias para a atmosfera (Cabeças, 2014)

2.2.6. Casos de aplicação em Portugal

Em 2004, no âmbito das competências da antiga JAE, atual IP, e das Câmaras Municipais, foram identificados os principais lanços de estradas nos quais foram implementadas algumas das técnicas de reciclagem, num total superior a 1.400.000 m². O acompanhamento técnico feito na maioria destas empreitadas pelas várias entidades envolvidas na sua execução (LNEC, IEP e empresas privadas) tiveram como objetivo a aquisição de dados relativos à aplicação das várias técnicas construtivas, de forma a possibilitar o estabelecimento de conclusões e propostas de melhoria sobre diversos aspetos, nomeadamente: métodos de formulação das misturas e respetivas técnicas de ensaio, evolução dos processos de cura dessas misturas, comportamento mecânico das misturas, normalização de especificações e métodos de ensaio. Na Tabela 2.1 apresentam-se, de uma forma concisa, os dados fundamentais recolhidos dos elementos caracterizados de cada obra (Martinho *et al.*, 2004).

2.2.7. Casos de aplicação a nível internacional

O constante desenvolvimento das técnicas de reciclagem tem vindo a fazer como que a sua aplicação seja cada vez mais usual a nível internacional, como se pode ver em seguida na Tabela 2.2 e na Tabela 2.3, respetivamente para os anos de 2012 e 2013.

Tabela 2.1 – Principais obras de reciclagem em Portugal até 2004 (Martinho *et al.*, 2004)

Ref ^o	Ano	Distrito	Estrada	Área aprox. (m ²)	Tipo de reciclagem	Espessura (m)	Ligante
1	1992/93	Porto	EN 12	100 000	<i>In situ</i> a frio	0,20	Emulsão (5%) e cimento (2%)
2	1995	Viseu	EN 222	120 000	<i>In situ</i> a frio	0,15	Emulsão (5%) e cimento (2%)
3	1997/98	Porto	EN 108	250 000	<i>In situ</i> a frio	0,15	Emulsão (3,5%) e cimento (2%)
4	1997/98	Porto	EN's 14, 104 e 105	230 000	A quente em central	0,15	Betume (?)
5	1998	Évora	EN 254	36 400	<i>In situ</i> a frio	0,10	Emulsão (4,5%) e cimento (1,5%)
6	1998/99	Beja	EN 260	126 000	<i>In situ</i> a frio	0,12	Emulsão (5%) e cal (1-2%)
7	2001	Beja	EN383	116 600	<i>In situ</i> a frio	0,20	Cimento (4%)
8	2001	Bragança	IP 4	70 000	<i>In situ</i> a frio	0,30	Cimento (3,5%)
9	2001	Viseu	Arruamentos urbanos	-	Semiquente em central	0,04 - 0,12	Emulsão (3,5%)
10	2002	Portalegre	IP 2	100 000	<i>In situ</i> a frio	0,15	Emulsão (3%)
11	2002	Porto	Arruamentos urbanos	14 720	<i>In situ</i> a frio	0,20	Betume-espuma (3%) e cimento (2%)
12	2003/04	Évora	EN 114	120 000	<i>In situ</i> a frio	0,16	Cimento (4%)
13	2004	Porto	EN 222	86 000	<i>In situ</i> a frio	0,12	Emulsão (3%) e cimento (1%)
14	2004	Faro	EM 529	30 000	<i>In situ</i> a frio	0,15	Cimento (4,5%)
15	2004	Leiria/ Coimbra	AE 1	-	A quente em central	-	Betume (3,5%)

Tabela 2.2 – Estado da reciclagem na Europa, Japão, EUA e Canadá em 2012 (EAPA, 2013)

País	RAP disponível (toneladas)	Percentagem de RAP disponível utilizado em cada caso (%)				Novas misturas a quente e temperadas com RAP (%)
		Reciclagem a quente e temperada	Reciclagem semitemperada	Reciclagem a frio	Camadas não ligadas	
Áustria	750 000	95	-	3	2	-
Bélgica	1 500 000	61	-	-	-	49
República Checa	1 400 000	22	0	30	15	10
Dinamarca	580 000	77	-	-	23	47
Finlândia	1 000 000	-	-	-	-	65
França	6 500 000	62	-	-	-	>60
Alemanha	11 500 000	87	-	-	13	97
Grã-Bretanha	4 500 000	-	-	-	-	-
Hungria	100 777	93	0	7	0	46
Islândia	15 000	-	-	-	25	2,5
Irlanda	150 00	10	0	0	-	10
Itália	10 000 000	20	-	-	-	-
Luxemburgo	210 000	90	5	5	0	60
Holanda	4 000 000	80	-	15	-	73
Noruega	787 689	18	-	2,9	66	13
Polónia	100 000	4	-	-	-	0,2
Roménia	20 000	30	15	30	25	5
Eslováquia	33 000	90	0	5	5	0
Eslovénia	10 000	-	30	20	50	-
Espanha	368 000	66	-	11	6	6,4
Suécia	1 000 000	75	5	5	10	70
Suíça	1 575 000	52	19	17	9	24
Turquia	3 816 000	2	-	5	93	1
Japão	-	-	-	-	-	70
EUA	64 000 000	95	-	-	5	70
Ontário-Canadá	3 500 000	80	-	3	17	75

Tabela 2.3 – Estado da reciclagem na Europa, Japão e EUA em 2013 (EAPA, 2014)

País	RAP disponível (toneladas)	Porcentagem de RAP disponível utilizado em cada caso (%)				Novas misturas a quente e temperadas com RAP (%)
		Reciclagem a quente e temperada	Reciclagem semitemperada	Reciclagem a frio	Camadas não ligadas	
Áustria	750 000	95	-	3	2	-
Bélgica	1 500 000	61	-	-	-	51
República Checa	1 450 000	18	0	25	20	10
Dinamarca	790 000	83	-	-	17	58
Finlândia	860 000	-	-	-	-	20
França	6 900 000	64	-	-	-	>65
Alemanha	11 500 000	90	-	-	10	-
Grã-Bretanha	5 000 000	-	-	-	-	-
Hungria	88 000	80	0	10	10	20
Islândia	15 000	-	-	-	-	3
Irlanda	150 000	-	-	-	-	-
Itália	10 000 000	20	-	-	-	-
Luxemburgo	300 000	90	0	10	0	50
Holanda	4 500 000	76	-	-	-	70
Noruega	686 268	21	0	5	74	20
Roménia	22 000	20	20	20	30	10
Eslováquia	26 000	90	0	5	5	-
Eslovénia	26 000	26	0	20	54	5
Espanha	205 000	85	-	7	8	1,3
Suécia	900 000	80	5	5	10	70
Suíça	1 370 000	48	17	15	8	27
Turquia	1 200 000	3	-	1	96	1
Japão	-	-	-	-	-	76
EUA	69 000 000	92	-	-	8	-

Analisando os dados apresentados é possível verificar que a monitorização feita sobre esta questão é ainda reduzida, uma vez que existem vários países sobre os quais não foi fornecido qualquer tipo de informação. É possível igualmente concluir que se tem existido uma evolução no que diz respeito à reciclagem de pavimentos, nomeadamente no que diz respeito à quantidade de material fresado reutilizado em reciclagem e à diversificação das técnicas de reciclagem utilizadas.

2.3. Revisão bibliográfica sobre utilização de betume-espuma em pavimentação

2.3.1. Breve descrição história

Há mais de 40 anos atrás, no Laboratório de Pesquisa de Betumes da estação experimental de engenharia da Universidade do Estado de Iowa, o Dr. Landis Csanyi injetou vapor de água no betume para criar massa de espuma. Inicialmente, começou por experimentar com o processo patenteado por Albert Sommer, em que o ligante era introduzido numa misturadora numa

forma atomizada e o agregado passava por uma “nuvem” de betume atomizado. Foi a progressão natural que levou ao desenvolvimento de um sistema em que o ligante é espumado antes de contactar com os agregados (Jenkins, 2000).

Nas centrais betuminosas da década de 50, o betume era aquecido através de um jato de vapor de água. Segundo Csanyi, ocorria por vezes o contacto do vapor de água com o betume, originando a expansão do mesmo e o transbordo para fora do reservatório, com um comportamento fluido semelhante ao da água. Por vezes, o betume penetrava no solo e adería ao mesmo aglomerando-o. Para Csanyi tornaram-se então evidentes os benefícios que poderiam advir da reprodução deste tipo de fenómeno em condições controladas. Csanyi desenvolveu, então um processo de produção de espuma de betume que consistia na injeção de vapor de água no betume quente através de um injetor idealizado por si (Teixeira, 2006).

Em 1982, a Austrália sozinha tinha cerca de 2,9 milhões de m² em pavimentos com betume-espuma, geralmente como uma camada de base ou sub-base. A África do Sul, Nova Zelândia, Japão, Alemanha e outros países tinham no total uma menor área pavimentada com camadas de betume-espuma. Ainda na mesma data os EUA tinham produzido centenas de quilómetros de superfície de camadas com betume-espuma. Como o uso de betume-espuma foi expandido para diversos países, a seleção de critérios para definir a mistura ótima de componentes ficou diversificada, baseando-se em diferentes formulações e interpretações do produto. Os procedimentos de formulação para misturas com betume-espuma não têm sido formalizados devido principalmente à sua aplicação ainda limitada, e frequentemente ficam reservados a aproximações do processo por diferentes operadores. Isto resultou na ausência de diretrizes do produto, prejudicando o desenvolvimento do processo (Dama, 2003).

A literatura disponível sobre betume-espuma requer revisão de forma que ganhe perspectiva na evolução da formulação de mistura de há várias décadas para o pensamento atual. A falta de procedimentos básicos de formulação de misturas resultou numa grande especulação referente a vários modelos de rutura de materiais incluindo a deformação permanente, fadiga e corte. Isto tem levado à evolução das propriedades da mistura com betume-espuma nos vários trabalhos de laboratório usando uma variedade de ensaios, incluindo entre outros, o ensaio de resistência à tração indireta (ITS), a resistência à compressão não confinada (UCS), a estabilidade Marshall entre muitos outros (Jenkins, 2000).

2.3.2. Vantagens e desvantagens da reciclagem com betume-espuma

A utilização de betume-espuma na reciclagem de pavimentos, segundo Muthen (1998) e Ramanujam e Jones (2007), apresenta as seguintes vantagens:

- O betume-espuma aumenta a resistência ao corte e reduz a suscetibilidade à humidade de materiais granulares. As características de resistência do betume-espuma aproximam-se às de materiais cimentados, mas o betume-espuma é flexível e resistente à fadiga.
- O tratamento com betume-espuma pode ser utilizado em uma gama mais ampla de tipos de agregados do que as outras misturas produzidas a frio.
- Menor quantidade de betume utilizada e redução de custos de transporte.
- Redução do tempo de execução, pois o betume-espuma pode ser compactado imediatamente e pode suportar tráfego quase imediatamente depois de compactado.
- Redução do consumo de energia, pois apenas o betume necessita de ser aquecido, enquanto os agregados são misturados a frio.
- Os efeitos colaterais ambientais resultantes da evaporação de voláteis a partir da mistura são evitados, pois não resulta liberação de compostos voláteis da cura destas misturas.

Ainda de acordo com Jenkins (2000), a reciclagem de pavimentos com betume-espuma apresenta as seguintes vantagens:

- Conservação de energia não renovável e redução dos riscos de saúde, pois no caso das emulsões e do betume-espuma os ligantes não possuem um solvente proveniente do petróleo para reduzir a sua viscosidade de modo a facilitar a mistura.
- Os materiais existentes no local podem ser utilizados diminuindo o custo de transportes que eventualmente poderiam ser feitos para o local.
- Capacidade de armazenamento do material, pois as misturas com betume-espuma podem ser produzidas em massa e armazenadas perto do ponto de aplicação para serem utilizadas e compactadas numa grande escala.
- Onde forem encontrados problemas com controlo de cotas ou com o nível de compactação, as camadas de betume-espuma podem ser retrabalhadas.

Além das vantagens acima mencionadas, também há interesse em enumerar algumas desvantagens da utilização de misturas tratadas com betume-espuma para se procurar evitar a sua ocorrência.

Nesse sentido, segundo Jenkins (2000) e Ramanujam e Jones (2007) as principais desvantagens do betume-espuma na reciclagem de pavimentos podem ser as seguintes:

- Este procedimento requer um nível de experiência avançado, de modo a produzir um produto de boa qualidade;
- O procedimento de mistura não é tão bem formulado para misturas a frio como para misturas a quente o que torna o processo de aquisição de experiência e especificação difícil;
- A utilização de alguns aditivos aumenta os custos do ligante;
- Não foram desenvolvidas funções de transferência entre o desempenho das misturas com betume-espuma em laboratório e no pavimento, tornando a exatidão do processo difícil;
- Sem uma previsão a longo termo do desempenho do pavimento, o custo do ciclo de vida é difícil de prever. Por esta razão muitos clientes não estão preparados para correr o risco de usar uma solução ainda pouco estudada.

2.3.3. Metodologia de caracterização do betume-espuma

O betume-espuma pode ser produzido por meio da injeção de pequenas quantidades de moléculas de água fria, como uma névoa fina, em betume de penetração quente dentro de uma câmara de expansão. Desta maneira, após a formação de espuma (no estado de baixa viscosidade temporário), o betume pode ser misturado com agregados minerais à temperatura ambiente. Esta etapa é necessária para se produzir uma mistura de qualidade e consistência aceitáveis a uma temperatura muito inferior. De entre as aplicações deste processo destaca-se a reabilitação de estradas recorrendo à reciclagem, os trabalhos de construção intensiva e construção de estradas novas. Tal como acontece com a maioria dos processos de engenharia de pavimentação, existe um grau de variabilidade inerente à estabilização com betume-espuma. Em particular, a qualidade da espuma pode variar para diferentes betumes e equipamentos de formação de espuma. Para controlar a qualidade do betume-espuma e da mistura estabilizada, o betume-espuma requer a uma análise e monitoramento cuidados (Jenkins *et al.*, 2000).

O mecanismo que produz o betume-espuma é o apresentado na Figura 2.9. Quando se injeta uma pequena quantidade de água fria, em torno de 1 a 2%, ao betume quente (160 a 180 °C), produz-se uma troca de energia entre o betume e a água, levando a temperatura das gotas de

água a mais de 100 °C, e fazendo com que haja uma evaporação instantânea. As bolhas de vapor são forçadas a introduzir-se na fase contínua do betume devido à pressão da câmara de expansão, ficando assim aprisionadas. O betume, junto com o vapor aprisionado, é liberado da câmara de expansão através de uma válvula e o vapor começa a expandir-se formando bolhas de asfalto contidas pela tensão superficial deste. A expansão termina quando as forças de tensão superficial do asfalto se equilibram com as tensões do interior das bolhas (estado de equilíbrio). À medida que a temperatura da espuma se reduz, o vapor aprisionado se condensa causando o colapso das bolhas e a desintegração da espuma. A desintegração da espuma produz milhares de gotículas de betume, as quais, ao unirem-se, recuperam o seu volume inicial sem alterar significativamente as propriedades reológicas do betume original (Castro, 2003). É esta sucessão de acontecimentos, e este fenómeno de expansão, que provoca o aumento de volume inicial de betume e a formação da espuma, que não é mais do que um acontecimento simultâneo do fenómeno descrito para uma infinidade de bolhas de água (Sunarjono, 2013).

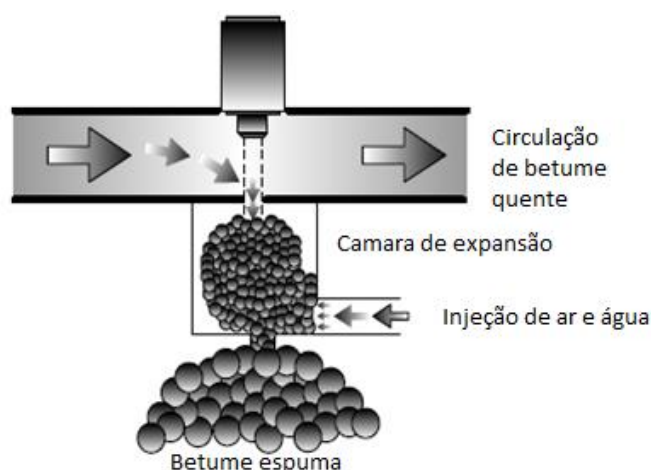


Figura 2.9 – Esquema de produção de betume-espuma (Sunarjono, 2013)

O betume-espuma caracteriza-se por dois parâmetros, a taxa de expansão (ER) e o tempo de meia vida ($\tau_{1/2}$). A taxa de expansão ER é a relação entre o volume máximo da espuma e o volume inicial do betume que lhe deu origem e constitui uma medida da viscosidade da espuma. O tempo de meia vida ($\tau_{1/2}$) corresponde ao intervalo de tempo, em segundos, que decorre desde o instante em que a espuma atinge o seu volume máximo até ao momento em que atinge metade desse volume. Este parâmetro corresponde a metade do tempo de vida total da espuma e é um indicador do tempo disponível para proceder à mistura dos agregados com espuma, ou seja, é um parâmetro que avalia a sua estabilidade. A expansão e o tempo de meia

vida estão relacionados com a percentagem de água utilizada na produção da espuma, da forma como mostra a Figura 2.10, ou seja, quanto maior for a percentagem de água utilizada na produção da espuma, maior o valor da expansão e menor o tempo de meia vida ou estabilidade da espuma (Teixeira, 2006).

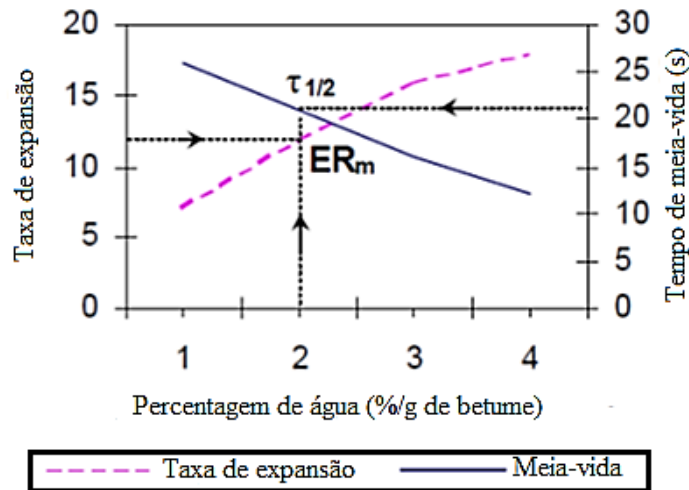


Figura 2.10 – Relação das propriedades do betume-espuma com a percentagem de água (adaptado de Jenkins *et al.* (2000))

Depois de um estudo intensivo das características do betume-espuma, tornou-se evidente que estes dois parâmetros e a forma em que estão atualmente definidos são insuficientes para a caracterização das propriedades do betume-espuma. De facto, o resto da curva que descreve o colapso da espuma com o tempo é ignorada ao analisar apenas a expansão e o tempo de meia vida apresentados na Figura 2.10. Melhores ou os novos parâmetros que utilizem toda a curva de decaimento são necessários para a caracterização da espuma e para previsão do desempenho do betume-espuma depois de aplicado em mistura betuminosas para pavimentação. Assim, um novo protocolo foi estabelecido para uniformizar a investigação e ensaio da “capacidade de espuma” de diferentes betumes (Jenkins *et al.*, 2000).

Como o objetivo é maximizar ambos os parâmetros, expansão e tempo de meia vida, de modo a melhorar a dispersão do betume na mistura, é perceptível a dificuldade na determinação de um valor ótimo de percentagem de água pois é necessário escolher qual das duas propriedades da espuma deve ser valorizada em relação à outra, sendo evidente a subjetividade de que se reveste tal procedimento. Entretanto, ao representar a medida da expansão do betume-espuma durante o intervalo de tempo que decorre entre o atingir o valor máximo da expansão e a sua

redução contínua até atingir o volume inicial de betume, obtém-se uma curva semelhante à apresentada na Figura 2.11. Esta curva de queda da espuma não é mais do que o registo da medição da expansão da espuma em intervalos de tempo predeterminados, desde que a espuma atinge a sua expansão máxima até ao seu colapso (volume inicial do betume). O processo que decorre neste intervalo de tempo designa-se por decaimento do betume-espuma (Teixeira, 2006).

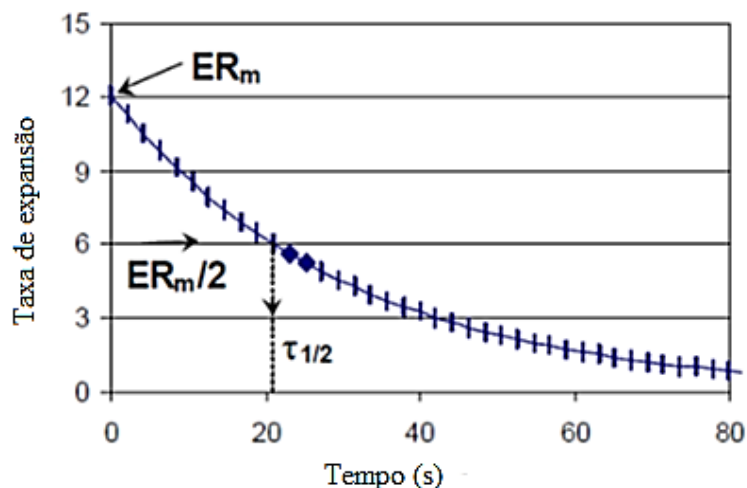


Figura 2.11 – Exemplo da curva de queda do betume-espuma (Jenkins *et al.*, 2000))

2.3.4. Estudo do decaimento do betume-espuma

Em laboratório podem ser identificadas várias causas para a queda da espuma com o tempo. O contacto das bolhas de espuma com o ar e com o recipiente, a temperaturas inferiores, provoca um arrefecimento das bolhas. O arrefecimento das bolhas induz uma diminuição da pressão do vapor de água encapsulado. Se essa diminuição da pressão interior for suficiente para que a pressão no interior da bolha tome valores inferiores aos da pressão de recuperação da camada de betume que a envolve, essa bolha perde volume, podendo mesmo entrar em colapso.

É evidente que bolhas maiores, tendo maior superfície específica, tendem a entrar em colapso primeiro, pois perdem mais calor do que as mais pequenas, fruto da sua maior superfície específica que permite uma maior troca de calor com o exterior. Se a gota de água que deu origem à bolha de espuma for muito grande e a sua expansão, em forma de vapor, ultrapassar o limite de expansão da camada de betume, a bolha rebenta deixando escapar o vapor contido

no seu interior. Contudo é usual neste caso que nem toda a água se transforma em vapor, existindo ainda uma pequena gota de água no interior da bolha de espuma que rebenta. Desta forma pode-se formar outra bolha de espuma originada por esta gota de água, embora a energia existente para este novo processo de formação de bolha de espuma seja menor (Teixeira, 2006).

A Equação 2.1 indicada em seguida foi desenvolvida por Jenkins *et al.* (2000) com o intuito de descrever a queda de espumas de betume obtidas com betumes não aditivados, ou seja, sem adição de aditivos utilizados com o objetivo de melhorar as propriedades da espuma.

$$ER(t) = ER_m \times e^{\frac{-\ln 2}{\tau_{1/2}} \times t} \quad (2.1)$$

Em que:

$ER(t)$ – Expansão função do tempo após descarga;

ER_m – Expansão máxima medida (imediatamente após descarga);

$\tau_{1/2}$ – Semivida ou tempo de meia vida;

t – Tempo medido após descarga.

Esta expressão permite estimar a curva de queda das espumas de betume, permitindo obter um registo contínuo da curva de queda que se apresenta semelhante ao da Figura 2.11 já apresentada. Um fator importante, e que deve ser tomado em consideração, é a impossibilidade de medir o volume da espuma de betume durante o tempo que decorre entre o início e o fim da produção da espuma (tempo de spray, t_s). Note-se que só é possível medir a expansão após o instante em que se verifica o término da produção da espuma (Jenkins *et al.*, 2000).

Na Figura 2.12 é possível observar que só passados cerca de 5 segundos de se começar a fazer o *spray* se mede o volume da espuma, tomando este como o volume máximo. O ramo ascendente da curva corresponde ao intervalo de tempo de *spray* da espuma e o ramo descendente corresponde à queda da espuma após o *spray* (Teixeira, 2006).

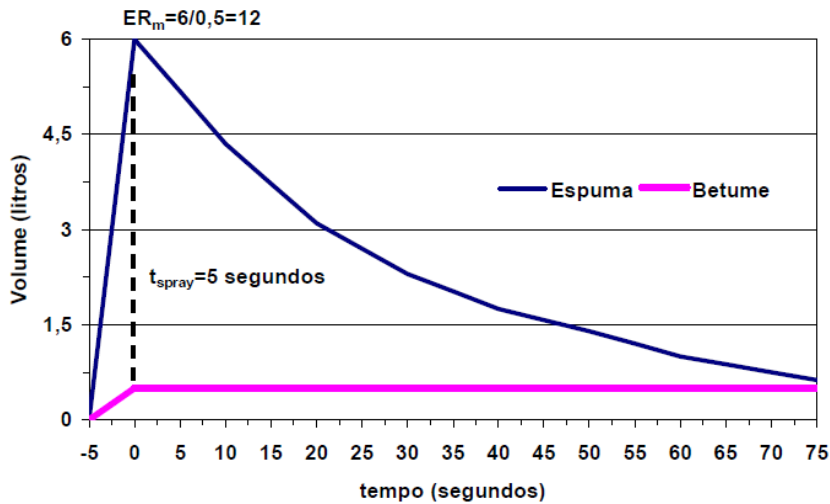


Figura 2.12 – Ciclo de vida de uma espuma betuminosa (Teixeira, 2006)

Na Figura 2.13 está representada a curva de queda da mesma espuma, mas efetuando uma pequena correção que consiste em extrapolar o valor da expansão (ER_a) para o intervalo de tempo que decorre durante o *spray* da mistura. Comparando as curvas da Figura 2.13 e da Figura 2.12 observa-se que a expansão máxima (ER_a) quantifica-se num valor de 13, mais perto da realidade que o valor 12 (ER_m) da Figura 2.12 (Teixeira, 2006).

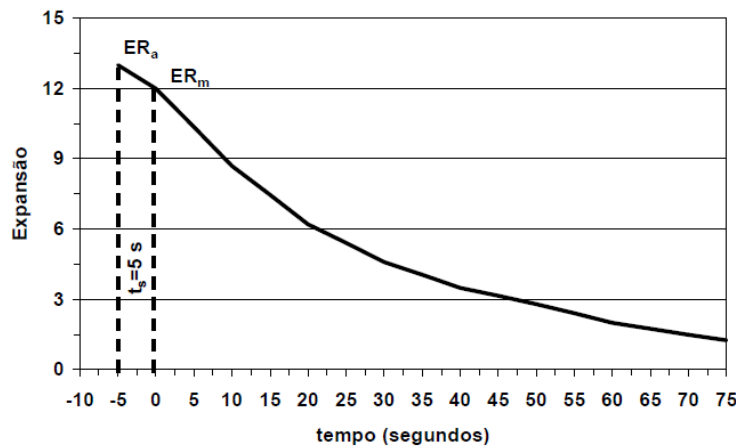


Figura 2.13 – Representação da expansão real (Teixeira, 2006)

O parâmetro ER_a da espuma é a expansão máxima real da espuma considerando que esta se mede desde o instante de tempo em que se começa o *spray* da espuma. Este parâmetro não pode ser medido, pois não é possível medir a queda da espuma durante o tempo de *spray*, mas pode ser extrapolado. A relação entre estes dois parâmetros pode ser representada por um terceiro indicador $c = ER_m / ER_a$. Assim, quantificando ER_m pode estimar-se o valor de ER_a , uma vez que há uma relação entre ambos. A Figura 2.14 representa este parâmetro c em

função da semivida da espuma para diferentes tempos de *spray*. Este diagrama serve para estimar a expansão real (ER_a) de um betume-espuma medindo apenas a expansão máxima ER_m (Jenkins *et al.*, 2000).

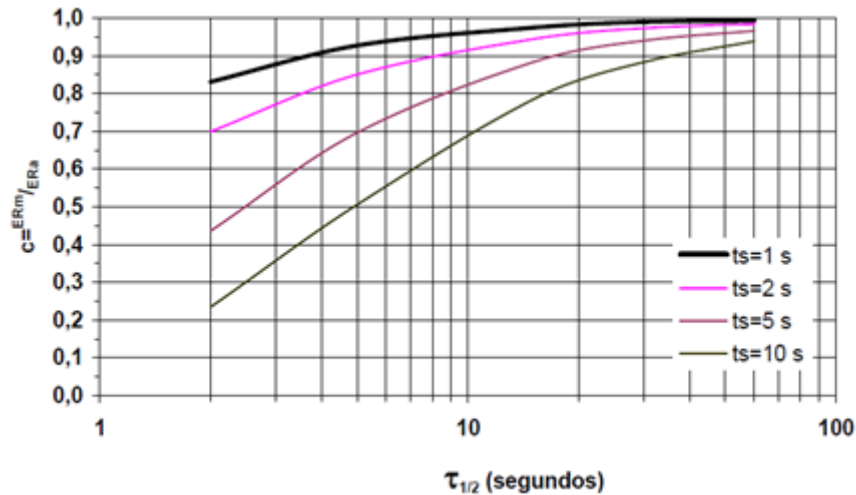


Figura 2.14 – Relação entre a expansão real e a expansão medida (Jenkins *et al.*, 2000)

2.3.5. Tecnologia de reciclagem a frio com betume-espuma

Segundo Wirtgen (2012) existem alguns tipos de recicladoras utilizadas na reciclagem a frio com betume-espuma, nomeadamente:

- Recicladora modelo 3800 CR;
- Recicladora modelo 2200 CR;
- Recicladora modelo WR 4200.

Na reciclagem a frio, o pavimento existente é fresado e triturado. A adição de agentes ligantes, como cimento, emulsão betuminosa ou betume-espuma, cria uma mistura de material nova e homogénea. A mistura homogénea do material de pavimentação já processado ou reciclado é distribuída uniformemente sobre toda a largura de trabalho por uma espiral de espalhamento, e é então pavimentada e pré-compactada por uma mesa de pavimentação. Na recicladora 3800 CR (Figura 2.15), além da reciclagem com o processo de fresagem ascendente (*upcut*) convencional, no qual o rotor de fresagem e mistura funciona em sentido contrário ao de deslocamento, também se realiza o processo de fresagem descendente (*downcut*), no qual o rotor de fresagem e mistura opera na direção de deslocamento. Também

se pode encontrar estas características no modelo 2200 CR, apenas diferindo as dimensões e alcance da recicladora.

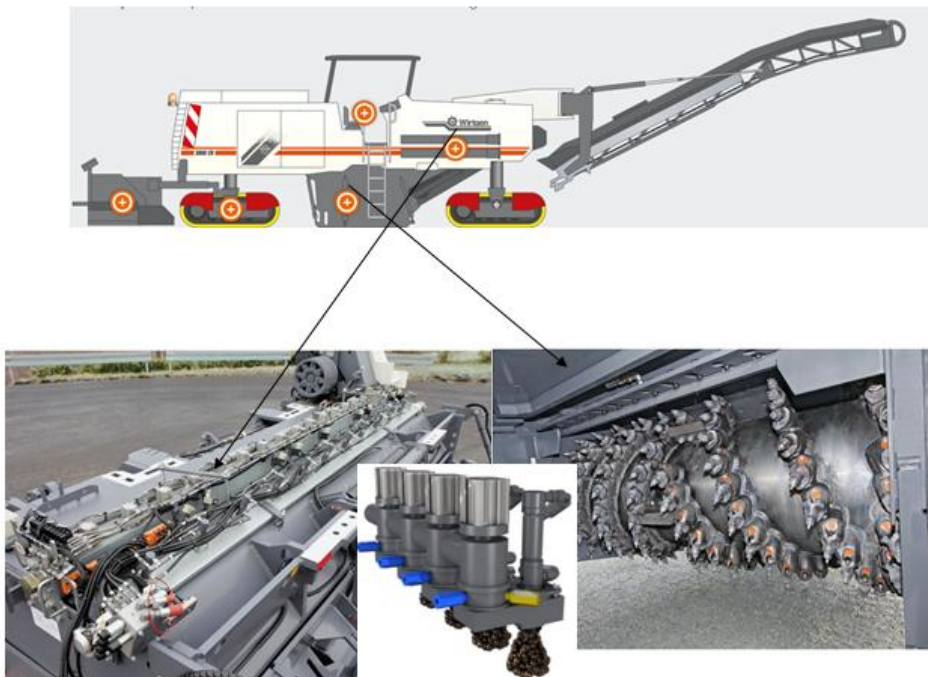


Figura 2.15 – Mecanismos de injeção e fresagem da recicladora a frio modelo 3800CR da Wirtgen (Wirtgen, 2012)

No que diz respeito ao modelo WR 4200 (Figura 2.16), pode-se dizer que é uma recicladora a frio para reciclagem em toda a largura de estradas ou de pistas individuais. A largura de trabalho é ajustável de forma contínua entre 3,0 e 4,20 metros e permite a adição de emulsão, betume-espuma ou suspensão de água-cimento.



Figura 2.16 – Mecanismos de injeção e fresagem da recicladora a frio modelo WR 4200 da Wirtgen (Wirtgen, 2012)

2.3.6. Casos de aplicação em Portugal

Não existem muitas obras realizadas com betume-espuma em Portugal, pelo menos que tenham sido reportadas em relatórios. Apesar disso, apresenta-se em seguida um exemplo de uma obra de reciclagem de pavimentos utilizando betume-espuma em Portugal.

Segundo Teixeira (2006), em junho de 2002 foi realizada uma intervenção de reciclagem com betume-espuma nas Ruas D. João Coutinho e Ferreira de Castro no Porto. A extensão foi de 1200 metros, totalizando uma área total de cerca de 15000 m². O pavimento anterior estava num estado de degradação muito avançado, sendo este pavimento constituído por uma camada de desgaste e uma base de material britado de granulometria extensa com 20 cm de espessura.

A formulação da mistura utilizada continha 3% de betume, 2% de cimento e 9% de pó de pedra, este último para correção da granulometria da mistura. Depois de serem efetuados ensaios de carga os valores obtidos para a camada de betume-espuma apresentava valores de 800 MPa logo após a reciclagem, e ainda sem a camada de desgaste, e valores de 1900 MPa decorridos 10 meses após a conclusão dos trabalhos. Estes valores permitem salientar que as misturas com betume-espuma apresentam um módulo elástico inicial bastante elevado e que este tem uma evolução considerável ao longo do tempo, sendo que um ano após a construção tende a situar-se em valores que são o dobro dos iniciais.

2.3.7. Casos de aplicação a nível Internacional

Existem vários casos de aplicação a nível internacional, embora a utilização de betume-espuma na reciclagem de pavimentos continue a ser uma técnica realizada por poucas empresas e que, por isso, tem tido uma utilização mais limitada. Embora pudessem ser apresentados outros casos, para exemplificar optou-se por apresentar em seguida casos do Brasil e da Austrália.

No Brasil já existe mais experiência na utilização de reciclagem com betume-espuma, sendo que Castro (2003) reportou quatro obras desse tipo realizadas entre 2000 e 2002, que são descritas em seguida. Os resultados apresentados em seguida dizem respeito a provetes recolhidos nas várias obras em análise.

Rodovia PR-151 (Entre Ponta Grossa e Jaguariaíva)

Para a reciclagem deste pavimento foram utilizados 2,0% de betume 85/100, 1,0% de cimento e 20% de pó de pedra de modo a corrigir a granulometria do agregado fresado. Após a reciclagem, o pavimento foi “selado” ou reforçado com uma camada de 5 cm de mistura betuminosa a quente. Depois de serem produzidos dois provetes com a incorporação de betume-espuma e mais dois provetes sem esse ligante, pode dizer-se que os provetes com betume-espuma atingiram resistências à tração bastante superior aos valores atingidos pelos provetes sem betume-espuma. Quanto ao módulo de resiliência o valor é muito superior.

Rodovia SP-330 (Anhanguera, km 165 a 234)

Nesta experiência foi utilizada uma percentagem de betume-espuma variável entre 2,5% e 4,0%. Também se utilizou cimento numa percentagem variável entre 1,0% e 1,5% em alguns dos provetes, enquanto nos restantes foi utilizada como solução alternativa cal numa percentagem de 3%. Após a reciclagem o pavimento foi revestido com uma camada de 6 cm de uma mistura betuminosa a quente e 10 mm de um microrrevestimento a frio. Os valores determinados para o módulo resiliente atingiram valores compreendidos entre 2628 e 4688 MPa. Quanto à resistência à tração por compressão diametral, no estado seco, o valor médio encontrado foi de aproximadamente 0,50 MPa. Não se verificaram diferenças significativas nos resultados realizados com os provetes contendo cimento ou cal.

Rodovia BR-277 (Entre São Luís do Purumã a Campo Largo no Estado do Paraná)

Nesta obra foi utilizado um betume 100/120, sendo o seu teor na mistura de 1,5% e também foi utilizado 1,0% de cimento. Após a reciclagem, o pavimento foi “selado” com uma camada de 6 cm de uma mistura betuminosa a quente. Os valores determinados para o módulo resiliente apresentaram valores compreendidos entre 1900 e 2825 MPa. Quanto à resistência à tração os valores encontrados foram aproximadamente 0,65 MPa para provetes secos e de 0,33 MPa para os provetes saturados. Foram também ensaiados três provetes retirados quinze dias após a intervenção de reciclagem do pavimento. Para estes provetes foi determinado o valor da resistência à tração por compressão diametral, em provetes secos, sendo que os valores obtidos variaram entre 0,57 e 0,90 MPa.

Rodovia BR-354 (Formiga/MG)

Para a realização desta experiência foi utilizada uma quantidade variável de betume-espuma entre 3,0 e 3,5% e uma percentagem de cimento também variável, entre 1,5 e 2,5%. Após a

reciclagem o pavimento, o mesmo foi “selado” com uma camada de 5 a 10 cm com uma mistura betuminosa a quente. Foram ensaiados um total de 22 provetes, que foram divididos em seis grupos.

No que diz respeito ao grupo 1, foram produzidos seis provetes em obra, que obtiveram valores médios para o módulo resiliente de aproximadamente 3000 MPa. Para o grupo 2 foram retirados seis provetes do pavimento três meses após o início da reciclagem e, por sua vez, estes provetes chegaram a valores para o módulo resiliente na ordem dos 4850 MPa. Também foram moldados em laboratório quatro dos restantes provetes, integrantes do grupo 3, que obtiveram valores para o módulo resiliente de 2300 MPa. Por fim para os grupos 4, 5 e 6 foram retirados seis provetes, em pares, aos nove, dez e onze meses, que chegaram a valores do módulo resiliente de 2870, 3050 e 2900 MPa respetivamente.

Quanto à resistência à tração para provetes secos os valores médios medidos foram de 0,54, 0,59, 0,38, 0,40, 0,37 e 0,53 para os grupos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 respetivamente.

Conclui-se assim que, por exemplo, para o grupo 3 estes são inferiores aos valores esperados quando comparados com os valores dos grupos 1 e 2. Este facto é justificado pela moldagem deficiente dos provetes deste grupo e que foi realizada em laboratório. Quanto aos valores dos grupos 4, 5 e 6 verifica-se que são inferiores aos do grupo 1, contrariamente ao esperado uma vez que estes provetes já têm mais tempo de cura, pelo que deveriam apresentar valores superiores. Isto justifica-se pelo facto de serem os provetes deste grupo que foram moldados com a menor quantidade de betume-espuma, 1,5% e 2,0%.

Mais recentemente, também no Brasil e segundo Cipollina (2015), foi realizada uma importante obra de reabilitação utilizando reciclagem com betume-espuma, como se refere em seguida.

Rodovia Ayrton Senna SP-070

A obra de recuperação da Rodovia Ayrton Senna SP-070, iniciada em junho e concluída em novembro de 2013, foi uma das primeiras no Brasil a utilizar a técnica de betume-espuma com material fresado (RAP) em central a frio. A rodovia, que liga a cidade de São Paulo a Campos do Jordão, Vale do Paraíba e Rio de Janeiro, recebe uma média diária de 90 mil veículos em cada direção, e é o principal acesso ao Aeroporto Internacional de Guarulhos

(São Paulo). A melhoria foi efetuada em ambos os sentidos do trecho de aproximadamente 35 quilômetros, entre os km 11 e 46, da SP-070. Devido ao grande tráfego na via, o pavimento, que tinha uma camada de base tratada com cimento, estava completamente degradado (Cipollina, 2015).

A reciclagem com betume-espuma, produzida na central móvel de reciclagem a frio Wirtgen KMA 220 (Figura 2.17), foi selecionada por ser a técnica de reabilitação que apresentou melhor resultado. A escolha deu-se após diversas seções experimentais abrangendo várias tecnologias e estudos, ao longo de 12 meses, realizados pela Fremix Engenharia e Comércio Ltda., empresa responsável pela execução da obra, juntamente com a Ecopistas, concessionária responsável pela gestão e manutenção da rodovia (Cipollina, 2015).



Figura 2.17 – Central móvel Wirtgen KMA 220 (Wirtgen, 2012)

A solução adotada para este caso, apresentada na Figura 2.18, foi efetuada como se descreve em seguida. Em primeiro lugar, as obras de reabilitação tiveram uma duração de 7 horas diárias, a ter lugar das 22 horas até às 05 horas. Começou-se então por fresar, transportar e armazenar todo o material fresado, que no Brasil tem o nome de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ). Seguidamente procedeu-se à remoção da brita graduada tratada com cimento (BGTC) e, logo depois, analisou-se o fundo da caixa (fundação) com rolo de pneus de 27 toneladas com o objetivo de fazer alguma correção caso necessário. Concluídos os trabalhos de remoção do material não necessário, aplicou-se uma camada de 200 mm de material estabilizado com betume-espuma (BSM-a), composta por 100% de material fresado britado (RAP) misturado com betume-espuma. Posteriormente aplicou-se também uma camada de 100 mm de material estabilizado com betume-espuma (BSM-b), composta por material fresado britado, juntamente com 15% de pó de pedra e betume-espuma. Para finalizar a reabilitação da estrada colocou-se uma camada de desgaste de mistura tradicional a quente entre 20 e 50 mm de espessura.



Figura 2.18 – Solução adotada para recuperação da rodovia Ayrton Senna (Cipollina, 2015)

Na Figura 2.19 pode verificar-se o comportamento real do pavimento reciclado com betume-espuma num período compreendido entre 18 de novembro de 2011 e 28 de maio de 2012. Verifica-se a ausência quase total de deformação durante estes primeiros 6 meses, o que leva a crer que se está perante uma boa alternativa às misturas convencionais.



Figura 2.19 – Comportamento da rodovia Ayrton Senna nos primeiros 6 meses (Cipollina, 2015)

Depois de apresentados os casos de aplicação de betume-espuma no Brasil, em seguida apresentam-se outros casos de aplicação de reciclagem com betume-espuma na Austrália. Ramanujam e Fernando (1997) e Ramanujam e Jones (2007) referem que na Austrália o *Queensland Main Road Department (QMRD)* tem na última década testado várias soluções de reciclagem e reabilitação de pavimentos de forma a maximizar este tipo de trabalho, quer do ponto de vista económico, quer do ponto de vista da eficiência. Esta necessidade surge

como consequência dos pavimentos da sua extensa rede viária virem nos últimos anos a atingir idade limite de projeto. Deste modo passou-se a investir cada vez menos em construção e mais em manutenção e reabilitação. Uma das vantagens dos estudos realizados por este departamento QMRD foi a utilização de várias soluções de pavimentação em simultâneo no mesmo pavimento, o que permite comparar o seu desempenho de uma forma válida. O QMRD teve quatro grandes intervenções com betume-espuma que são apresentadas em seguida.

Gladfield

Realizada em 1997, esta intervenção conta com a utilização de 3,5% de betume-espuma na faixa da esquerda e 2,0% na faixa da direita. As deflexões foram medidas no final do primeiro dia e apresentaram valores de apenas 0,75 mm, atestando o rápido aumento da capacidade resistente característico das espumas de betume. O pavimento permaneceu deste modo durante duas semanas, sendo depois revestido por uma camada de desgaste em mistura convencional a quente. Durante este tempo não se verificou o aparecimento de deformações significativas. Além disso, e após o pavimento realizado estar sujeito a um tráfego muito intenso, ao fim de dois anos de serviço apenas apresentou patologias em 10% da sua extensão sendo estas patologias maioritariamente fendas causadas pela elevada percentagem de cimento utilizada, que fazem com que pavimento seja mais rígido, da fraca capacidade resistente das camadas de base e também da circulação de veículos com excesso de carga.

Rainbow Beach

A segunda intervenção do QMRD na Austrália realizou-se em 1998, tendo sido utilizado betume-espuma apenas numa faixa. Nos primeiros 200 metros utilizou-se uma mistura com 2% de cal e 3% de betume-espuma, nos segundos 200 metros utilizou-se 2% de cal e 4% de betume-espuma e finalmente para os últimos 200 metros utilizou-se 2% de cimento e 5% de betume-espuma. No período de três semanas compreendido entre a construção das secções e a execução da camada de desgaste, o pavimento esteve sujeito a condições climatéricas agressivas, nomeadamente baixas temperaturas e chuva intensa. Comparativamente com a outra faixa em que foram utilizadas misturas a frio com emulsão pode-se dizer que as misturas com betume-espuma tiveram um comportamento superior ao apresentado pelas misturas com emulsão. No caso das últimas verificou-se a formação de rodeiras e a tendência para que a sua camada superficial se tornasse escorregadia (exsudação). No caso das misturas com betume-espuma não se observou a formação desse tipo de patologias ou a necessidade de realizar

qualquer ação de correção antes de revestir o pavimento com a camada de desgaste convencional a quente.

Comparando o desempenho dos dois ligantes é possível concluir que o betume-espuma apresenta um melhor desempenho, quer devido ao seu aumento de resistência inicial, quer devido à sua melhor resistência às condições climáticas.

Inglewood

Esta terceira intervenção efetuada pelo QMRD com betume-espuma teve lugar em Gladfield, num outro ponto da mesma estrada da primeira experiência. Nesta intervenção a composição da mistura utilizada continha 4% de betume-espuma e 2% de cal hidratada.

Após o primeiro dia de construção a camada executada foi sujeita a uma chuva de grande intensidade. A camada permaneceu sem revestimento nas seis semanas seguintes à construção, durante as quais esteve sujeita a chuvas muito intensas. Contrariamente ao que seria espectável, o pavimento não apresentou patologias graves, sendo que após pequenas intervenções de correção se precedeu ao seu revestimento com a execução da camada de desgaste final com uma mistura convencional a quente. Mais uma vez se evidencia um desempenho superior das misturas com betume-espuma sob condições adversas.

New England

Na quarta intervenção documentada pelo QMRD foi utilizada uma mistura com 3,5% de betume-espuma e 2,0% de cal. A extensão total desta intervenção foi de 17 km, aproximadamente. As deflexões medidas após a construção apresentaram valores entre 0,15 e 0,45 mm. As mesmas deflexões medidas uma ano após a construção apresentaram valores entre 0,10 e 0,25 mm, ou seja, diminuíram substancialmente devido à cura do ligante. Verificou-se também que a relação entre as deflexões aumentou. Estes factos conjugados permitem afirmar que a rigidez da mistura reciclada com betume-espuma aplicada no pavimento aumentou. Como não se verificou o aparecimento de fendas pode-se também afirmar que este aumento de rigidez do pavimento não comprometeu a sua flexibilidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1. Materiais

Os materiais utilizados neste estudo são os seguintes:

- *Tout venant* ou agregado britado de granulometria extensa (ABGE);
- Material fresado;
- Cimento;
- Betumes;
- Aditivo para melhorar as propriedades da espuma de betume;
- Água.

O *tout venant* ou ABGE utilizado para o estudo é de origem granítica e é proveniente da pedreira Bezerras, na região Norte Litoral de Portugal, enquanto o material fresado foi fornecido pela empresa Elevo Group e foi obtido pela fresagem de camadas de desgaste de autoestradas durante a sua manutenção (Figura 3.1). Estes materiais serão caracterizados posteriormente.



Figura 3.1 – Material fresado (esquerda) e *tout venant* (direita) utilizados no trabalho

O cimento (designado CEM) é o principal ligante hidráulico utilizado em misturas a frio que não utilizam um ligante betuminoso. Segundo a norma NP 206 o cimento caracteriza-se por ser um “material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece em virtude das reações e processos de hidratação e que, depois de endurecer, mantém a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água”. Os cimentos CEM referidos nas normas europeias são constituídos por diferentes materiais e têm uma composição estatisticamente homogênea, que resulta dos processos de produção e de

manuseamento do material de qualidade assegurada. Os cimentos mais usados em camadas de pavimentação ligadas hidraulicamente são os da classe de resistência 42,5 e eventualmente os da classe 32,5, ambos do tipo CEM I. No entanto, quando o cimento é utilizado como aditivo em misturas com ligantes betuminosos, como é o caso deste trabalho, é mais habitual a utilização de cimentos com menor resistência, da classe 32,5 e do tipo CEM II. A adição de cimento (ou cal) também pode ser feita aos solos que apresentem propriedades adequadas, destinando-se nesse caso à constituição de camadas de sub-base.

Assim, o cimento utilizado neste estudo foi do tipo Portland de calcário CEM II/B-L 32,5N (Figura 3.2). De acordo com o fornecedor este cimento é o mais adequado para estes trabalhos de pavimentação, pois origina materiais de menor resistência, que não é necessária nesta situação, mas consegue garantir melhor trabalhabilidade e menos problemas de retração.

No que diz respeito aos betumes utilizados para produzir betume-espuma, foram estudados dois betumes da mesma origem com classes de penetração distintas (70/100 e 50/70 da Galp) para se estudar a influência desse parâmetro nas propriedades do betume-espuma. Foi também usado um aditivo (TEGO Addibit FS 725 A) com a capacidade de melhorar a estabilidade da espuma de betume, pois previa-se que apenas o uso de betume simples não seria suficiente para a produção das misturas betuminosas. Este aditivo deve aumentar o tempo de meia-vida do betume-espuma, conferindo mais tempo para a produção das misturas (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Betume 50/70 (esquerda), cimento (centro) e aditivo TEGO (direita) utilizados neste trabalho

A água a empregar nas misturas estabilizadas com betume-espuma e com ligantes hidráulicos como aditivos, estudadas neste trabalho, e para as aplicações previstas no Caderno de Encargos (EP, 2009), deverá ser doce, limpa e não deverá conter óleos, ácidos, matérias

orgânicas ou quaisquer outros produtos prejudiciais que possam influenciar os tempos de cura e o desenvolvimento da resistência da mistura. A água utilizada foi obtida da rede de distribuição de água da Universidade do Minho.

Com base nestes materiais foram produzidos dois tipos de misturas a estudar neste trabalho: uma mistura com 100% *tout venant* estabilizada com betume-espuma e outra mistura com 50% material fresado + 50% *tout venant* estabilizada ou reciclada com betume-espuma. Ambas as misturas foram produzidas tendo por base uma composição final idêntica de modo a que seja possível comparar os resultados obtidos.

3.2. Métodos experimentais

3.2.1. Estudo dos betumes base utilizados para produzir betume-espuma

Segundo o manual da Wirtgen (2012), que é uma das entidades que está mais habituada a trabalhar com equipamentos para produção de betume-espuma, as classes de betume com valores de penetração entre 60 e 200 são geralmente seleccionadas para estabilizar material com betume-espuma, embora já tenha sido utilizado betume mais rígido com sucesso no passado sem comprometer a qualidade da mistura. Neste trabalho, como se referiu, utilizaram-se dois betumes do tipo 50/70 e 70/100 que foram caracterizados através dos ensaios de caracterização básica a seguir descritos, antes de se proceder ao estudo do betume-espuma.

Ensaio de penetração do betume

A penetração de um betume (NP EN 1426) é o valor da profundidade que uma agulha com 100 g atinge no betume, a 25 °C, durante 5 segundos, medida em décimas de milímetro (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Fases do ensaio de penetração do betume a 25 °C

Este valor designa o tipo de betume, ou seja, um betume da classe 50/70, apresenta uma penetração entre 5 e 7 mm neste ensaio. Costuma-se repetir este ensaio em três pontos diferentes da amostra, fazendo depois a média desses valores.

Ensaio anel e bola para determinar o ponto de amolecimento do betume

No ensaio anel e bola, de acordo com a norma EN 1427, coloca-se uma amostra de betume num anel, seguida da colocação de uma pequena esfera de aço por cima deste, tudo dentro de um recipiente com água (num suporte adequado). A fase seguinte consiste em aquecer a água gradualmente a 5 °C por cada minuto até que o betume se deforme e toque na parte inferior do suporte por ação do peso da esfera, como mostra a Figura 3.4. Quando este momento acontece é chamado de ponto de amolecimento do betume e o valor dessa temperatura fica registado.



Figura 3.4 – Fases do ensaio anel e bola para determinar o ponto de amolecimento do betume

Este ensaio permite calcular o ponto o temperatura de amolecimento do betume, e assim ficar a saber o comportamento do betume quando sujeito a temperaturas elevadas. 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.

Ensaio de viscosidade dinâmica

O ensaio de viscosidade dinâmica baseia-se na norma EN 13302 e o procedimento utilizado consiste em fazer rodar um objeto cilíndrico, chamado *spindle*, dentro de uma amostra de betume quente (serve para medir valores de viscosidade mais reduzidos, a altas temperaturas). Para isso é usado o viscosímetro rotacional de *Brookfield*, que vai medindo a força (torque) necessária para fazer girar o *spindle* a velocidade constante dentro do recipiente cilíndrico onde se encontra o betume (Figura 3.5), e que é proporcional à viscosidade do betume a

cada temperatura. O ensaio pode repetiu-se a várias temperaturas entre 100 °C e 180 °C, com variações de 10 °C, fazendo-se um registo logo que a temperatura e a viscosidade estabilizem.



Figura 3.5 – Fases do ensaio de viscosidade dinâmica

3.2.2. Estudo do decaimento do betume-espuma

Para a produção de betume-espuma é utilizado um equipamento específico, sendo que o laboratório da Universidade do Minho dispõe do equipamento *Wirtgen WLB 10 S* (Figura 3.6) para esse efeito. Para produção do betume-espuma, além do betume é necessário utilizar 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 e formando a espuma de betume. Toda a máquina possui resistências que podem aquecer qualquer componente a uma determinada temperatura. Assim, por onde quer que o betume passe, este nunca vai arrefecer pois todo o sistema está aquecido e mantém a temperatura regular (para evitar entupimentos).



Figura 3.6 – Equipamento laboratorial *Wirtgen WLB 10 S* utilizado para produção de betume-espuma

Este equipamento possui também um balde e escala para medir adequadamente o tempo de meia vida (medida de estabilidade da espuma ou da taxa de colapso da mesma) e a taxa de expansão (medida da viscosidade da espuma, que determina como o betume se dispersará). Na escala pode ver-se gravado os números 6, 12, 18, 24 e 30 que correspondem a valores de taxas de expansão (Figura 3.7).



Figura 3.7 – Escala e balde utilizado para a medição do tempo de meia vida e da taxa e expansão do betume-espuma

De facto, o valor da penetração, por si só, não qualifica o betume para o uso na estabilização de materiais com betume-espuma. As características da capacidade de produção da espuma em cada tipo de betume necessitam de ser ensaiadas, em que duas propriedades formam a base dessa caracterização, sendo elas a taxa de expansão e o tempo de meia vida.

Um dos fatores dominantes que influenciam as características da espuma é a quantidade de água injetada na câmara de expansão para criar a espuma. O aumento da taxa de aplicação de água criará uma maior expansão mas conduz a uma perda de estabilidade mais rápida da mesma, reduzindo o tempo de meia vida (Figura 3.8).

A taxa de aplicação da água, bem como o tipo e temperatura do betume são os fatores mais importantes que influenciam a qualidade da espuma. Uma temperatura mais alta do betume ou um betume mais mole normalmente criam uma espuma melhor. Assim, é recomendada uma análise de laboratório para identificar as melhores condições para formação do betume-espuma.

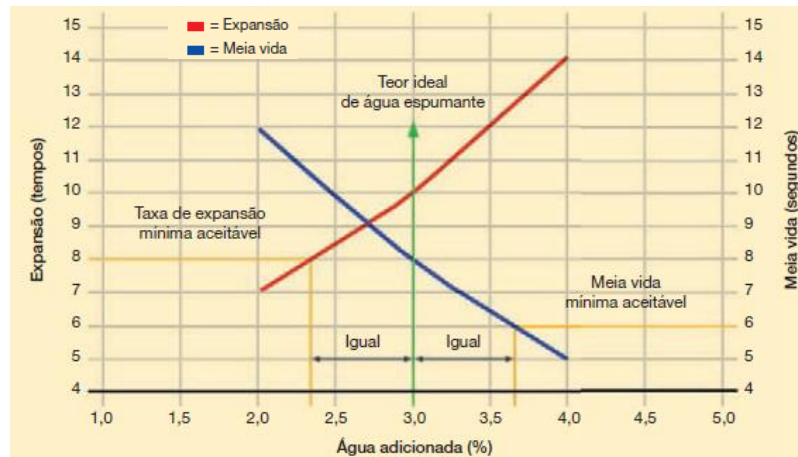


Figura 3.8 – Efeito da injeção de água na expansão e tempo de meia vida do betume-espuma (Wirtgen, 2012)

3.2.3. Caracterização do material granular (*tout venant* ou ABGE)

Para a caracterização do material granular efetuaram-se três ensaios: i) ensaio da equivalente de areia; ii) ensaio do azul-de-metileno e; iii) ensaio da granulometria.

Em primeiro lugar procedeu-se à secagem do material a 110 °C durante 24 h. Em todos os ensaios as amostras laboratoriais devem ser reduzidas, caso seja necessário, de acordo com a norma EN 932-2, de modo a produzir uma subamostra de, no mínimo, 200 g da fração granulométrica 0/2 mm (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Redução (esquerda) e espartilhamento (direita) da amostra de material granular

No passo seguinte procedeu-se à lavagem da amostra, que será novamente colocada na estufa a 110 °C. Depois da secagem, optou-se por peneirar 500 g de amostra seca para o ensaio do equivalente de areia e mais 500 g para o ensaio do azul-de-metileno.

Ensaio de granulometria ao material granular

Depois de efetuar os passos referidos no ponto anterior, e de acordo com a norma NP EN 933-1, deve-se agitar a amostra de ensaio (material granular) com o vigor necessário para se obter a sua separação completa e suspensão dos finos. Deve-se molhar ambos os lados de um peneiro mais fino de 63 μm , usado exclusivamente para este ensaio, e colocar por cima um peneiro de proteção. Os peneiros devem ser colocados de forma que a suspensão que os atravessa possa ser despejada, ou se necessário recolhida num recipiente adequado. Após este passo deve-se despejar a amostra de ensaio no peneiro superior e continuar a lavagem até que a água que atravessa o peneiro de 63 μm seja límpida.

Deve-se secar o material com granulometria superior a 63 μm a 110 °C até alcançar massa constante. Deixar arrefecer, pesar e registar o resultado. Por fim procede-se à peneiração do material seco e lavado na coluna de peneiros. Esta coluna é constituída por um certo número de peneiros encaixados e dispostos de cima para baixo por ordem decrescente da dimensão das aberturas, com o fundo e a tampa (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Preparação do ensaio de granulometria ao material granular

A granulometria do material granular é então obtida com base na massa de amostra retida em cada peneiro dessa coluna, sendo o resto o material lavado inicialmente no peneiro de 63 μm .

Ensaio do equivalente de areia ao material granular

No ensaio de equivalente de areia (Figura 3.11), de acordo com a norma NP EN 933-8, começou-se por introduzir em cada proveta cilíndrica graduada uma solução de lavagem (solução antifloculante) até à marca inferior, e de seguida coloca-se 120 g de amostra granular anteriormente preparada, com a ajuda de um funil, mantendo-a em posição vertical.

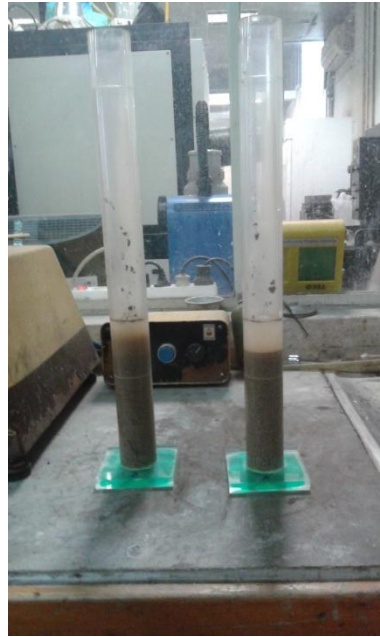


Figura 3.11 – Ensaio do equivalente de areia

Usando a palma da mão, dar várias pancadas ligeiras na parte inferior de cada proveta, de modo a soltar as bolhas de ar e facilitar a molhagem elementar do provete. Após este procedimento deve-se aguardar 10 minutos. Após esse período, selar a proveta cilíndrica utilizando uma rolha de borracha, e fixá-la na máquina vibratória, onde será sujeita a vibração durante 30 segundos. De seguida colocar a proveta cilíndrica na mesa de trabalho em posição vertical.

Posto isto, e para medir as alturas h_1 e h_2 (altura do material em suspensão e altura do material sedimentado), deve-se aguardar 20 min, sem perturbações, de modo a verificar-se o assentamento. O valor do equivalente de areia é a relação entre a altura h_2 e h_1 .

Ensaio do azul-de-metileno ao material granular

Após cada injeção de corante, e de acordo com a norma EN 933-9, o ensaio do azul-de-metileno consiste em retirar uma gota de suspensão com a ajuda da vara e deposita-la sobre o papel de filtro. A mancha que se forma é composta por uma zona central de material depositado, geralmente de cor azul escura, rodeada por uma zona húmida sem cor.

A quantidade de gota a retirar será tal o diâmetro do depósito tenha 8 a 12 mm. O ensaio é considerado positivo se na zona húmida, uma auréola persistente azul clara de cerca de 1 mm de espessura se formar à volta do depósito central.

Para efetuar o ensaio propriamente dito (Figura 3.12) procedeu-se à preparação da suspensão. Para isso coloca-se 500 ml de água destilada no gobelé e adiciona-se o provete de ensaio seco, mexendo com uma espátula. Mistura-se uniformemente a solução corante ou, em alternativa, agita-se vigorosamente. Em seguida enche-se uma bureta com solução corante.



Figura 3.12 – Preparação da solução corante para o ensaio de azul-de-metileno

Regula-se o agitador para uma velocidade de 600 rpm e posiciona-se a ventoinha cerca de 10 mm acima da base do copo. Liga-se o agitador e inicia-se o cronómetro, agitando o conteúdo do copo durante 5 min a 600 rpm e, seguidamente, agita-se continuamente a 400 rpm durante o resto do ensaio.

Se a quantidade de material fino do provete for insuficiente para se formar a auréola deverá ser adicionada caulinite juntamente com a solução corante adicional. Como neste trabalho se ensaiou um solo granítico, em princípio pouco plástico, foi adicionada a caulinite.

Para a determinação da quantidade de corante absorvido coloca-se o papel de filtro em cima de um suporte adequado, de tal modo que a maior parte da sua superfície não esteja em contato com nenhum sólido nem líquido.

Após a agitação a 600 rpm durante 5 min, injetar uma dose de 5 ml de solução corante no gobelé. Agitar a 400 rpm durante pelo menos 1 min e efetua-se um ensaio da mancha sobre o papel de filtro (Figura 3.13).

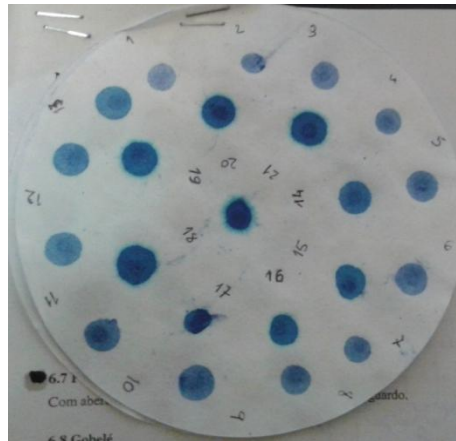


Figura 3.13 – Manchas com e sem auréola no papel de filtro do ensaio azul-de-metileno

Se após a adição destes 5 ml iniciais de solução corante a auréola não aparecer, adicionar 5 ml de solução corante continuando a agitação durante 1 min e fazendo outro ensaio da mancha. Se a auréola continuar sem aparecer repete-se o procedimento alterando as adições de corante e os períodos de tempo até que apareça a auréola. Quando esta etapa for atingida, continua-se a agitação sem mais adições de solução corante, efetuando novos ensaios da mancha em intervalos de 1 min para confirmar o resultado. Se a auréola desaparecer nos primeiros 4 min, adiciona-se mais 5 ml de solução corante. Se desaparecer no quinto minuto, adiciona-se apenas 2 ml de solução corante. Em ambos os casos deve-se continuar a agitação e os ensaios da mancha até que a auréola permaneça visível durante 5 min.

3.2.4. Caracterização do material fresado

O material fresado a reciclar, obtido de camadas de desgaste fresadas durante a reabilitação de estradas, foi caracterizado em três fases: i) determinação do teor de betume por incineração; ii) granulometria dos agregados do material fresado após incineração e; iii) recuperação do betume para sua caracterização básica. Estes ensaios serão explicados de seguida.

Determinação do teor em betume do material fresado por incineração

O método usado para a determinação da percentagem de ligante presente no material fresado tem por base a incineração do ligante (EN 12697-39), calculando-se pela diferença de pesos do material fresado antes e após a incineração do ligante. Para a incineração do betume, a amostra é colocada em tabuleiros (Figura 3.14) e submetida a uma temperatura que ronda os 540 °C. A esta temperatura o betume é incinerado, o que não acontece com os agregados,

visto a temperatura de incineração destes ser mais elevada. Após a queima do betume, o peso estabiliza, concluindo-se assim o processo de incineração.



Figura 3.14 – Tabuleiro com amostra para determinação da percentagem de ligante do material fresado

Para o cálculo da percentagem de ligante da mistura, é necessário conhecer o peso do material fresado antes da incineração e o peso dos agregados após a incineração, sendo em seguida calculado o teor em betume pelas Equações 3.1 e 3.2:

$$M_b = M_t - M_a \quad (3.1)$$

$$P_b = \frac{M_b}{M_t} \times 100 \quad (3.2)$$

Em que:

M_b é a massa de betume (ligante);

M_t é a massa total do material fresado;

M_a é a massa dos agregados após incineração do betume; e

P_b é a percentagem do betume presente no material fresado.

Contudo, e visto existir possibilidade de parte dos materiais finos serem incinerados ou serem perdidos em suspensão juntamente com o betume, fez-se uma correção de 0,15% na percentagem de betume obtida. Este valor adotado resultou de estudos de calibração realizados previamente no laboratório com agregados do mesmo tipo.

Granulometria dos agregados do material fresado após inceneração

A determinação da granulometria consiste essencialmente num processo de peneiração dos agregados do material fresado obtidos após incineração do betume, fazendo-os passar através de peneiros com abertura maior para peneiros com abertura menor (Figura 3.15). Este processo é em tudo idêntico ao apresentado anteriormente para caracterizar o ABGE.



Figura 3.15 – Peneiros utilizados para determinar a granulometria do material fresado

Este processo permite verificar qual a fração de material que tem dimensão superior à abertura do peneiro, conseguindo-se assim encontrar uma percentagem de material que tem um diâmetro entre um intervalo de valores. Este ensaio permite determinar a curva granulométrica e conseqüentemente perceber o comportamento esperado deste material, com base nos valores especificados, por exemplo, no manual da Wirtgen (2012).

Recuperação do betume do material fresado para caracterização básica

De modo a ser possível realizar uma análise mais detalhada acerca do comportamento esperado do material fresado, é necessário caracterizar o betume envelhecido existente nesse material fresado, o que obriga a recorrer ao processo de recuperação de betume, processo esse que se mostrou bastante complexo e que compreende três fases.

A primeira fase diz respeito à “lavagem” dos agregados grossos, através do uso de tolueno. Para tal, cerca de 7 kg de mistura são colocados numa centrifugadora, onde é adicionado 1 litro de tolueno, deixando-se repousar durante meia hora, tendo o cuidado de verificar que todo o material fica submerso no solvente (Figura 3.16). Em seguida é feito um processo com

seis ciclos, sendo o tempo do ciclo o necessário para extrair o tolueno do interior da centrifugadora. Em seguida, o tolueno (com alguns resíduos de betume) é colocado novamente dentro da centrifugadora e dá-se início a um novo ciclo. Após terminado este primeiro processo de lavagem é colocado meio litro de tolueno novo, e realizado um segundo processo com igual número de ciclos, e no final obtém-se uma mistura entre tolueno, betume e alguns finos.



Figura 3.16 – Centrifugadora usada na 1ª fase do processo de recuperação de betume

A segunda fase tem por objetivo a separação entre a parte líquida (tolueno e betume) e a parte sólida (finos) resultante do processo anterior. Para isso, recorre-se a uma centrifugadora de precisão, onde a rotação deve atingir 3000 rotações por minuto (Figura 3.17).

Nesse processo existe a necessidade de garantir o equilíbrio dentro da centrifugadora. De modo a garantir isto, o peso do copo e da mistura líquida deve ser igual para todos os copos. No final deste processo, o material fino fica no fundo dos copos da centrifugadora e o tolueno e o betume são vertidos para um recipiente e submetidos à última fase de recuperação do betume.



Figura 3.17 – Centrifugadora de precisão usada na 2ª fase de recuperação do betume

De facto, a última fase de recuperação do betume compreende a separação entre o betume e o solvente (tolueno), usando um processo de condensação (Figura 3.18). Este processo foi realizado com base a norma EN 12697-3 para recuperação do betume no evaporador rotativo.



Figura 3.18 – Evaporador rotativo utilizado na 3ª fase de recuperação do betume

3.2.5. Produção das misturas com betume-espuma a estudar neste trabalho

Tal como se descreveu anteriormente, neste trabalho foram produzidas duas misturas com betume-espuma: i) uma com 100% de material granular e; ii) outra com 50% de material granular + 50% de material fresado.

Inicialmente procurou utilizar-se o procedimento descrito no caderno de encargos das estradas de Portugal (EP, 2009) para misturas estabilizadas com ligante betuminoso. Após algumas tentativas iniciais, e depois de novas pesquisas, optou-se por utilizar o procedimento de produção indicado pela Wirtgen (2012) por ser a entidade que fabricou a máquina de laboratório já apresentada, e na qual se produziu o betume-espuma durante todo o estudo. É importante referir que as misturas foram produzidas a frio (apenas o betume-espuma foi aquecido).

Para confirmar a precisão da máquina de betume-espuma da Wirtgen em cada injeção de betume-espuma, optou-se efetuar pesagens de confirmação da massa de betume injetada cada vez que se efetuou uma nova mistura.

No final do estudo também foi feita uma inceneração das misturas com betume-espuma, segundo a norma EN 12697-39, para confirmar o teor em betume-espuma efetivamente injetado, verificando-se que os teores obtidos eram normalmente superiores aos utilizados na produção em 1,2% a 1,5%. Esta diferença resulta da água adicionada à mistura durante a produção, e que pode estar retida na mesma, impedindo uma análise mais pormenorizada a estes valores.

Mistura com 100% material granular

Em primeiro lugar, e com base na Tabela 3.1 (Wirtgen, 2012), escolheram-se três teores de betume-espuma diferentes (2,7, 3,2 e 4,0%) para o estudo de formulação da mistura com 100% de material granular. A partir destes três teores de betume, foram feitas três misturas estabilizadas com betume-espuma com o objetivo de escolher o teor ótimo de betume.

Tabela 3.1 – Diretrizes para estimar a adição ideal de betume-espuma (Wirtgen, 2012)

Diretrizes para estimar a adição ideal de espuma de asfalto			
Fração que passe na peneira de 0,075 mm (%)	Adição de espuma de asfalto. (% por massa de agregado seco)		Tipo característico de material
	Fração que passe na peneira de 4,75 mm		
	< 50%	> 50%	
< 4	2,0	2,0	Asfalto reciclado (RA/RAP)
4 – 7	2,2	2,4	RA/ Pedra triturada/cascalho natural/misturas
7 – 10	2,4	2,8	
> 10	2,6	3,2	Cascalho/areias

Para cada teor de betume acima referido preparou-se a mistura granular estabilizada com betume-espuma do modo que se explica em seguida. Primeiro colocou-se na misturadora 10 kg de material granular ABGE, que se encontra no seu estado de humidade natural (neste caso de 4,7%). Em seguida juntou-se 1,5% de cimento sobre a massa seca de ABGE. Depois adiciona-se alguma água adicional (além da já existente no ABGE) na mistura a frio para garantir uma boa trabalhabilidade do material nas fases de mistura e compactação. A quantidade de água a adicionar deve ser tal que, em conjunto com o teor em água higroscópico do ABGE, permita atingir o teor em água ótimo de Proctor do ABGE, que é

igual a 7,0% de acordo com um trabalho anterior de Pereira (2014). Convém referir que essa água adicional aqui referida é introduzida na mistura em duas fases, 75% nesta fase inicial, antes da injeção de betume-espuma, e os restantes 25% depois dessa injeção.

Relativamente à quantidade de cimento, o manual da Wirtgen (2012) indica o valor de 1% de cimento como sendo mais habitual, mas optou-se por alterar esse valor para 1,5% para se conseguir obter misturas com melhor desempenho, em simultâneo com um ligeiro aumento das percentagens de betume-espuma utilizadas no estudo de formulação de cada mistura.

Em seguida convém misturar o material granular, o cimento e a água correspondente à primeira fase (75% da quantidade de água adicional) durante sensivelmente 2 minutos. Depois procede-se à injeção do betume-espuma quente para cada percentagem de betume-espuma atrás referida, e mistura-se por mais 2 min. Finalmente coloca-se a água da segunda fase (25% da quantidade de água adicional). Após adicionar a água da segunda fase, mistura-se tudo durante 5 min e a mistura fica pronta para compactar os provetes (Figura 3.19).



Figura 3.19 – Produção da mistura estabilizada com 100% material granular

Das três misturas com teores de betume diferentes vão resultar 18 provetes, que vão ser sujeitos ao ensaio de sensibilidade da água, para posteriormente chegar a um teor ótimo de betume. Este procedimento será explicado na secção 3.2.7. Após determinar o teor ótimo de betume desta mistura granular estabilizada com betume-espuma (3,5%, como se verá

posteriormente), repetiu-se todo o processo de produção dessa mistura para este teor de betume de modo a realizar ensaios de caracterização adicionais.

Mistura com 50% de material granular e 50% de material fresado

Tal como se procedeu anteriormente para a mistura com 100% de material granular, também neste caso se recorreu à Tabela 3.1 (Wirtgen, 2012), escolhendo-se três teores de betume-espuma diferentes (1,6, 2,6 e 3,1%) para o estudo de formulação da mistura de material granular (50%) e material fresado (50%) reciclada com betume-espuma. A partir destes três teores de betume, foram feitas três misturas recicladas com betume-espuma com o objetivo de escolher o teor ótimo de betume.

Para cada teor de betume acima referido preparou-se a mistura reciclada de material granular e material fresado com betume-espuma do modo que se explica em seguida. Primeiro colocou-se na misturadora 5 kg de material granular ABGE, que se encontra no seu estado de humidade natural (neste caso de 4,7%) juntamente com 5 kg de material fresado, também no seu estado de humidade natural (neste caso de 2,3%). Em seguida juntou-se 1,5% de cimento sobre a massa seca do ABGE e dos agregados secos do material fresado. Depois adiciona-se alguma água adicional (além da já existente no ABGE e no material fresado) na mistura produzida a frio para garantir uma boa trabalhabilidade do material nas fases de mistura e compactação.

Por simplificação, voltou a considerar-se que a quantidade de água a adicionar deve ser tal que, em conjunto com o teor em água higroscópico do ABGE e do material fresado, permita atingir o teor em água ótimo de Proctor do ABGE, que é igual a 7,0% (como referido anteriormente). Mais uma vez, essa água adicional aqui referida é introduzida na mistura em duas fases, 75% nesta fase inicial, antes da injeção de betume-espuma, e os restantes 25% depois dessa injeção. Para a percentagem de cimento de 1,5% voltou a ser seguindo o critério referido anteriormente.

O processo de produção da mistura reciclada com betume-espuma também é semelhante ao indicado para a mistura com 100% de material granular, de modo a reduzir o número de variáveis em análise para posterior comparação entre as duas misturas. Assim, na produção da mistura reciclada de material granular e material fresado com betume-espuma começou por se misturar o material granular, o material fresado, o cimento e a água correspondente à primeira

fase (75% da quantidade de água adicional) durante sensivelmente 2 minutos. Depois procede-se à injeção do betume-espuma quente para cada percentagem de betume-espuma atrás referida, e mistura-se por mais 2 min. Finalmente coloca-se a água da segunda fase (25% da quantidade de água adicional). Após adicionar a água da segunda fase, mistura-se tudo durante 5 min e a mistura fica pronta para compactar os provetes (Figura 3.20).



Figura 3.20 – Produção da mistura reciclada com 50% material granular e 50% material fresado

Das três misturas com teores de betume diferentes vão resultar 18 provetes, que vão ser sujeitos ao ensaio de sensibilidade da água, para posteriormente chegar a um teor ótimo de betume. Este procedimento será explicado na secção 3.2.7. Após determinar o teor ótimo de betume desta mistura de material granular e material fresado reciclada com betume-espuma (3,0%, como se verá posteriormente), repetiu-se todo o processo de produção desta mistura para esse teor de betume de modo a realizar ensaios de caracterização adicionais.

3.2.6. Compactação das misturas com betume-espuma para os diversos ensaios

A compactação dos provetes de ensaio, efetuados com as misturas com betume-espuma estudadas neste trabalho, foi efetuada no compactador de Marshall ou recorrendo a um cilindro de rasto liso para obtenção de lajes ou vigas, em função do tipo de provete necessário para cada ensaio a efetuar na fase seguinte do trabalho.

Compactação dos provetes no compactador Marshall

A preparação dos provetes no compactador de Marshall consiste em colocar e compactar amostras da mistura em moldes que tem 101,6 mm de largura interna e 63,4 mm de altura.

Depois da produção de cada uma das misturas anteriormente referidas, as mesmas são divididas em várias amostras que são colocadas e pesadas em recipientes metálicos, antes de serem compactadas uma a uma para se obter cada um dos provetes de ensaio necessários para as fases seguintes do trabalho (formulação, sensibilidade à água e resistência à tração indireta).

Nas bases 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. Em seguida são então aplicadas 75 pancadas de cada lado do provete. Depois de terminada a compactação procede-se à numeração e à medição dos provetes para ensaio. O procedimento para as duas misturas será idêntico (Figura 3.21).

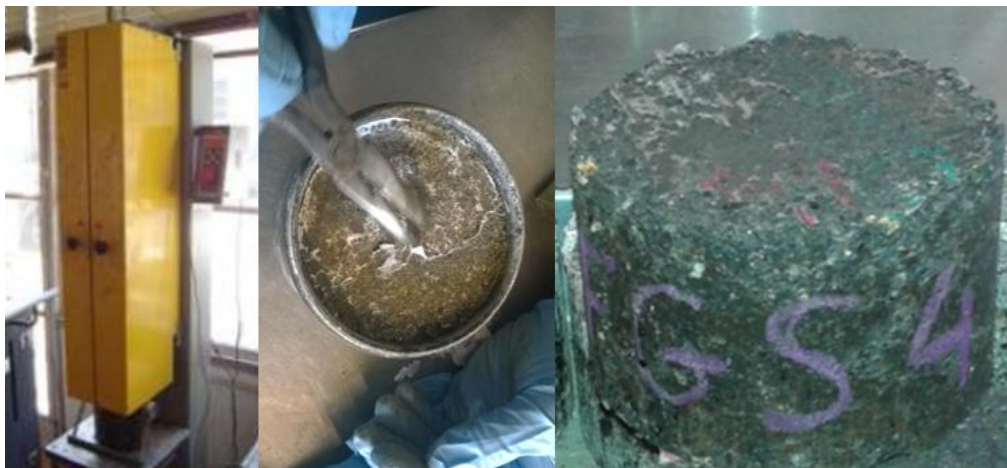


Figura 3.21 – Compactador Marshall e aspeto final dos provetes compactados

Segundo o procedimento descrito no manual da Wirtgen (2012), estes provetes ficaram a curar durante 72 horas em estufa a 40 °C antes de serem caracterizados.

Compactação das lajes com cilindro de rasto liso

Começou-se por produzir cada uma das duas misturas em estudo (apenas para os teores ótimos obtidos na formulação) para fazer duas lajes distintas para cada uma dessas misturas. Uma das lajes será utilizada para obter os provetes para o ensaio de pista (WTT), com 4 cm de

altura, 39 cm de largura e 75 cm de comprimento, e outra laje que será sujeita ao ensaio do módulo de e outra será utilizada para avaliar o módulo de rigidez e a resistência à fadiga, com 7 cm de altura, 49 cm de largura e 75 cm de comprimento. Depois da produção das misturas anteriormente referidas, as mesmas são colocadas num molde com as dimensões acima referidas, para posteriormente serem compactadas com um cilindro de rastos lisos (Figura 3.22).



Figura 3.22 – Compactação das lajes e aspecto final das lajes compactadas

Na parte de baixo dos moldes são colocados papeis para evitar que a mistura fique colada ao fundo do molde, e o mesmo processo é aplicado na parte de cima para que não cole ao cilindro de compactação. São então aplicadas as passagens que forem necessárias para que as lajes fiquem bem compactadas.

Depois de terminada a compactação procede-se a numeração das lajes, e posteriormente vão ser obtidos os provetes necessários por serragem das lajes. Esses provetes serão numerados e caracterizados. O procedimento para as duas misturas será idêntico. Mais uma vez e segundo o procedimento descrito no manual da Wirtgen (2012), as lajes vão ficar 72 h em estufa a 40 °C.

3.2.7. Formulação das misturas de material tratado com betume-espuma

Para a formulação das duas misturas em estudo neste trabalho tem de se ter em atenção o manual da Wirtgen (2012), em especial os requisitos a cumprir de acordo com a Figura 3.23. Os resultados apresentados nessa Figura 3.23 (Wirtgen, 2012) são valores típicos obtidos a 25 °C a partir de provetes com um diâmetro de 100 mm para uma mistura de material granular tratado com betume-espuma. Esta é uma ótima referência para se ter valores de comparação dos resultados obtidos neste trabalho na formulação e no ensaio de sensibilidade à água.

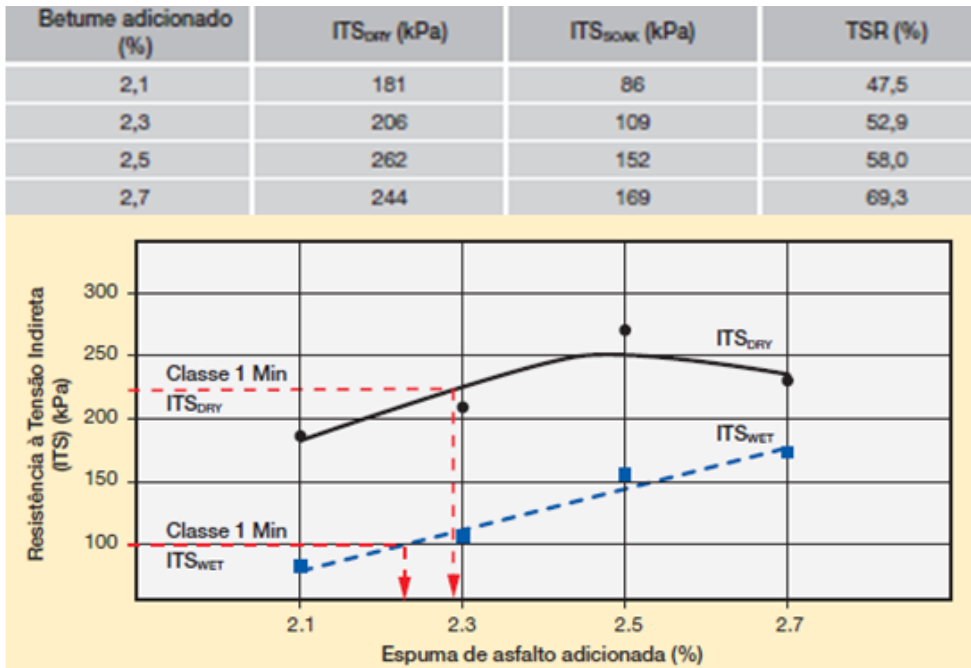


Figura 3.23 – Resultados indicados pela *Wirtgen* como referência para formulação de misturas estabilizadas com betume-espuma recorrendo ao ensaio de resistência à tração indireta a 25 °C e à avaliação da sensibilidade à água nessas condições (Wirtgen, 2012)

As curvas que passam através dos quatro pontos ITS_{DRY} e ITS_{WET} aproximam a relação entre estes valores e a quantidade de betume-espuma adicionado nas misturas estabilizadas. As linhas finas a tracejado indicam que para este exemplo da *Wirtgen* a adição de pelo menos 2,3% de betume-espuma atenderá aos requisitos para um material estabilizados com betume-espuma, em que se tem de garantir simultaneamente que ITS_{DRY}>225 KPa e ITS_{WET}>100 kPa.

O mesmo tipo de análise terá de ser realizado para as duas misturas em estudo de modo a formular essas misturas, ou seja para se escolher qual o teor em betume que mais se adequa a essas misturas.

3.2.8. Ensaio de caracterização das misturas finais tratadas com betume-espuma

Depois de selecionadas as percentagens ótimas de betume-espuma, para as duas misturas em estudo, procedeu-se a uma caracterização mais avançada dessas soluções recorrendo aos ensaios a seguir descritos.

Baridade aparente

A determinação da baridade aparente pode ser feita por 4 métodos diferentes segundo a norma EN 12697-6. Para o presente estudo, optou-se pelo método D (Figura 3.24) para determinar a baridade aparente, que consiste em determinar a baridade pelas dimensões do provete. Além disso também se utilizou o método B, que consiste em pesar o provete seco, imerso e saturado mas com superfície seca, mas apenas para validação dos resultados do método D.



Figura 3.24 – Aparelho para determinar as dimensões dos provetes para cálculo da baridade aparente pelo método D

A utilização de betume-espuma e de cimento dificultou a obtenção da baridade máxima teórica, e do volume de vazios, pelo que a baridade aparente foi a principal propriedade volumétrica utilizada para agrupar os provetes e ter uma noção do sucesso na compactação dos mesmos.

Ensaio de sensibilidade à água e ensaio de tração indireta a 25 °C

Para o ensaio de sensibilidade a água são necessários 6 provetes: 3 são ensaiados depois de saturados ou condicionados em água, e os outros 3 são ensaiados secos. Os seis provetes devem ter dimensões idênticas. Ao fazer a separação em dois grupos devemos ter em conta o valor da baridade aparente e o valor das alturas, que devem ser semelhantes entre si.

Assim, depois de 72 horas de cura em estufa a 40 °C, os provetes são retirados para ensaio. Desses provetes, 3 serão colocados em banho de imersão em água a 25 °C durante 24 horas, enquanto os restantes 3 provetes serão colocados em estufa seca durante as mesmas 24 horas à

mesma temperatura de 25 °C. Após este processo, os provetes serão sujeitos ao ensaio de tração indireta a uma temperatura de 25 °C (Figura 3.25).

Todo o procedimento foi feito seguindo o manual da Wirtgen (2012) que é ajustado a este tipo de misturas estabilizadas com betume-espuma. De facto, não se seguiu a norma EN 12697-12, pois esta norma é direccionada para misturas a quente, o que não permitiria a comparação de resultados futuros.

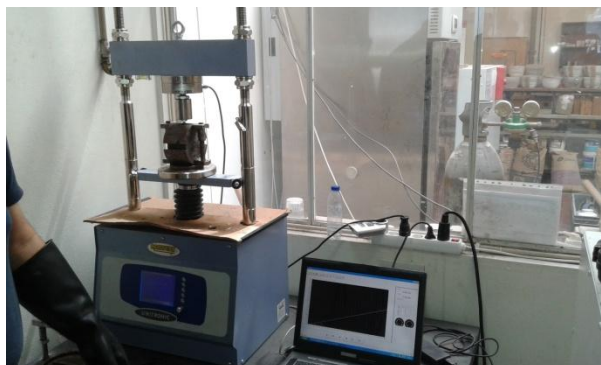


Figura 3.25 – Ensaio de tração indireta

Ensaio de resistência à deformação permanente

De modo a caracterizar a resistência à deformação permanente existem diversas formas de ensaio, sendo possível determinar a resistência à deformação permanente através de cargas estáticas ou cargas rolantes, podendo ser realizados à escala real ou em laboratório.

Para o presente estudo, recorreu-se ao ensaio de pista ou *Wheel Tracking Test* (WTT), de acordo com a norma EN 12697-22, que é um ensaio realizado em laboratório e que consiste essencialmente em fazer passar repetidamente uma roda sobre uma mistura betuminosa e fazer a medição da profundidade da rodeira em função do número de passagens da roda (Figura 3.26). Este ensaio simula a passagem dos rodados dos veículos de modo a ser possível prever o comportamento de deformação das misturas betuminosas a temperaturas elevadas.

O ensaio de pista foi realizado a uma temperatura de 50 °C, para uma carga de 700 N, com uma frequência de 0,44 Hz sendo aplicados 10 000 ciclos de carga. Os principais resultados obtidos neste ensaio são a taxa de deformação em ensaio de pista (WTS_{AIR}), a profundidade média proporcional da rodeira (PRD_{AIR}) e a profundidade do cavado da rodeira (RD_{AIR}).



Figura 3.26 – Preparação do ensaio de pista para avaliação da deformação permanente

Ensaio de módulo de rigidez

O módulo de rigidez de uma mistura betuminosa depende da temperatura a que o material se encontra no momento do ensaio, da frequência de carregamento e das características dos materiais que foram usados na mistura (Figura 3.27).



Figura 3.27 – Vigas e equipamento utilizado no ensaio do módulo de rigidez e de fadiga

Todas as vigas devem ser ensaiadas a 20 °C e da mesma forma para assim poder existir uma comparação entre várias possibilidades existentes. Além disso, neste trabalho também se efetuaram ensaios a 0, 10 e 30 °C para estudar melhor um material ainda pouco conhecido. O ensaio utiliza várias frequências de acordo com a norma EN 12697-26, nomeadamente, 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 8, 10 Hz.

Ensaio de resistência à fadiga

A resistência à fadiga, de acordo com a norma EN 12697-24, é uma propriedade fundamental nas misturas betuminosas, e tem como principais agentes que podem originar o fendilhamento por fadiga a ação do tráfego, bem como ações de origem térmica.

Para o ensaio de resistência à fadiga, a temperatura de ensaio é de 20 °C e a frequência com que a carga é aplicada ao provete é de 10 Hz (Figura 3.27). Tal como referido anteriormente

todas as vigas, foram inicialmente ensaiadas ao módulo de rigidez antes da realização deste, uma vez que o ensaio de resistência à fadiga é um ensaio destrutivo.

O ensaio de resistência à fadiga tem como intuito verificar ao fim de quando ciclos a mistura atinge a ruína (fendilhamento por fadiga). Neste caso, a ruína é definida pelo número de ciclos correspondente a uma redução do módulo de rigidez da viga para metade do valor inicial, uma vez que o ensaio é realizado em extensão controlada. Com a realização do ensaio a vários provetes, para diferentes níveis de extensão, é possível determinar a lei de fadiga do material.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Caracterização dos betumes base

Para esta análise foram escolhidos dois tipos de betume para se avaliar qual o melhor para ser usado no fabrico do betume-espuma. Os betumes utilizados foram o 50/70 e o 70/100, ambos da marca GALP, sendo que o primeiro é mais duro e o último mais mole. Sendo a utilização do betume 50/70 mais comum, e tendo este betume uma maior resistência às deformações, este betume será o escolhido caso o betume 70/100 não apresente vantagens claras para produção de betume-espuma (maior expansão e tempo de meia vida).

Para cada tipo de betume foram feitos vários ensaios básicos de caracterização, nomeadamente, o ensaio de penetração, anel e bola e viscosidade dinâmica, cujos resultados vão ser apresentados de seguida de forma a retirar as respetivas conclusões.

Considerando os valores mínimos e máximos para a penetração a 25 °C e para a temperatura de amolecimento dos dois betumes base utilizados no estudo, estipulados na norma EN 12591 (Tabela 4.1), observa-se ambos os betumes (50/70 e 70/100) cumprem os limites da norma.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de penetração e anel e bola aos betumes base

Betume	Limites	Penetração (mm)	Anel e bola (°C)
50/70	Min	50	46
	Max	70	54
50/70 Galp	Medido (média)	52,32	51,2
70/100	Min	70	43
	Max	100	51
70/100 Galp	Medido (média)	76,31	44,7

A viscosidade dinâmica determina a consistência dos betumes para um leque de temperaturas de produção e compactação mais elevadas, o que permite definir a temperatura adequada de produção e compactação das misturas betuminosas. Neste trabalho também se definiram as temperaturas de produção do betume-espuma para que os dois betumes base deste estudo (50/70 e 70/100) tivessem uma viscosidade equivalente durante a produção do betume-espuma, tendo como referencia o valor de 200 cP (Read e Whiteoak, 2003).

Com base nos procedimentos anteriormente definidos para avaliar a viscosidade rotacional do betume, foi possível obter os resultados da viscosidade dinâmica entre 100 e 180 °C para os dois betumes base em estudo, que são apresentados na Figura 4.1.

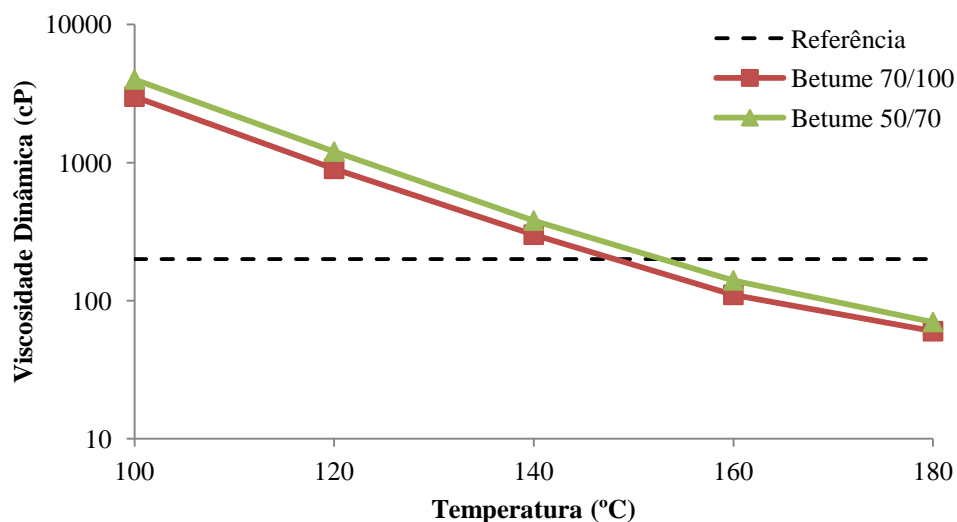


Figura 4.1 – Viscosidade dinâmica dos betumes base utilizados

Com base na viscosidade de referência atrás indicada, pode-se concluir que para o betume 50/70 a temperatura de produção do betume-espuma situa-se entre os 150 e 160 °C, escolhendo-se neste caso a temperatura de 160 °C para garantir uma menor viscosidade e, dessa forma, melhorar as condições de produção do betume-espuma. Para o betume 70/100 a temperatura de produção do betume-espuma deve ser de 150 °C. Assim, com base neste ensaio definiram-se as temperaturas de produção do betume-espuma a usar na fase seguinte, para ambos os betumes base, para reduzir o número de variáveis a estudar nessa fase do trabalho.

Pode-se também concluir que quanto mais mole o betume, menor a temperatura de produção para o mesmo valor de viscosidade. Isso é visível na Figura 4.1, pois ambas as curvas apresentam um comportamento semelhante, ficando o betume 50/70 na parte superior do gráfico e o betume 70/100 que é mais mole na parte inferior do gráfico.

Neste ponto ambos os betumes são aptos para que se continue o estudo, isto é, esta caracterização foi feita para verificar 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 nesse ponto será decidido qual o betume base a usar posteriormente nas misturas.

4.2. Análise das condições de produção do betume-espuma

4.2.1. Efeito do tipo de betume base

Para o estudo do betume-espuma foram usados os dois tipos de betumes atrás indicados, produzindo-se o betume-espuma às temperaturas determinadas com base no ensaio de viscosidade. Para cada betume foram realizadas injeções para a produção de betume-espuma com diferentes percentagens de água, que variaram de 1% a 6%.

Dentro destas percentagens de água foram selecionadas três para aprofundar e continuar o estudo sobre as vantagens de utilizar um aditivo estabilizador da espuma (aditivo TEGO já referido). Convém ainda referir que se optou por fazer três injeções de betume-espuma para cada percentagem de água para depois ser feita uma média destes três valores, o que conduz a valores finais menos variáveis.

Para estudo do betume-espuma, em primeiro lugar é representado o gráfico da taxa de expansão, para o qual se definiu como valor mínimo de 12,3, e depois apresenta-se o tempo de meia vida com um valor de referência mínimo de 13, segundo (Jenkins *et al.*, 2000).

Assim, primeiro analisou-se a taxa de expansão do betume-espuma medido com o betume 50/70 a 160 °C e com o betume 70/100 a 150 °C para diferentes quantidades de água adicionadas (Figura 4.2).

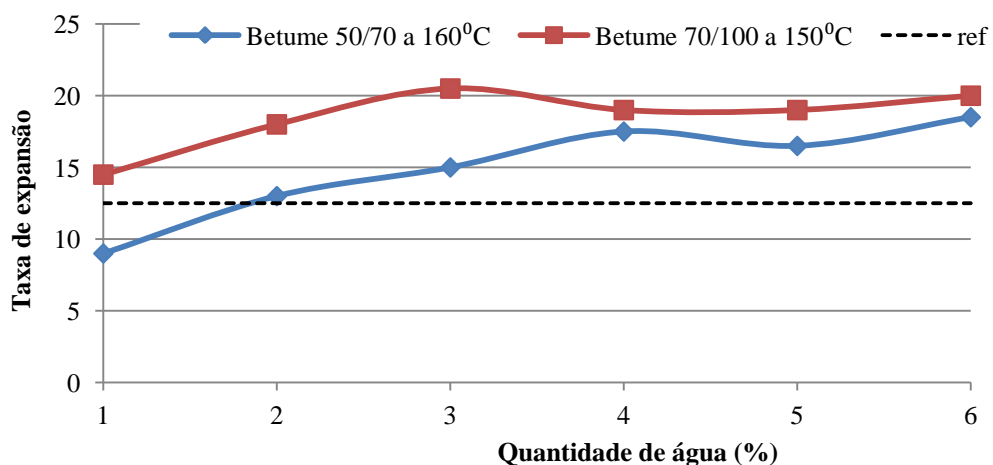


Figura 4.2 – Comparação das taxas de expansão do betume-espuma produzido com betume 50/70 a 160 °C ou com o betume 70/100 a 150 °C

Relativamente a taxa de expansão quase todas as percentagens de água cumprem o requisito mínimo para os dois betumes em análise. De facto, a partir de 3% de água ambos os betumes cumprem o valor de expansão mínimo. Também é possível concluir que o betume 70/100 tem melhores resultados a nível da taxa de expansão. Este resultado pode dever-se a sua menor viscosidade em relação ao betume mais duro, fazendo com que se expanda mais facilmente. Apesar disso, ambos os betumes apresentam propriedades adequadas e que permitem utilizar qualquer um deles para produção de betume-espuma.

A seguir analisou-se o tempo de meia vida do betume-espuma medido nas mesmas condições, ou seja, com o betume 50/70 a 160 °C e com o betume 70/100 a 150 °C para diferentes quantidades de água adicionadas (Figura 4.3).

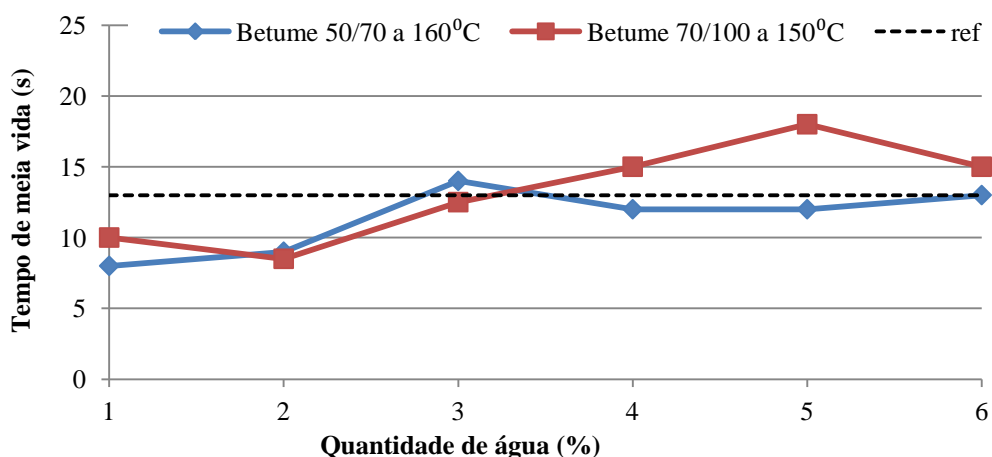


Figura 4.3 – Comparação dos tempos de meia vida do betume-espuma produzido com betume 50/70 a 160 °C ou com o betume 70/100 a 150 °C

Para o betume 50/70 observa-se que nenhuma condição satisfaz o requisito do tempo de meia vida, para qualquer percentagem de água, o que leva a concluir que é necessário o uso de um aditivo estabilizador da espuma. No caso do betume 70/100 cumpre-se por pouco o requisito mínimo do tempo de meia vida para percentagens de água acima de 4%.

Dado que não se verificaram diferenças significativas nas propriedades do betume-espuma produzido com betume 50/70 e com 70/100, e dado que vai ser necessário utilizar um aditivo para melhorar o tempo de meia vida, optou-se por continuar essa parte do estudo (aditivo) e o estudo das misturas apenas para o betume 50/70, por ser mais comum e também por ser aquele que resistirá melhor às deformações permanentes.

4.2.2. Efeito da utilização de aditivos

Deste estudo inicial com betume-espuma optou-se por utilizar o betume 50/70 por ser um betume convencional e um betume mais duro. 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.

Optou-se por não continuar com as percentagens de água de 1%, 5% e 6%, visto que a percentagem de 1% de água não produz resultados satisfatórios em relação à expansão, e que as percentagens de 5% e 6% são excessivas e certamente iriam apresentar um desempenho na mistura inferior em relação às percentagens de água mais baixas. Assim, nesta avaliação utilizaram-se as percentagens de água de 2%, 3% e 4%.

O aditivo a utilizar é um produto comercial desenvolvido para o efeito, o TEGO. A empresa que fornece o aditivo recomenda o uso de 0,25% em relação a quantidade de betume. De forma a reduzir o custo com o aditivo e a entender o efeito que diferentes dosagens terão no betume-espuma considerou-se o uso de duas percentagens de aditivo que são 0,1% e 0,2%.

Os resultados obtidos neste estudo de betume-espuma com aditivo, em termos de expansão e de meia vida, são apresentados respetivamente na Figura 4.4 e Figura 4.5.

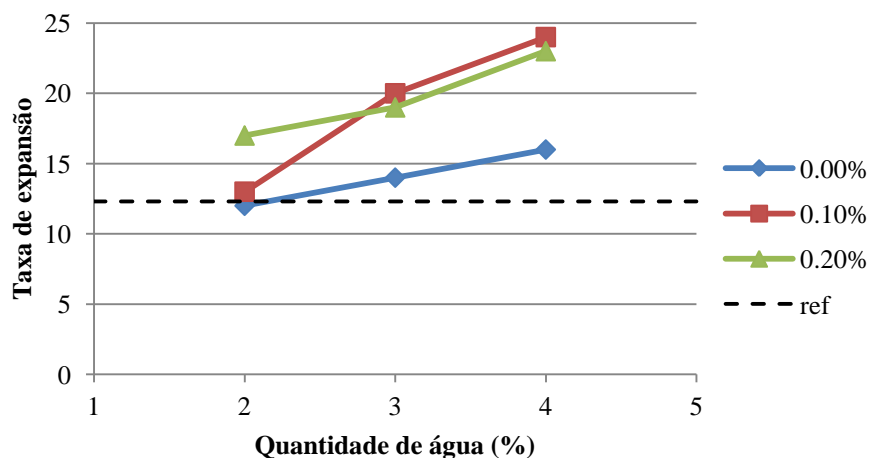


Figura 4.4 – Taxa de expansão do betume-espuma produzido a 160 °C com o betume 50/70 para diferentes percentagens de aditivo

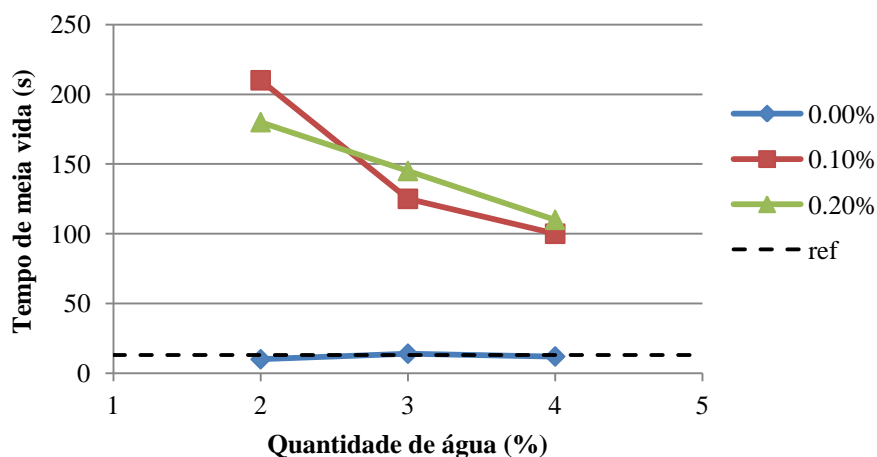


Figura 4.5 – Tempo de meia vida do betume-espuma produzido a 160 °C com o betume 50/70 para diferentes percentagens de aditivo

Deste estudo inicial com o aditivo percebe-se que a sua utilização altera radicalmente o tempo de meia vida do betume, tendo uma influência muito menor na taxa de expansão. Fazendo uma análise às diferentes percentagens de aditivo percebe-se que não há grande vantagem em utilizar mais do que 0,1% de aditivo, embora esta pequena percentagem seja fundamental para aumentar drasticamente o tempo de meia vida do betume-espuma.

Em resumo, para produção do betume-espuma nas fases seguintes do trabalho (produção de misturas) seleccionou-se as seguintes condições: betume 50/70, temperatura de 160 °C, 0,1% de aditivo, e uma quantidade de 3% de água (pois foi a percentagem de água que obteve melhores resultados globais). 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 implicaria usar o dobro do aditivo, com as consequências económicas associadas.

4.3. .Caraterização do material granular

4.3.1. Análise granulométrica do material granular

Para a análise granulométrica do material granular em estudo utilizou-se o procedimento descrito anteriormente no Capítulo 3, do qual resultou a curva granulométrica apresentada na Figura 4.6, juntamente com os valores do fuso granulométrico existente no Caderno de Encargos da EP (2009).

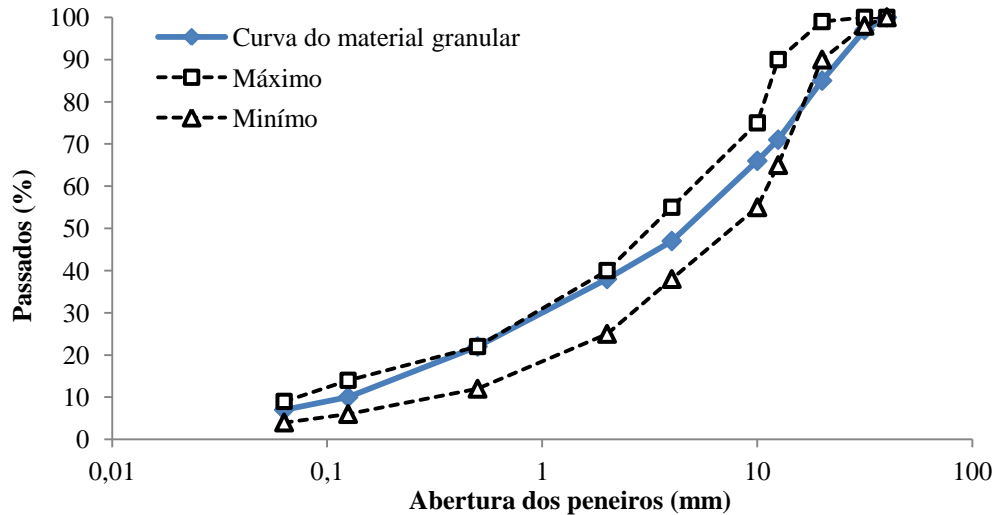


Figura 4.6 – Fusão granulométrica do material granular em comparação com os limites indicados para esse material

Da análise da Figura 4.6 pode verificar-se que de uma forma global o material granular cumpre o fusão pretendido, dado que é um material com uma curva contínua e com dimensões semelhantes às indicadas no caderno de encargos.

No entanto, verifica-se que em alguns peneiros não se cumpre integralmente o fusão granulométrico, em especial nos peneiros de maior dimensão. Isto deve-se ao facto de, ao contrário do que o caderno de encargos pretende, haver uma quantidade ligeiramente elevada material acima dos 20 mm, que ronda os 15%. Apesar deste pequeno incumprimento, o mesmo não se considera muito revelante para o estudo do desempenho deste material, dado que se pretende simular a reabilitação de estradas nas quais o material granular pode diversas vezes não cumprir o fusão esperado.

4.3.2. Análise do ensaio do equivalente de areia do material granular

De acordo com o procedimento do ensaio do equivalente de areia descrito no Capítulo 3, foi possível obter os resultados apresentados na Tabela 4.2.

Para este ensaio, e de acordo com a norma EN 933-8 e o Caderno de Encargos da EP (2009), o valor do equivalente de areia tem de ser no mínimo igual a 30%, e a diferença entre as alturas medidas em dois ensaios tem de ser inferior a 4 mm. Analisando os valores da Tabela 4.2, conclui-se que ambas as restrições são cumpridas para este material granular.

Tabela 4.2 – Resultado do ensaio do equivalente de areia do material granular

Provete	Massa do provete (g)	h1 = Altura entre a base e o flocculado (mm)	h2 = Altura entre o peso e a guia (mm)	$(h2/h1) \times 100$	Equivalente de areia (%)
1	120	188	74	39,4	39
2	120	186	73	39,2	

4.3.3. Análise do ensaio do azul-de-metileno ao material granular

Ao efetuar o procedimento descrito anteriormente no Capítulo 3, segundo a norma EN 933-9, em conjunto com a norma AFNOR 18-592, que diz que o valor de azul-de-metileno máximo não deve ser superior a 1,5 g, conclui-se que o valor de azul-de-metileno do material fino existente no material granular é muito elevado, como se pode ver na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Valor do ensaio de azul-de-metileno do material granular

Tipo de solo	Massa do provete da fração granular 0/0,075mm (g)	Volume de solução absorvida pela caulinite (ml)	Total de solução corante adicionada (ml)	Valor de azul-de-metileno (g)
<i>Tout venant</i>	200	47	127	6,35

De facto, o valor do ensaio de azul-de-metileno é de 6,35 g, e não cumpre as especificações. Idealmente as mesmas deviam ser cumpridas, mas o facto de o resultado do ensaio do equivalente de areia ter sido adequado minimiza o efeito da maior plasticidade do material fino existente neste material granular usado no estudo de estabilização com betume-espuma.

Apesar disso, devido à existência deste material fino com alguma plasticidade deverá ser utilizada uma percentagem um pouco mais alta de cimento como aditivo nas misturas com betume-espuma a desenvolver, de forma a minimizar o eventual impacto negativo desta plasticidade dos agregados finos.

4.4. Caracterização do material fresado

4.4.1. Análise da percentagem de betume do material fresado

Para determinar a percentagem de betume do material fresado utilizado na mistura utilizou-se o método da incineração já descrito anteriormente, e o valor obtido foi de 5,2%.

Este valor praticamente não se afasta do valor referência para estas misturas que é de 5,0%. Logo pode-se dizer que o valor de 5,2% é adequado ao pretendido e demonstra que este material está devidamente envolvido por betume, o que certamente irá influenciar o desempenho da mistura resultante. De facto, a mistura com 50% de material fresado já terá 2,6% de betume na sua constituição, além do betume-espuma que será adicionado (o que justifica a menor quantidade de betume-espuma utilizada nestas misturas). Apesar disso, não é consensual que esse betume vá funcionar como ligante na nova mistura produzida a frio.

4.4.2. Análise da granulometria do material fresado após incineração

Após extração do betume do material fresado, procedeu-se à sua análise granulométrica, sendo os resultados apresentados na Figura 4.7, juntamente com o fuso duma mistura para camada de desgaste AC14 (de onde o material foi fresado) e uma curva típica do material fresado apresentada no manual da Wirtgen (2012).

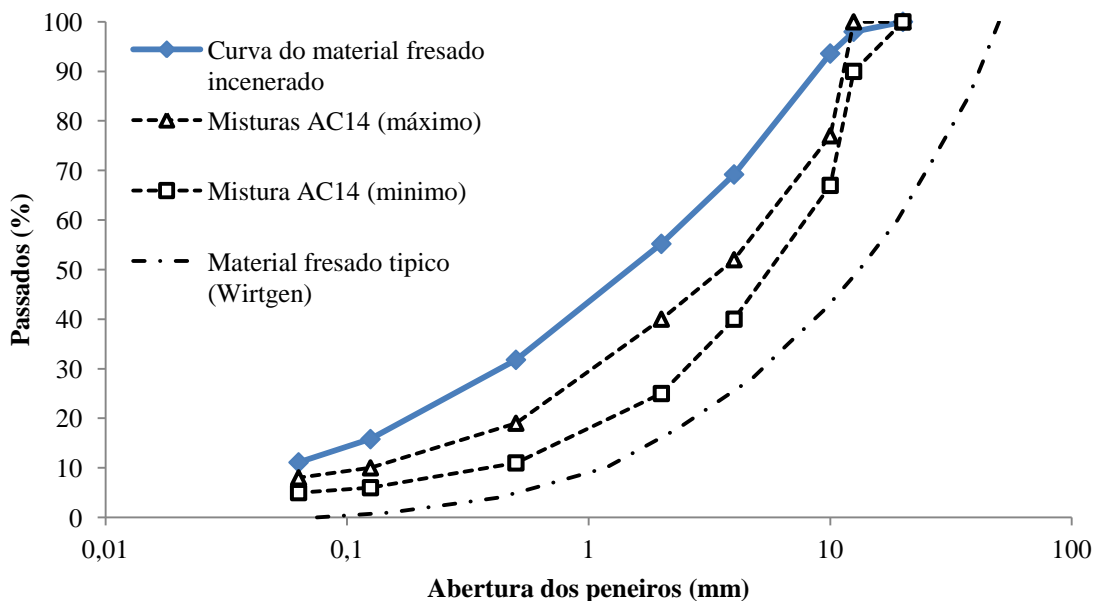


Figura 4.7 – Curva granulométrica do material fresado, em comparação com a curva de um material fresado típico e com a curva de uma mistura convencional AC 14 Surf

Analisando a Figura 4.7, pode-se concluir que a curva do material fresado em estudo apresenta agregados bastante menores, em termos de dimensão, se comparados com a curva do material de onde foi retirado e com a curva do material fresado típico, dado que há muito mais material a passar em cada peneiro.

Isto deve-se ao facto de o material fresado em estudo reduzir a sua dimensão em comparação com a mistura base de onde foi extraído devido ao processo fresagem em obra. Além disso, conclui-se que a curva do material fresado típico da *Wirtgen* é uma curva do material de obra imediatamente após a sua fresagem e aglomerado pelo betume o que permite naturalmente o aparecimento de agregados de maiores dimensões, enquanto o material fresado em estudo é material de laboratório após incineração que não tem esses aglomerados de agregados de dimensões tao grandes. Assim, considerou-se este resultado o expetável.

4.4.3. Caracterização do betume recuperado do material fresado

Posteriormente à extração do betume do material fresado pelo método da centrifugação, procedeu-se à recuperação do betume pelo método do evaporador rotativo. Para o betume recuperado efetuaram-se ensaios básico de caracterização para determinar a penetração com agulha e a temperatura de amolecimento pelo método do “anel e bola”, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.4. Efetuaram-se ainda ensaios de viscosidade dinâmica com o viscosímetro rotacional, cujos resultados são apresentados na Figura 4.8.

Tabela 4.4 – Caracterização básica do betume recuperado do material fresado

Propriedade avaliada	Valor medido
Penetração, valor médio ($\times 0,1$ mm)	8,86
Temperatura de amolecimento, valor médio ($^{\circ}\text{C}$)	73,7

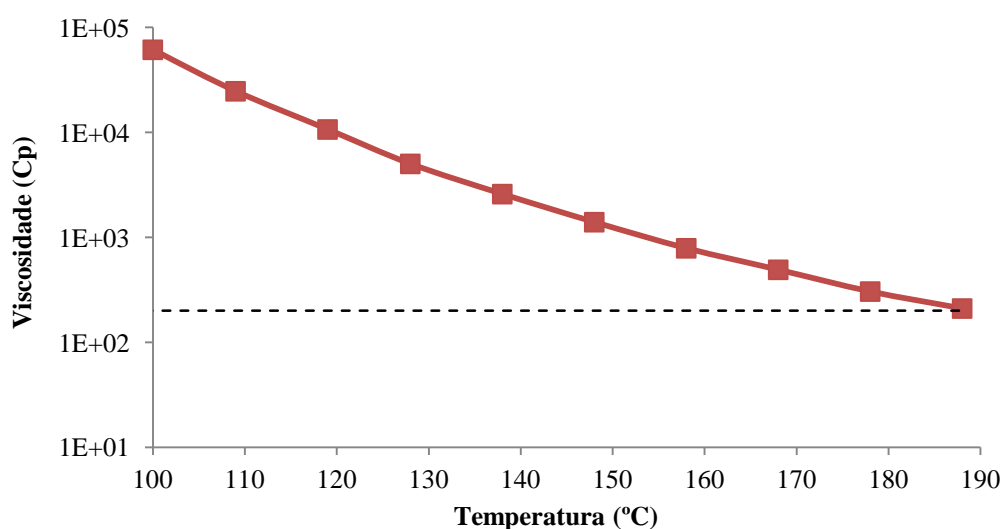


Figura 4.8 – Viscosidade do betume recuperado do material fresado obtida no viscosímetro rotacional em função da temperatura

Ao analisar estes resultados conclui-se que o betume recuperado do material fresado em estudo é extremamente duro (penetração inferior a 0,9 mm a 25 °C) devido ao envelhecimento a que foi sujeito em serviço, sendo por isso muito resistente à deformação pois só começa a amolecer depois dos 70 °C. A elevada dureza deste betume irá dificultar a sua interação com o betume-espuma nas novas misturas desenvolvidas a frio neste trabalho, pois nesse caso este betume irá funcionar mais como agregado do que como ligante, o que pode prejudicar o desempenho da solução que incorpora material fresado (que tem menor quantidade de betume novo).

Conclui-se ainda que seria necessário atingir temperaturas na ordem dos 190 °C para este betume reduzir a sua viscosidade para condições ideais de mistura a quente.

4.5. Formulação das misturas de material estabilizado com betume-espuma

4.5.1. Misturas com 100% material granular estabilizadas com betume-espuma

Depois de ser analisada a granulometria do material granular, foram selecionados três teores de betume-espuma a utilizar para a produção e formulação das misturas com 100% de material granular. Esses valores são apresentados na Tabela 4.5, onde também se apresentam as quantidades reais de betume injetado (que por vezes diferiram um pouco do valor esperado). Os teores de betume-espuma foram escolhidos de acordo com a Tabela 3.1 apresentada no Capítulo 3, que mostra que para material granular deve-se utilizar um teor em betume entre 2,6% e 3,2%. Neste estudo optou-se por escolher os três teores em betume-espuma para formulação com base no valor de 3,2% referido, com outros valores acima e abaixo.

Tabela 4.5 – Percentagens de betume-espuma admitidas e percentagens de betume-espuma realmente injetadas para as misturas com 100% material granular

Mistura	Betume calculado		Betume real injetado	
	Massa (g)	(%)	Massa (g)	(%)
100% material granular	262	2,7	288	2,97
	310	3,2	350	3,60
	388	4,0	455	4,52

Pode-se verificar que os valores de betume que realmente foram injetados são elevados em relação aos escolhidos inicialmente. Isto acontece pela simples razão que estas misturas foram as primeiras a ser feitas, verificando-se uma maior dificuldade no domínio do equipamento de produção de betume-espuma nesta fase inicial, o que melhorou ao longo do trabalho.

Depois de proceder à produção das misturas com estes teores de betume e depois de utilizar todo o procedimento que foi descrito para formulação, procede-se então ao ensaio de sensibilidade à água da *Wirtgen* (com base em ensaios de tração indireta realizados a 25 °C) em que os valores finais obtidos estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Valores de sensibilidade à água para misturas com 100% material granular

Mistura	Betume real injetado (%)	Grupo de provetes	Deformação média (mm)	ITS (kPa)	ITSR (%)
100% material granular	2,97	Secos	1,54	669,76	45%
		Molhados	1,27	299,82	
	3,60	Secos	1,74	580,52	47%
		Molhados	1,68	327,37	
	4,52	Secos	1,64	735,64	42%
		Molhados	1,98	314,03	

Os valores de resistência à tração indireta dos provetes que foram ensaiados secos (ITS_{dry}) e também dos provetes que estiveram sujeitos a ação da água (ITS_{wet}) são importantes para se selecionar o teor ótimo em betume-espuma, como foi explicado no procedimento (Figura 4.9).

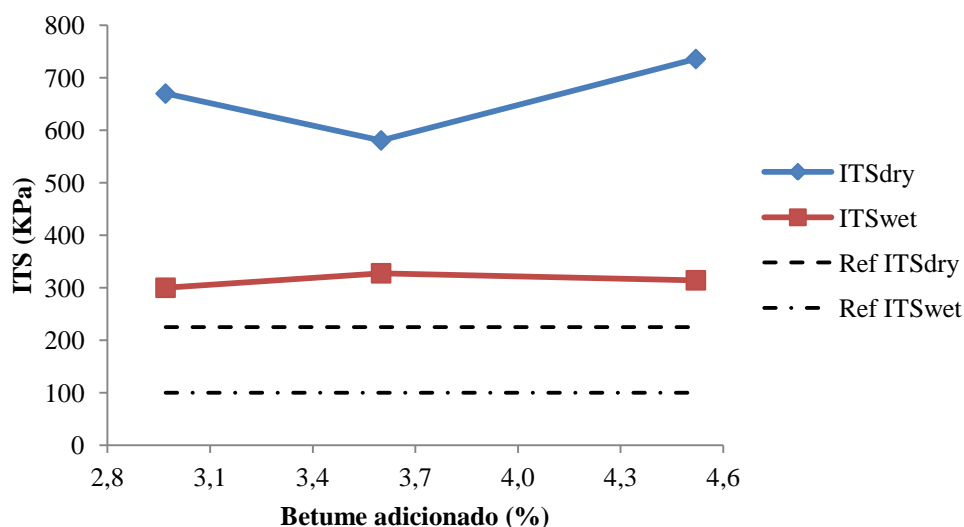


Figura 4.9 – Resultados do ensaio de resistência à tração indireta para misturas com 100% material granular

Comparando os resultados da Figura 4.9 com os resultados equivalentes indicados pela *Wirtgen* e apresentados na Figura 3.23 (embora para percentagens de betume-espuma diferentes), conclui-se que os valores do ITS_{dry} e ITS_{wet} obtidos neste trabalho estão claramente acima dos valores de referência mínimos em todas as misturas produzidas com diferentes teores em betume-espuma.

Verifica-se também que os valores de sensibilidade à água são relativamente baixos, embora estejam dentro da gama de valores apresentados como exemplo pela *Wirtgen*.

4.5.2. Misturas com 50% de material granular e 50% de material fresado estabilizadas com betume-espuma

A Figura 4.10 representa a granulometria conjunta do material com 50% material granular + 50% material fresado, e conclui-se que a junção dos dois materiais levou a uma correção do excesso de material grosso existente no material granular, embora o material fresado mais fino tenha feito com que curva granulométrica do material conjunto passe acima do fuso especificado para o material granular (excesso de material fino, que pode ser prejudicial).

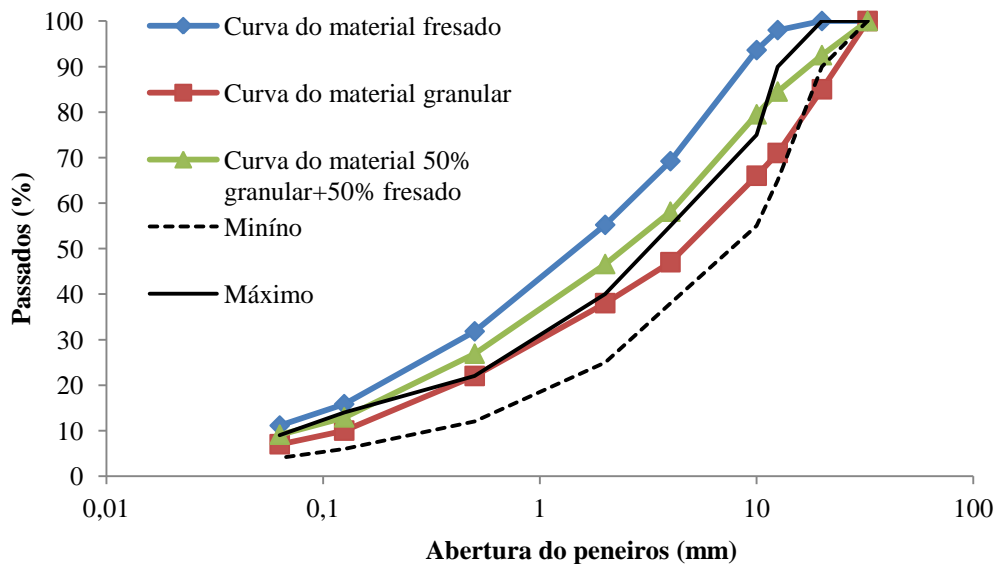


Figura 4.10 – Curva granulométrica do material 50% granular+50% fresado, em comparação com as curvas granulométricas do material fresado e do material granular e com o fuso granulométrico do material granular

Depois desta análise granulométrica foram selecionados os teores de betume para a formulação das misturas com 50% material granular + 50% material fresado, que são apresentados na Tabela 4.7 juntamente com as quantidades reais de betume injetado. Os teores de betumes foram escolhidos de acordo com a Tabela 3.1 da *Wirtgen* apresentada no Capítulo 3, de onde se infere que para materiais com 50% material granular + 50% material fresado devem-se utilizar percentagens de betume-espuma entre 2,4% e 2,8%. Neste estudo optou-se por escolher três teores em betume-espuma em torno do valor de referência de 2,6%.

Tabela 4.7 – Percentagens de betume-espuma admitidas e percentagem de betume realmente injetadas para as misturas com 50% material granular + 50% material fresado

Mistura	Betume calculado		Betume real injetado	
	Massa (g)	(%)	Massa (g)	(%)
50% material granular	155	1,6	153,5	1,58
+	252	2,6	256	2,64
50% material fresado	301	3,1	303	3,12

Pode-se verificar que os valores de betume que realmente foram injetados são agora muito mais próximos dos escolhidos inicialmente, pelo maior controlo na produção do betume-espuma.

Depois de proceder à produção das misturas com estes teores de betume e depois de utilizar todo o procedimento de formulação anteriormente descrito, procede-se então ao ensaio de sensibilidade à água a 25 °C da *Wirtgen*, cujos resultados são apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Valores de sensibilidade à água para misturas com 50% material granular e 50% material fresado

Mistura	Betume real injetado (%)	Grupo de provetes	Deformação média (mm)	ITS (kPa)	ITSR (%)
50% material granular	1,58	Secos	3,42	267,83	40%
		Molhados	2,87	107,29	
+	2,64	Secos	1,80	438,46	62%
		Molhados	1,38	271,49	
50% material fresado	3,12	Secos	1,58	431,64	70%
		Molhados	1,49	301,56	

Mais uma vez, os valores de resistência à tração indireta dos provetes ensaiados secos (ITS_{dry}) e também dos provetes que estiveram sujeitos a ação da água (ITS_{wet}), apresentados na Figura 4.11, são importantes para se selecionar o teor ótimo em betume-espuma.

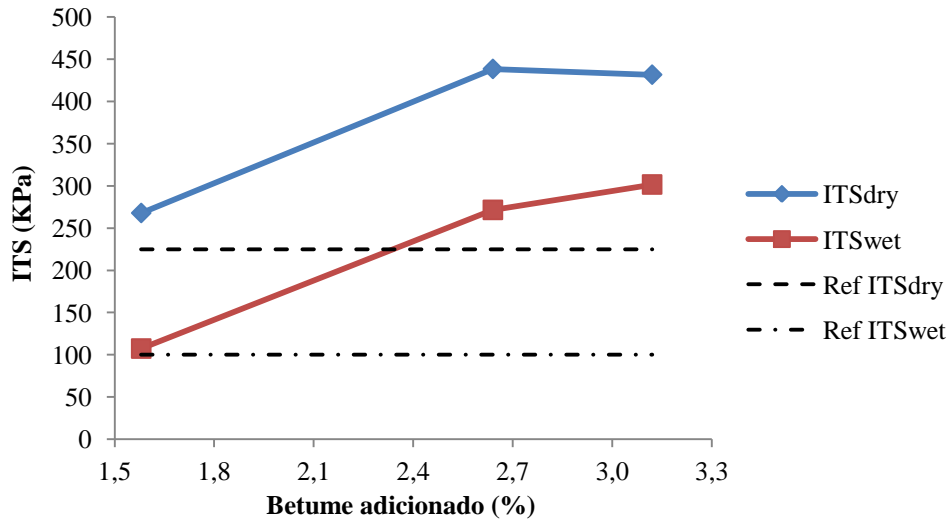


Figura 4.11 – Resultados do ensaio de resistência à tração indireta para misturas com 50% material granular e 50% material fresado

Também para esta mistura com 50% material granular e 50% material fresado, ao comparar os resultados da Figura 4.11 com os resultados equivalentes indicados pela *Wirtgen* e apresentados na Figura 3.23, conclui-se que os valores do ITS_{dry} e ITS_{wet} obtidos neste trabalho estão claramente acima dos valores de referência mínimos em todas as misturas produzidas com diferentes teores em betume-espuma. Os valores de sensibilidade à água são mais elevados do que os obtidos para a mistura com 100% material granular, e estão claramente dentro da gama de valores apresentados como exemplo pela *Wirtgen*.

4.5.3. Comparação entre misturas estabilizadas com e sem material fresado

No que diz respeito à resistência à tração indireta (ITS), as misturas com 100% material granular apresentam valores mais altos que as misturas com 50% material granular + 50% material fresado. Isto deve-se essencialmente à utilização de uma maior percentagem de betume-espuma nas misturas com 100% material granular, o que permite um maior envolvimento dos agregados e leva a uma melhor compactação da mistura.

Em termos de sensibilidade à água (ITSR) acontece precisamente o contrário. Os valores das misturas com 50% material granular + 50% material fresado são mais altos do que os valores das misturas com 100% material granular. Isto pode acontecer devido ao facto dos agregados do material fresado já estarem envolvidos por betume o que faz com que o efeito negativo da ação da água seja menor.

Por fim, e para seleccionar o teor ótimo de betume para utilizar nas misturas finais, teve-se em atenção o facto de os valores de ITS_{DRY} e ITS_{WET} de cada mistura, para diferentes teores em betume, não apresentarem uma diferença acentuada (exceto para o teor de 1,6% utilizado na mistura com material fresado) e serem muito superiores aos limites mínimos exigidos, procurando assim utilizar o menor teor em betume (menor custo) que garante um valor mais elevado de ITSR.

Assim, para misturas com 100% material granular escolheu-se um teor ótimo de betume de 3,5% e para misturas com 50% material granular + 50% material fresado escolheu-se um teor de betume de 3,0%. Os valores escolhidos foram arredondados e valores exatos porque o processo de formulação também não é exato.

4.6. Caracterização das misturas finais de material estabilizado com betume-espuma

4.6.1. Produção das misturas

No seguimento dos procedimentos descritos no Capítulo 3, apresentam-se em seguida os resultados obtidos na produção dos dois tipos de misturas.

Relembra-se que devido a máquina de betume-espuma da Wirtgen não ser exatamente precisa em cada injeção de betume-espuma, optou-se por efetuar novamente pesagens de confirmação da massa de betume injetada em cada mistura. Para as misturas finais com 100% de material granular utilizou-se um teor ótimo de betume de 3,5%, tanto para a produção dos provetes com para a produção das lajes em que os resultados são apresentados na Tabela 4.9. O mesmo foi feito para as misturas finais com 50% material granular + 50% material fresado, com um teor ótimo de betume de 3,0%, em que os resultados são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.9 – Quantidades de betume utilizadas nas misturas com material 100% granular

Mistura 100% material granular	Betume calculado		Betume real injetado	
	Massa (g)	(%)	Massa (g)	(%)
Provetes	339	3,5	342,0	3,53
Laje (módulo de fadiga)	1934	3,5	1989,5	3,60
Laje (WTT)	1086	3,5	1165,0	3,75

Tabela 4.10 – Quantidades de betume utilizadas nas misturas com 50% material granular + 50% material fresado

Mistura 50% material granular + 50% material fresado	Betume calculado		Betume real injetado	
	Massa (g)	(%)	Massa (g)	(%)
Provetes	291	3,0	281,5	2,9
Laje (módulo de fadiga)	1658	3,0	1661,0	3,0
Laje (WTT)	727	3,0	743,0	3,1

Através da análise da Tabela 4.9 e da Tabela 4.10 pode-se concluir que, mesmo não injetando a quantidade exata de betume calculada, as percentagens reais de betume utilizadas são muito próximas do valor inicialmente calculado. Assim sendo, pode-se dizer que esta alteração na percentagem ideal de betume a ser injetada pouco ou nada vai afetar a mistura em termos experimentais.

4.6.2. Baridade aparente

Depois de produzidos todos os provetes de ensaio, pode ser então avaliada a sua baridade aparente. Os valores da baridade aparente para os provetes com 100% material granular e com 50% material granular + 50% material fresado encontram-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Baridade aparente dos provetes das misturas produzidas com betume-espuma

Provetes	Mistura 100% material granular (kg/m ³)	Mistura 50% material granular + 50% material fresado (kg/m ³)
Provetes Marshall	2170	2050
Vigas (módulo e fadiga)	2120	2020
Lajes (WTT)	2130	2030

Não se conseguiu determinar o volume de vazios porque a água adicionada à mistura reagiu quimicamente com o cimento também adicionada à mesma mistura, o que impossibilitou a realização do ensaio de baridade máxima teórica necessário para a sua determinação.

Analisando os resultados relativos a ambas as misturas, pode-se dizer que os resultados são diferentes entre os vários tipos de provete a ensaiar. Esta diferença pode ser justificada pelo método de compactação que foi utilizado em cada um deles. Daí os provetes Marshall apresentarem valores de baridade aparente mais altos do que as vigas de módulo e fadiga e as lajes de WTT, que foram compactadas com o cilindro.

Comparando agora as baridades aparentes das duas misturas pode-se dizer que as misturas com material fresado tem uma baridade aparente claramente mais baixa do que as misturas com 100% material granular. Este facto justifica-se pela maior quantidade de betume utilizado na mistura com 50% material granular + 50% material fresado e pelo facto de ser mais difícil compactar essas misturas, pois o betume existente no material fresado funciona mais como agregado do que como ligante. Posteriormente irá observar-se que este facto teve uma implicação significativa no desempenho da mistura com material fresado, que precisava utilizar uma maior quantidade de betume para ter um desempenho adequado.

De qualquer forma ambos os valores apresentados anteriormente são baixos se comparados com misturas a quente, dado que Silva (2014) refere que os valores de baridade aparente rondam valores entre 2300 a 2400 kg/m³. No entanto, a comparação não deve ser feita diretamente porque estas misturas estabilizadas são muito diferentes das misturas a quente.

4.6.3. Sensibilidade à água e resistência à tração indireta a 25 °C

Depois de efetuar a produção das misturas finais para os teores ótimos de betume já indicados, procedeu-se a análise dos seus resultados finais para ambas as misturas em estudo. Começou por se estudar a sensibilidade à água e a resistência à tração indireta a 25 °C. Inicialmente, a Figura 4.12 apresenta os valores de resistência à tração indireta a 25 °C (ITS_{dry} e ITS_{wet}) para as duas misturas finais estabilizadas com betume-espuma e com 100% material granular ou com 50% material granular + 50% material fresado.

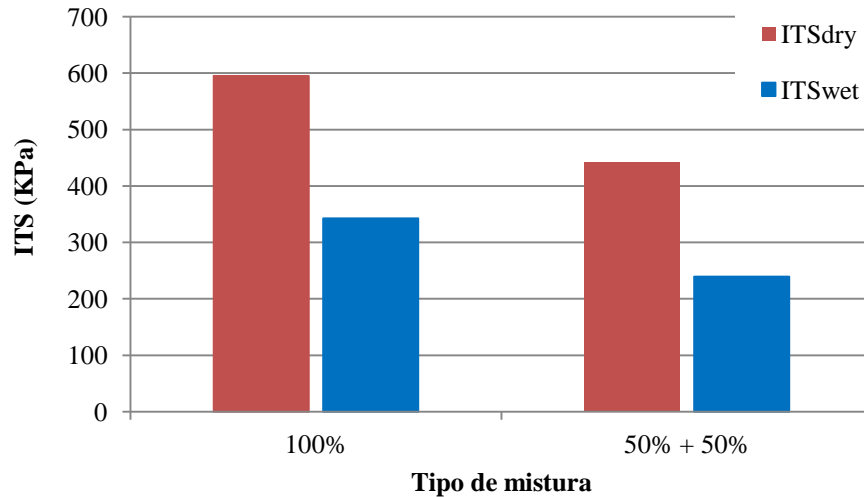


Figura 4.12 – Valores de ITS_{dry} e ITS_{wet} a 25 °C para a duas misturas em estudo

As misturas com 100% material granular apresentam valores mais altos de resistência à tração indireta a 25 °C (ITS) do que as misturas com 50% material granular + 50% material fresado. Isto deve-se essencialmente à utilização de uma maior percentagem de betume nas misturas com 100% material granular, o que permite um maior envolvimento dos agregados que leva a uma melhor compactação e ao aumento da resistência mecânica da mistura. Convém ainda referir todos valores de ITS são muito elevados por comparação com os apresentados pela *Wirtgen*, o que se pode dever à maior quantidade de betume-espuma e cimento utilizados.

Em seguida avaliou-se a sensibilidade à água (ITSR) das duas misturas, cujos resultados são apresentados na Figura 4.13, juntamente com a baridade aparente de cada mistura.

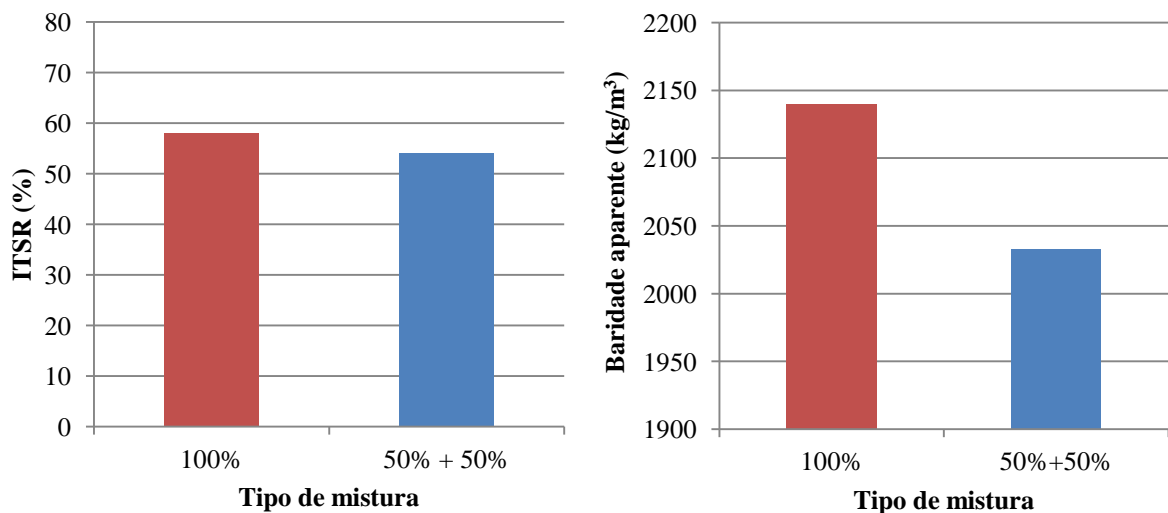


Figura 4.13 – Valores de ITSR e baridade aparente das duas misturas em estudo

Também aqui se verifica que os valores de ITSR para misturas com 100% material granular são mais altos do que os valores de ITSR para a mistura com material fresado, confirmando mais uma vez o problema referido da mistura com material fresado. Na prática estes resultados são diferentes dos obtidos na fase de formulação, em que os valores de ITSR para misturas com 100% material granular eram mais baixos do que os valores de ITSR para misturas com 50% de material granular +50% material fresado. Acredita-se que esta alteração de valores seja justificada pelos valores da baridade aparente de cada mistura. Seria interessante estudar outras percentagens de betume na mistura com material fresado para avaliar melhor esta situação, não tendo havido tempo para esse estudo. Apesar disso, convém referir que os valores de sensibilidade à água de ambas as misturas situam-se entre 50% e 60%, o que está dentro dos valores indicados pela *Wirtgen* para esta propriedade.

De referir ainda que as primeiras misturas produzidas para formulação foram feitas próximo do Verão, estando os agregados mais secos, enquanto as misturas finais foram produzidas no Outono/Inverno, o que fez com que os agregados estivessem mais húmidos. Assim, a variação de comportamento das misturas entre as duas fases do trabalho pode ter resultado desta variação do teor em humidade do material utilizado, o que demonstra a importância de se estudar com cuidado este tipo de misturas. Lembra-se que todas as misturas foram produzidas a frio e que por isso seria impossível manter os teores de humidade constantes, o que parece ser mais representativo das condições reais de estabilização de materiais com betume-espuma.

4.6.4. Resistência à deformação permanente

Outra das propriedades a avaliar para garantir um bom desempenho das misturas betuminosas é a resistência à deformação permanente, em especial em países com climas quentes. O ensaio de pista, utilizado neste trabalho para avaliar esta propriedade, é um ensaio relativamente demorado porque é necessário aplicar cargas mais lentas e a temperaturas elevadas.

Os resultados deste ensaio apresentam-se na Figura 4.14 que representa a evolução da deformação com o número de ciclos para ambas as misturas em estudo.

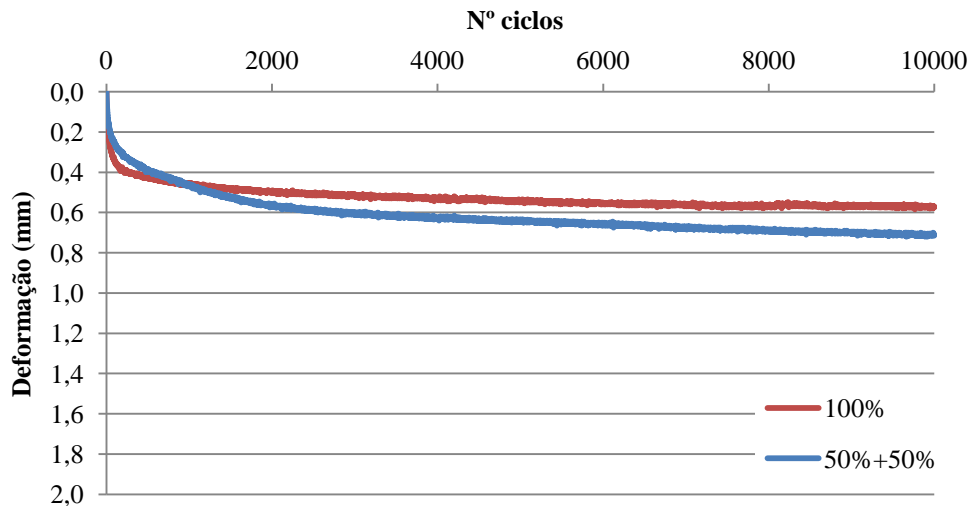


Figura 4.14 – Comparação da deformação das duas misturas em estudo no ensaio de pista

Verifica-se um excelente comportamento de ambas as misturas, com deformações muito reduzidas. A deformação da mistura com 100% material granular é ligeiramente inferior à da mistura com 50% material granular + 50% material fresado. Isto deve-se no essencial à maior compactação (maior baridade aparente) da mistura com 100% material granular, que assim é menos deformável.

Apesar de nos primeiros ciclos a mistura com 100% material granular se deformar mais, confirma-se que a partir dos 2000 ciclos (período mais importante do ensaio) é visível que a mistura com 50% material granular + 50% material fresado é menos resistente à deformação.

Comparando estas misturas com as misturas com betume-espuma temperadas estudadas por Silva (2014), pode-se dizer que os materiais em estudo nesta dissertação têm uma maior resistência à deformação permanente do que as misturas temperadas. A utilização de menores quantidades de betume-espuma e a utilização de cimento ajudam a explicar esse resultado.

Finalmente apresentam-se os resultados finais obtidos no ensaio de pista (Tabela 4.12).

Tabela 4.12 – Principais resultados obtidos no ensaio de pista

Propriedade	100% granular	50% granular + 50% fresado
WTS (mm/10 ³ ciclos)	0,006	0,013
PRD (%)	1,5	1,8
PR (mm)	0,6	0,7

Os resultados obtidos confirmam novamente que a mistura com 50% material granular + 50% material fresado não teve tão bom comportamento quanto a mistura com 100% material granular. Nos três parâmetros a analisar neste tipo de ensaio, que são a taxa de deformação em ensaio de pista (WTS_{AIR}), a percentagem da profundidade de rodeira máxima (PRD_{AIR}) e a profundidade máxima da rodeira (PR_{AIR}), a mistura com 100% material granular teve sempre melhores resultados do que mistura com 50% material granular + 50% material fresado. Como foi dito anteriormente, isto acontece porque a mistura com 50% material granular + 50% material fresado teve alguns problemas na sua produção já referidos, apresentando uma menor baridade aparente, o que a tornou ligeiramente mais deformável.

4.6.5. Módulo de rigidez

No que diz respeito ao módulo de rigidez, e de modo a perceber de que forma a temperatura influencia essa propriedade das misturas em estudo, foram executados ensaios a várias temperaturas para ser possível traçar curvas mestras para uma temperatura de referência de 20 °C que permita comparar as misturas numa gama de frequências mais alargada.

Inicialmente, na Figura 4.15 apresentam-se os valores do módulo complexo e ângulo de fase para misturas com 100% material granular a diferentes temperaturas.

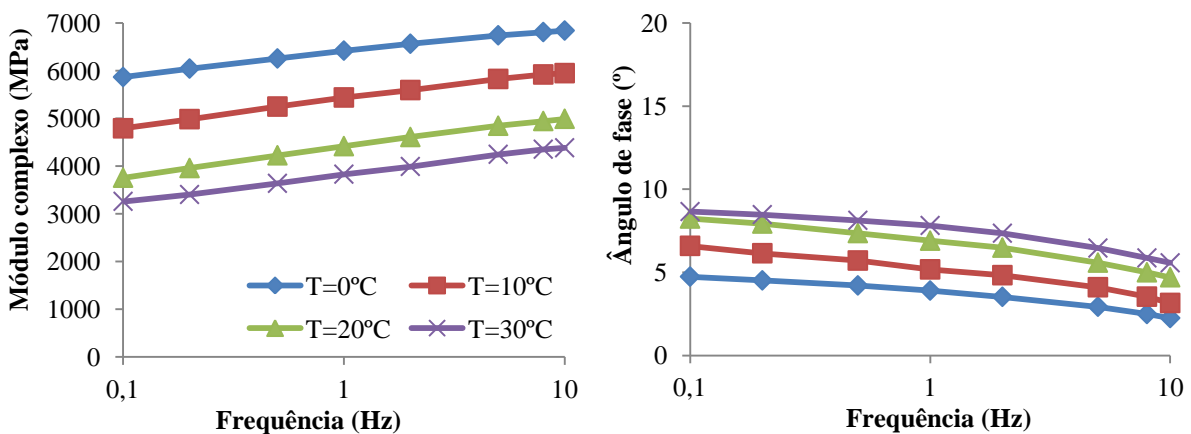


Figura 4.15 – Módulo complexo e ângulo de fase para a mistura com 100% material granular a diferentes temperaturas

Pode-se concluir a mistura com betume-espuma e com 100% material granular tem uma rigidez elevada, pois tem valores de módulo complexo bastante altos (a 20 °C e para uma

frequência de 8 Hz atinge o valor de 4943 MPa) e valores de ângulo de fase muito baixos (a 20 °C e para uma frequência de 8 Hz tem um valor de apenas 4,99°). Nota-se ainda uma certa influência da temperatura e da frequência na variação do módulo, semelhante ao comportamento de misturas betuminosas flexíveis, mas com menores variações do ângulo de fase devido à utilização de cimento, o que garante vantagens da utilização dos dois materiais a esta mistura.

Comparando estes valores com os obtidos por Silva (2014) para misturas temperadas com betume-espuma (módulo complexo a 20 °C e a 8 Hz de aproximadamente 5000 MPa e ângulo de fase nas mesmas condições de aproximadamente 25°), pode-se dizer que os valores obtidos e apresentados nesta dissertação são muito interessantes pois esta solução destina-se à estabilização de materiais granulares e é produzida totalmente a frio. De facto, não se esperava obter valores de módulo tão altos para este material, apesar de se ter utilizado percentagens de betume-espuma e cimento mais altos do que é habitual.

Comparando também com o manual da Wirtgen (2012), em que para misturas com apenas material granular e para teores de betume-espuma entre 2,2% e 3,5% apresenta valores para o módulo resiliente de 400 a 800 MPa, conclui-se que a mistura apresentada nesta dissertação ultrapassa largamente esses valores. Isto mostra que esta solução poderá ser uma mais-valia e uma realidade a adotar mais regularmente. Esta grande diferença de valores pode ser justificada pelo facto das misturas estudadas nesta dissertação terem uma maior percentagem de cimento e betume-espuma, o que demonstrou ser uma alternativa muito interessante pelo ganho significativo de desempenho obtido com um pequeno aumento nas quantidades destes ligantes.

Na Figura 4.16 apresenta-se uma imagem de algumas vigas ensaiadas com este material, onde se pode observar que apesar de a mistura (material granular tratado com betume-espuma) ter sido produzida a frio, e com percentagens de betume-espuma de apenas 3,5%, foi possível obter um material bem ligado e com uma boa coesão que permitiu que as vigas não se desagrassem durante o seu corte. O cimento utilizado como aditivo nesta mistura terá ajudado, certamente, a obter este bom desempenho aqui apresentado.



Figura 4.16 – Aspeto homogéneo das vigas com 100% material granular

Depois de analisada a mistura com 100% de material granular, na Figura 4.17 apresentam-se os valores do módulo complexo e ângulo de fase para misturas com 50% material granular + 50% material fresado a diferentes temperaturas.

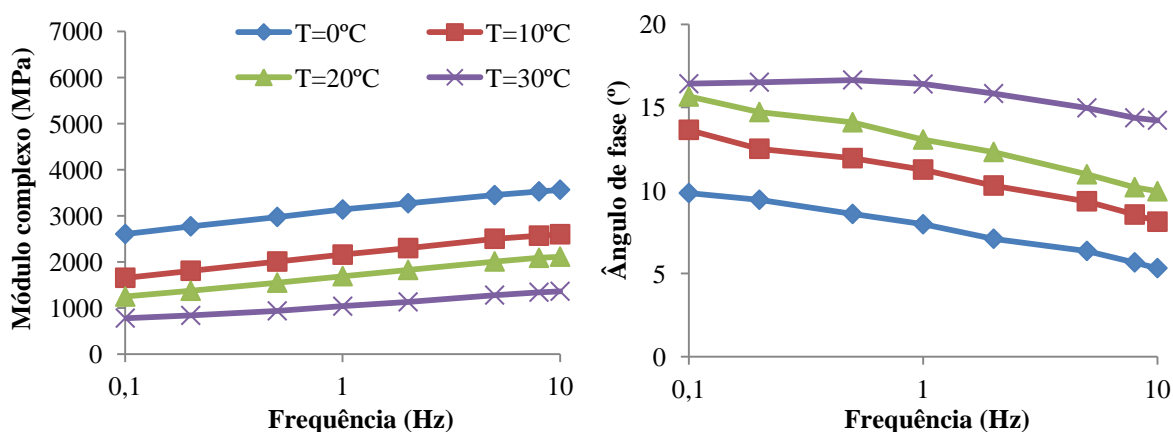


Figura 4.17 – Módulo complexo e ângulo de fase para a mistura com 50% material granular + 50% material fresado a diferentes temperaturas

Como se pode verificar, as misturas com 50% material granular + 50% material fresado apresentam valores de módulo complexo muito baixos e valores de ângulo de fase elevados em comparação com a mistura anterior (100% material granular). De facto, tal como aconteceu anteriormente noutras propriedades, a mistura com 50% material granular e 50% material fresado teve resultados mais baixos em comparação com os da mistura com 100% material granular, apesar dos bons resultados destas misturas na sua formulação inicial.

Apesar disso, o valor do módulo continua a ser superior ao indicado no manual da Wirtgen (2012) e o ângulo de fase continua a ser inferior ao obtido por Silva (2014) para misturas temperadas com betume-espuma. O efeito da temperatura e da frequência é semelhante ao observado para a mistura com 100% material fresado, validando a análise efetuada mesmo

quando as condições de produção não são as ideais. Apesar disso, neste caso parece haver uma menor variação do módulo e uma maior variação do ângulo de fase.

Mais uma vez pode-se dizer que a variação do teor em humidade dos materiais usados nas misturas, que foram produzidas em épocas do ano distintas, pode ser um dos fatores que causou estas diferenças de comportamento, aliado ao facto de o teor de betume utilizado poder ter sido inferior ao necessário pela dificuldade na análise dos resultados de formulação. Na Figura 4.18 pode-se ver a desagregação sofrida pelas vigas da mistura com 50% material granular e 50% material fresado utilizadas neste ensaio, o que ajuda a compreender as claras diferenças de comportamento em relação à mistura anterior.



Figura 4.18 – Desagregação evidente das vigas com 50% material granular + 50% material fresado

Finalmente, para se comparar ambas as misturas numa gama mais alargada de temperaturas, utilizou-se o princípio da sobreposição tempo temperatura (TTS) para ambas as misturas com betume-espuma em estudo, para uma temperatura de 20 °C indicada na norma EN 13108-20 como referência. Dessa forma foi possível obter curvas mestras representativas dos ensaios feitos às várias temperaturas, quer para o módulo de rigidez (Figura 4.19), quer para o ângulo de fase (Figura 4.20).

Com base das curvas mestras de ambas as misturas confirma-se que o módulo de rigidez da mistura com 100% material granular é claramente superior ao obtido com a mistura constituída por 50% material granular + 50% material fresado, e o ângulo de fase é muito inferior devido ao seu comportamento mais elástico. Isto comprova a análise feita anteriormente, e confirma o problema de desagregação da mistura com 50% material granular + 50% material fresado e o excelente desempenho da mistura com 100% material granular.

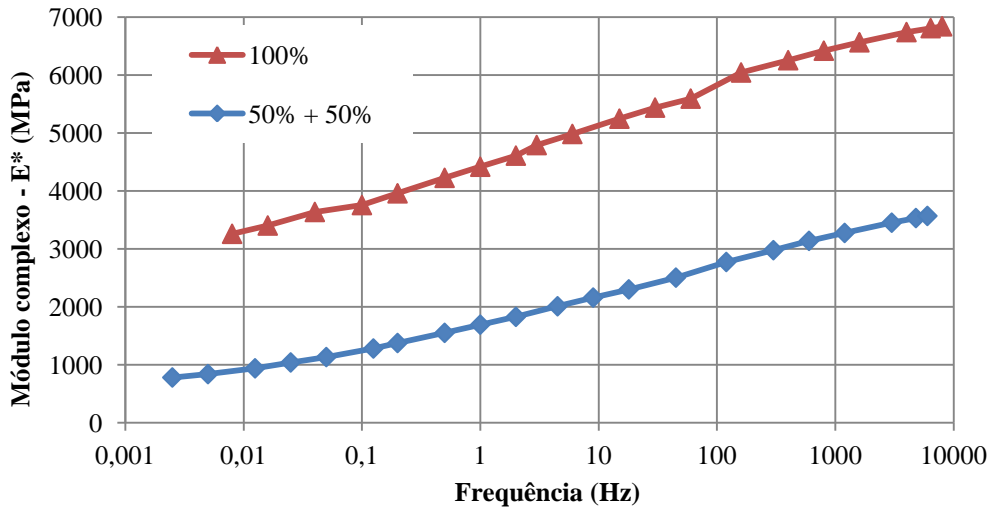


Figura 4.19 – Curvas mestras do módulo complexo para as duas misturas estudadas para uma temperatura de referência de 20 °C

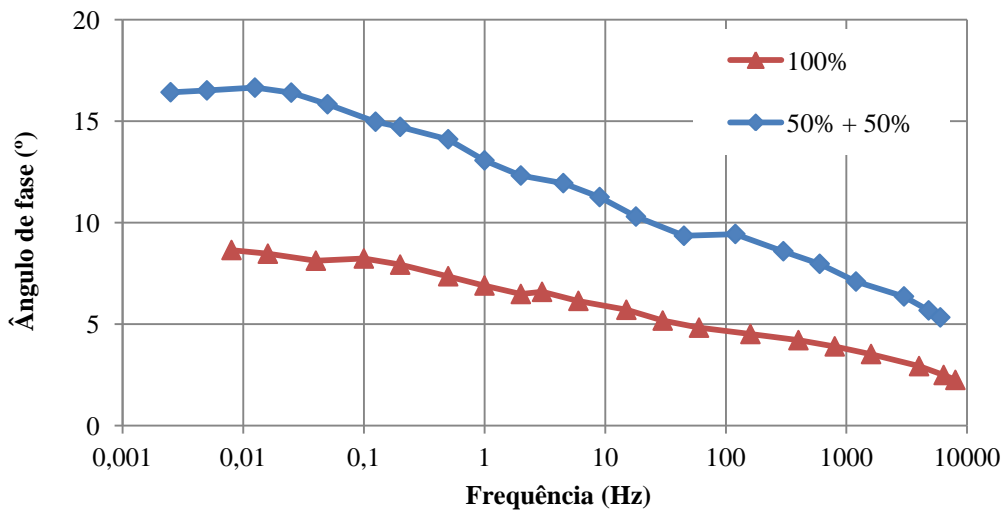


Figura 4.20 – Curvas mestras do ângulo de fase para as duas misturas estudadas para uma temperatura de referência de 20 °C

4.6.6. Resistência à fadiga

Finalmente foi realizado o ensaio de fadiga a ambas as misturas com betume-espuma estudadas, cujos resultados são apresentados na Figura 4.21.

Dos resultados obtidos pode concluir-se que a mistura com 100% material granular tem mais uma vez um melhor desempenho do que a mistura com 50% material granular + 50% material fresado.

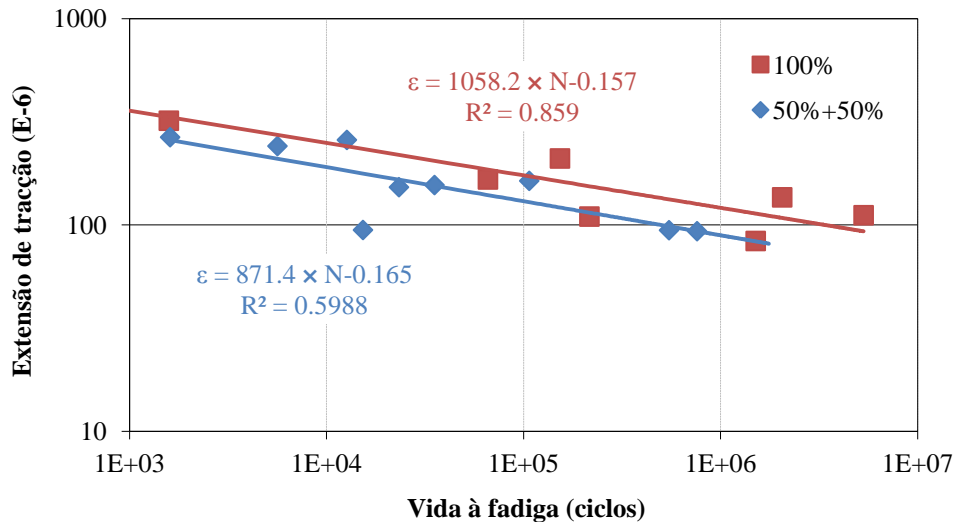


Figura 4.21 – Resultados do ensaio à fadiga para as duas misturas estudadas

De facto, a mistura com 100% material granular tem um comportamento bastante interessante já que a sua vida à fadiga ultrapassa 1 milhão de ciclos para um valor de referência de extensão de tração de 100 μ (tendo $R^2=0,859$ um valor claramente acima dos 0,5 mínimos). Por outro lado, a mistura com 50% material granular + 50% material fresado tem um pior comportamento, com uma maior dispersão de resultados ($R^2=0,5988$ muito próximo do valor mínimo) e a sua vida à fadiga não ultrapassa 1 milhão de ciclos para um valor de referência de extensão de tração de 100 μ , pelas razões apresentadas ao longo desta dissertação.

De seguida, na Figura 4.22 apresenta-se um gráfico que compara a resistência à fadiga das misturas desenvolvidas e estudadas nesta dissertação e de misturas a quente e misturas temperadas com betume-espuma desenvolvidas no estudo de Silva (2014).

Comparando as misturas deste estudo com as estudadas por Silva (2014) pode-se concluir que a mistura com 100% material granular tem uma resistência à fadiga que ultrapassa significativamente 1 milhão de ciclos, para uma extensão de tração de 100 μ , ao contrário das misturas a quente e temperadas avaliadas nesse estudo anterior, e que praticamente tem o mesmo comportamento. No que diz respeito à mistura com 50% material granular + 50% material fresado, conclui-se que tem um comportamento muito similar em relação às misturas a quente e temperadas avaliadas nesse estudo anterior, ficando bastante longe dos excelentes resultados apresentados para a mistura com 100% material granular.

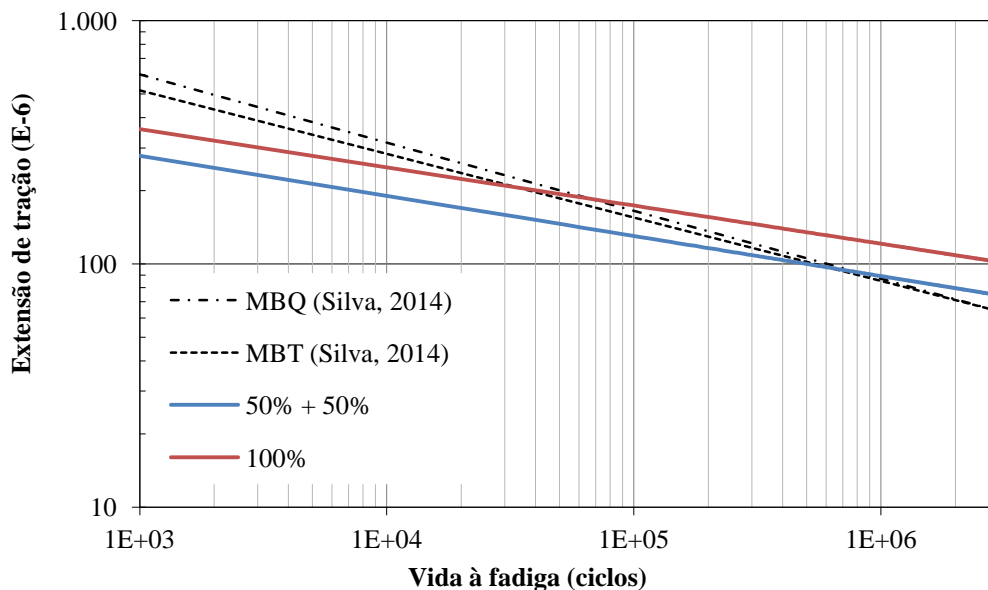


Figura 4.22 – Comparação dos resultados do ensaio de fadiga deste estudo com o observado em misturas temperadas e a quente num estudo anterior

Finalmente apresenta-se na Tabela 4.13 os valores dos principais parâmetros avaliados no ensaio de fadiga, que são o N_{100} (número de ciclos para uma extensão de tração de 100 μ) e o ϵ_6 (extensão de tração que origina a rotura por fadiga ao fim de 1 milhão de ciclos), para misturas alvo de estudo ao longo desta dissertação em comparação com as misturas a quente (MBQ) e temperada (MBT) do estudo anterior já referido.

Tabela 4.13 – Resultados do ensaio de resistência a fadiga das misturas 100%, 50% + 50%, MBQ e MBT

Tipo de mistura	N_{100}	ϵ_6
100%	3,36E+06	120,9
50% + 50%	4,99E+05	89,2
MBQ	5,88E+05	86,0
MBT	5,29E+06	85,0

Estes parâmetros confirmam os resultados observados anteriormente, de acordo com os quais se concluiu que a mistura com betume-espuma e 100% de material granular apresentou um desempenho claramente superior à fadiga (10 vezes superior) em comparação com as restantes misturas em análise, que têm todas um comportamento semelhante.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPETIVAS FUTURAS

5.1. Considerações finais

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 são apresentados 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 a não utilização do aditivo.

No que diz respeito ao 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, enquanto a expansão apresentou valores aceitáveis sem aditivo para percentagens de água superiores a 2% ou 3%. Primeiramente foi estudado o tempo de meia vida e taxa de expansão para percentagens de água entre 1% e 6% sobre o peso do betume para dois betumes. Destes estudos obtiveram-se resultados que apontavam que o intervalo de percentagem ótima de água seria 2% a 4%, mas mesmo para estes valores o tempo de meia vida não era favorável. A solução para este problema passou pela adição de um aditivo capaz de estabilizar a espuma de betume e aumentar o tempo de meia vida.

Depois de realizar o estudo do aditivo optou-se por escolher para as fases seguintes do estudo (produção de misturas) o betume 50/70 a 160 °C por ser aquele que resistiria melhor às deformações permanentes, sem prejudicar muito as propriedades do betume-espuma. Para produção das misturas com betume-espuma esse betume deve ser aditivado com 0,1% de Tego, e deve utilizar-se 3% de água para espumar o betume.

Após ser escolhido o tipo de betume e as condições em que o mesmo deve ser espumado, efetuou-se a formulação de misturas estabilizadas com betume-espuma com vista a escolher o teor ótimo de betume-espuma a utilizar em cada caso. Para misturas com 100% material granular, inicialmente optou-se por estudar na formulação teores de betume de 2,97%, 3,60% e 4,52%, de onde se escolheu o valor de 3,5% como sendo o teor ótimo de betume com base nos resultados de ensaios de tração indireta a 25 °C e de ensaios de sensibilidade à água. Para

misturas com 50% material granular + 50% material fresado, inicialmente optou-se por estudar teores de betume de 1,58%, 2,64% e 3,12%, de onde se escolheu o valor de 3,0% como sendo o teor ótimo de betume com base nos resultados.

Em seguida procedeu-se à produção das misturas finais com 100% material granular ou com 50% material granular + 50% material fresado com betume a 160°, para os teores ótimos obtidos na formulação, e fez-se a análise de desempenho mais rigorosa destas misturas. No ensaio de sensibilidade à água (ITSR) obtiveram-se valores de 58% para a mistura com 100% material granular e 54% para a mistura com 50% material granular + 50% material fresado. Estes valores foram diferentes dos valores inicialmente calculados na formulação e acredita-se que esta alteração de valores inesperada seja justificada pelos valores da baridade aparente de cada mistura (pois esta é muito inferior na mistura com material fresado) e pelo facto de as primeiras misturas que foram produzidas na fase de formulação terem sido produzidas com os agregados mais secos, enquanto as misturas finais foram produzidas numa altura mais húmida e com os agregados potencialmente mais húmidos.

No ensaio de deformação permanente foram obtidos valores de deformação menores para a mistura com 100% material granular, sendo a profundidade de rodeira máxima (PR_{AIR}) de 0,6 mm para a mistura com 100% material granular de 0,7 mm para a mistura 50% material granular + 50% material fresado. Isto acontece porque a mistura com 100% material granular tem uma maior baridade aparente, o que resulta de melhores condições de produção e compactação, sendo por isso menos deformável.

Nos resultados do módulo de rigidez pode-se concluir que a mistura com 100% material granular tem valores de módulo complexo bastante altos (a 20°C para uma frequência de 8 Hz atinge o valor de 4943 MPa) e valores de ângulo de fase muito baixos, enquanto a mistura com 50% material granular + 50% material fresado tem módulos muito inferiores e ângulos de fase mais altos. Como foi dito, a altura de produção desta mistura com material fresado não foi a mais propícia, ou não se seleccionou a percentagem de betume mais adequada para esta mistura durante a sua formulação.

No ensaio de fadiga as misturas obtiveram resultados bastantes diferentes, tendo a mistura produzida com 100% material granular alcançado valores de resistência à fadiga bastante

mais interessantes do que a mistura com 50% material granular + 50% material fresado, pelas várias razões já indicadas ao longo desta dissertação.

Com o estudo efetuado ao longo desta dissertação foi possível perceber a problemática associada a produção de misturas estabilizadas com betume-espuma e à utilização desta solução com maior frequência no futuro, deixando boas perspetivas para a sua utilização na reabilitação e estabilização de pavimentos de uma forma mais barata e mais amiga do ambiente. De facto, a mistura com 100% material fresado demonstrou ter um desempenho excepcional para as condições em que foi produzida (estabilização a frio com quantidade de ligante reduzidos e utilizando ABGE em vez de agregados britados).

Por outro lado, também se verificou o lado menos positivo desta tecnologia, na mistura com material granular e com material fresado, na qual houve uma alteração inesperada de desempenho entre a fase de formulação e de estudo final da mistura. Assim, esta tecnologia de pavimentação demonstra ser muito vantajosa ao nível técnico e económico, mas obriga a um controlo cuidadoso das condições de produção para reduzir a variabilidade dos resultados obtidos.

5.2. Perspetivas futuras

Apesar de os resultados obtidos serem importantes, e pouco se sabendo ainda desta técnica, haverá certamente muito mais a estudar para perceber melhor o que se pode otimizar.

Nesta dissertação foram estudados apenas três teores de betume para cada mistura. Logo, será de interesse o estudo de um leque mais abrangente de percentagens de betume de modo a perceber os seus efeitos nas misturas tornando-as mais ou menos vantajosas em relação ao seu desempenho e ao seu custo.

Também seria de interesse estudar misturas deste tipo com betumes mais duros e betumes mais moles para perceber melhor a sua influência no comportamento mecânico destas misturas finais, nomeadamente em relação à resistência à deformação permanente.

Seria também importante perceber se no futuro, a médio ou longo prazo, se poderá efetuar uma “reciclagem da reciclagem”, isto é, se será possível reciclar um pavimento que já tenha

sido reciclado com esta técnica de betume-espuma, para estudar as características dos materiais desse pavimento de modo a perceber se houve alterações significativas das suas propriedades ao longo do período de vida do pavimento.

O resultado menos bom da mistura com 50% material granular + 50% material fresado pode ter resultado da seleção duma percentagem de betume abaixo do desejável, razão pela qual se indicou que se deviam estudar mais teores em betume. No entanto, houve uma variação de comportamento entre a fase de formulação e o estudo final de desempenho, que pode ter resultados de outros fatores que também devem ser estudados em mais pormenor, tais como:

- o teor em água do *tout venant* e do material fresado;
- o processo de cura;
- a rapidez com que se efetua a mistura após injeção do betume-espuma, entre outros.

Todos estes fatores devem ser isolados e estudados separadamente para se compreender melhor a sua influência no desempenho destas misturas, de modo a garantir uma elevada confiança nestas misturas, o que associado ao bom desempenho já observado (para a mistura com 100% de material granular) irá colocar esta solução como uma das mais interessantes para reabilitação de pavimentos nos próximos tempos. Isto, é claro, desde que haja soluções tecnológicas que permitam a aplicação desta solução duma forma fiável em larga escala.

Nesse sentido, e para finalizar, havia todo o interesse em efetuar um trecho de uma estrada real, que seja sujeita a tráfego com alguma intensidade, e onde se possa aplicar estas tecnologias e verificar o seu sucesso, quer com reciclagem ou estabilização em central a frio, quer com reciclagem ou estabilização *in situ* a frio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baptista, A.M.C. (2006). Misturas betuminosas recicladas a quente em central: contribuição para o seu estudo e aplicação, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Bonfim, V. (2007). Fresagem de Pavimentos Asfálticos, Exceção Editorial ed, São Paulo.
- Cabeças, H.J.H.Z. (2014). Reciclagem de pavimentos na engenharia rodoviária, Tese de Mestrado, Universidade de Évora, Évora.
- Castro, L.N. (2003). Reciclagem a Frio in situ com Espuma de Asfalto, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Cipollina, E. (2015). Cold recycling job site report - Ayrton Senna highway rehabilitation (São Paulo, Brasil), Moviter e Laboratório Nacional de Engenharia Civil ed, Jornadas Técnicas - Reciclagem: Novos desafios para a reabilitação de pavimentos, Lisboa.
- Cunha, C.M. (2010). Reciclagem de pavimentos rodoviários flexíveis: diferentes tipos de reciclagem, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- Dama, M.A. (2003). Análise de comportamento da camada reciclada com espuma de asfalto na rodovia BR-290/RS, Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Dinis-Almeida, M., Afonso, M.L. (2015). Warm Mix Recycled Asphalt - a sustainable solution, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 107, pp. 310-316.
- Dinis-Almeida, M., Castro-Gomes, J., Antunes, M.D. (2012a). Mix design considerations for warm mix recycled asphalt with bitumen emulsion, *Construction and Building Materials*, Vol. 28 (1), pp. 687-693.
- Dinis-Almeida, M., Castro-Gomes, J., Antunes, M.L. (2012b). Mechanical Performance and Economic Evaluation of Warm Mix Recycling Asphalt, *Siiv-5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures 2012*, Vol. 53, pp. 286-296.
- EAPA (2013). Asphalt in figures 2012, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EAPA (2014). Asphalt in figures 2013, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EP (2009). Caderno de Encargos Tipo Obra, Capítulos 14.03 e 15.03 (Pavimentação), Estradas de Portugal, SA, Lisboa.
- Jenkins, K., Molenaar, A., De Groot, J., Van de Ven, M. (2000). Developments in the uses of foamed bitumen in road pavements, *Heron*, Vol. 45 (3).
- Jenkins, K.J. (2000). Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis of foamed bitumen, PhD Thesis, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa.
- Lewis, A., Collings, D. (1999). Cold in place recycling: a relevant process for road rehabilitation and upgrading, *Seventh Conference on Asphalt Pavements for South Africa*.
- Martinho, F., Santos, L.P., Pais, J.C. (2004). Reciclagem de pavimentos rodoviários: selecção do processo construtivo, 3º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.

- Moreira, J., Correia, A.G., Pereira, P.A. (2006). Contribuição para a reutilização de material fresado em camadas estruturais de pavimento.
- Muthen, K. (1998). Foamed asphalt mixes-mix design procedure, Transportation Research Record, Vol. 898, pp. 290-296.
- Pereira, P.D.M. (2014). Avaliação da Aplicabilidade de solos estabilizados com cinzas ativadas alcalinamente em camadas de pavimentos rodoviários, Universidade do Minho, Guimarães.
- Ramanujam, J., Fernando, D. (1997). Foam Bitumen Trial at Gladfield-Cunningham Highway, Proceedings of the Southern Region Symposium, Australia.
- Ramanujam, J., Jones, J. (2007). Characterization of foamed-bitumen stabilisation, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 8 (2), pp. 111-122.
- Read, J., Whiteoak, D. (2003). The Shell Bitumen Handbook, Thomas Telford.
- Silva, C.C. (2014). Utilização de betume-espuma na produção de misturas betuminosas mais sustentáveis, Tese de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- Sunarjono, S. (2013). Performance of Foamed Asphalt under Repeated Load Axial Test, Procedia Engineering, Vol. 54, pp. 698-710.
- Teixeira, M.S.M.R.C. (2006). A utilização de espumas de betume na reciclagem de pavimentos, Tese de Mestrado, Universidade do Porto, Porto.
- Wirtgen (2012). Reciclagem a frio: Tecnologia de reciclagem a frio Wirtgen, Wirtgen Group, GmbH, Windhagen, Alemanha.