



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Liliana Patrícia Ferreira Abreu | Aplicação de betume-espuma e rejuvenescedores em misturas betuminosas recicladas - desenvolvimento de soluções para otimização do seu desempenho

Liliana Patrícia Ferreira Abreu

Aplicação de betume-espuma e rejuvenescedores em misturas betuminosas recicladas - desenvolvimento de soluções para otimização do seu desempenho

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR



UMinho | 2017

abril de 2017



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Liliana Patrícia Ferreira Abreu

Aplicação de betume-espuma e
rejuvenescedores em misturas betuminosas
recicladas - desenvolvimento de soluções
para otimização do seu desempenho

Tese de Doutoramento
Programa Doutoral em Engenharia Civil

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

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Liliana Patrícia Ferreira Abreu, autora da presente Tese, declara ter atuado com integridade na sua elaboração. Confirma que em todo o trabalho conducente à sua elaboração não recorreu à prática de plágio ou a qualquer forma de falsificação de resultados.

Mais declara que tomou conhecimento integral do Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Universidade do Minho, 26 de abril de 2017

Assinatura: Liliana Patrícia Ferreira Abreu

AGRADECIMENTOS

A realização de uma tese de doutoramento envolve muito mais do que o trabalho espelhado neste documento final, pois representa todo um conjunto de vivências e de conhecimentos adquiridos através do convívio com vários intervenientes. Por este motivo, não posso deixar de agradecer a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta tese.

Aos meus orientadores, os Professores Joel Oliveira e Hugo Silva, por apostarem em mim desde o primeiro momento e por confiarem no meu potencial para desenvolver este trabalho. Ao longo destes anos mostraram um cuidado extremo no apoio e orientação, de modo a que o trabalho final chegasse a bom porto.

Ao Engenheiro Carlos Palha, o “Chefe”, agradeço imenso o apoio no desenvolvimento deste projeto, apesar do seu feito bem especial. Não menos importante, um sentido reconhecimento ao companheirismo do Engenheiro Hélder Torres, crucial ao longo de todo este percurso.

À Engenheira Daniela Palha, companheira de todas as horas, um enorme obrigada por reconhecer a verdadeira dificuldade dos trabalhos desenvolvidos e por todo o apoio no decorrer destes anos.

À empresa Elevo Group, na pessoa do Engenheiro Paulo Fonseca, pelo fornecimento dos materiais utilizados neste estudo, pelo apoio dado na realização dos trabalhos e pela disponibilidade para validar os resultados obtidos em central.

Às meninas do laboratório, Andreia, Elisabete, Liliana e Sara, fico grata pelo acompanhamento e incansáveis apoio e motivação, inclusive nas etapas mais complicadas com que me deparei nos últimos anos. A todos os que se cruzaram comigo, naquela que foi a minha segunda casa, um muito obrigada por me fazerem crescer e tornar-me no que sou hoje.

À minha afilhada de curso, Engenheira Diana Oliveira, das melhores coisas que levo, daquilo que é um bicho de sete cabeças para muitos. Um muito obrigada, afilhada, por todo o apoio e por todos os abraços no momento certo.

Aos Engenheiros do perfil de Hidráulica e Ambiente, Diana Costa, Marisa Pinheiro, Sílvia Silva, Raquel Nogueira, Hélder Costa, Manuel Machado e João Pedro Soares, agradeço pelo encorajamento e ajudas certas nos momentos certos.

Aos meus pais, que me tornaram a pessoa capaz que sou hoje e me demonstraram que, por maiores que sejam as partidas da vida, nunca devemos baixar os braços, um agradecimento muito especial. E a ti mãe, que partiste antes que isto estivesse finalizado, deixo a certeza que nunca serás esquecida.

Aos dois homens essenciais na minha vida, o meu irmão Raul Abreu e o meu namorado Francisco Oliveira, muito obrigada por todo o apoio que ambos me dão. Agradeço todos os momentos em que me fazem acreditar que sou bem mais capaz do que aquilo que penso ser.

Este trabalho foi financiado pelo Governo de Portugal e pelo Fundo Social Europeu da União Europeia (UE/FSE) através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) com a Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/85448/2012, e no âmbito do Programa Operacional Potencial Humano inscrito no Quadro de Referência Estratégico Nacional (POPH/QREN) para o período 2007-2013, assim como no âmbito do projeto “Eficiência Energética e Ambiental das Misturas Betuminosas e Redução das Emissões de Gases de Efeito Estufa (QREN-SI 090528), atribuído à empresa Betominho, Sociedade de Construções S.A., do grupo MonteAdriano, com a colaboração da Universidade do Minho.

Aplicação de betume-espuma e rejuvenescedores em misturas betuminosas recicladas – desenvolvimento de soluções para otimização do seu desempenho

RESUMO

As questões ambientais assumem um papel essencial para a sociedade atual, e nesse sentido, o desenvolvimento de novas tecnologias que permitam melhorar a sustentabilidade da indústria de pavimentação é cada vez mais pertinente. Dado que, nos países desenvolvidos, a maior parte dos trabalhos realizados nessa área consistem na reabilitação de pavimentos, existe a necessidade de adaptar essa atividade à economia circular, reutilizando os materiais existentes no pavimento quando este atingir o final do seu ciclo de vida. Assim, a reciclagem de misturas betuminosas tem vindo a assumir um interesse crescente da comunidade científica, pelo seu papel fundamental na redução do consumo de recursos naturais e da produção de resíduos.

Nesse sentido, atualmente procura-se maximizar a taxa de incorporação de materiais fresados de pavimentos em novas misturas betuminosas, o que traz novos desafios ao nível da sua produção. De facto, para atingir essas taxas é necessário utilizar temperaturas muito elevadas, às quais estão associados consumos de energia e emissões de gases de efeito de estufa significativos. Para minimizar esses efeitos existem tecnologias que permitem reduzir a temperatura de produção, que podem ser aplicadas juntamente com a reciclagem de elevadas quantidades de material fresado, das quais se destaca a tecnologia de betume-espuma. Esta utiliza apenas com uma pequena quantidade de água para expandir o betume, reduzindo a sua viscosidade de forma a envolver adequadamente os agregados a temperaturas muito inferiores.

Tendo em conta os desafios anteriores, a presente tese tem como objetivo realizar um estudo detalhado sobre a reciclagem de misturas betuminosas com elevadas taxas de incorporação de material fresado (até 50 %), com grande enfoque na utilização da tecnologia de betume-espuma como solução para minimizar a temperatura de produção das misturas recicladas. Além disso, também se pretende avaliar a utilização de rejuvenescedores em misturas recicladas produzidas a quente, como solução que pode ser utilizada de forma mais generalizada quando não for possível usar a tecnologia de betume-espuma.

No decorrer dos trabalhos começou por efetuar-se uma análise completa do material fresado, para uma incorporação mais eficaz em misturas betuminosas recicladas. Depois estudou-se a utilização de rejuvenescedores para melhoria do desempenho de misturas recicladas a quente com 30 e 50% de material fresado. Em seguida estudou-se a tecnologia de betume-espuma em detalhe de forma a contribuir para um maior conhecimento na sua aplicação em misturas recicladas. O estudo desta técnica incluiu a avaliação das propriedades de expansão e das curvas de decaimento do betume-espuma, bem como a determinação da redução da temperatura de produção com ensaios de compactabilidade, para se conseguir determinar as melhores condições de produção destas misturas. Por último, procedeu-se à análise de desempenho das misturas recicladas com betume-espuma, que foi comparado com o das misturas equivalentes produzidas a quente, e procedeu-se à aplicação da tecnologia de betume-espuma em central.

No final deste estudo, foi possível obter misturas com betume-espuma e com incorporação de elevadas taxas de reciclagem (30 e 50%), produzidas a temperaturas significativamente mais baixas (temperatura dos agregados diminuiu entre 20 e 40 °C), mas com um desempenho idêntico ao das misturas produzidas a quente. Adicionalmente, para as misturas betuminosas recicladas a quente concluiu-se que o uso de rejuvenescedores não é necessário para taxas de reciclagem até 30%, mas é aconselhado (2 a 3%) ao incorporar 50% de material fresado.

PALAVRAS-CHAVE

Material fresado
Técnicas de reciclagem de pavimentos
Misturas betuminosas recicladas
Rejuvenescedores
Misturas betuminosas temperadas
Betume-espuma
Características de expansão
Curvas de decaimento
Desempenho de misturas betuminosas
Validação em central

Application of foamed bitumen and rejuvenators in recycled asphalt mixtures – development of solutions to optimize their performance

ABSTRACT

Nowadays, the environmental issues play a key role for the society, and thus, the development of new technologies to improve the sustainability of the paving industry is increasingly relevant. Given that, in developed countries, most of the work carried out in this area is related to pavement rehabilitation, there is a need to adapt this activity to the circular economy, reusing pavement materials when it reaches the end of its life cycle. Therefore, recycling of asphalt mixtures has assumed an increasing interest of the scientific community, due to its fundamental role in reducing the consumption of natural resources and the production of waste.

Taking the abovementioned into account, maximization of reclaimed asphalt pavement material incorporation rates into new asphalt mixtures is currently being targeted, which presents new production challenges. In fact, to achieve these rates, it is necessary to use very high temperatures, which are associated with significant energy consumption and greenhouse gas emissions. To minimize these effects, there are technologies that allow the reduction of the production temperature, which can be applied together with the recycling of high quantities of reclaimed asphalt pavement material, of which foamed bitumen technology stands out. It uses only a small amount of water to expand the bitumen, reducing its viscosity in order to properly coat the aggregates at much lower temperatures.

Considering the previous challenges, this thesis aims to carry out a detailed study on the recycling of asphalt mixtures with high reclaimed asphalt pavement incorporation rates (up to 50%), with a great focus on the use of foamed bitumen technology as a solution to minimize the production temperature of the recycled mixtures. In addition, it is also intended to evaluate the use of rejuvenators in hot-recycled blends, as a solution that can be more widely used when foamed bitumen technology cannot be used.

In the course of the work, a complete analysis of reclaimed asphalt pavement material was made, for a more efficient incorporation in recycled asphalt mixtures. Then, the use of rejuvenators was studied to improve the performance of hot recycled mixtures with 30 and 50% of reclaimed asphalt pavements. Next, foamed bitumen technology was studied in detail in order to contribute to a better knowledge of its application in recycled mixtures. The study of this technology included the evaluation of the expansion properties and the decay curves of the foamed bitumen, as well as the assessment of the production temperature reduction based on compactability tests, in order to determine the best production conditions for these mixtures. Finally, the performance of the recycled mixtures with foamed bitumen was evaluated and compared with that of equivalent hot mixtures, and the foamed bitumen technology was tested in an asphalt plant.

At the end of this study, it was possible to obtain asphalt mixtures with foamed bitumen incorporating high recycling rates (30 and 50%), produced at significantly lower temperatures (aggregate temperature decreased between 20 and 40 °C), but with a similar performance to that of hot mix asphalts. Additionally, for hot recycled asphalt mixtures it was concluded that the use of rejuvenators is not required for recycling rates up to 30%, but it is expected to be used (2 to 3%) when incorporating 50% of reclaimed asphalt pavements.

KEY-WORDS

Reclaimed asphalt pavements
 Pavement recycling techniques
 Recycled asphalt mixtures
 Rejuvenators
 Warm mix asphalts
 Foamed bitumen
 Expansion characteristics
 Decay curves
 Performance of asphalt mixtures
 Asphalt plant validation

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TRABALHO.....	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.3. ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	4
2. RECICLAGEM DE MISTURAS BETUMINOSAS	7
2.1. INTRODUÇÃO.....	7
2.2. MATERIAL FRESADO	9
2.3. RECICLAGEM DE PAVIMENTOS	13
2.4. TÉCNICAS DE RECICLAGEM	16
2.5. RECICLAGEM A QUENTE EM CENTRAL	19
2.6. RECICLAGEM TEMPERADA	22
2.6.1. <i>Aditivos Redutores de Temperatura</i>	23
2.6.2. <i>Tecnologias de Formação de Espuma</i>	25
2.6.3. <i>Betume-espuma</i>	31
2.6.4. <i>Misturas Betuminosas Temperadas e Semi-temperadas</i>	33
2.7. PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO DO BETUME-ESPUMA.....	37
2.7.1. <i>Curvas de Decaimento</i>	41
2.7.2. <i>Índice de Espuma</i>	44
3. MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1. MATERIAIS UTILIZADOS NO ESTUDO.....	49
3.1.1. <i>Agregados</i>	49
3.1.2. <i>Material Fresado</i>	50
3.1.3. <i>Betumes</i>	51
3.1.4. <i>Aditivos Rejuvenescedores</i>	52
3.1.5. <i>Aditivos Estabilizadores de Espuma</i>	53

3.2. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FRESADO	55
3.2.1. <i>Recuperação do Betume</i>	55
3.2.2. <i>Determinação da Percentagem de Betume</i>	55
3.2.3. <i>Determinação da Curva Granulométrica dos Agregados</i>	56
3.3. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS BETUMES	57
3.3.1. <i>Ensaio “Anel e Bola”</i>	57
3.3.2. <i>Ensaio de Penetração a 25 °C</i>	58
3.3.3. <i>Ensaio de Viscosidade Dinâmica</i>	58
3.3.4. <i>Ensaio de Reologia</i>	59
3.3.5. <i>Ensaio de Envelhecimento RTFOT</i>	60
3.4. DETERMINAÇÃO DAS TEMPERATURAS DE FABRICO DAS MISTURAS	61
3.4.1. <i>Misturas Betuminosas Recicladadas a Quente</i>	61
3.4.2. <i>Misturas Betuminosas Recicladadas com Betume-Espuma</i>	63
3.5. FORMULAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS	64
3.5.1. <i>Composição Granulométrica das Misturas Betuminosas</i>	64
3.5.2. <i>Método de Formulação e Ensaio Marshall</i>	65
3.6. MÉTODOS PARA A CARACTERIZAÇÃO VOLUMÉTRICA DAS MISTURAS.....	66
3.6.1. <i>Ensaio de Baridade Aparente</i>	66
3.6.2. <i>Ensaio de Baridade Máxima Teórica</i>	66
3.6.3. <i>Determinação do Volume Vazios</i>	67
3.7. METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO DA PERCENTAGEM DE ADITIVOS	67
3.7.1. <i>Aditivos Rejuvenescedores</i>	67
3.7.2. <i>Aditivos Estabilizadores de Espuma</i>	70
3.8. METODOLOGIA DE PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BETUME-ESPUMA	71
3.8.1. <i>Determinação das Propriedades de Expansibilidade do Betume-Espuma</i>	72
3.8.2. <i>Determinação das Curvas de Decaimento</i>	74
3.9. MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS BETUMINOSAS	75
3.9.1. <i>Ensaio de Sensibilidade à Água</i>	75
3.9.2. <i>Ensaio de Resistência à Deformação Permanente</i>	76
3.9.3. <i>Ensaio de Módulo de Rigidez por Flexão em Quatro Pontos</i>	77
3.9.4. <i>Ensaio de Resistência à Fadiga por Flexão em Quatro Pontos</i>	78

4. ESTUDO DE COMPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS COM REJUVENESCEDORES.....	79
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FRESADO.....	79
4.2. FORMULAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS.....	82
4.2.1. <i>Mistura Convencional</i>	82
4.2.2. <i>Mistura com 30% de Material Fresado</i>	84
4.2.3. <i>Mistura com 50% de Material Fresado</i>	87
4.3. ESTUDO DE REJUVENESCIMENTO DOS BETUMES.....	90
4.3.1. <i>Simulação do Betume Presente no Material Fresado</i>	90
4.3.2. <i>Efeito dos Aditivos Rejuvenescedores nas Propriedades do Betume Envelhecido</i>	93
4.3.3. <i>Efeito dos Aditivos Rejuvenescedores nas Propriedades do Betume Recuperado</i>	95
4.4. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS COM REJUVENESCEDORES.....	100
4.4.1. <i>Sensibilidade à Água e Resistência à Tração Indireta</i>	100
4.4.2. <i>Resistência à Deformação Permanente</i>	102
4.4.3. <i>Módulo de Rigidez a Várias Temperaturas</i>	104
4.4.4. <i>Resistência ao Fendilhamento por Fadiga</i>	108
5. ESTUDO DE COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS COM BETUME-ESPUMA	111
5.1. ESTUDO PRELIMINAR DAS CONDIÇÕES DE PRODUÇÃO DE BETUME-ESPUMA.....	111
5.1.1. <i>Influência da Velocidade de Injeção</i>	112
5.1.2. <i>Influência das Condições de Fronteira</i>	113
5.1.3. <i>Influência da Utilização do Adaptador no Bico Injetor</i>	114
5.1.4. <i>Influência da Pressão do Ar</i>	116
5.2. PROPRIEDADES DOS BETUMES USADOS NA PRODUÇÃO DE BETUME-ESPUMA.....	117
5.2.1. <i>Propriedades dos Betumes sem Aditivos</i>	117
5.2.2. <i>Propriedades dos Betumes com Aditivos</i>	120
5.3. PROPRIEDADES DE EXPANSIBILIDADE DO BETUME-ESPUMA.....	122
5.3.1. <i>Expansibilidade dos Betumes-Espuma sem Aditivos</i>	122
5.3.2. <i>Expansibilidade dos Betumes-Espuma com Aditivos</i>	125
5.4. ESTUDO DAS CURVAS DE DECAIMENTO DO BETUME-ESPUMA.....	130
5.4.1. <i>Análise das Medições Experimentais das Curvas de Decaimento</i>	130
5.4.2. <i>Tipos de Curvas de Decaimento Obtidas e Respetivos Ajustes Teóricos</i>	136

5.4.3. <i>Variação das Curvas de Decaimento com as Condições de Produção do Betume-Espuma</i>	138
5.4.4. <i>Comparação das Áreas das Curvas de Decaimento com o Índice de Espuma</i>	142
5.5. ESTUDOS PRELIMINARES DAS CONDIÇÕES DE PRODUÇÃO DAS MISTURAS COM BETUME-ESPUMA	144
5.5.1. <i>Influência do Processo de Cura</i>	145
5.5.2. <i>Influência do Tipo de Filer e da Percentagem de Betume</i>	146
5.5.3. <i>Influência da Composição Granulométrica e do Tipo de Agregados</i>	149
5.5.4. <i>Influência da Quantidade de Água Usada na Produção do Betume-Espuma</i>	152
5.5.5. <i>Influência do Método de Pesagem na Fase de Produção da Mistura</i>	154
5.5.6. <i>Influência do Condicionamento Após Produção da Mistura</i>	156
5.5.7. <i>Influência da Pressão do Ar Usada na Produção do Betume-Espuma</i>	158
5.5.8. <i>Principais Recomendações Resultantes dos Estudos Preliminares</i>	159
5.6. DEFINIÇÃO DA TEMPERATURA DE PRODUÇÃO E COMPACTAÇÃO.....	160
5.6.1. <i>Misturas sem Material Fresado</i>	160
5.6.2. <i>Mistura com 30% de Material Fresado</i>	163
5.6.3. <i>Mistura com 50% de Material Fresado</i>	166
6. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS COM BETUME-ESPUMA	171
6.1. SENSIBILIDADE À ÁGUA.....	171
6.1.1. <i>Mistura sem Material Fresado</i>	171
6.1.2. <i>Mistura com 30% de Material Fresado</i>	173
6.1.3. <i>Mistura com 50% de Material Fresado</i>	175
6.2. RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE	177
6.2.1. <i>Misturas sem Material Fresado</i>	177
6.2.2. <i>Misturas com 30% de Material Fresado</i>	178
6.2.3. <i>Misturas com 50% de Material Fresado</i>	179
6.3. MÓDULO DE RIGIDEZ.....	181
6.3.1. <i>Mistura sem Material Fresado</i>	181
6.3.2. <i>Mistura com 30% de Material Fresado</i>	183
6.3.3. <i>Mistura com 50% de Material Fresado</i>	185

6.4. RESISTÊNCIA AO FENDILHAMENTO POR FADIGA	187
6.4.1. <i>Mistura sem Material Fresado</i>	187
6.4.2. <i>Mistura com 30% de Material Fresado</i>	188
6.4.3. <i>Mistura com 50% de Material Fresado</i>	189
6.5. COMPARAÇÃO ENTRE AS MISTURAS BETUMINOSAS A QUENTE E TEMPERADAS.....	190
6.6. APLICABILIDADE DAS MISTURAS EM CONTEXTO REAL.....	196
7. CONCLUSÕES	201
7.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES	201
7.2. PROPOSTAS PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	205
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	207

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Exemplo do estado avançado de degradação observado num número significativo de pavimentos rodoviários atuais.....	7
Figura 2.2 – Soluções para aplicação de material fresado em pavimentos (adaptado de EAPA (2005)).	8
Figura 2.3 – Esquematização da composição (em massa) das misturas betuminosas convencionais (a) e das misturas betuminosas recicladas (b).....	9
Figura 2.4 – Aspeto do material após fresagem.	10
Figura 2.5 – Classificador industrial usado para a separação do material fresado (Palha et al., 2014).	11
Figura 2.6 – Composição química do betume (adaptado de Branco et al. (2005)).	12
Figura 2.7 – Quantidade de misturas betuminosas temperadas produzidas anualmente na Europa, em milhões de toneladas (EAPA, 2010a, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015).	16
Figura 2.8 – Parâmetros de distinção das técnicas de reciclagem (adaptado de Martinho (2004)).....	17
Figura 2.9 – Classificação das misturas betuminosas quanto à temperatura de produção (adaptado de EAPA (2010b)).....	18
Figura 2.10 – Alterações ao nível da composição química depois do envelhecimento e da aplicação de rejuvenescedores (adaptado de Brownridge (2010)).	20
Figura 2.11 – Diferentes etapas do processo LEA [®] (adaptado de Harder (2007)).....	26
Figura 2.12 – Aspeto do aditivo Aspha-min [®] (Aspha-min GmbH (2009)).....	28
Figura 2.13 – Equipamento Ultrafoam GX2 TM (Gencor Industries, 2014).	29
Figura 2.14 – Esquema de produção da WAM foam (adaptado de Shell Bitumen (2014)).....	30
Figura 2.15 – WMA Terex System (Terex Roadbuilding, 2011).....	30
Figura 2.16 – Generalização do sistema de espuma (adaptado de Saunders (1991)).....	31
Figura 2.17 – Esquema de produção do betume-espuma (adaptado de Wirtgen (2012)).	33
Figura 2.18 – Esquema ilustrativo da evolução do volume do betume-espuma ao longo do tempo.....	38

Figura 2.19 – Representação esquemática do comportamento típico dos betumes quando expandidos.....	39
Figura 2.20 – Esquematização da distribuição da espuma na mistura final – a) betume virgem, b) betume aditivado com promotores de espuma (adaptado de Koshi <i>et al.</i> (2014)).	40
Figura 2.21 – Curvas de decaimento típicas para betume-espuma (adaptado de Jenkins (2000))......	43
Figura 2.22 – Esquema de cálculo para o FI (adaptado de Jenkins (2000)).	45
Figura 2.23 – Estabilidade e forma das bolhas de betume-espuma em função do tempo (adaptado de Newcomb et al. (2015)).	47
Figura 3.1 – Fuso granulométrico dos agregados usados na mistura.....	50
Figura 3.2 – Aspeto das frações grossa (6/12) e fina (0/6) do material fresado utilizado.	51
Figura 3.3 – Aditivos rejuvenescedores utilizados no estudo.....	53
Figura 3.4 – Aditivos utilizados para o estudo do betume-espuma.	54
Figura 3.5 – Evaporador rotativo utilizado para a separação entre o solvente e o betume.	56
Figura 3.6 – Detalhe do ensaio “Anel e Bola”.....	57
Figura 3.7 – Detalhe do ensaio de penetração a 25 °C.	58
Figura 3.8 – Equipamento de ensaio para determinação da viscosidade dinâmica.	59
Figura 3.9 – Equipamento e pratos do ensaio reológico realizado no DSR.....	60
Figura 3.10 – Estudo das temperaturas a utilizar nas misturas recicladas a quente com 30% de material fresado.	61
Figura 3.11 – Estudo das temperaturas a utilizar nas misturas recicladas a quente com 50% de material fresado.	62
Figura 3.12 – LVDT utilizado para medir o adensamento da mistura no ensaio de compactabilidade.....	64
Figura 3.13 – Fuso granulométrico da mistura AC 14 (BB) avaliada neste trabalho.	65
Figura 3.14 – Proporções dos betumes novo e envelhecido existentes nas misturas com 30% de material fresado (à esquerda) e com 50% de material fresado (à direita).	68
Figura 3.15 – Esquema do processo de rejuvenescimento do betume com diferentes aditivos.	69
Figura 3.16 – Equipamento laboratorial para a produção de betume-espuma.....	71
Figura 3.17 – Parâmetros a indicar ao equipamento de produção de betume-espuma.	71

Figura 3.18 – Ajuste da quantidade de água a ser usada para a produção de betume-espuma.	72
Figura 3.19 – Balde e escala associados ao equipamento Wirtgen WLB 10 S para medição das características de expansibilidade.	73
Figura 3.20 – Determinação da relação adequada entre o tempo de meia-vida e a taxa de expansão para a produção de betume-espuma a utilizar em misturas com incorporação de MF (Abreu <i>et al.</i> , 2017).	74
Figura 3.21 – Esquema do laser colocado para determinar as curvas de decaimento do betume-espuma.	75
Figura 3.22 – Equipamento para realização de ensaios de tração indireta.	76
Figura 3.23 – Colocação da lajeta de mistura betuminosa no molde para o ensaio de pista.	77
Figura 3.24 – Equipamento utilizado para o ensaio de flexão em quatro pontos.	78
Figura 4.1 – Curva granulométrica do MF após incineração do betume.	80
Figura 4.2 – Viscosidade dinâmica dos betumes recuperados das duas frações.	80
Figura 4.3 – Características reológicas dos betumes presentes nas frações do material fresado.	81
Figura 4.4 – Curva granulométrica da mistura convencional.	82
Figura 4.5 – Resultados estudo de Marshall para a mistura convencional: a) baridade aparente, b) volume de vazios.	83
Figura 4.6 – Resultados estudo de Marshall para a mistura convencional: a) vazios no esqueleto de agregados, b) força máxima ou estabilidade do provete.	83
Figura 4.7 – Resultados estudo de Marshall para a mistura convencional: deformação no ponto de carga máxima.	84
Figura 4.8 – Curva granulométrica da mistura com 30% de material fresado.	85
Figura 4.9 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 30% MF: a) baridade aparente, b) volume de vazios.	85
Figura 4.10 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 30% MF: a) vazios no esqueleto de agregados, b) força máxima ou estabilidade do provete.	86
Figura 4.11 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 30% MF: deformação no ponto de carga máxima.	86
Figura 4.12 – Curva granulométrica da mistura com 50% de material fresado.	88
Figura 4.13 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 50% MF: a) baridade aparente, b) volume de vazios.	88
Figura 4.14 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 50% MF: a) vazios no esqueleto de agregados, b) força máxima ou estabilidade do provete.	89

Figura 4.15 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 50% MF: deformação no ponto de carga máxima.....	89
Figura 4.16 – Evolução da penetração do betume 10/20 durante o processo de envelhecimento.....	91
Figura 4.17 – Evolução da temperatura de amolecimento do betume 10/20 durante o processo de envelhecimento.....	91
Figura 4.18 – Penetração e temperatura de amolecimento dos betumes recuperados de cada fração de MF, do betume 10/20 e do betume 10/20 envelhecido.	92
Figura 4.19 – Viscosidade dinâmica dos betumes recuperados em comparação com o betume 10/20 e o betume 10/20 envelhecido.	92
Figura 4.20 – Características reológicas dos betumes recuperados em comparação com o betume 10/20 e o betume 10/20 envelhecido.	93
Figura 4.21 – Penetração dos betumes sem rejuvenescedores e com diferentes percentagens dos mesmos.	94
Figura 4.22 – Temperatura de amolecimento dos betumes sem rejuvenescedores e com diferentes percentagens dos mesmos.....	94
Figura 4.23 – Penetração e temperatura de amolecimento dos betumes produzidos com betume recuperado.	95
Figura 4.24 – Comparação da penetração antes e depois do ensaio de RTFOT.....	96
Figura 4.25 – Comparação da temperatura de amolecimento antes e depois do ensaio de RTFOT.	96
Figura 4.26 – Efeito do aumento da percentagem de aditivo nos valores de penetração e temperatura de amolecimento do betume recuperado.	97
Figura 4.27 – Viscosidade dinâmica dos betumes rejuvenescidos com 3,0% de aditivo.	98
Figura 4.28 – Características reológicas dos betumes rejuvenescidos com 3,0% de aditivo.....	98
Figura 4.29 – Penetração do betume novo 70/100 aditivado com a percentagem de rejuvenescedor pré-determinada.....	99
Figura 4.30 – Resultados de sensibilidade à água das misturas executadas a quente.....	101
Figura 4.31 – Evolução da deformação nos ensaios de pista misturas sem aditivos.....	102
Figura 4.32 – Evolução da deformação nos ensaios de pista misturas com aditivos.....	103
Figura 4.33 – Curvas mestras do módulo complexo para as misturas sem aditivos ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).	104
Figura 4.34 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas sem aditivos ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).	105

Figura 4.35 – Curvas mestras do módulo viscoso para as misturas sem aditivos ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	105
Figura 4.36 – Curvas mestras do módulo elástico para as misturas sem aditivos ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	106
Figura 4.37 – Curvas mestras do módulo complexo para as misturas com rejuvenescedores e misturas de referência ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	106
Figura 4.38 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas com rejuvenescedores e misturas de referência ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	107
Figura 4.39 – Curvas mestras do módulo viscoso para as misturas com rejuvenescedores e misturas de referência ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	107
Figura 4.40 – Curvas mestras do módulo elástico para as misturas com rejuvenescedores e misturas de referência ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	108
Figura 4.41 – Leis de fadiga das misturas sem aditivos.....	109
Figura 4.42 – Leis de fadiga das misturas com aditivos e misturas de referência.....	109
Figura 5.1 – Comparação da expansibilidade entre os bicos injetores de 50 g/s e de 100 g/s.....	112
Figura 5.2 – Comparação da expansibilidade medida em diferentes recipientes que alteram as condições de fronteira.....	114
Figura 5.3 – Adaptador para o bico injetor de 50 g/s.....	115
Figura 5.4 – Comparação da expansibilidade com e sem adaptador no bico injetor: a) betume 50/70 e b) betume 160/220.....	115
Figura 5.5 – Comparação da expansibilidade do betume ao alterar a pressão de ar na injeção.....	116
Figura 5.6 – Variação da viscosidade dinâmica dos betumes e indicação da viscosidade de referência para definição das temperaturas a usar no estudo de expansibilidade dos betumes.....	117
Figura 5.7 – Penetração a 25 °C e temperatura de amolecimento dos betumes em estudo....	118
Figura 5.8 – Características reologias dos betumes base usados no estudo: módulo complexo (à esquerda) e ângulo de fase (à direita).....	119
Figura 5.9 – Variação de $G^*/\text{sen}(\delta)$ e valor utilizado como referência (a vermelho) para determinar a temperatura superior do grau PG dos betumes base em estudo.....	120
Figura 5.10 – Penetração a 25 °C dos betumes aditivados utilizados no estudo da expansibilidade.....	121

Figura 5.11 – Temperatura de amolecimento dos betumes aditivados utilizados no estudo da expansibilidade.	121
Figura 5.12 – Características de expansibilidade do betume 50/70 a diferentes temperaturas e com diferentes percentagens de água.	123
Figura 5.13 – Características de expansibilidade do betume 70/100 a diferentes temperaturas.	124
Figura 5.14 – Características de expansibilidade do betume 160/220 a diferentes temperaturas.	125
Figura 5.15 – Influência do ativo E1 nas características de expansibilidade do betume 50/70 a 160 °C.	126
Figura 5.16 – Influência do ativo E1 nas características de expansibilidade do betume 50/70 a 170 °C.	127
Figura 5.17 – Comparação das características de expansibilidade do betume 50/70 aditivado com 0,1% do aditivo E1 às temperaturas de 160 e 170 °C.	127
Figura 5.18 – Características de expansibilidade do betume 50/70 com 0,4% do aditivo E2 à temperatura de 160 °C.	128
Figura 5.19 – Características de expansibilidade do betume 50/70 com diferentes percentagens do aditivo E3 à temperatura de 160 °C.	129
Figura 5.20 – Características de expansibilidade do betume 50/70 com diferentes percentagens do aditivo E4 à temperatura de 160 °C.	130
Figura 5.21 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 50/70 a 160 °C e com 2% de água.	131
Figura 5.22 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 70/100 a 160 °C e com 3% de água.	132
Figura 5.23 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 160/220 a 140 °C e com 3% de água.	133
Figura 5.24 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 160/220 a 140 °C com 3% de água recorrendo à curva teórica de Jenkins.	134
Figura 5.25 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 50/70 com 0,1% do aditivo E1 a 170 °C e com 3% de água.	134
Figura 5.26 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 50/70 com 0,2% do aditivo E4 a 160 °C e com 3% de água.	135
Figura 5.27 – Tipo de curva de decaimento dos betumes 50/70 e 70/100 e respetiva curva teórica.	137
Figura 5.28 – Tipo de curva de decaimento do betume 160/220 e do betume 50/70 aditivado com o aditivo E4 e respetiva curva teórica.	137

Figura 5.29 – Tipo de curva de decaimento do betume 50/70 com o aditivo E1 e respetiva curva teórica.....	138
Figura 5.30 – Curvas de decaimento obtidas com os betumes (a) 50/70 e (b) 70/100.....	139
Figura 5.31 – Curvas de decaimento obtidas com o betume 160/220.....	140
Figura 5.32 – Curvas de decaimento obtidas com o betume 50/70 aditivado com o aditivo E1, ao usar percentagens de aditivo de a) 0,1%, b) 0,2% e c) 0,3%.....	141
Figura 5.33 – Curvas de decaimento do betume 50/70 aditivado com o aditivo E4 a 160 °C, ao usar percentagens de aditivo de a) 0,2%, b) 0,4% e c) 0,6%.....	142
Figura 5.34 – Problemas de envolvimento da mistura executada para análise do processo de cura.....	146
Figura 5.35 – Esquema das misturas produzidas para verificar a influência do tipo de filer.....	146
Figura 5.36 – Valores de ITS_{seco} médio das misturas com diferentes tipos de filer tendo em conta a percentagem de betume.	148
Figura 5.37 – Valores de ITSR das misturas com diferentes tipos de filer tendo em conta a percentagem de betume.....	148
Figura 5.38 – Aspeto das diferentes dimensões dos agregados calcários utilizados.....	150
Figura 5.39 – Curva granulométrica da mistura com agregados calcários.....	150
Figura 5.40 – Influência da granulometria e do tipo de agregados nos valores de ITSR e ITS_{seco}	151
Figura 5.41 – Influência da quantidade de água e aditivo nos valores de ITSR e ITS_{seco}	153
Figura 5.42 – Esquema dos métodos de pesagem: método A (traço interrompido) e método B (a azul).....	155
Figura 5.43 – Resultados de sensibilidade à água das misturas ao usar diferentes métodos de pesagem.....	156
Figura 5.44 – Condicionamento da mistura em tabuleiro coberto com folha de alumínio. ...	157
Figura 5.45 – Resultados sensibilidade à água antes e após condicionamento da mistura. ...	158
Figura 5.46 – Resultados sensibilidade à água obtidos ao alterar a pressão do ar na injeção do betume-espuma.....	159
Figura 5.47 – Esquematização do sistema de pesagem adotada nas misturas com betume-espuma.	160
Figura 5.48 – Resultados de compactabilidade das misturas sem material fresado.....	161
Figura 5.49 – Variação da sensibilidade à água das misturas sem material fresado com a temperatura (linha contínua: referência de ITSR; linha descontínua: referência de ITS_{seco}).....	162

Figura 5.50 – Resultados de compactabilidade das misturas com 30% de material fresado e com o aditivo E1.....	164
Figura 5.51 – Resultados de compactabilidade das misturas com 30% de material fresado e com o aditivo E4.....	165
Figura 5.52 – Variação da sensibilidade à água das misturas com 30% de material fresado com a temperatura (linha contínua: referência de ITSR; linha descontínua: referência de ITS_{seco}).....	166
Figura 5.53 – Resultados de compactabilidade das misturas com 50% de material fresado e com o aditivo E1.....	168
Figura 5.54 – Resultados de compactabilidade das misturas com 50% de material fresado e com o aditivo E4.....	168
Figura 5.55 – Variação da sensibilidade à água das misturas com 50% de material fresado com a temperatura (linha contínua: referência de ITSR; linha descontínua: referência de ITS_{seco}).....	170
Figura 6.1 – Resultados de sensibilidade à água das misturas sem incorporação de MF.	173
Figura 6.2 – Resultados de sensibilidade à água das misturas com incorporação de 30% de MF.	175
Figura 6.3 – Resultados de sensibilidade à água das misturas com incorporação de 50% de MF.	176
Figura 6.4 – Evolução da deformação para as misturas sem material fresado.	177
Figura 6.5 – Evolução da deformação para as misturas com 30% de material fresado.....	179
Figura 6.6 – Evolução da deformação para as misturas com 50% de material fresado.....	180
Figura 6.7 – Curvas mestras do módulo complexo para as misturas produzidas sem MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	181
Figura 6.8 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas produzidas sem MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	182
Figura 6.9 – Curvas mestras do módulo viscoso para as misturas produzidas sem MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	182
Figura 6.10 – Curvas mestras do módulo elástico para as misturas produzidas sem MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	183
Figura 6.11 – Curvas mestras do módulo complexo para as misturas produzidas com 30% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	183
Figura 6.12 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas produzidas com 30% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	184

Figura 6.13 – Curvas mestras do módulo viscoso para as misturas produzidas com 30% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	184
Figura 6.14 – Curvas mestras do módulo elástico para as misturas produzidas com 30% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	185
Figura 6.15 – Curvas mestras do módulo complexo para as misturas produzidas com 50% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	185
Figura 6.16 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas produzidas com 50% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	186
Figura 6.17 – Curvas mestras do módulo viscoso para as misturas produzidas com 50% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	186
Figura 6.18 – Curvas mestras do módulo elástico para as misturas produzidas com 50% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	187
Figura 6.19 – Leis de fadiga das misturas sem incorporação de Material Fresado.....	188
Figura 6.20 – Leis de fadiga das misturas com incorporação de 30% de MF.....	188
Figura 6.21 – Leis de fadiga das misturas com incorporação de 50% de MF.....	189
Figura 6.22 – Comparação dos resultados de sensibilidade à água das principais misturas estudadas.....	191
Figura 6.23 – Comparação dos resultados de resistência à deformação permanente das principais misturas estudadas.....	191
Figura 6.24 – Curvas mestras do módulo complexo das principais misturas estudadas ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	192
Figura 6.25 – Curvas mestras do ângulo de fase das principais misturas estudadas ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	193
Figura 6.26 – Curvas mestras do módulo viscoso das principais misturas estudadas ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	194
Figura 6.27 – Curvas mestras do módulo elástico das principais misturas estudadas ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).....	194
Figura 6.28 – Comparação da evolução da resistência ao fendilhamento por fadiga para as principais misturas estudadas.....	195
Figura 6.29 – Central usada para a transposição.....	197
Figura 6.30 – Aquecimento dos moldes onde foram compactados os provetes recolhidos na central para os ensaios de sensibilidade à água.....	198
Figura 6.31 – Controlo da temperatura da mistura.....	198
Figura 6.32 – Agregados utilizados no estudo realizado em central.....	199

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Percentagem de MF reutilizado para cada tipo de mistura (adaptado de EAPA (2015).	15
Quadro 2.2 – Resumo de alguns estudos desenvolvidos com aditivos rejuvenescedores.	21
Quadro 2.3 – Exemplos de aditivos usados para a produção de MBT.	24
Quadro 2.4 – Fases do processo de formação de betume-espuma.	32
Quadro 2.5 – Exemplos de estudos desenvolvidos com recurso a aditivos que permitem a produção de MBTs e MBSTs.	35
Quadro 2.6 – Relação entre o valor de ER_a e o valor de ER_m	45
Quadro 3.1 – Características do filer comercial.	49
Quadro 3.2 – Características dos agregados graníticos.	49
Quadro 3.3 – Percentagens de aditivos estabilizadores utilizadas no estudo do betume-espuma.	70
Quadro 4.1 – Percentagem de betume e características do betume presente nas duas frações do MF.	80
Quadro 4.2 – Quantidades de agregado a usar para a mistura convencional.	82
Quadro 4.3 – Quantidades de agregado a usar para a mistura com 30% de material fresado.	84
Quadro 4.4 – Quantidades de agregado a usar para a mistura com 50% de material fresado.	87
Quadro 4.5 – Características dos betumes após o ensaio de envelhecimento no RTFOT.	97
Quadro 4.6 – Condições de produção e características volumétricas das misturas betuminosas executadas a quente.	101
Quadro 4.7 – Resumo dos resultados dos ensaios de pista.	103
Quadro 4.8 – Propriedades das leis de fadiga das MBQs estudadas no presente trabalho.	110
Quadro 5.1 – Características dos recipientes usados para medir as propriedades de expansão.	113
Quadro 5.2 – Temperaturas usadas no estudo das propriedades de expansão dos betumes.	118
Quadro 5.3 – Coeficientes de determinação resultantes dos ajustes às curvas de decaimento obtidas para o betume 50/70.	131

Quadro 5.4 – Coeficientes de determinação resultantes dos ajustes às curvas de decaimento obtidas para o betume 70/100.	132
Quadro 5.5 – Coeficientes de determinação resultantes dos ajustes às curvas de decaimento obtidas para o betume 160/220.	133
Quadro 5.6 – Coeficientes de determinação resultantes dos ajustes às curvas de decaimento obtidas para o betume 50/70 com o aditivo E1.....	135
Quadro 5.7 – Coeficientes de determinação resultantes dos ajustes às curvas de decaimento obtidas para o betume 50/70 com o aditivo E4 à temperatura de 160 °C.....	136
Quadro 5.8 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 50/70.....	143
Quadro 5.9 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 70/100.....	143
Quadro 5.10 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 160/220.....	143
Quadro 5.11 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 50/70 com o aditivo E1 a 160 °C.	144
Quadro 5.12 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 50/70 com o aditivo E1 a 170 °C.	144
Quadro 5.13 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 50/70 com o aditivo E4 a 160 °C.	144
Quadro 5.14 – Resultados de sensibilidade à água para os dois processos de cura.....	145
Quadro 5.15 – Misturas produzidas para análise da influência do filer e da percentagem de betume.	147
Quadro 5.16 – Misturas produzidas para análise da influência da composição granulométrica e do tipo de agregados.....	151
Quadro 5.17 – Misturas com betume-espuma produzido com diferentes quantidades de água e aditivo.....	152
Quadro 5.18 – Condições de produção e volume de vazios das misturas produzidas com diferentes quantidades de água e aditivo	153
Quadro 5.19 – Misturas efetuadas para comparação dos métodos de pesagem.	155
Quadro 5.20 – Misturas efetuadas para avaliar o efeito do condicionamento da mistura após produção.....	157
Quadro 5.21 – Características das misturas produzidas com diferentes níveis de pressão do ar.....	158

Quadro 5.22 – Temperaturas utilizadas para produção das misturas sem material fresado...	161
Quadro 5.23 – Volume de vazios às 150 pancadas das misturas sem material fresado no ensaio de compactabilidade.	162
Quadro 5.24 – Temperaturas utilizadas para produção das misturas com 30% de material fresado.....	163
Quadro 5.25 – Temperaturas aproximadas de produção das misturas com 30% de material fresado.....	164
Quadro 5.26 – Volume de vazios às 150 pancadas das misturas com 30% de material fresado no ensaio de compactabilidade.....	165
Quadro 5.27 – Temperaturas utilizadas para produção das misturas com 50% de material fresado.....	167
Quadro 5.28 – Temperaturas aproximadas de produção das misturas com 50% de material fresado.....	167
Quadro 5.29 – Volume de vazios às 150 pancadas das misturas com 50% de material fresado no ensaio de compactabilidade.....	169
Quadro 6.1 – Temperaturas das misturas sem MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.	172
Quadro 6.2 – Características das misturas sem incorporação de MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.	172
Quadro 6.3 – Temperaturas das misturas com incorporação de 30% de MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.	174
Quadro 6.4 – Características das misturas com incorporação de 30% de MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.	174
Quadro 6.5 – Temperaturas das misturas com incorporação de 50% de MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.	175
Quadro 6.6 – Características das misturas com incorporação de 50% de MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.	176
Quadro 6.7 – Resumo dos resultados do ensaio de pista para as misturas sem MF.....	178
Quadro 6.8 – Resumo dos resultados do ensaio de pista das misturas com 30% de material fresado.....	179
Quadro 6.9 – Resumo dos resultados do ensaio de pista das misturas com 50% de material fresado.....	180
Quadro 6.10 – Propriedades das leis de fadiga das misturas sem incorporação de Material Fresado.....	188
Quadro 6.11 – Propriedades das leis de fadiga das misturas com 30% de MF.....	189

Quadro 6.12 – Propriedades das leis de fadiga das misturas com 50% de MF.	189
Quadro 6.13 – Comparação dos resultados do ensaio de pista das principais misturas estudadas.	192
Quadro 6.14 – Comparação das propriedades das leis de fadiga.	195
Quadro 6.15 – Comparação das temperaturas aproximadas de aquecimento, produção e compactação das MBs.	195
Quadro 6.16 – Características das misturas produzidas em central.	199
Quadro 6.17 – Resultados de sensibilidade à água das misturas produzidas em central.	200

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

MF	–	Material Fresado
E*	–	Módulo complexo da mistura
G*	–	Módulo complexo do betume
δ	–	Ângulo de fase
PG	–	<i>Performance Grade</i>
BA	–	Baridade aparente
BMT	–	Baridade Máxima Teórica
LVDT	–	Transformador Diferencial Variável Linear
WTT	–	Ensaio de pista (<i>Wheel Tracking Test</i>)
ITSR	–	Resistência conservada à tração indireta
ITS	–	Resistência à tração indireta (<i>Indirect Tensile Strength</i>)
ITS _{seco}	–	Resistência à tração indireta com os provetes secos
WTS _{air}	–	Taxa de deformação do ensaio de pista
PRD _{air}	–	Profundidade média proporcional da rodeira
RD _{air}	–	Profundidade do cavado da rodeira
RTFOT	–	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
MB	–	Mistura betuminosa
MBs	–	Misturas betuminosas
MBR	–	Mistura betuminosa reciclada
MBQ	–	Mistura betuminosa reciclada a quente
MBST	–	Mistura betuminosa semi-temperadas
MBT	–	Mistura betuminosa temperada
V _v	–	Volume de vazios
VMA	–	Vazios no esqueleto de agregado
E2	–	Módulo viscoso
E1	–	Módulo elástico

E1	–	Aditivo estabilizador E1 (Tego® Addibit FS 725 A)
E2	–	Aditivo estabilizador E2 (Cecabase 200)
E3	–	Aditivo estabilizador E3 (Rediset LQ)
E4	–	Aditivo estabilizador E4 (Iterfoam B)
R1	–	Aditivo rejuvenescedor R1 (RapCap K)
R2	–	Aditivo rejuvenescedor R2 (RapCap S)
R3	–	Aditivo rejuvenescedor R3 (Iterlene ACF1000)
R4	–	Aditivo rejuvenescedor R4 (Óleo de Rícino)
HL	–	Tempo de meia-vida (<i>Half-life</i>)
ER	–	Taxa de expansão
ER _m	–	Taxa de expansão máxima
MBF	–	Mistura betuminosa a frio
FI	–	Índice de espuma (<i>Foam Index</i>)
ER _a	–	Taxa de expansão máxima real
t _s	–	Tempo de spray
ER _{min}	–	Taxa de expansão mínima
FF	–	Fração fina
FG	–	Fração grossa
BC	–	Betume convencional (não sujeito ao processo de expansão)
BE	–	Betume-espuma
BB	–	Betão betuminoso
AC	–	<i>Asphalt concrete</i>
SBS	–	Estireno butadieno estireno
DSR	–	<i>Dynamic shear rheometer</i>
LEA	–	<i>Low Energy Asphalt</i>
EBE	–	<i>Enrobé à Basse Énergie</i>
EBT	–	<i>Enrobé à Basse Température</i>
FT	–	Fischer-Tropsch

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Trabalho

Os pavimentos rodoviários são atualmente um meio importante para o desenvolvimento de qualquer país e, em especial, de grande parte das regiões portuguesas. Estes formam um conjunto de infraestruturas que permite a ligação de vários pontos do país, de forma eficiente. No entanto, tem vindo a ser cada vez mais importante a evolução do seu estado de conservação, causando atualmente algumas preocupações, pelos limitados recursos existentes para a sua conservação.

O cumprimento do Plano Rodoviário 2000, criado em 1998, resultou na construção de grande parte dos pavimentos existentes em Portugal (Branco *et al.*, 2005). Atualmente, uma parte significativa deles encontra-se em ruína, pelo que é fundamental a sua reabilitação. Neste sentido, a forma como se programam as intervenções de reabilitação devem ter em consideração a sustentabilidade dos pavimentos como um objetivo essencial a atingir. Assim, a solução a propor para reutilizar os materiais que constituem o pavimento em fim de vida, e que foram sendo considerados ao longo dos anos como resíduos de construção e demolição, é de elevada relevância.

Assim sendo, o reaproveitamento do material fresado (MF) das camadas betuminosas dos pavimentos tem sido alvo de atenção ao longo das últimas décadas e a sua reutilização em novas misturas betuminosas (MB) tem-se tornado cada vez mais popular. Este tipo de reutilização, referida usualmente como reciclagem de pavimentos, tem a vantagem de conferir as mesmas funções às componentes do material fresado. No entanto, existem ainda algumas dificuldades na sua efetiva implementação, nomeadamente, no que diz respeito à incorporação de altas percentagens de material fresado (superiores a 30%) em misturas betuminosas produzidas a quente, quer a nível técnico (pela necessidade de alterar as centrais de produção), quer a nível

político (pela dificuldade em convencer as Administrações Rodoviárias do adequado desempenho deste tipo de solução).

Reconhecidas as vantagens da utilização do material fresado, como a redução do consumo de materiais novos (betume e agregados), que permite que estes recursos naturais não alcancem a escassez tão rapidamente, tem sido realizado um esforço significativo por parte da comunidade científica para fomentar a sua maior utilização. Porém, a incorporação de maiores percentagens de material fresado em novas misturas implica, normalmente, temperaturas de produção mais elevadas, o que causa alguns problemas a nível ambiental e económico. Surge, assim, a necessidade de encontrar outras tecnologias que permitam reduzir as temperaturas de produção das misturas betuminosas recicladas (MBR) sem afetar o seu desempenho, em serviço.

Durante os últimos anos foram surgindo diversas técnicas que permitem a produção de misturas a temperaturas mais baixas, designando-se por misturas betuminosas temperadas (MBT) e semi-temperadas (MBST), em função da gama de temperaturas a que são produzidas. Este tipo de misturas betuminosas envolve a aplicação de tecnologias específicas como o uso de aditivos, químicos ou orgânicos, ou tecnologias mais complexas que envolvem a expansão do betume, por processo direto ou indireto de introdução de água.

Estas tecnologias que permitem reduzir as temperaturas de fabrico têm como principal vantagem a redução dos consumos energéticos, o que se torna mais vantajoso a nível económico e ambiental.

Tendo em consideração que a utilização de temperaturas elevadas é prejudicial à incorporação de elevadas quantidades de material fresado, pelo potencial envelhecimento excessivo do betume, a utilização de menores temperaturas de produção permitiria incluir maiores percentagens de material fresado em novas misturas betuminosas.

Assim, a utilização conjunta de técnicas de produção de misturas betuminosas temperadas e elevadas quantidades de material fresado mostra-se como uma alternativa interessante para a produção de misturas betuminosas economicamente viáveis e com um menor impacto ambiental.

1.2. Objetivos

A presente tese tem como objetivo principal realizar um estudo detalhado sobre a reciclagem de misturas betuminosas com elevadas taxas de incorporação de material fresado (até 50%), com grande enfoque na utilização da tecnologia de betume-espuma como solução para minimizar a temperatura de produção das misturas recicladas. Além disso, também se pretende avaliar a utilização de rejuvenescedores em misturas recicladas produzidas a quente, como solução que pode ser utilizada de forma mais generalizada quando não for possível usar a tecnologia de betume-espuma.

Nesse sentido, de forma a validar as soluções em estudo, este trabalho inclui a produção de misturas betuminosas de referência, produzidas a quente com materiais convencionais, que servem de termo comparativo para aferir o desempenho das novas soluções desenvolvidas.

Para se atingir o objetivo principal foi necessário definir um conjunto de objetivos mais específicos, que se passa a apresentar.

Em primeiro lugar pretendeu-se verificar a eficiência de aditivos comerciais no rejuvenescimento do betume, bem como de outros que até ao presente não eram considerados para esse fim, de modo a determinar quais os melhores aditivos para a produção de misturas betuminosas recicladas a quente (MBRQ).

Em segundo lugar foi necessário avaliar a influência de vários parâmetros que condicionam o processo de expansão do betume, nomeadamente, o tipo de betume, a quantidade de água e de ar, a temperatura e a velocidade de injeção, entre outros, de forma a otimizar o processo de expansão do betume-espuma e o processo de produção das misturas betuminosas recicladas temperadas (MBRT) com essa tecnologia. Adicionalmente, pretendeu-se avaliar a necessidade da utilização de aditivos estabilizadores de espuma na produção de misturas com essa tecnologia.

Para avaliar o desempenho das misturas em estudo foi necessário realizar um conjunto de ensaios mecânicos que permitiram determinar o comportamento das MBRTs e das MBRQs, comparando-as entre si e com misturas convencionais, produzidas com materiais virgens.

Por fim, pretendeu-se avaliar as dificuldades em transpor um estudo laboratorial, como este, para uma central de produção de misturas betuminosas em contexto real, nomeadamente, para a construção de um trecho experimental.

1.3. Organização da Tese

A tese está dividida em sete capítulos, sendo alguns destes de carácter mais teórico e outros de carácter mais prático.

No primeiro capítulo faz-se um enquadramento do trabalho a desenvolver, identificando-se os respetivos objetivos e apresentando-se o conteúdo da tese.

No Capítulo 2 é apresentada, de forma sucinta, toda a pesquisa bibliográfica realizada ao longo da elaboração da tese, sendo exposto um estado da arte para duas vertentes distintas: a reciclagem de misturas betuminosas e o betume-espuma. Assim, neste capítulo é apresentada uma visão geral sobre a reciclagem de pavimentos, com foco na forma de tratamento do material fresado. Ainda são referidas as principais técnicas de reciclagem de pavimentos, com ênfase nas tecnologias de formação de espuma. O mesmo capítulo apresenta ainda com mais detalhe a tecnologia de betume-espuma, tendo em atenção o comportamento da espuma, na sua formação e as propriedades avaliadas para este tipo de betume.

No Capítulo 3 apresentam-se os diversos materiais inseridos no estudo, bem como, os métodos utilizados ao longo do trabalho. Salienta-se que alguns dos métodos utilizados ainda não se encontram normalizados, nomeadamente, na utilização e caracterização do betume-espuma, dada a incipiente normalização existente sobre o assunto.

O Capítulo 4 é referente ao estudo das misturas betuminosas recicladas a quente. Em primeiro lugar faz-se uma análise das principais condicionantes de produção destas misturas, passando pelo estudo de otimização da percentagem de aditivo rejuvenescedor a ser adicionado à mistura e pela formulação das diversas misturas. No final apresentam-se os resultados da caracterização mecânica das misturas recicladas a quente e comparam-se esses resultados com os de misturas betuminosas convencionais.

O Capítulo 5 foca-se essencialmente nas misturas betuminosas temperadas, apresentando um estudo pormenorizado sobre a produção e a utilização do betume-espuma. Assim, nesse capítulo são analisadas várias questões que poderão influenciar quer o comportamento do betume após expansão quer as propriedades finais das misturas temperadas, tendo esta parte do trabalho servido de base para a análise posterior do desempenho dessas misturas.

O resultado da avaliação final de desempenho das misturas betuminosas temperadas é apresentada no Capítulo 6. Nesse capítulo ainda é feita a comparação entre as MBRQs e MBRTs, e é demonstrada uma primeira tentativa de transposição do estudo do laboratório para a central de produção. A comparação foi realizada de modo a perceber a aplicabilidade do betume-espuma em misturas betuminosas, em geral, e em misturas recicladas, em particular. Quanto à transposição para a central, este estudo pretende de uma forma geral avaliar as dificuldades que serão encontradas aquando da aplicação deste tipo de tecnologia em contexto real.

No que respeita ao Capítulo 7, o último capítulo deste documento apresenta as principais conclusões obtidas durante o trabalho para os dois tipos de misturas avaliadas e para a utilização das respetivas tecnologias. Nesse capítulo são ainda apresentadas algumas sugestões no que diz respeito a trabalhos futuros, as quais resultam da impossibilidade de, em tempo útil, responder a todas elas ao longo do trabalho realizado.

RECICLAGEM DE MISTURAS BETUMINOSAS

2.1. Introdução

A reciclagem é atualmente um assunto essencial para a Sociedade. Nesse sentido, esta tem recebido também uma atenção especial por parte da indústria em geral, assumindo-se como um dos seus focos de investimento. No que diz respeito à indústria da pavimentação em particular, a reciclagem de pavimentos com recurso a técnicas de produção de misturas betuminosas a quente tem um longo historial, desde meados do ano de 1915, ganhando mais popularidade em 1970, aquando do surgimento do embargo ao petróleo (Chen *et al.*, 2007, Wijk e Wood, 1983).

Em Portugal, uma parte significativa das estradas apresenta atualmente uma idade avançada, tendo a construção das mais recentes resultado da implementação do Plano Rodoviário 2000 (Branco *et al.*, 2005). Assim, os seus pavimentos apresentam um estado de conservação que, em muitos casos, obriga a intervenções a nível superficial e/ou estrutural (Figura 2.1) para correção das degradações existentes.



Figura 2.1 – Exemplo do estado avançado de degradação observado num número significativo de pavimentos rodoviários atuais.

As intervenções nos pavimentos podem associar-se a operações de conservação ou de reabilitação. No primeiro caso, o principal objetivo é evitar que o estado do pavimento se agrave, enquanto a reabilitação pretende conferir, ao pavimento, características próximas das iniciais, podendo estar associado a um dimensionamento para um novo período de vida (Branco *et al.*, 2005), quando este já apresenta um nível de degradação significativo.

A fresagem dos pavimentos existentes é uma operação mais comum no âmbito da reabilitação, estando normalmente associada a condicionantes relacionadas com a necessidade de manter a cota do pavimento ou com a eliminação de fendas existentes nos pavimentos. Após o processo de fresagem existem duas soluções distintas, no que respeita à reaplicação do material fresado (MF): a reutilização e a reciclagem (Figura 2.2).

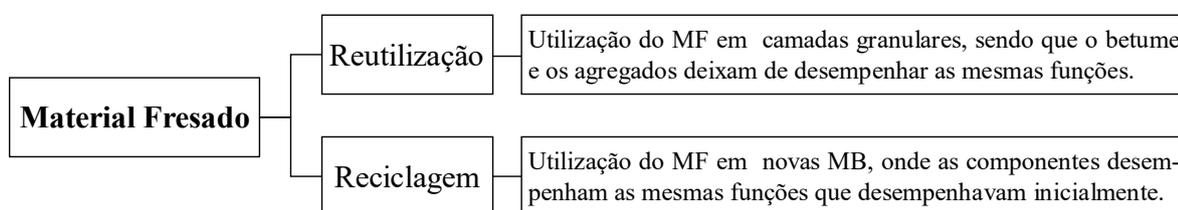


Figura 2.2 – Soluções para aplicação de material fresado em pavimentos (adaptado de EAPA (2005)).

Independentemente da solução escolhida para reutilizar o MF, qualquer uma destas representa uma solução ambientalmente mais viável do que a sua colocação a vazadouro. A redução da quantidade de material a ser colocado em aterro resulta num menor impacto no meio ambiente. Para além disso, uma vez que apresenta um custo significativo, a colocação em aterro é tanto mais económica quanto menor for a quantidade do respetivo material.

Indiretamente, a reutilização do MF é vantajosa pelo facto de possibilitar a redução de espessura das camadas betuminosas a serem aplicadas no pavimento. Acrescenta-se ainda que a incorporação do MF nas camadas granulares permite melhorar a sua qualidade e a sua capacidade resistente (Locander, 2009). Já as vantagens da reciclagem variam consoante a técnica utilizada, mas aponta-se principalmente (Al-Qadi *et al.*, 2007, Aravind e Das, 2007, Martinho, 2004), a redução de material virgem a ser utilizado na mistura (Figura 2.3). Independentemente de se tratar da extração de agregados ou da extração de petróleo, do qual se obtém o betume, esta redução garante uma maior longevidade dos recursos naturais. Não obstante, apesar de representar uma pequena porção da mistura, a redução da quantidade de betume é muito vantajosa em termos económicos.

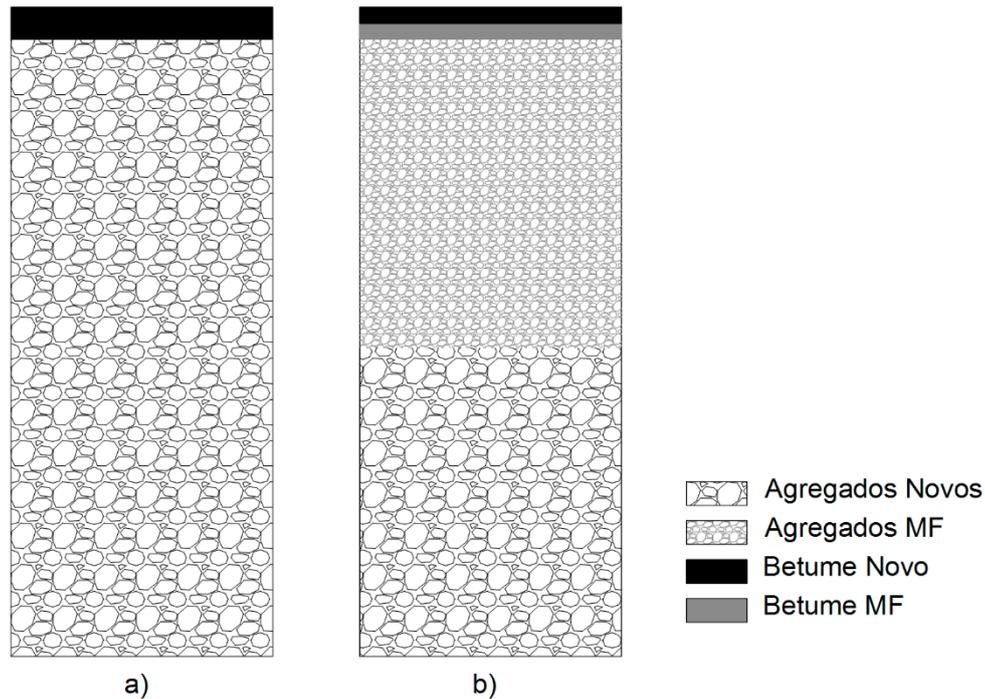


Figura 2.3 – Esquematização da composição (em massa) das misturas betuminosas convencionais (a) e das misturas betuminosas recicladas (b).

De referir que a composição do material fresado pode variar, em função da sua origem e dos processos a que é sujeito, sendo importante caracterizá-lo de forma pormenorizada para, posteriormente, ser adequadamente incorporado em novas misturas.

2.2. Material Fresado

A extração de parte do material constituinte de um pavimento deve-se a diversas questões relacionadas com condicionantes externas ou com o estado do pavimento existente. As primeiras dizem respeito às cotas a que se encontram os pavimentos envolventes, sejam estes pavimentos rodoviários ou passeios. O estado do pavimento, por vezes em ruína, exige a sua extração previamente à colocação de uma nova camada de mistura betuminosas. Esta extração é essencial sob o ponto de vista da necessidade de correção da forma do pavimento e da sua textura (Queensland DTMR, 2012).

Para extrair as camadas superiores ligadas dos pavimentos existentes recorre-se a duas técnicas distintas (Kandhal e Mallick, 1998): a fresagem (*cold milling*) e o arranque do pavimento posteriormente esmagado (*ripping and crushing*). Na fresagem utiliza-se um equipamento que

desagrega o pavimento em pequenas dimensões (Figura 2.4) e recolhe, automaticamente, o material para um camião que acompanha a fresagem. Já o arranque do pavimento envolve o uso de maquinaria pesada e o pavimento é partido em pedaços de maiores dimensões.



Figura 2.4 – Aspeto do material após fresagem.

Após a fresagem do material betuminoso surge a questão da armazenagem do mesmo, uma vez que o contacto com determinados agentes altera as suas características, o que poderá condicionar a sua utilização em novas misturas. Existe, assim, a necessidade de agrupar o material em diferentes pilhas, de acordo com a sua origem, garantido assim a sua homogeneidade. Outra questão essencial é a exposição do material fresado às condições climáticas, sendo importante garantir que exista uma drenagem adequada da água que cai sobre a superfície onde o material é colocado. Para além disso deve evitar-se a alteração de humidade presente no material fresado, colocando-o num espaço coberto. Não obstante, é de evitar a contaminação do material fresado com solos, assim como, o contacto direto entre eles.

A separação do material fresado em frações é bastante comum pois permite a sua incorporação em novas misturas betuminosas recicladas em maiores percentagens (Copeland, 2011). Apesar disso, existem alguns estudos cuja separação é realizada para um maior número de frações (West, 2015). Regra geral, para a separação entre a fração fina e a fração grossa recorre-se a um classificador industrial (Figura 2.5) caso o material seja utilizado para produções em grande escala (Copeland, 2011, Fonseca *et al.*, 2013, Palha *et al.*, 2014).



Figura 2.5 – Classificador industrial usado para a separação do material fresado (Palha et al., 2014).

De facto, é expectável que, quando há uma separação entre fração fina e fração grossa existam algumas diferenças ao nível do betume presente em cada uma das frações. McDaniel e Anderson (2001) referem a separação com o recurso a um peneiro de 4,75 mm, cujas partículas acima deste valor são consideradas como fração grossa e o restante como fração fina. A fração fina apresenta uma maior percentagem de betume (que nesse estudo apresentou um valor de 6,10%) do que a fração grossa (4,75%).

Ainda relativamente à separação em frações em laboratório, foram igualmente desenvolvidos alguns estudos que permitem verificar qual a forma mais eficaz. Oliveira *et al.* (2012b) analisam três processos de adição de material fresado a novas misturas, diversificando o método de separação entre frações. Um dos processos implica a utilização da misturadora de laboratório para provocar uma desagregação mecânica e, posteriormente, a passagem no peneiro de 8 mm; outro requer a separação com o peneiro de 10 mm e, o último processo, não implica desagregação mecânica mas apenas a passagem no peneiro de 8 mm. A desagregação mecânica acaba por apresentar melhores resultados quando associada à incorporação do MF em novas misturas, uma vez que permite que na mistura final o efeito de envelhecimento seja menos sentido.

Este tipo de separação torna-se vantajosa, uma vez que permite um aquecimento parcelar do MF. Uma vez que contém uma maior quantidade de betume, a fração fina do MF pode não ser submetida a temperaturas tão altas (Abreu, 2012, Oliveira *et al.*, 2012b). Isto leva a que não haja um envelhecimento tão notório durante o processo de produção das novas misturas, mas implica que a fração grossa e os agregados novos sejam aquecidos a temperaturas mais altas, para possibilitar uma temperatura de mistura ideal.

O processo de oxidação a que o material betuminoso é sujeito durante o tempo de vida do pavimento depende, em parte, do tipo de fatores a que se encontra exposto. No entanto, após fresagem, as dimensões do MF levam à alteração do processo de oxidação. As partículas de menores dimensões têm maior superfície específica, conduzindo a uma maior exposição do betume ao ar e, conseqüentemente, um processo de oxidação mais rápido. Daí que a oxidação esperada é inversamente proporcional à dimensão do MF (De Lira *et al.*, 2015).

Independentemente do seu estado de oxidação, o betume é composto por asfaltenos e maltenos (Figura 2.6). Os primeiros são identificados como sólidos amorfos, de cor castanha ou preta, e representam entre 5 a 25% do betume asfáltico. Os maltenos podem ser classificados em três subgrupos distintos: resinas, aromáticos e saturados (Branco *et al.*, 2005).

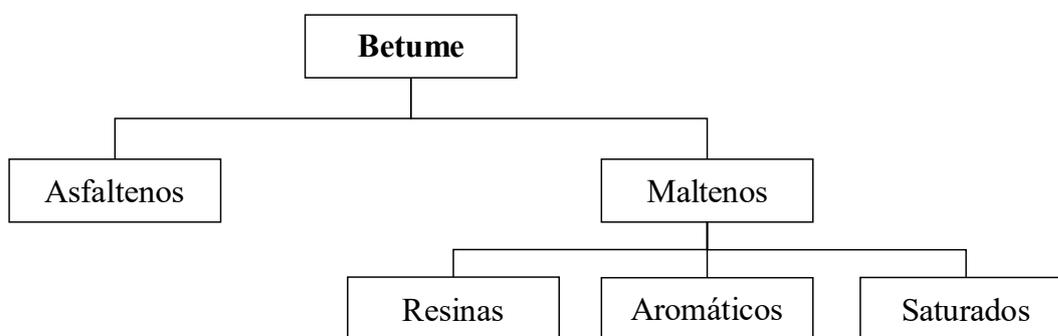


Figura 2.6 – Composição química do betume (adaptado de Branco *et al.* (2005)).

As resinas são um tipo de material solúvel em heptano normal, com composição idêntica aos asfaltenos, mas com melhores qualidades adesivas, servindo como dispersantes para os asfaltenos. Os aromáticos são os constituintes dos betumes com peso molecular mais baixo e representam a maior proporção do meio dispersante dos asfaltenos, entre 40 e 65% do betume. Os saturados representam a menor percentagem do betume, entre 5 a 20% (Branco *et al.*, 2005).

A oxidação do betume é bastante complexa devido à simultaneidade de ocorrência de vários processos (Gawel *et al.*, 2016, Hamzah *et al.*, 2015). Normalmente, resulta numa deterioração do betume, tornando-o mais frágil e menos resistente à fadiga (Fernández-Gómez *et al.*, 2013). Para além disso, traduz-se num aumento da viscosidade, da temperatura de amolecimento e numa redução nos valores de penetração. Este tipo de processo causa o envelhecimento do ligante e está igualmente relacionado com a deterioração das misturas. Isto porque o envelhecimento do betume diminui a durabilidade das misturas e, conseqüentemente, o seu tempo de vida dos pavimentos (Soenen *et al.*, 2016).

Os processos de envelhecimento do betume são variados, sendo a volatilização e a oxidação que mais se realçam como os mais comuns (Fernández-Gómez *et al.*, 2013, Roberts *et al.*, 1996). A volatilização corresponde à evaporação dos componentes leves do betume, relacionada com as temperaturas de mistura a que o betume é sujeito. A oxidação refere-se à reação do betume com o oxigénio e com o meio ambiente. Tendo em conta as alterações a que os betumes são sujeitos ao longo do período de vida do pavimento, estes não apresentam o mesmo tipo de estrutura que os betumes novos (Santos *et al.*, 2015).

Sendo a reutilização/reciclagem de MF cada vez mais comum na atualidade, existe a necessidade de tratar o betume oxidado pois o seu comportamento pode comprometer e agravar as características mecânicas das misturas finais. Nesse sentido, é usual aplicar betumes mais moles nas misturas com altas percentagens de reciclagem e aditivos rejuvenescedores que permitem a restauração parcial das características originais dos betumes (Yang e Lee, 2016).

No que respeita à reutilização do material fresado, a reciclagem tem sido a técnica preferencial, sendo por isso o principal foco de interesse deste trabalho.

2.3. Reciclagem de Pavimentos

A reciclagem de pavimentos resulta cada vez mais de uma preocupação a nível global, e a Europa foi um dos primeiros continentes a assumir isto como necessidade inequívoca. Por essa razão, no ano 2000, os Estados Unidos analisaram a atividade de reciclagem de pavimentos realizado em alguns países da Europa (Schimmoller *et al.*, 2000). Nesse trabalho concluíram que, nessa fase específica, a Holanda era um dos países mais preocupados com a reciclagem, tendo-se já debruçado na ideia de que um produto deveria ser não só pensado para o seu tempo de vida útil, mas também para a sua possível reutilização. Nesta fase, no que concerne aos Estados Unidos, apenas a Pensilvânia pensaria na necessidade de reciclar e na criação de uma normalização para a tornar viável.

Atualmente já se aceita a utilização de percentagens de MF significativas nos Estados Unidos (Hansen e Copeland, 2015) onde grande parte deste material é reutilizado para misturas betuminosas a quente ou temperadas. Uma outra questão bastante interessante reside no facto de referirem que o recurso a betume-espuma é significativamente superior (valores de 84,5% em 2014) ao uso de aditivos, sejam estes químicos (15,0%), aditivos promotores de espuma

(0,3%) ou orgânicos (0,7%). As percentagens de MF para a produção de misturas betuminosas variam, usualmente, entre 20 e 30%, sendo que, apenas uma parte muito reduzida dos Estados Unidos aplica mais de 30% de MF. Segundo o método de formulação *Superpave*, para definir a percentagem de incorporação de MF é necessário conhecer o grau PG do betume recuperado do MF e o tipo de betume virgem que será posteriormente usado (McDaniel e Anderson, 2001). No entanto, apenas é possível incorporar mais de 30% de MF com recomendações específicas.

Comparativamente aos Estados Unidos, é desde logo possível verificar que a percentagem de MF aplicada em misturas betuminosas é superior no Japão (47%). No entanto, este valor sofreu um acréscimo significativo no período entre 2000 e 2013 (14%). A reciclagem, no Japão, é amplamente aceite quer uma questão política, quer cultural. Daí advém a necessidade de reutilizar materiais e de preservar os materiais virgens existentes. Neste sentido, a normalização em vigor não é muito exigente, sendo que (West e Copeland, 2015) referem que a normalização japonesa promove a aplicação de MF em novas MBs. Sendo de ressaltar que é exigido que o betume presente no MF não apresente valores de penetração inferiores a 20, o que poderá ser indicativo de MF menos oxidado do que o utilizado, por exemplo, em Portugal. Quanto à produção de MBR existem duas questões bastantes pertinentes. A primeira refere o recurso a um processo específico para reduzir as emissões aquando da secagem/aquecimento do MF e o facto dos rejuvenescedores serem adicionados ao MF, de modo a que estes atuem diretamente sobre a parte envelhecida da MBR.

A utilização de percentagens elevadas de MF é ainda uma prática pouco corrente e muitas vezes proibida pela legislação de diferentes países. No caso da Austrália e da Nova Zelândia, a limitação varia de estado para estado. No entanto, o valor máximo é de 30%, sendo a limitação mais comum a de 15% (Lee *et al.*, 2015). De referir que o betume-espuma tem sido essencialmente utilizado para a estabilização de pavimentos realizados a frio e *in situ*, onde é igualmente utilizado um agente promotor de espuma (Jameson, 2013, Jameson, 2014, 2015).

No que respeita à reutilização do MF na Europa é possível, desde logo, verificar que poucos países reutilizam 100% do MF que originam. Além disso, quando se considera apenas aquele que é reutilizado em MBs, estes valores são ainda mais reduzidos (Quadro 2.1). Para além da aplicação em novas MBs existe a possibilidade de aplicar o MF em camadas granulares, em outros trabalhos de engenharia civil ou em aterro. De facto, segundo EAPA (2015), em 2014, a Eslovénia aplicou cerca de 75% do MF disponível em camadas granulares.

Analisando mais pormenorizadamente o Quadro 2.1 verifica-se que grande parte do MF é reaproveitado para a produção de MBQs. No entanto, em países como a República Checa, a maioria do MF aproveitado é direcionada para a produção de misturas a frio. No que respeita às MBTs e MBSTs, a grande parte dos países não estipula qualquer percentagem de MF a ser aplicado, sendo a Grã-Bretanha a que mais aplica este material em MBTs e a Romênia em MBSTs.

Quadro 2.1 – Percentagem de MF reutilizado para cada tipo de mistura (adaptado de EAPA (2015)).

País	MBQ	MBT	MBST	MBF	Soma
Alemanha	90				90
Bélgica	72				72
Croácia	24	5		19	48
Dinamarca	54				54
Eslováquia	98			1	99
Eslovénia	25				25
Espanha	95	2	3		100
Finlândia	100				100
França	64				64
Grã-Bretanha	52	18		5	75
Holanda	67	3		15	85
Hungria	80	10			90
Luxemburgo	85	5		10	100
Noruega	20			3	23
Republica Checa	16			30	46
Romênia	40		25	25	90
Suécia	75	5	5	5	90
Suíça	52	10	1	2	65
Turquia	6				6

No que se refere à aplicação totalitária do MF em novas misturas betuminosas, apenas três países, Espanha, Finlândia e Luxemburgo, a praticam. Somente no Luxemburgo se aplica parte deste material em MBFs e na Finlândia, todo o MF produzido é reaplicado em MBQs. Assim, é possível concluir que a aceitação da incorporação de MF em misturas betuminosas a quente é muito superior à aceitação verificada para as restantes técnicas. Isto é facilmente justificável pela falta de conhecimento acerca do comportamento das misturas semi-temperadas e temperadas. Já relativamente às misturas betuminosas a frio, a menor utilização deve-se ao facto de ser conhecido o seu inferior desempenho em serviço comparativamente às MBQs.

Quanto à produção de misturas temperadas na Europa, verifica-se um acréscimo na quantidade de mistura produzida (Figura 2.7), apesar destes valores serem muito baixos comparativamente às quantidades de misturas produzidas a quente.

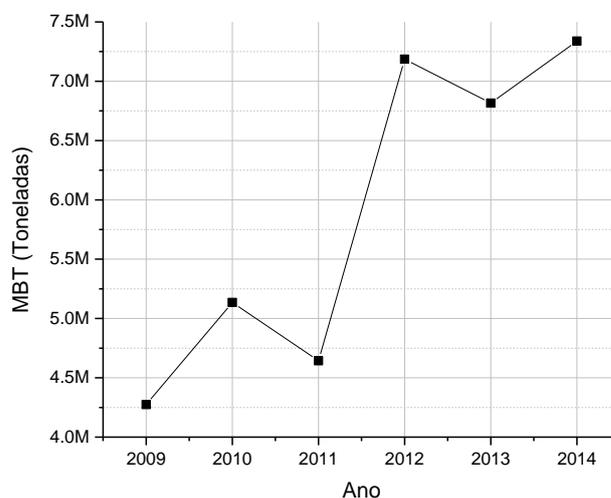


Figura 2.7 – Quantidade de misturas betuminosas temperadas produzidas anualmente na Europa, em milhões de toneladas (EAPA, 2010a, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015).

Tendo por base estes dados é possível concluir que é, ainda, reduzida a aceitação das técnicas de produção a temperaturas mais baixas, pela maioria dos países. Daí ser necessário desenvolver e conhecer mais aprofundadamente as técnicas que permitem a redução de temperaturas de fabrico. Adicionalmente, verifica-se ser cada vez maior a preocupação da reutilização do MF, conduzindo ao crescimento da sustentabilidade na construção de pavimentos.

Kerkhof (2012) refere que, na Bélgica, a aplicação de taxas de reciclagem inferiores a 20% não apresenta qualquer problema, nos dias de hoje. No entanto, quando as taxas rondam os 50% ou valores superiores, surge a necessidade de incrementar o controlo de qualidade, de modo a garantir a conformidade da nova MBR.

2.4. Técnicas de Reciclagem

As técnicas de reciclagem atualmente utilizadas são classificadas de acordo com diferentes parâmetros (Figura 2.8), nomeadamente, o local e temperatura de produção e o ligante utilizado para a produção das misturas.

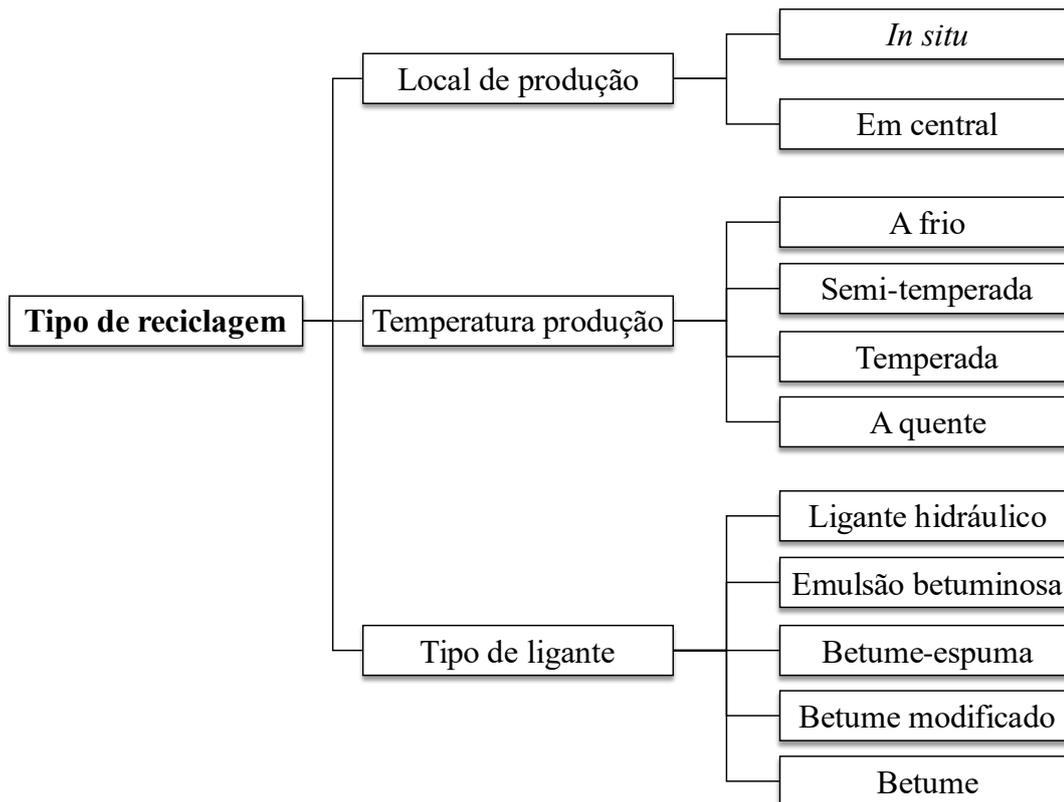


Figura 2.8 – Parâmetros de distinção das técnicas de reciclagem (adaptado de Martinho (2004)).

No que respeita ao local de produção, a reciclagem pode ser realizada *in situ* ou em central, sendo possível apontar algumas vantagens e desvantagens a cada uma das localizações. A reciclagem *in situ* implica que a escarificação do pavimento a reciclar e a produção da nova mistura se realizem no mesmo local, não existindo assim custos de transporte, tornando-a economicamente vantajosa (Fonseca, 2004). Como o transporte de quantidades significativas de material não é necessário, os pavimentos envolventes não são sujeitos às elevadas cargas do tráfego da obra, o que implica uma degradação e custo de conservação menores.

Apesar destas vantagens serem muito valorizadas, face à atual conjuntura económica, este tipo de reciclagem não é muito utilizado porque implica a produção de misturas betuminosas com características inferiores às produzidas em central (Martinho, 2004). De referir que a reciclagem *in situ* é muitas vezes aplicada em estradas rurais, onde a distância entre o local de aplicação e as centrais é muito elevada (Tabaković *et al.*, 2016).

Por sua vez, a reciclagem em central está associada à produção de misturas betuminosas com melhores características do que as misturas produzidas *in situ*, o que resulta numa maior aceitação e aplicação. Conforme o tipo de central utilizada, a qualidade da mistura pode diferir (EAPA, 2007). As limitações apontadas à reciclagem em central residem na limitação das taxas

de incorporação de MF e na necessidade de deslocar o material para o local de implantação da central. Assim, há um aumento significativo dos custos relativamente à reciclagem *in situ*.

Quanto à temperatura de produção, a classificação dos tipos de mistura não é unânime e os intervalos alteram-se de autor para autor. Por exemplo, a EAPA (2010b) refere que em misturas betuminosas a frio, os agregados não são submetidos ao processo de aquecimento e é usual a aplicação de betume-espuma ou de emulsões asfálticas. Já as misturas betuminosas semi-temperadas (MBSTs) são produzidas a temperaturas entre os 70 e os 100 °C e as misturas betuminosas temperadas (MBTs), a temperaturas superiores a 100 °C e inferiores a 140 °C. As misturas betuminosas a quente (MBQs) são, normalmente, produzidas a temperaturas variáveis entre 120 e 190 °C.

Bijleveld *et al.* (2012) defendem que as misturas betuminosas a quente são produzidas entre 160 e 170 °C, enquanto as misturas betuminosas temperadas são produzidas a temperaturas mais baixas entre 20 e 55 °C. Vaitkus *et al.* (2011) apontam para um intervalo de temperaturas mais alargado para a produção de misturas a quente (140 – 180 °C), e um intervalo de redução de temperatura ligeiramente mais curto (20 – 40 °C) para as misturas temperadas, salvaguardando o facto destas serem produzidas a temperaturas superiores a 100 °C.

Tendo como base as referências já apresentadas e de modo a uniformizar a classificação utilizada no decorrer do presente trabalho tem-se em consideração a distribuição da Figura 2.9.

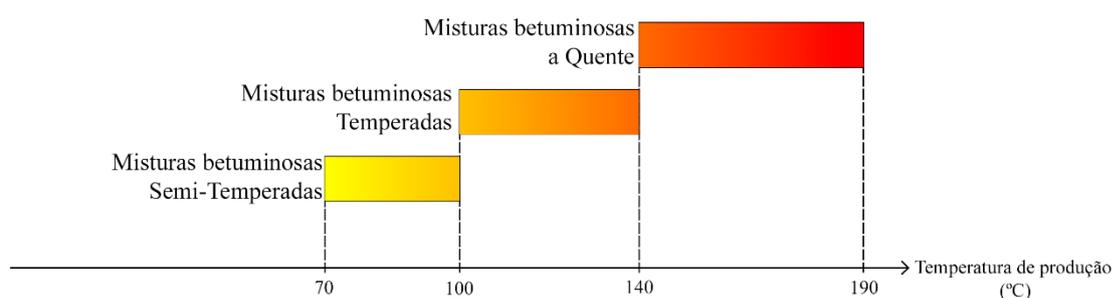


Figura 2.9 – Classificação das misturas betuminosas quanto à temperatura de produção (adaptado de EAPA (2010b)).

As misturas betuminosas a quente (MBQs) apresentam melhores características em relação às produzidas a frio. No entanto, com a crescente preocupação na poupança de energia e na redução de emissões de gases de estufa, têm vindo a ser procuradas outras alternativas, originando a criação de novas técnicas para a produção de misturas a temperaturas mais baixas

com idêntico desempenho. Apesar das vantagens inerentes à redução das temperaturas de produção das misturas, a sua aplicação é ainda reduzida. Em EAPA (2015) refere-se que França é o país Europeu com a maior quantidade de misturas temperadas produzidas, sendo a Suíça o país com as percentagens mais elevadas. Para ter uma aplicação mais comum, é exigido um maior investimento na sua investigação.

O ligante utilizado está maioritária e diretamente relacionado com o país e com a técnica aplicada. A reciclagem a frio é praticada com recurso a ligantes hidráulicos ou a emulsões betuminosas. Também se pode utilizar betume-espuma, embora os seus casos de aplicação ainda estejam concentrados apenas em determinados países. Já a reciclagem a quente passa pelo uso de betume ou de betumes modificados, com recursos a aditivos comerciais ou materiais não comerciais, nomeadamente materiais considerados como resíduos (Abreu *et al.*, 2015, Ahmadinia *et al.*, 2011, Fernandes, 2013, Torres, 2014, Vasudevan *et al.*, 2012).

O presente estudo centrar-se-á, essencialmente, nas duas técnicas principais apresentadas, nomeadamente, a reciclagem a quente e a reciclagem temperada. Nesse sentido, pretende-se perceber de que forma seria possível o uso do betume-espuma em misturas betuminosas temperadas, garantindo um comportamento equivalente ou superior ao das misturas betuminosas produzidas a quente.

2.5. Reciclagem a Quente em Central

A reciclagem de pavimentos a quente tem-se demonstrado, nos últimos anos, uma das técnicas preferenciais para a aplicação do MF existente, particularmente com produção em central. Em alguns casos, este tipo de reciclagem implica o uso de aditivos que permitam restaurar as propriedades perdidas pelo betume com o seu envelhecimento. Noutros casos pode ser usado, unicamente, num betume mais mole (Celauro *et al.*, 2010).

Atualmente, a utilização de rejuvenescedores é uma prática cada vez mais comum. A incorporação de MF implica a junção de materiais deteriorados pelas ações a que foram submetidos durante o tempo de serviço. Os rejuvenescedores têm como principal função restaurar as propriedades do betume envelhecido (Su *et al.*, 2009). Zaumanis *et al.* (2014) referem que os rejuvenescedores têm dois tipos de função: imediata e de longa duração. No imediato permitem a incorporação de maiores percentagens de MF, uma maior difusão do

betume dentro das misturas e, conseqüentemente, um melhor revestimento dos agregados. Os rejuvenescedores têm como função de longa duração permitir uma eficiente reconstituição das propriedades físicas e químicas do betume, a sua estabilidade durante o período de vida do pavimento. A Figura 2.10 apresenta as diferenças na composição química de um betume sujeito a processos de envelhecimento e rejuvenescimento.

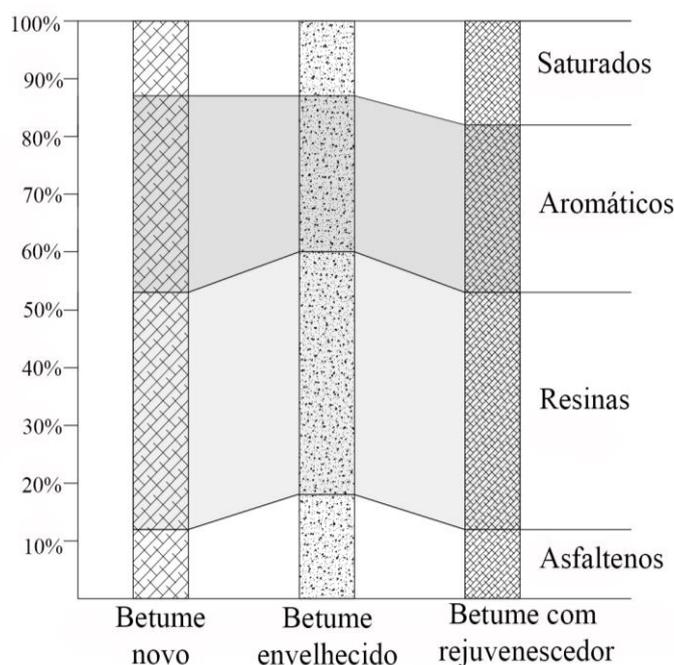


Figura 2.10 – Alterações ao nível da composição química depois do envelhecimento e da aplicação de rejuvenescedores (adaptado de Brownridge (2010)).

Tratando-se de uma técnica cada vez mais comum, o uso de rejuvenescedores em MBs com incorporação de altas percentagens de MF tem suscitado trabalho de investigação (Shen *et al.*, 2007, Su *et al.*, 2009), nomeadamente na aplicação de rejuvenescedores não comerciais que têm vindo a demonstrar resultados bastante positivos. Por exemplo, Nayak e Sahoo (2015) referem a aplicação do óleo de Pongamia e um composto onde o óleo de rícino é aplicado. Neste caso, ambos os óleos são de origem vegetal e no estudo são utilizados por existirem junto ao local de produção. Uma série de outros autores refere a aplicação de óleos não comerciais como rejuvenescedores sendo que, a aplicação de óleos considerados como resíduos, tem-se demonstrado cada vez mais usual. A título de exemplo, Abreu *et al.* (2015) aplicaram o óleo de motor usado para a produção de misturas com altas percentagens de material fresado, utilizando igualmente outro tipo de resíduos nas suas misturas. Muitos outros autores apresentam outro tipo de rejuvenescedores (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 – Resumo de alguns estudos desenvolvidos com aditivos rejuvenescedores.

Referência	Rejuvenescedores usados
Abreu <i>et al.</i> (2015)	Aplicação de óleo usado de motor e polímeros reciclados em misturas com MF.
Im <i>et al.</i> (2016)	Três aditivos comerciais <ul style="list-style-type: none"> • Hydrogreen • Road Science • Arizona Chemical
Nayak e Sahoo (2015)	Aplicação de dois óleos de origem vegetal <ul style="list-style-type: none"> • Óleo de Pongamia • Compósito à base de óleo de rícino
Chen <i>et al.</i> (2014b)	Uso de três rejuvenescedores diferentes: <ul style="list-style-type: none"> • Rejuvenescedor comercial • Óleo usado de cozinha • Óleo de sementes de algodão
Chen <i>et al.</i> (2014a)	Aplicação do óleo usado de cozinha como rejuvenescedor em betumes diferentes, sendo que um deles se trata de um betume modificado com SBS (estireno-butadieno-estireno).
Zaumanis <i>et al.</i> (2014)	Aplicação de seis tipos de rejuvenescedores distintos de origem não comercial. <ul style="list-style-type: none"> • Óleo vegetal usado • Gordura (<i>grease</i>) vegetal usada • Óleo orgânico • <i>Tall oil</i> destilado • Extrato aromático • Óleo usado de motor
Su <i>et al.</i> (2009)	Aplicação de um mesmo aditivo comercial a misturas com diferentes percentagens de material fresado.
Bailey e Zoorob (2012)	Uso de um óleo de origem vegetal em betume envelhecido em laboratório, com análise detalhada da composição do betume.
Asli <i>et al.</i> (2012)	Uso de óleo usado de cozinha com tratamento adequado (filtração) como rejuvenescedor.
Zaumanis <i>et al.</i> (2013)	No estudo foram testados nove aditivos distintos para a reciclagem com 100% de MF, no entanto apenas cinco foram considerados como aptos para este tipo de reciclagem: <ul style="list-style-type: none"> • Mistura orgânica • Sebo refinado • Óleo de base parafínica • Extrato aromático • <i>Tall oil</i> destilado
Silva <i>et al.</i> (2012)	Uso de dois aditivos distintos para aplicação em misturas com 100% de MF, sendo um deles um aditivo comercial (Iterlene ACF 1000) e o outro um resíduo (óleo usado de motor).
Nazzal <i>et al.</i> (2015)	Aplicação de três rejuvenescedores que são usualmente aplicados, com a dosagem de 9,0% do peso do betume a ser reciclado. Os três rejuvenescedores são identificados como: <ul style="list-style-type: none"> • Aditivo orgânico resultante da mistura de óleos • Óleo parafínico • Óleo orgânico obtido através de um processo que reduz ou elimina as substâncias perigosas.
Ongel e Hugener (2015)	Aplicação de três rejuvenescedores comerciais, com seleção de percentagens distintas, para se obter um betume 70/100 a partir de um betume 40/50.
Oliveira <i>et al.</i> (2013)	Aplicação de óleo para rejuvenescer misturas com incorporação de 100% de MF.
Zargar <i>et al.</i> (2012)	Uso de óleo de cozinha usado, tendo-se concluído que este funciona corretamente como rejuvenescedor e permite maior resistência ao envelhecimento de curto prazo.

Relativamente à quantidade de aditivo a ser adicionado ao betume existem valores de referência estipulados por parte de empresas produtoras, mas que por vezes se demonstra serem exagerados (Yang e Lee, 2016). Apesar de não ser tão comum, a aplicação de aditivos que permitam uma maior resistência ao processo de envelhecimento tem sido igualmente avaliada (Gawel *et al.*, 2016).

De uma forma geral, o uso de rejuvenescedores tem vindo a ser considerado importante para as misturas betuminosas recicladas, em essencial para as MBQs.

2.6. Reciclagem Temperada

As misturas betuminosas temperadas (MBTs) surgem da necessidade de tornar as misturas betuminosas (MBs) produzidas mais sustentáveis. Assim, as MBs são sujeitas a uma redução na temperatura de produção, o que influencia os níveis de energia consumida e de conforto para os intervenientes na produção e compactação das misturas. Para isso existe uma alteração, temporária ou permanente, das propriedades do betume usado (Martinho *et al.*, 2010).

O recurso a misturas betuminosas temperadas traz algumas vantagens, independentemente da técnica utilizada na sua produção (Rubio *et al.*, 2012, Zaumanis *et al.*, 2012b), nomeadamente, a nível:

- Ambiental:
 - Redução do nível de emissões;
 - Diminuição do consumo de energia;
- Económico:
 - Redução dos custos de energia;
 - Redução dos custos de produção imputados às matérias-primas (essencialmente em misturas com incorporação de MF);
- Produtivo:
 - Facilidade de incorporação de maiores percentagens de MF;
 - Possibilidade de instalação de centrais mais próximas das áreas urbanas (maior proximidade entre a central e o local da obra);
 - Aumento da trabalhabilidade da mistura;
 - Maior eficácia no que diz respeito à compactação;

- Possibilidade de aumento da distância de transporte (temperatura da mistura aquando da compactação pode ser inferior);
- Melhoramento das condições de trabalho dos intervenientes;
- Abertura ao tráfego mais rápida (reduzindo os custos associados ao utente).

Por outro lado são apontadas por outros autores algumas desvantagens, nomeadamente, Zaumanis *et al.* (2012b), que questionam se a redução de emissões de gases de estufa conseguida pela redução da temperatura não é mitigada pela necessidade de produção dos aditivos aplicados em algumas técnicas.

Do ponto de vista económico, obtém-se uma diminuição de custos conseguida pela menor necessidade de energia e matéria-prima, o que fará face aos custos exigidos pela aplicação de uma dada técnica, tais como: custos de alteração de equipamentos, custos de aditivos ou custos associados ao licenciamento/aplicação da respetiva técnica (Capitão *et al.*, 2012, Zaumanis *et al.*, 2012b).

Uma vez que não se conhece, efetivamente, o seu comportamento a longo prazo (Rubio *et al.*, 2012), no seguimento da problemática dos custos e da poluição ambiental que pode ser causada pelo fabrico destes aditivos, as misturas temperadas ainda são postas em causa pelos profissionais da área (Almeida-Costa e Benta, 2016).

As técnicas para obtenção destas misturas são classificadas de acordo com o uso de aditivos, sejam estes orgânicos ou químicos, ou pelo uso de processos de formação de espuma de betume (*foaming process*) (Rubio *et al.*, 2012, Zaumanis *et al.*, 2012b). As misturas comportam-se de forma ligeiramente diferente quando a técnica utilizada varia e, usualmente, os tempos de cura das MBTs também varia, de acordo com o tipo de técnica (Al-Qadi *et al.*, 2012). Isto exige um conhecimento mais profundo de cada uma das técnicas utilizadas.

2.6.1. Aditivos Redutores de Temperatura

Os aditivos orgânicos podem ser ceras, com a função de reduzir a viscosidade dos betumes a temperaturas acima de 120 °C e, conseqüentemente, as temperaturas de fabrico das misturas. Os aditivos químicos resultam da combinação de agentes emulsionantes, surfactantes e/ou polímeros que melhoram as características dos betumes, assim como, a trabalhabilidade das

misturas (Zaumanis *et al.*, 2012b). No Quadro 2.3 estão identificados alguns dos aditivos utilizados na produção de MBTs, de acordo com a sua classificação.

Quadro 2.3 – Exemplos de aditivos usados para a produção de MBT.

Aditivos Químicos	Aditivos Orgânicos
<ul style="list-style-type: none"> • Evotherm[®] • RedisetTM WMX • Cecabase[®] RT • HyperthermTM/ Qualitherm • Rediset LQ • Revix • Iterlow T 	<ul style="list-style-type: none"> • Sasobit[®] (Fischer-tropsch waxes) • AstechPER[®] • SonneWarmixTM • ThiopaveTM • TLA-XTM Warm Mix • Montan Wax • Fatty acid amid • Slack wax • Asphaltan A • Asphaltan B • Licomon BS 100 • CCBitl 113 AD

Tendo em conta os vários aditivos existentes, mesmo dentro da mesma tipologia, é fácil compreender que existam diferenças de comportamento entre os mesmos. A título de exemplo, Al-Qadi *et al.* (2012) referem que o aditivo Sasobit[®], comparativamente com o Evotherm[®], apresenta melhores resultados relativamente aos danos causados pelo reaquecimento das MBs. Isto poder-se-á traduzir numa melhor vida à fadiga das misturas finais.

Os processos de formação de espuma de betume (também conhecida como betume-espuma) passam pelo uso de pequenas quantidades de água à temperatura ambiente, injetadas no betume a temperaturas relativamente elevadas, provocando o aumento do volume do betume sob a forma de uma espuma. Também é possível recorrer a aditivos que possuam, na sua composição, percentagens reduzidas de água e que permitam espumar os betumes. Esta tecnologia, apesar de ser vantajosa por não implicar o uso de grandes quantidades de aditivos, é bastante complexa podendo envolver um investimento inicial elevado, com o objetivo de modificar as centrais de produção das misturas.

Relativamente à produção de misturas a temperaturas mais baixas, Rodríguez-Alloza *et al.* (2013) testaram diferentes tipos de aditivos considerados redutores de temperaturas de produção, no entanto este estudo centra-se unicamente na análise dos betumes o que permitindo

apenas verificar que pela viscosidade seria possível reduzir as temperaturas de produção, não se comprovando posteriormente esta questão uma vez que não são apresentados resultados relativos a misturas betuminosas.

Em Portugal, e na Europa em geral, é mais bem aceite a utilização de aditivos do que a utilização de betume-espuma para a obtenção de misturas com temperaturas de produção mais baixas. Este facto deve-se a não ser necessário alterar as centrais para aplicação deste tipo de tecnologia (Martinho *et al.*, 2010).

Uma vez que o presente estudo se centrará na utilização de betume-espuma são apresentadas de seguida algumas tecnologias usadas para a formação da espuma.

2.6.2. Tecnologias de Formação de Espuma

Para concretizar a formação de espuma pode recorrer-se à injeção direta de água sobre o betume ou sobre os agregados (Zaumanis *et al.*, 2012a) ou, ainda, através da utilização de aditivos que contenham água. Esta, por sua vez, promove a formação de espuma de betume (Ali *et al.*, 2013). Este tipo de tecnologia é preferível à utilização de emulsões, uma vez que implica tempos de cura mais curtos (Wijk e Wood, 1983).

Quanto aos aditivos utilizados na formação de espuma, o processo LEA[®] (*Low Energy Asphalt*), também conhecido como EBE[®] (*Enrobé à Basse Énergie*) ou EBT[®] (*Enrobé à Basse Température*) é um dos mais conhecidos e aplicados. Trata-se de um processo desenvolvido em França, que envolve também a utilização de um aditivo surfactante, especialmente desenvolvido para melhorar a adesividade entre o betume e os agregados (Harder, 2007).

Esta tecnologia (Figura 2.11) consiste, numa primeira fase de mistura, num processo de produção entre o betume e a fração grossa dos agregados aquecidos, seguida da adição a frio da fração fina dos agregados, sem realizar a sua secagem. Ao entrar em contacto com os agregados e com o betume quentes, a humidade presente na fração fina promove a formação de betume-espuma e o envolvimento uniforme da mistura final. As temperaturas de aquecimento do betume e da fração grossa dos agregados são temperaturas abaixo das usadas na produção de misturas a quente. Apesar disso, a temperatura da mistura final é bastante reduzida, em comparação com a obtida na produção de misturas a quente.

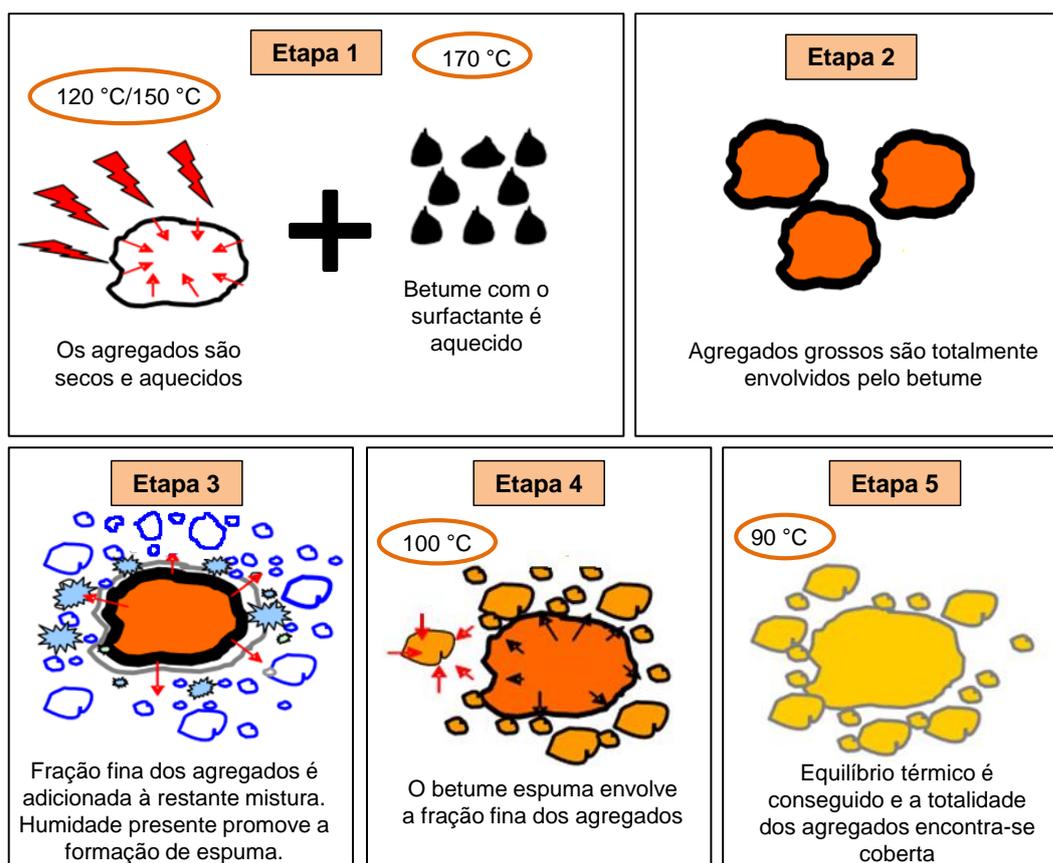


Figura 2.11 – Diferentes etapas do processo LEA[®] (adaptado de Harder (2007)).

O aditivo utilizado é um surfactante e visa conferir maior adesividade entre os agregados e o betume. As percentagens de aplicação deste aditivo são bastante baixas em relação ao volume de betume, rondando os 0,2 e 0,5% (D'Angelo *et al.*, 2008, Motta, 2011).

Apesar do processo definido como LEA[®] estar patenteado, Olard e Gaudefroy (2012) apresentam algumas alterações, nomeadamente na variação das temperaturas de aquecimento dos agregados, bem como, nas etapas em que a fração fina é adicionada.

No que respeita a outras técnicas que implicam o uso de aditivos específicos para a formação de betume-espuma, a empresa *NYNAS* em conjunto com mais quatro empresas e com o *The Dutch Road Authorities Innovation Test Centre* desenvolveu a técnica *LT Asphalt*. Esta técnica utiliza um aditivo promotor de espuma especialmente desenvolvido para este efeito (*Nyfoam*), numa percentagem entre 0,5 e 1,0% de um filer higroscópico (D'Angelo *et al.*, 2008). Sendo a temperatura de aquecimento dos agregados de 90 °C (Prowell, 2007). Apesar da possibilidade de obter uma elevada redução da temperatura de produção, a aplicação desta técnica é apenas conhecida na Itália e na Holanda (D'Angelo *et al.*, 2008). Pelas temperaturas referidas, as

misturas deverão ser consideradas como misturas betuminosas semi-temperadas (MBSTs), uma vez que são produzidas abaixo dos 100 °C.

Um outro aditivo, Advera[®] WMA, apresenta-se como uma zeólita sintética contendo cerca de 18 a 22% de água, o que permite a formação de betume-espuma a temperaturas inferiores às utilizadas em técnicas geradoras do mesmo efeito sobre o betume. Segundo PQ Corporation (2011), a aplicação deste aditivo é exequível quer em misturas betuminosas com borracha, quer com material fresado, tendo apresentado um caso de estudo em Nova Inglaterra, onde é referido que este aditivo permite uma melhor trabalhabilidade da mistura além de permitir igualmente a introdução de maior percentagem de MF.

Malladi (2012) refere que este aditivo deve ser aplicado numa percentagem de 0,15%, relativamente ao peso total da mistura, evidenciando-se, desde logo, que a aplicação do método poderá representar um custo acrescido devido à quantidade de aditivo. As temperaturas de aplicação das misturas produzidas com este aditivo podem variar entre os 115 os 155 °C (PQ Corporation, 2011).

A técnica LEAB[®] foi desenvolvida pela empresa *Royal BAM Group* nos Países Baixos, originando alguns projetos comerciais, maioritariamente nessa região (D'Angelo *et al.*, 2008). Esta técnica permite a obtenção de misturas betuminosas semi-temperadas devido à produção de misturas a uma temperatura inferior a 100 °C (Pereira, 2011). Em particular, a técnica não recorre a água para a produção da espuma, mas a seis bicos injetores com um aditivo à base de aminas com percentagens de 0,5% o peso do betume (Ferreira, 2009).

Um outro aditivo muito utilizado é o Asphalt-min (Figura 2.12) que, tal como o Advera[®] WMA, é uma zeólita sintética criada para produzir misturas betuminosas a temperaturas mais baixas do que as usadas para as misturas convencionais.

Este aditivo é dos mais comuns na produção de misturas betuminosas temperadas (Bower *et al.*, 2012). Contendo cerca de 21% de água, este aditivo permite que as misturas sejam produzidas a temperaturas entre 30 e 35 °C mais baixas que as usadas nas misturas produzidas a quente (Kristjansdottir, 2006). Num estudo realizado por Goh *et al.* (2007) foram testadas duas percentagens de aditivo, o valor indicado como ideal (0,3%) e uma percentagem superior (0,5%). Neste caso as temperaturas de compactação foram reduzidas entre 20 a 40 °C, comparativamente àquela que foi usada para a mistura convencional (compactação a 142 °C).



Figura 2.12 – Aspeto do aditivo Aspha-min® (Aspha-min GmbH (2009)).

D'Angelo *et al.* (2008) referiram que ao utilizar o aditivo Asphalt-min a temperatura de produção pode ser reduzida entre 20 e 30 °C e que a aplicação deste tipo de técnica já tinha sido realizada em França, na Alemanha e nos Estados Unidos.

Caro *et al.* (2012) defendem que o uso deste aditivo implica uma gama de temperaturas próxima dos 100 °C, para o betume, assim como para os agregados. Esses autores concluíram ainda que este aditivo permite melhorar o comportamento das MBTs, quanto à sensibilidade à água.

Relativamente aos processos que implicam a injeção direta de água sobre a mistura, existem alguns equipamentos já patenteados e comercializados. A tecnologia *AQUAblack® Warm Mix Asphalt*, é uma técnica comercializada pela empresa *MAXAM Equipment, Inc.*, sendo referido que este sistema implica custos mais baixos que as restantes técnicas de produção de MBT (MAXAM Equipment, 2012).

O sistema de produção implica o uso de água (Bower *et al.*, 2012), e as temperaturas de produção das misturas situam-se entre os 100 e os 120 °C (Pereira, 2011). Os custos de produção são, conseqüentemente, inferiores por não recorrer a aditivos, mas implica custos iniciais superiores.

Na técnica *Double Barrel® Green*, desenvolvida pela empresa *Astec, Inc.*, recorre-se a um mecanismo específico para a formação de espuma (Motta, 2011). Este processo envolve o uso de uma central contínua, com um tambor secador-misturador onde a mistura é produzida imediatamente após a secagem dos agregados. Este tambor incorpora um sistema que permite a introdução de pequenas quantidades de água que promovem a expansão do betume (ASTECC, 2014).

Este tipo de técnica permite o aumento do volume do betume em 18 vezes face ao seu volume inicial, conferindo uma maior eficácia no envolvimento dos agregados. No entanto, implica a modificação dos sistemas e aumenta o custo inicial de investimento para a produção de MBT (Middleton e Forfylow, 2008).

A temperatura de mistura varia entre os 120 e 135 °C e a temperatura de compactação ronda os 115 °C (D'Angelo *et al.*, 2008, Middleton e Forfylow, 2008). Esta tecnologia tem sido essencialmente testada no Canadá e nos Estados Unidos (D'Angelo *et al.*, 2008, Middleton e Forfylow, 2008).

O Ultrafoam GX2™ (Figura 2.13) é um equipamento desenvolvido pela *Gencor Industries*, nos Estados Unidos, possibilitando a formação de espuma com a introdução de 1,25 a 2% de água (Gencor Industries, 2014). O sistema é facilmente adaptado a uma central, sendo acoplado à linha de betume já existente (Ferreira, 2009) e permite a produção de misturas a temperaturas entre os 110 e ao 115 °C (Pereira, 2011).



Figura 2.13 – Equipamento Ultrafoam GX2™ (Gencor Industries, 2014).

A tecnologia WAM *foam*, desenvolvida em 1995 segundo a parceria entre a Shell bitumen e a empresa Kolo Veidekke (Motta, 2011), teve como objetivo desenvolver um conjunto de técnicas que permitissem a redução das temperaturas de fabrico sem comprometer as características das misturas (Larsen *et al.*, 2004).

Esta técnica envolve a utilização de dois betumes distintos, isto é, um mais mole e um mais duro, misturados em fases distintas da produção das misturas (Figura 2.14). No que respeita ao betume mais mole, Larsen *et al.* (2004) referem um betume com um grau de penetração muito alto (330/440).

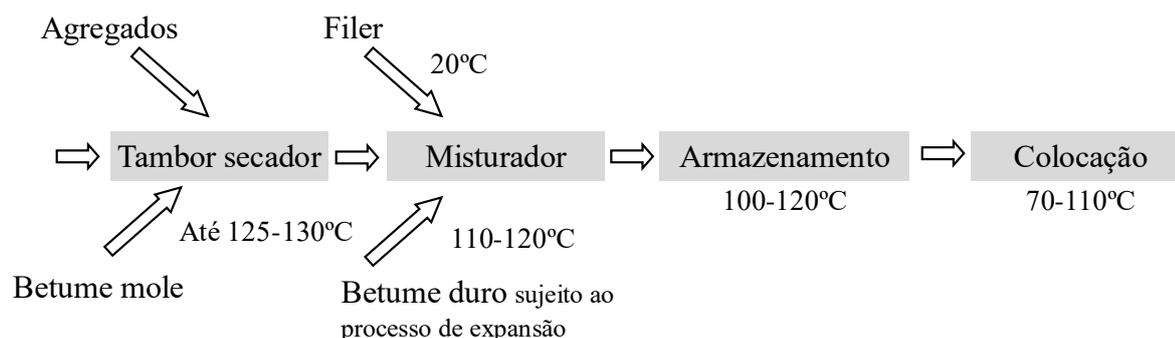


Figura 2.14 – Esquema de produção da WAM foam (adaptado de Shell Bitumen (2014)).

Esta técnica foi aplicada em alguns trechos experimentais, sendo que o primeiro foi realizado em maio de 1999, na Noruega (Kristjansdottir, 2006), tendo-se conseguido durante a fase de aplicação resultados satisfatórios apesar das condições adversas sob as quais se aplicaram as misturas. Outros trechos foram construídos na Suécia e no Reino Unido (Larsen *et al.*, 2004) e, mais recentemente (2006), em Florença, Itália (Lecomte *et al.*, 2007), sendo que neste caso o intuito foi avaliar a quantidade de emissões, tendo-se comprovado que esta tecnologia permite reduzir significativamente as emissões durante a produção da mistura.

O *WMA Terex system* (Figura 2.15) foi desenvolvido pela empresa Terex Roadbuilding, EUA e é descrita por Putman e Xiao (2012) como sendo muito similar ao sistema *Double Barrel® Green*.



Figura 2.15 – WMA Terex System (Terex Roadbuilding, 2011).

Esta técnica envolve uma câmara de expansão patenteada (Terex Roadbuilding, 2011), com recurso a cerca de 2% de água (Pereira, 2011). A redução de temperatura é bastante significativa, sendo referida a possibilidade de produção de misturas entre os 90 e os 130 °C (Ferreira, 2009, Pereira, 2011).

2.6.3. Betume-espuma

De uma forma geral, o uso de espumas tem-se generalizado e difundido. Atualmente existem inúmeros produtos comercializados contendo na sua composição alguma espécie de espuma (Schramm e Wassmuth, 1994).

Uma espuma é obtida pela formação de bolhas de um gás comum, desejavelmente dispersas uniformemente num meio líquido (Saunders, 1991) (Figura 2.16).

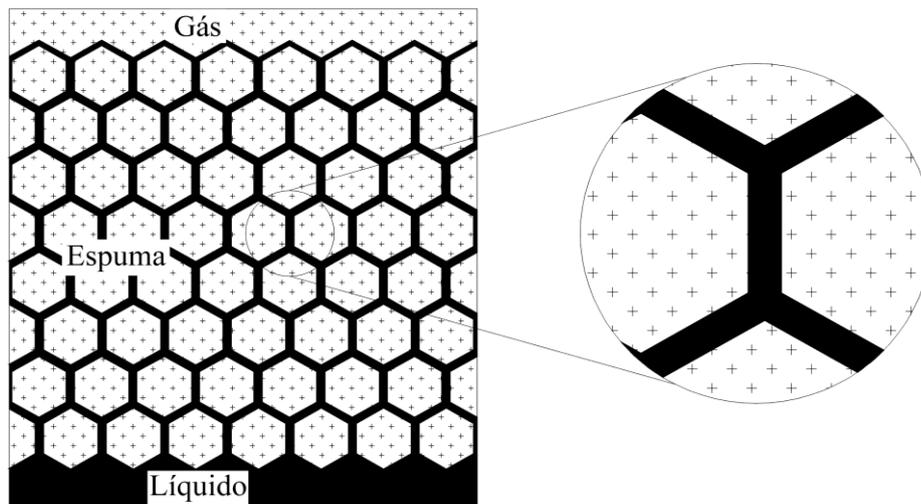


Figura 2.16 – Generalização do sistema de espuma (adaptado de Saunders (1991)).

No que respeita à indústria do petróleo existem inúmeras aplicações e situações em que a espuma se torna parte do processo. Apesar da formação de espuma ser desejável em alguns pontos-chave, é igualmente indesejável noutras situações, como por exemplo, durante o processo de destilação (Schramm e Wassmuth, 1994).

De referir que a transformação do betume em betume-espuma permite a redução aparente da sua viscosidade, um aumento significativo da sua superfície específica e uma alteração na sua tensão interna (Bowering e Martin, 1976, Muthen, 1998).

A estabilidade da espuma é influenciada por diversos fatores enumerados de seguida (Schramm e Wassmuth, 1994):

- Gravidade;
- Sucção capilar;
- Elasticidade de superfície;

- Viscosidade;
- Repulsão elétrica;
- Dispersão das forças atrativas; e
- Repulsão estérica.

Uma vez que a formação da espuma pode ser desejável ou não, existem atualmente agentes que funcionam como promotores e outros como redutores ou mitigadores de espuma (Saleh, 2007).

O processo de formação de betume-espuma é descrito por diversos autores (Barinov, 1990, He e Wong, 2006, Jenkins, 2000). Neste contexto, Sunarjono (2008) faz um resumo das cinco fases constituintes do processo de formação de betume-espuma, apresentadas no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Fases do processo de formação de betume-espuma.

Identificação fase	Descrição
Fase 1: Posição Inicial	Água e ar são injetadas sobre alta pressão, o que faz com que a água se divida em pequenas gotas de água que são diretamente adicionadas à fase líquida do betume. Esta ação causa uma rápida transmissão de energia.
Fase 2: Transferência de Calor	Transferência de calor entre o betume quente e as pequenas gotas de água dentro da câmara de expansão. A temperatura da água aumenta e a temperatura do betume decresce.
Fase 3: Evaporação	Assim que as gotas de água atingem a temperatura de 100°C, começa a existir a evaporação de água. Esta evaporação faz com que se formem bolhas de vapor internas ao betume.
Fase 4: Formação de Espuma	O vapor de água é forçado a ficar dentro do betume o que faz com que o volume de betume aumente, isto é, há a formação do betume-espuma.
Fase 5: Colapso da Espuma	Inicia-se o processo de colapso das bolhas que se formaram interiormente, começando o volume de betume a decrescer. O colapso das bolhas pode ser causado pelo contacto com elementos externos, com a pressão excessiva que causa uma expansão excessiva das bolhas ou com o processo de drenagem.

Quanto à produção do betume-espuma em escala laboratorial, no presente estudo foi utilizado um equipamento comercial, baseado no princípio de funcionamento dos equipamentos utilizados em grande escala (Wirtgen, 2008).

Na tecnologia aplicada, a formação da espuma passa pela injeção de água e ar no betume quente (Figura 2.17). Por sua vez, o processo de expansão ocorre dentro de uma câmara de expansão consistindo no aprisionamento do vapor formado quando a água entra em contacto com as altas temperaturas do betume.

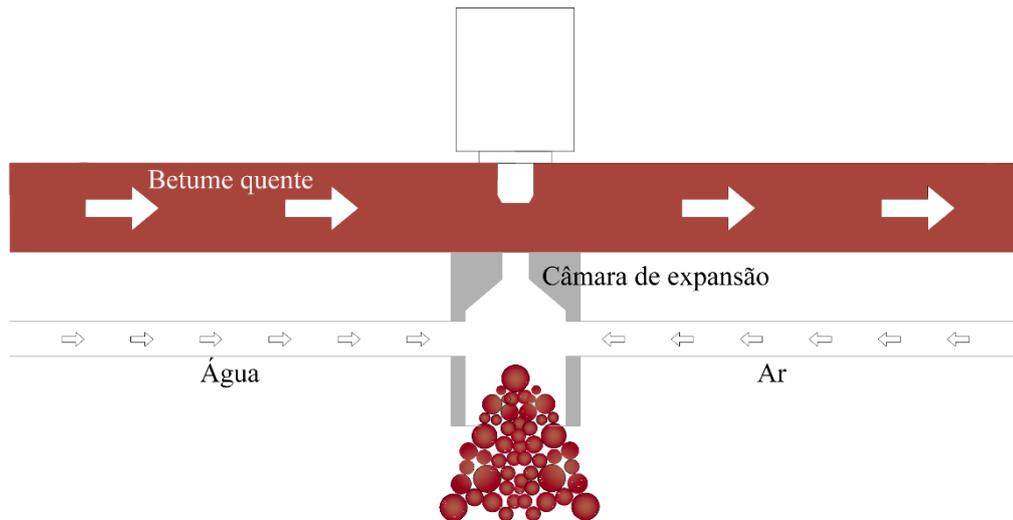


Figura 2.17 – Esquema de produção do betume-espuma (adaptado de Wirtgen (2012)).

O colapso das bolhas está normalmente associado ao seu alongamento excessivo que torna demasiadamente estreita a camada entre bolhas provocando, conseqüentemente, o seu rebotamento. Este pode ser agravado pela temperatura ambiente ou do recipiente onde a espuma é colocada (Jenkins, 2000).

Tratando-se de um método que envolve a utilização de betume a temperaturas elevadas, existem alguns estudos onde betumes aditivados com outro tipo de materiais são utilizados, nomeadamente, betumes aditivados Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) (Yu *et al.*, 2013).

2.6.4. Misturas Betuminosas Temperadas e Semi-temperadas

No que respeita à aplicação de misturas temperadas com recurso a aditivos, a Lituânia tem realizado alguns estudos/trechos experimentais que lhe permitiram concluir que as MBT têm comportamento idêntico às misturas produzidas a quente, apesar de apresentarem uma variabilidade ligeiramente superior (Vaitkus *et al.*, 2011). De referir que os primeiros estudos remontam ao Verão de 2008, onde diversos aditivos foram testados, desencadeando novos estudos.

Na Letónia foi realizado um estudo completo em termos de estado da arte, de modo a tentar implementar este tipo de técnicas no país. O autor conclui que existe ainda a necessidade de provar que estas misturas conseguem ter comportamentos considerados adequados, através de estudos feitos *in loco* (Zaumanis *et al.*, 2012a).

A utilização do Sasobit® tem sido altamente documentada, totalizando mais de 100 publicações referentes à sua aplicação, realçando a vantagem de reduzir o consumo de combustível, as emissões e de aumentar o tempo disponível para a aplicação das misturas (Jamshidi *et al.*, 2013).

Num estudo em que avaliam diferentes aditivos para obtenção de temperaturas de fabrico mais baixas, Xiao *et al.* (2012) recorreram a diferentes betumes com aditivos comerciais distintos (Cecabase, Evotherm, Rediset® e Sasobit®), e concluíram que é provocado um decréscimo da viscosidade dos betumes, sendo esta mais visível para os betumes aditivados com Rediset® e Sasobit®.

Uma vez que as temperaturas de fabrico são significativamente mais baixas, surge a questão de como lidar com este tipo de mistura. Bijleveld *et al.* (2012) referem que o uso deste tipo de tecnologia é problemático para os envolvidos, no sentido de haver necessidade de desenvolver mais o conhecimento nesta área.

Ainda no que respeita às misturas temperadas, existe a possibilidade de se aplicarem betumes modificados durante a sua produção, como por exemplo o Azalt ECO². Jain *et al.* (2013) referem que este betume permite melhorar a vida à fadiga das misturas. No entanto, em termos de sensibilidade à água isto não acontece.

Zhao *et al.* (2013) estudaram diversas misturas temperadas produzidas em central com incorporação de material fresado. Na preparação destas misturas recorreram a técnicas de formação de espuma e um aditivo comercial. Ambas as misturas temperadas demonstraram que é possível produzir misturas a temperaturas mais baixas, com idênticas características. Relativamente à resistência à deformação permanente, as misturas com betume-espuma apresentaram melhor comportamento que as restantes.

A utilização de diferentes técnicas para a redução de temperaturas de produção apresenta resultados diferentes relativos às características finais das misturas. Neste sentido, Kavussi e Hashemian (2012) testaram duas tecnologias distintas que incluem a utilização de espuma: na primeira incorporaram a totalidade do ligante sob a forma de betume-espuma e na outra, apenas parte do betume foi incorporado como espuma (cerca de 70% do betume total). Concluíram que primeiro método apresenta mais vantagens, uma vez que, sem qualquer tipo de aditivo, os resultados são idênticos aos da mistura convencional usada para comparação.

Mo *et al.* (2012) estudaram a aplicação de um aditivo químico a misturas convencionais e a misturas com betume modificado com SBS. O aditivo apresenta uma maior influência nos betumes aditivados.

Muitos outros estudos têm vindo a ser desenvolvidos no que respeita à utilização de aditivos para a obtenção de temperaturas de produção mais baixas, os quais são sumariamente indicados no Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Exemplos de estudos desenvolvidos com recurso a aditivos que permitem a produção de MBTs e MBSTs.

Estudo	Técnicas	Temperaturas
Goh <i>et al.</i> (2007)	0,3 e 0,5% de Aspha-min [®]	100 °C e 120 °C (redução de 42 °C em relação à mistura de referência)
Olard e Gaudefroy (2012)	LEA [®] - 3 processos distintos	Temperatura de mistura 95 °C
Rodríguez-Alloza <i>et al.</i> (2013)	Sasobit [®] Asphaltan [®] A Asphaltan [®] B Licomont [®] BS 100	Redução da temperatura visível no estudo, no entanto muito variável de acordo com o aditivo e a percentagem usada
Sengoz <i>et al.</i> (2013)	Zeólita natural Zeólita sintética Aditivo orgânico Aditivo químico	-
Vidal <i>et al.</i> (2013)	Zeólita sintética	-
Oliveira <i>et al.</i> (2012a)	CECABASE [®] RT 945	Redução de 35 °C na temperatura de compactação da MBT
Hamzah <i>et al.</i> (2010)	Sasobit [®]	Redução da temperatura de mistura de 160 para 145 °C
Morea <i>et al.</i> (2012)	Aplicação de dois aditivos do tipo tensioativos	-

O betume-espuma foi também aplicado em misturas a frio, tendo sido apontadas diversas vantagens, nomeadamente (Xu e Hao, 2012):

- Aumento da durabilidade e capacidade de carga;
- Possibilidade de diminuição da quantidade de betume;
- Maior espectro de agregados que poderiam ser usados;
- Processo de mistura energeticamente mais vantajoso;
- Tecnologia mais amiga do ambiente;
- Aumento da trabalhabilidade das misturas.

Reddy *et al.* (2014) apresentaram uma reabilitação em meio urbano com recurso ao betume-espuma a frio, na cidade de Kolkata, na Índia. Segundo os autores, este tipo de técnica aparenta ser uma forte alternativa para pavimentos em serviço, uma vez que os resultados, estruturais e funcionais, foram muito positivos. No que refere ao uso do betume-espuma em misturas betuminosas a frio (MBFs), He e Wong (2007) apresentam um estudo sobre a incorporação de MF de diferentes origens e com percentagens distintas, tendo os autores chegado à conclusão que a percentagem de MF que é introduzida na mistura com betume-espuma bem como o estado de envelhecimento do betume não afeta significativamente os resultados de deformação permanente.

O uso de betume-espuma em estabilização de materiais é preferível por permitir que a compactação seja feita imediatamente após a sua aplicação, não havendo a necessidade de aguardar pela evaporação do excesso de água ou solventes (Ruckel *et al.*, 1983).

Atualmente, no que respeita à estabilização com betume-espuma, existem alguns guias que permitem definir determinadas questões para a sua utilização (Chandra *et al.*, 2013, Gonzales, 2011), bem como uma quantidade significativa de artigos publicados acerca desta temática (Fu e Harvey, 2007), ao contrário do uso do BE em MBT ou MBST. Este aspeto evidencia, de forma geral, um interesse na utilização de BE, seja para a reciclagem a frio *in situ* ou em central (Wang *et al.*, 2009)

A produção das misturas com betume-espuma a temperaturas superiores às do ambiente é um processo ainda menos conhecido, sendo realizada com diferentes abordagens. Por exemplo, alguns autores procedem à preparação das misturas com a adição do filer junto com os restantes agregados, mas outros (Hailesilassie *et al.*, 2015) colocam-no após a injeção do betume. Adicionalmente, os autores concluem que a percentagem de água com que o betume-espuma é produzido não influencia significativamente o comportamento das MBs.

Bieder *et al.* (2012) apresentam um estudo à escala real onde a temperatura de produção da mistura ronda os 115 °C, demonstrando que esta tecnologia poderá ser uma boa alternativa para a produção de misturas a temperaturas mais baixas. De referir que o processo usado para a obtenção da expansão do betume é ligeiramente diferente do que será posteriormente usado no presente estudo.

No que respeita à produção de MBSTs com recurso a BE, Voskuilen *et al.* (2004) apresentam um estudo, cujos resultados não se mostram ser os melhores. Nesse sentido, importa reter a

importância do eventual uso de um aditivo estabilizador de espuma para a produção de misturas betuminosas de acordo com esta tecnologia.

Analisando diferentes utilizações de BE, na Austrália este foi usado para a selagem de fendas nos pavimentos, tendo-se mostrado mais eficiente do que as técnicas convencionais ao fim de alguns anos. No entanto, aquando da sua aplicação, surgiram alguns problemas devido ao fraco conhecimento sobre a técnica (Choi, 2008). Com resultados mais positivos e interessantes, Chomicz-Kowalska *et al.* (2016) apresentam valores de sensibilidade à água idênticos aos obtidos para misturas convencionais, principalmente quando é adicionado um aditivo (FT Wax) ao betume-espuma. Apesar da coerência dos resultados, não é possível fazer uma comparação entre estas e as misturas estudadas, uma vez que a percentagem de betume usada pelos autores é bastante elevada (5,8%).

Atualmente existem alguns estudos comparativos das diversas técnicas de obtenção de MBRTs. Bower *et al.* (2012) apresentam um estudo de comparação entre técnicas com recurso a aditivos (Sasobit® e Aquablack™) e tecnologias de formação de espuma (Gencor® e injeção direta de água), com aplicação em trechos experimentais. Os resultados obtidos, em termos de betumes e de misturas, apresentam algumas discrepâncias sendo, por isso, necessária uma análise mais precisa sobre a influência das técnicas de produção nas propriedades das misturas.

Já Sengoz e Oylumluoglu (2013) comparam o efeito de aditivos de diferentes tipos (químicos, orgânicos e compostos por água), relativamente a uma mistura convencional, no que refere à diminuição de cerca de 10 °C da temperatura de mistura. Apesar dos resultados obtidos serem bastante positivos, a redução da temperatura não é muito significativa.

2.7. Parâmetros de Caracterização do Betume-Espuma

As características habitualmente utilizadas para a avaliação do betume-espuma são a taxa de expansão máxima (*maximum expansion ratio* - ER_m) e o tempo de meia-vida (*half-life* - HL) (Jenkins, 2000).

Estas duas características estão ligadas entre si, uma vez que o tempo de meia-vida é o tempo decorrido entre o momento em que se verifica o valor máximo da taxa de expansão e o momento em que este valor se reduz para metade. A taxa de expansão máxima é a relação entre o máximo volume atingido pelo betume e o volume desse betume sem ser sujeito ao processo de expansão.

Estas características são facilmente visualizáveis uma vez que, através da escala e do recipiente que acompanha o equipamento, é possível realizar uma medição visual, como se apresenta no esquema da Figura 2.18.

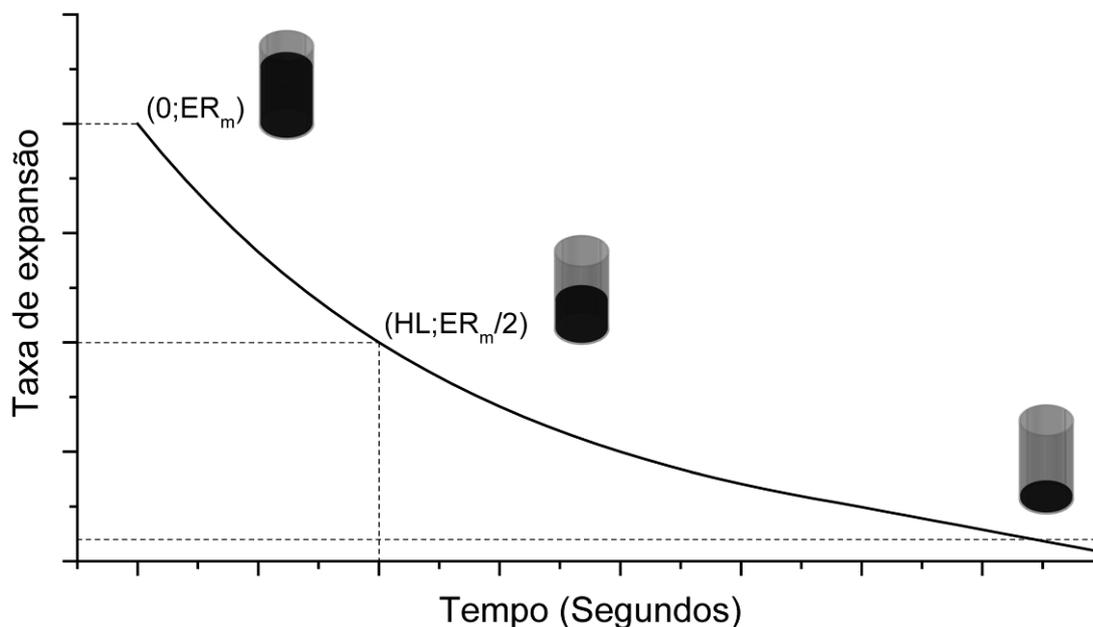


Figura 2.18 – Esquema ilustrativo da evolução do volume do betume-espuma ao longo do tempo.

Apesar de ligados entre si, a ER_m e o HL têm comportamentos contrários, o que obriga a determinar uma combinação de variáveis que permitam os melhores resultados possíveis. Jenkins (2000) refere essencialmente três grandes grupos de fatores que influenciam as características de expansão, nomeadamente o betume, a água usada para a expansão e o equipamento e definições usadas.

O tipo de betume e a sua temperatura influenciam as características do betume-espuma durante o processo de expansão, assim como o tempo de injeção (*spray*) e a utilização de aditivos, sejam eles estabilizadores ou mitigadores de expansão (Saleh, 2007).

Jenkins (2000) refere ainda que aspetos como a quantidade de água, a sua temperatura durante o processo de expansão, a quantidade de moléculas de ar presentes na água e aditivos que possam estar presentes condicionam o comportamento do betume-espuma. Se o equipamento de produção e as respetivas definições se mantiverem constantes, as propriedades finais do betume-espuma serão influenciadas pela pressão da água e do betume, pelas temperaturas do ar e do recipiente usado para colher o betume após expansão, pela humidade relativa existente e pela configuração do bico injetor e da câmara de expansão.

Torna-se importante a caracterização dos parâmetros de expansibilidade do betume, uma vez que, melhores taxas de expansão máxima e tempos de meia-vida conduzem a uma melhor dispersão do betume nas misturas. Um estudo cuidadoso destas características permitirá otimizar a quantidade de betume colocada na mistura final (Fu *et al.*, 2011).

Lesueur *et al.* (2004) analisaram a utilização de recipientes de dimensões distintas de modo a perceber de que forma as condições de fronteira influenciam o comportamento do betume após o processo de expansão. Nesse estudo verificou-se que quer as condições de fronteira (recipiente), quer a temperatura a que este se encontra, influenciam o comportamento do betume após expansão. Embora não fosse o objetivo principal desse estudo, ainda concluíram que o processo de expansão não provoca um envelhecimento significativo no betume.

De uma maneira geral sabe-se que quanto maior a percentagem de água, maior será o valor de ER_m . No entanto, o valor de HL sofre um decréscimo com esse aumento (Figura 2.19). Teoricamente os betumes mais moles, com temperaturas mais altas, apresentaram melhores resultados em termos de expansão (Brennen *et al.*, 1983, Sunarjono, 2008).

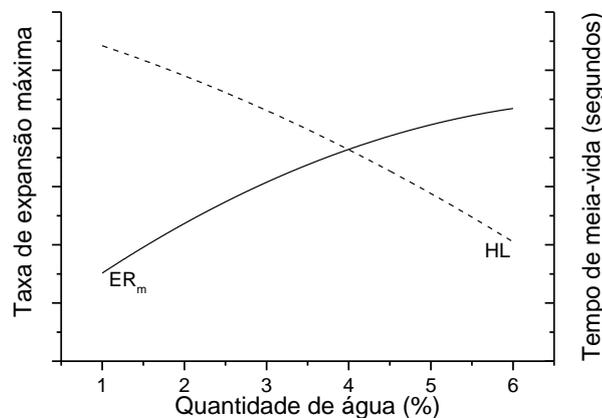


Figura 2.19 – Representação esquemática do comportamento típico dos betumes quando expandidos.

Apesar de se considerar que betumes mais moles apresentam melhores resultados de expansão, isto não deve ser generalizado uma vez que betumes com o mesmo grau de penetração podem apresentar resultados distintos, de acordo com a sua composição química (Barinov, 1990, Martinez-Arguelles *et al.*, 2014).

Para além disso, alguns autores questionam a afirmação de que temperaturas mais elevadas implicam melhores resultados de expansão. De facto, Ruenkraitergsa *et al.* (2004) e He e Lu

(2004) apresentam resultados que refutam esta teoria. He e Lu (2004) analisaram a composição dos betumes e a percentagem de cera que faz parte da sua constituição. Daí concluíram que os melhores resultados de expansão foram conseguidos para o betume com maior percentagem de cera que, por sua vez, não seria o mais mole em termos de penetração.

Koshi *et al.* (2014) referem que a utilização de promotores de espuma permite a formação de uma maior quantidade de bolhas, de menores dimensões, conduzindo à permanência de uma maior quantidade de bolhas na produção da mistura (Figura 2.20).

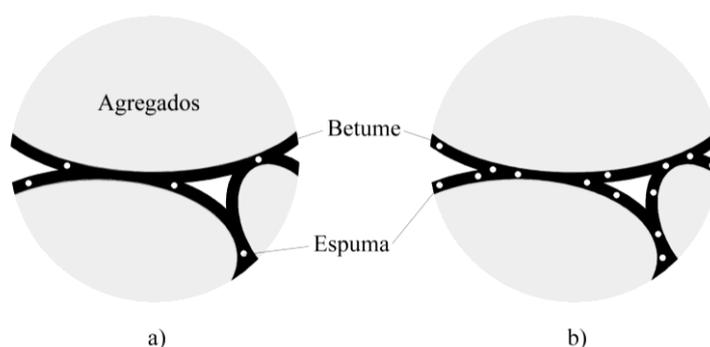


Figura 2.20 – Esquemática da distribuição da espuma na mistura final – a) betume virgem, b) betume aditivado com promotores de espuma (adaptado de Koshi *et al.* (2014)).

Os agentes estabilizadores são por vezes aditivos utilizados para outras finalidades, apesar de apresentarem bons resultados quando adicionados ao betume que é posteriormente sujeito ao processo de expansão. A cera Fischer-Tropsch (FT) demonstrou-se eficiente no aumento quer do HL quer da ER_m (Iwański *et al.*, 2015), apesar de implicar um valor de penetração mais alto.

No que respeita às misturas produzidas com betume-espuma existem algumas questões que são levantadas uma vez que, em teoria, existem problemas ao nível da deformação permanente e da sensibilidade à água (Ali *et al.*, 2013, Shu *et al.*, 2012). No entanto é igualmente referido que a incorporação de MF pode ser benéfica para as MBs, principalmente quanto à sensibilidade à água (Shu *et al.*, 2012).

O betume-espuma foi aceite por diversos países essencialmente para a estabilização de solos. Akeroyd e Hicks (1988) referem a aplicação deste tipo de tecnologia nos Estados Unidos, Austrália, África do Sul e Noruega para esse fim.

2.7.1. Curvas de Decaimento

As representações gráficas da taxa de expansão em função do tempo decorrido após a expansão máxima são designadas por curvas de decaimento. Estas permitem avaliar a estabilidade da espuma de betume ao longo do tempo, após a sua injeção, através da monitorização da redução da taxa de expansão.

Segundo Jenkins, a curva teórica de decaimento tem em conta a taxa de expansão máxima (ER_m) e o tempo de meia-vida (HL), sendo traduzida pela Equação 2.1.

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

Em que:

$ER(t)$ – taxa de expansão no instante t ;

ER_m – taxa de expansão máxima;

HL – tempo de meia-vida;

t – tempo decorrido desde a expansão máxima.

Esta fórmula é posteriormente questionada por Lesueur *et al.* (2004) que provam a impossibilidade da equação do tipo exponencial representar o decaimento inicial verificado devido ao colapso imediato de algumas bolhas de maior dimensão formadas inicialmente. Assim, Lesueur *et al.* (2004) sugerem a Equação 2.2, onde o parâmetro a pode variar entre 0,3 e 1,2 e o valor médio de 0,7 é determinado com base numa regressão linear.

$$ER(t) = \frac{ER_m}{2} \left(\frac{t}{HL} \right)^{-a} \quad (2.2)$$

Em que:

$ER(t)$ – taxa de expansão no instante t ;

ER_m – taxa de expansão máxima;

t – tempo decorrido desde a expansão máxima;

HL – tempo de meia-vida;

a – parâmetro determinado experimentalmente.

Apesar de a Equação 2.1 descrever genericamente o decaimento de um betume-espuma, existem algumas condicionantes que podem originar outro tipo de curvas de decaimento.

Jenkins (2000) refere a existências de seis curvas típicas para diferentes betumes ou condições de produção (Figura 2.21) das quais são, de seguida, apresentadas sucintamente algumas das propriedades.

Expansão Rápida: Decaimento Assintótico (ER:DA)

- Aplicável a vários tipos de betumes que são possíveis de submeter a expansão.
- Condições de expansão do betume iguais ou próximas do ideal.

Expansão Rápida: Decaimento Linear (ER:DL)

- Usualmente aplicável ao decaimento de betume com adição de aditivos estabilizadores de espuma.
- Tempo de meia-vida normalmente superiores ao usuais, ultrapassando os trinta segundos.

Expansão Rápida: Decaimento Rápido (ER:DR)

- Indicativo de betume que permite a expansão, no entanto, não recomendável para a produção de misturas betuminosas.
- Decaimento rápido provocado pela errada percentagem de água aplicada ou pela temperatura de betume demasiado baixa.
- Tempo de meia-vida usualmente muito baixo, inferior a 12 segundos.

Expansão em Patamar: Decaimento Rápido (EP:DR)

- Betume não ideal para aplicação em misturas betuminosas.
- Valores de expansão não muito elevados.
- Percentagem de água abaixo da ideal influenciadora deste tipo de comportamento.

Expansão Lenta: Decaimento Gradual (EL:DG)

- Betume próximo do ideal para ser submetido ao processo de expansão.
- Usualmente referente a betumes com penetrações superiores a 150 ou com aplicação de aditivos estabilizadores de espuma.
- Valores da percentagem de água próximos dos ideais.
- Valores de tempo de meia-vida usualmente altos.
- Decaimento gradual pode assumir diferentes formas, de acordo com o tipo de betume.

Expansão em Patamar: Decaimento em Patamar (EP:DP)

- Aplicável à maioria dos betumes não modificados.
- Distribuição dos colapsos e dos patamares das bolhas que se formam no betume.
- Origem dos patamares pode influenciar significativamente os valores do tempo de meia-vida.

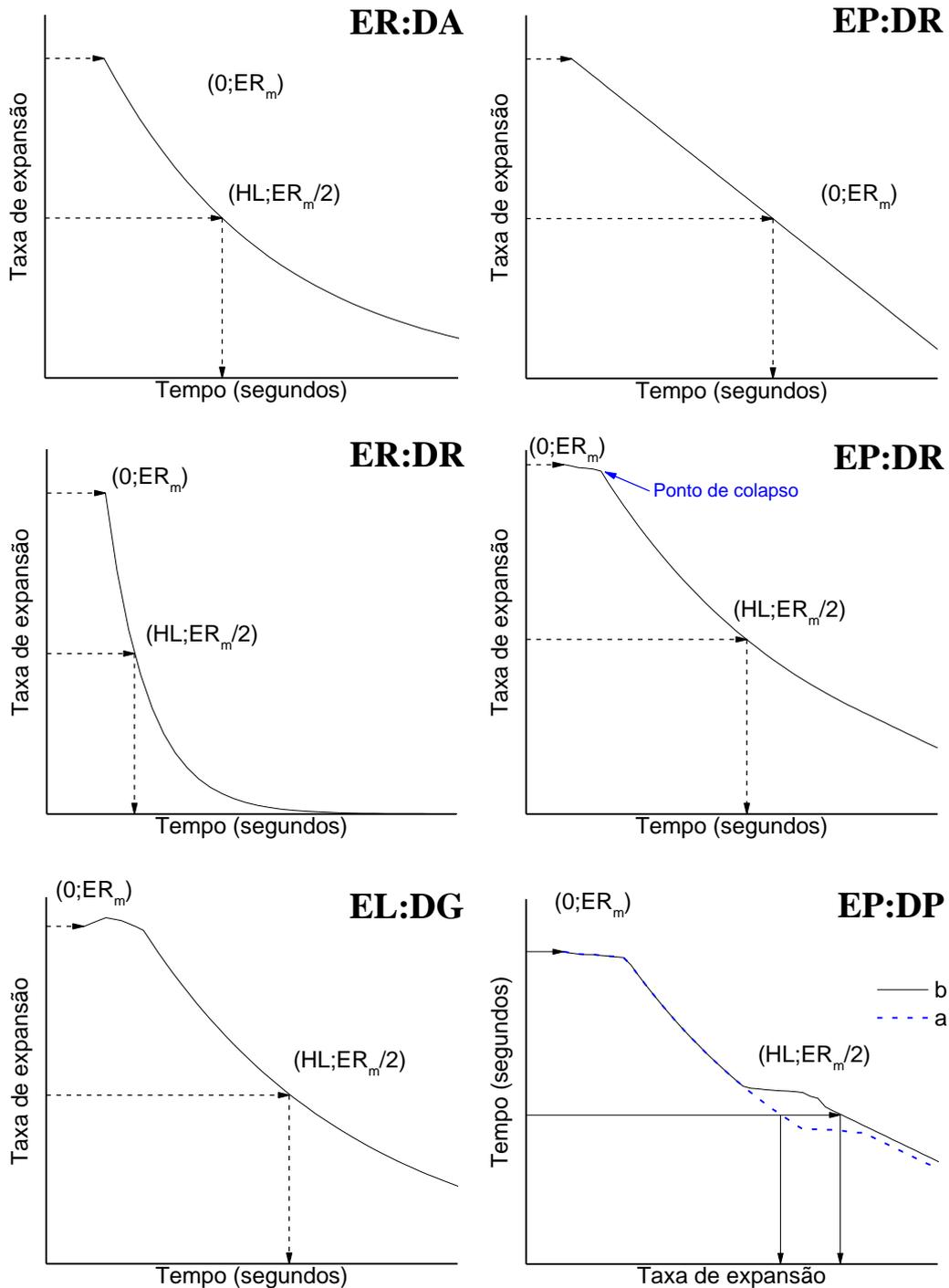


Figura 2.21 – Curvas de decaimento típicas para betume-espuma (adaptado de Jenkins (2000)).

Ainda neste contexto, existem algumas situações onde não é possível traçar a curva associada, normalmente, a um betume composto por algum componente que não permite a expansão do mesmo, nomeadamente, um óleo de silicone.

Apesar das curvas de decaimento serem bastante importantes para compreender o comportamento do betume após o processo de expansão, o procedimento para a obtenção desta curva envolve tecnologia específica.

Desde logo é importante evitar o contacto entre o betume e o equipamento de medição e, conseqüentemente, a interferência no processo de decaimento. Neste sentido, He e Wong (2006) utilizaram uma câmara de vídeo para acompanhar o decaimento do betume e trataram, posteriormente, os respetivos dados. No sentido de não ser necessária a visualização de imagens e tornada mais simples a análise, (Newcomb *et al.*, 2015) utilizaram duas técnicas de medição distintas: uma com recurso a um sensor ultrassónico e a outra utilizando um laser.

2.7.2. Índice de Espuma

Ainda no que respeita a parâmetros que permitem caracterizar o betume-espuma, Jenkins (2000) desenvolveu um índice designado por índice de espuma (*Foam Index* – FI) que relaciona as duas características essenciais do betume-espuma acima referidas e facilita a escolha da sua melhor combinação. Este parâmetro é obtido pelo cálculo da área abaixo da curva de decaimento do betume (até ao valor mínimo de 4), quando esta é representada num gráfico onde se relaciona a taxa de expansão com o tempo.

Após ter realizado uma análise de viscosidade a vários betumes espumados, Jenkins (2000) concluiu que apenas é possível obter valores de viscosidade adequados para a produção da mistura para valores de taxa de expansão superiores a 4. Assim sendo, definiu este valor como a taxa de expansão mínima (ER_{min}).

Jenkins (2000) refere que existe uma taxa de expansão (ER_a), superior à mencionada quando se observa a expansão do betume, que deve ser tida em consideração aquando do cálculo do FI. A taxa de expansão real (ER_a) representa a extensão da curva já traçada pela ER_m e pelo HL, dando origem a uma variável c que relaciona o ER_m e o ER_a . Neste caso, Jenkins (2000) apresenta uma tabela (Quadro 2.6) em que o valor de ER_a é dado em função do tempo de meia-vida, do tempo de *spray* (t_s) e da taxa de expansão máxima.

Quadro 2.6 – Relação entre o valor de ER_a e o valor de ER_m

t_s (segundos)	ER_m	ER_a				
		HL = 2s	HL = 5s	HL = 15s	HL = 30s	HL = 60s
1	5	6,02	5,39	5,13	5,06	5,03
	15	18,05	16,17	15,38	15,19	15,10
	25	30,05	26,95	25,64	25,32	25,15
5	5	11,50	7,20	5,66	5,30	5,20
	15	34,40	21,48	16,98	16,00	15,50
	25	57,20	35,80	28,30	26,60	25,80
10	5	21,34	9,88	6,38	5,66	5,33
	15	63,98	29,64	19,14	16,98	15,97
	15	106,63	49,39	31,89	28,30	26,61

Após análise dos valores apresentados por Jenkins (2000) é possível determinar os valores de c e de ER_a por extrapolação, de forma simples e eficiente. Importa referir que c é o coeficiente entre ER_a e ER_m .

Sendo o FI a área abaixo da curva de decaimento do betume, obtêm-se duas áreas distintas a calcular (Figura 2.22), assumindo a forma da curva de decaimento teórica.

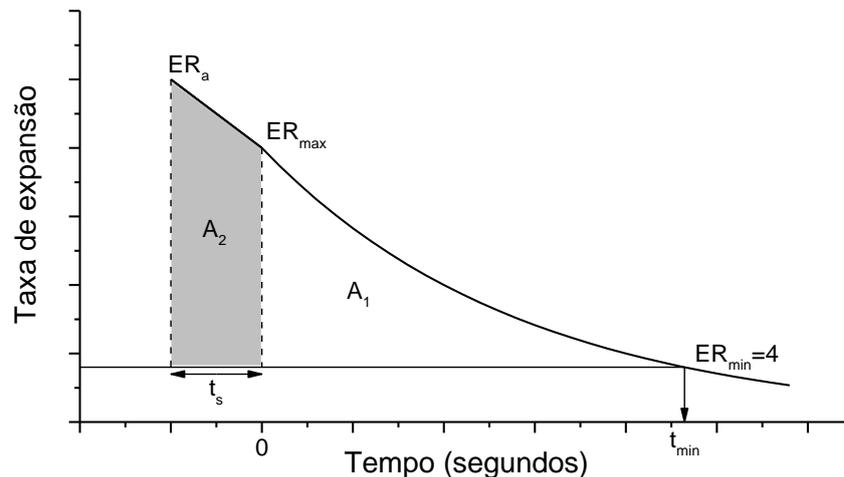


Figura 2.22 – Esquema de cálculo para o FI (adaptado de Jenkins (2000)).

Assim sendo, A_1 seria dado pela diferença entre o integral da equação de $ER(t)$ e a área do retângulo de altura ER_{min} entre as abscissas 0 e t_{min} (Equação 2.3, cujo desenvolvimento resulta na Equação 2.4).

$$A_1 = \int_0^{t_{\min}} ER_m \times e^{-\frac{\ln(2)}{HL} \cdot t} \cdot dt - ER_{\min} \times t_{\min} \quad (2.3)$$

$$A_1 = \frac{-ER_m \times HL}{\ln(2)} \left(e^{-\frac{\ln(2)}{HL} \cdot t_{\min}} - 1 \right) - ER_{\min} \times t_{\min} \quad (2.4)$$

Em que:

ER_m – taxa de expansão máxima;

HL – tempo de meia-vida;

t – tempo decorrido desde a expansão máxima;

ER_{\min} – taxa de expansão mínima;

t_{\min} – tempo correspondente à taxa de expansão mínima.

Por sua vez, A_2 é representado pela área de um trapézio, sendo, mais uma vez necessário subtrair a área abaixo do ER_{\min} (Equação 2.5).

$$A_2 = \frac{ER_a + ER_m}{2} \times t_s - ER_{\min} \times t_s \quad (2.5)$$

Em que:

ER_a – taxa de expansão máxima real;

ER_m – taxa de expansão máxima;

t_s – tempo de *spray*;

ER_{\min} – taxa de expansão mínima.

No que respeita à área A_2 , a fórmula apresentada por Jenkins (2000) apresenta uma incoerência uma vez que não refere a limitação de ER_{\min} . No entanto, caso se pretenda comparar alguns valores dados como referência para o FI, será importante usar a fórmula desenvolvida inicialmente (Equação 2.6).

$$FI = \frac{-HL}{\ln 2} \left(4 - ER_m - 4 \ln \left(\frac{4}{ER_m} \right) \right) + \left(\frac{1+c}{2c} \right) \times ER_m \times t_s \quad (2.6)$$

Tendo em atenção a correção referida anteriormente, o cálculo do índice de espuma deveria ser realizado com base na Equação 2.7.

$$FI = \frac{-HL}{\ln 2} \left(4 - ER_m - 4 \ln \left(\frac{4}{ER_m} \right) \right) + \left(\left(\frac{1+c}{2c} \right) \times ER_m - 4 \right) \times t_s \quad (2.7)$$

Segundo Jenkins (2000), o FI não foi desenvolvido para substituir os parâmetros HL e ER_m , mas sim, para os complementar. De facto, este parâmetro poderá servir como referência para avaliar a adequação de determinado betume para uma dada utilização.

No que respeita às características determináveis através da curva de decaimento, outros autores sugerem um parâmetro diferente (*k-value*), conforme se pode verificar em alguns estudos já publicados (Newcomb *et al.*, 2015, Zhang *et al.*, 2015). O parâmetro *k-value* corresponde a um rácio de colapso das bolhas semi-estáveis, obtido com base em parte da curva de decaimento e na Equação 2.8, em que *c* e *e* são constantes e *k* é o rácio de colapso das bolhas semi-estáveis (*k-value*).

$$ER(t) = 1 + ce^{-kt} \quad (2.8)$$

Sendo o *k-value* obtido apenas na parte de rebentamento das bolhas semi-estáveis, deve ser considerado o valor do tempo superior a 10 segundos, tendo em conta o tipo de curva obtida (Figura 2.23).

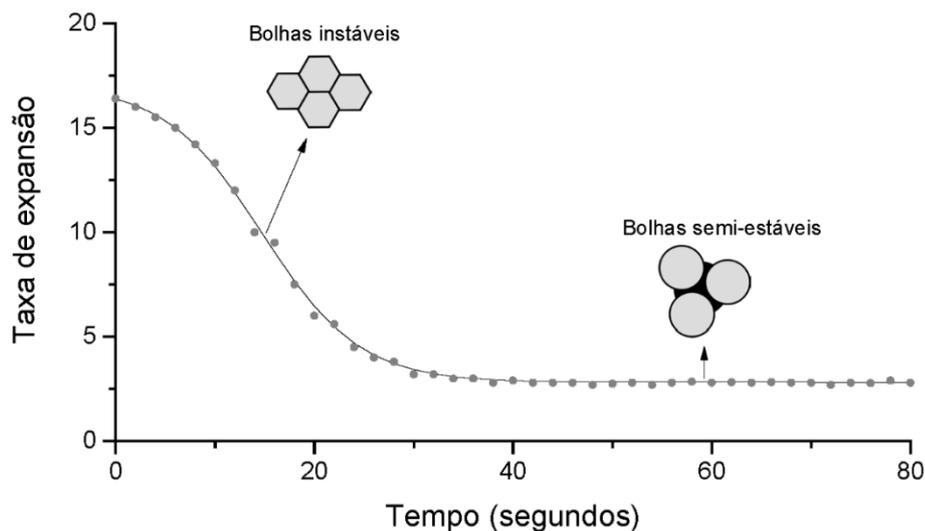


Figura 2.23 – Estabilidade e forma das bolhas de betume-espuma em função do tempo (adaptado de Newcomb *et al.* (2015)).

Depois de apresentados alguns dos principais trabalhos que foram compilados durante a revisão bibliográfica efetuada neste trabalho de doutoramento, que incidiram em especial sobre a reciclagem e a utilização de betume-espuma, em seguida vai iniciar-se a descrição dos materiais e métodos efetivamente utilizados neste trabalho.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais Utilizados no Estudo

3.1.1. Agregados

Os agregados utilizados durante a maior parte deste estudo são de origem granítica, tendo sido extraídos na pedreira de Fornelo, Vila do Conde, onde se situava a central betuminosa da empresa devidamente equipada para produção de misturas recicladas. A exceção foi o filer comercial que é de origem calcária. Os agregados de maiores dimensões foram fornecidos nas seguintes frações: pó 0/4, brita 4/10 e brita 8/14.

No que respeita às características dos agregados, apresenta-se no Quadro 3.1 a massa volúmica e o volume de vazios do filer comercial seco compactado e, em seguida, no Quadro 3.2, as principais propriedades requeridas para os agregados graníticos.

Quadro 3.1 – Características do filer comercial.

Característica	Norma de ensaio	Filer comercial
Massa volúmica (Mg/m ³)	EN 1097-7	2,71
Volume de vazios no ensaio <i>Rigden</i> (%)	EN 1097-4	31

Quadro 3.2 – Características dos agregados graníticos.

Característica	Norma de ensaio	Pó 0/4	Brita 4/10	Brita 8/14
Coefficiente Los Angeles (%)	EN 1097-2	-	-	14
Coefficiente micro-Deval (%)	EN 1097-1	-	-	5
Índice de achatamento (%)	EN 933-3	-	10	5
Azul-de-metileno (g/kg)	EN 933-9	3,3	-	-
Absorção de água (%)	EN 1097-6	0,3	0,6	0,5

Os agregados e o filer fornecidos cumprem os requisitos para serem utilizados em misturas betuminosas, o que era expectável dado que os mesmos têm marcação CE. O volume de vazios do filer compactado é relativamente baixo em comparação com os valores de outros autores (Antunes, 2013), o que, em conjugação com a baixa absorção de água dos agregados, deve dar origem a uma menor necessidade de betume para produção das misturas. Os agregados mais grossos são bastante resistentes ao desgaste e à fragmentação e têm um bom índice de forma, e os agregados mais finos não têm plasticidade.

Na Figura 3.1 são apresentadas as curvas granulométricas do filer e dos vários agregados utilizados, as quais serão essenciais para posteriormente se proceder à formulação (ajuste no fuso granulométrico pretendido) das misturas betuminosas produzidas.

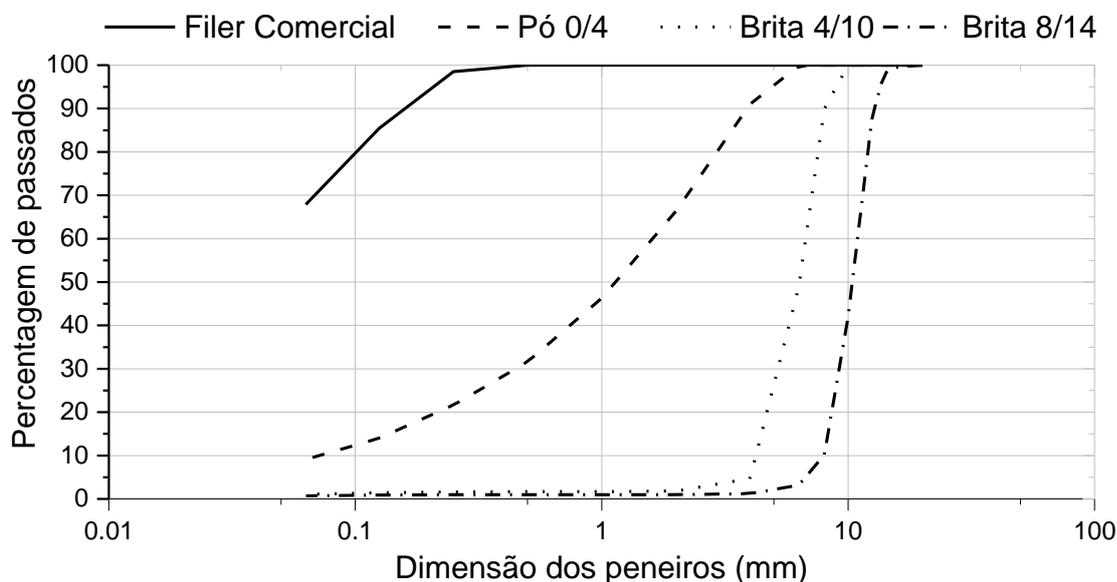


Figura 3.1 – Fuso granulométrico dos agregados usados na mistura.

De referir que a maior parte do estudo foi realizada com estes agregados, mas pontualmente foram utilizados outros agregados para verificar a influência dos mesmos no desempenho das misturas. Assim que oportuno, serão apresentadas as características desses agregados.

3.1.2. Material Fresado

O material fresado (MF) utilizado neste estudo foi fornecido pela empresa envolvida no desenvolvimento deste trabalho, e resultou de fresagens realizadas na camada de desgaste do pavimento da autoestrada A3. Para produção de misturas recicladas com maior taxa de

reciclagem, essa empresa adquiriu uma central betuminosa descontínua que permite introduzir o material fresado em duas fases (uma parte mais grossa do MF no final do tambor secador e outra mais fina e mais rica em betume diretamente no misturador). Assim, a empresa utilizou um classificador industrial para separar o material fresado nas frações 6/12 e 0/6, que vão ser referidas neste trabalho como fração grossa (FG) e fração fina (FF) do material fresado, respetivamente (Figura 3.2). O material foi fornecido separado nestas frações para representar de forma mais próxima o procedimento que se pretendia utilizar em central.

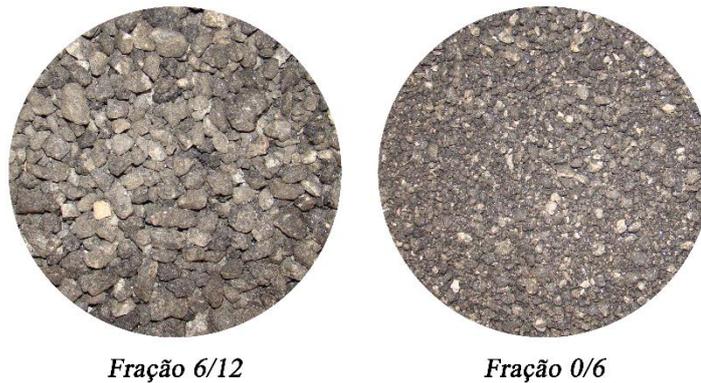


Figura 3.2 – Aspeto das frações grossa (6/12) e fina (0/6) do material fresado utilizado.

As duas frações do material fresado serão caracterizadas posteriormente, quer ao nível do betume que as compõem, quer ao nível da sua granulometria (métodos descritos na Secção 3.2, e resultados apresentados na Secção 4.1), de modo a que a sua incorporação em misturas betuminosas recicladas seja adequadamente controlada durante a fase de formulação.

3.1.3. Betumes

Devido à grande variedade de misturas betuminosas que foram estudadas neste trabalho, houve necessidade de utilizar vários betumes adaptados a cada fase do estudo que se estava a desenvolver (por exemplo, ao aumentar a taxa de reciclagem devem utilizar-se betumes mais moles). No entanto, os diferentes betumes utilizados neste trabalho foram fornecidos sempre pela mesma empresa (Galp) para se procurar reduzir essa variável no estudo.

Inicialmente, ao estudar as misturas betuminosas a quente com rejuvenescedores, foram utilizados betumes com durezas distintas, sendo que cada um deles foi utilizado para um fim específico. Por ser um dos betumes mais utilizados em trabalhos correntes de pavimentação, o betume 35/50 foi utilizado para produzir uma mistura convencional sem material fresado e sem

rejuvenescedores, a qual servirá de referência para comparação com as restantes misturas avaliadas nesta fase do trabalho. Para produção das misturas recicladas com 30 e 50% de MF foi utilizado um betume 70/100, que é bastante mais mole para compensar a maior dureza do betume existente no material fresado. Além deste betume mais mole, ainda foi estudada a necessidade de adicionar rejuvenescedores para se conseguir obter um ligante equivalente ao betume 35/50 utilizado na mistura de referência. Ao estudar os ligantes para otimização da percentagem de aditivo rejuvenescedor a aplicar (Secção 3.7) também se utilizou um betume 10/20, o qual foi submetido a um envelhecimento adicional para simular o betume envelhecido existente no material fresado (como descrito mais em pormenor na Secção 4.3.1). Obviamente, este betume não foi utilizado de forma direta na produção de misturas betuminosas, mas desempenha um papel importante no estudo ao reduzir a quantidade de betume que foi necessário recuperar do MF. Caso contrário, seria inviável ter suficiente betume recuperado para realizar essa parte do estudo.

Posteriormente, ao estudar as misturas betuminosas com betume-espuma, optou-se por utilizar os betumes 50/70, 70/100 e 160/220, dado que era importante avaliar a variação do comportamento destes betumes com diferente viscosidade quando sujeitos ao processo de expansão que ocorre na produção de betume-espuma. Não foi possível utilizar o betume 35/50 nesta fase do estudo porque a sua expansão, durante a produção de betume-espuma, era quase nula. Assim, utilizou-se o betume 50/70 espumado para produção de uma mistura betuminosa temperada sem material fresado. Os betumes 70/100 e 160/220 espumados foram utilizados nas misturas betuminosas recicladas temperadas, respetivamente com 30% e 50% de material fresado. Mais uma vez, a utilização de betumes com elevada penetração aparece associada às misturas com maiores taxas de reciclagem, de forma a compensar a maior viscosidade do betume existente no material fresado.

3.1.4. Aditivos Rejuvenescedores

Ao estudar as misturas betuminosas recicladas a quente foram utilizados, no total, quatro aditivos rejuvenescedores, denominados de R1 a R4. Dois desses aditivos são comercializados de uma empresa Sul Coreana e são ainda pouco conhecidos no nosso mercado, nomeadamente, o RapCap K (R1) e o RapCap S (R2). No entanto, essa empresa mostrou-se interessada neste trabalho e associou-se ao mesmo para avaliar o potencial dos seus aditivos.

O aditivo Iterlene ACF 1000 (R3) é um aditivo comercial com ampla divulgação, e já foi estudado anteriormente para a utilização em misturas com 100% de material fresado (Silva *et al.*, 2012).

Por último, o óleo de rícino (R4) é um óleo de origem vegetal renovável e de elevado interesse industrial (Mutlu e Meier, 2010), devido à capacidade de renovação deste aditivo, à possibilidade de ser obtido em grandes quantidades, e por ser um aditivo biodegradável e amigo do ambiente (Karak *et al.*, 2009). Na Figura 3.3 é apresentado o aspeto geral dos quatro aditivos rejuvenescedores.

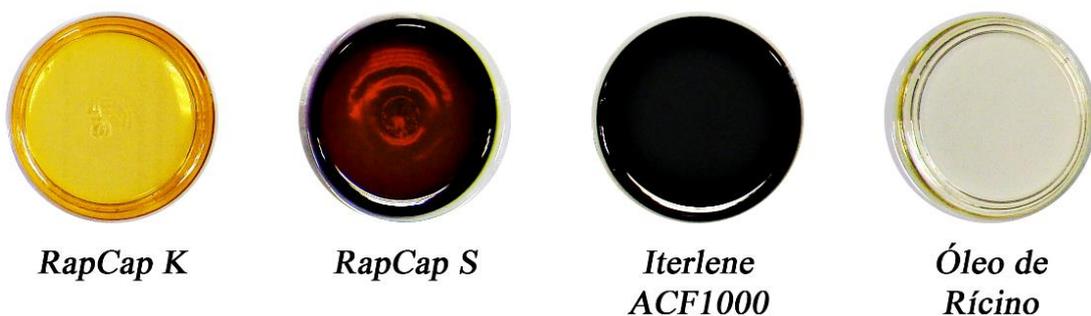


Figura 3.3 – Aditivos rejuvenescedores utilizados no estudo.

A aplicação do óleo de rícino é justificada pela presença do ácido ricinoleico. Este componente tem alta polarização, e permitirá, *a priori*, a dissolução dos asfaltenos presentes no betume envelhecido (Nayak e Sahoo, 2015). De referir que o aditivo Iterlene ACF 1000 é único para o qual se conhece um valor de referência para a percentagem em que deve ser aplicado no betume para rejuvenescimento, que deve andar no intervalo de 0,4 a 0,6% (Iterchimica, 2010).

3.1.5. Aditivos Estabilizadores de Espuma

Os aditivos utilizados para produção do betume-espuma tem como objetivo a estabilização do processo de decaimento do betume após expansão, implicando um maior tempo de meia-vida sem influenciar, de forma significativa, a taxa de expansão máxima. Houve interesse em utilizar estes aditivos para melhorar a estabilidade das espumas de betume (os tempos de meia-vida dos betumes não eram elevados) e para se conhecer melhor o seu efeito.

Durante o estudo das misturas com betume-espuma foram utilizados quatro aditivos estabilizadores (Figura 3.4) distintos, denominados de E1 a E4, que variam quanto à sua composição e funcionalidade.

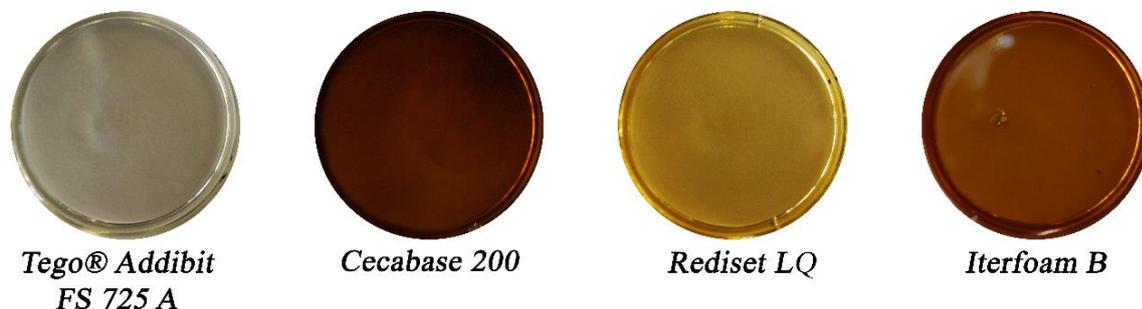


Figura 3.4 – Aditivos utilizados para o estudo do betume-espuma.

O Tego® Addibit FS 725 (E1) é um aditivo estabilizador de espuma (Evonik Industries AG, 2012), apresentando como benefícios o aumento de expansão e o significativo incremento do tempo de meia-vida, mas sem alterar as propriedades básicas do betume base.

O Cecabase® 200 (E2) é um aditivo promotor de adesividade (Arkema Group Social Media Hub, 2016), avaliando-se neste trabalho o seu potencial como estabilizador de betume-espuma. Uma menor adesividade entre o betume e os agregados tem sido associada às técnicas para a redução das temperaturas de fabrico (Mogawer *et al.*, 2011), e procurou-se desta forma avaliar se um aditivo promotor de adesividade também poderia ser estabilizador de espuma.

O Rediset® LQ (E3) é um aditivo para produção de misturas temperadas, que pode ser utilizado em percentagens distintas de acordo com a forma de aplicação, ou com os problemas que se pretendem resolver. Habitualmente é utilizado numa percentagem entre 0,3 e 0,5% do peso do betume (AkzoNobel, 2015). Neste trabalho procurou verificar-se a sua aplicabilidade como estabilizador na produção de betume-espuma.

Tal como o aditivo E1, o Iterfoam B (E4) também é um aditivo estabilizador de espuma. No entanto, este aditivo é especialmente adequado para aplicação em misturas a frio. A sua dosagem recomendada varia entre 0,4 e 0,6% do betume (Iterchimica, 2011).

Depois de descritos todos os materiais utilizados neste estudo, em seguida serão descritos todos os métodos de caracterização e ensaio utilizados nas diferentes fases do trabalho, e que iniciaram na caracterização do material fresado.

3.2. Métodos de Caracterização do Material Fresado

A caracterização do material fresado obriga à separação dos seus constituintes, o betume e os agregados, que em seguida podem ser estudados de forma isolada. Assim, a recuperação do betume presente no material fresado é essencial para a sua posterior caracterização. Esta caracterização foi efetuada para ambas as frações do MF.

3.2.1. Recuperação do Betume

A recuperação do betume é um processo muito complexo que pode ser subdividido em três fases distintas. Numa primeira fase é realizada a separação entre o betume e os agregados, com recurso a uma centrifugadora e a um solvente (neste trabalho utilizou-se tolueno). Este processo permite efetuar a lavagem dos agregados do material fresado, dado que o betume que os envolvia vai ser dissolvido pelo tolueno, que depois é filtrado para evitar a passagem de material sólido. Apesar disso, no fim desta primeira etapa resulta uma solução onde o solvente, o betume e alguns agregados muito finos se encontram misturados.

Por conseguinte, surge a necessidade de uma segunda fase, para separação entre os agregados finos e a parte líquida da solução, com recurso a uma centrifugadora de precisão. Para que os finos se separem da restante matéria líquida de forma mais rápida, este equipamento deve atingir uma velocidade de 3000 rotações por minuto. A última fase consiste na separação entre o solvente e o betume, utilizando um evaporador rotativo (Figura 3.5), de acordo com o procedimento indicado na norma EN 12607-1 (CEN, 2007c).

3.2.2. Determinação da Percentagem de Betume

O método usado para a determinação da percentagem de betume presente no material fresado tem por base a incineração do ligante e o cálculo da diferença entre os pesos do material fresado antes e após a incineração, de acordo com a norma EN 12697-39 (CEN, 2012d).

Para a incineração do betume, uma amostra solta de MF é colocada em tabuleiros e submetida a uma temperatura que ronda os 540 °C. A esta temperatura o betume é totalmente queimado, o que não acontece com os agregados, visto que a sua temperatura de incineração é mais elevada. Após a queima do betume, o peso da amostra estabiliza, concluindo-se assim o processo de incineração.



Figura 3.5 – Evaporador rotativo utilizado para a separação entre o solvente e o betume.

Contudo, e visto existir uma parte dos agregados mais finos e leves que são expelidos pelo sistema de exaustão da mufla, juntamente com o betume incinerado, fez-se uma redução de 0,15% na percentagem de betume obtida. Esta correção resultou numa calibração prévia realizada em laboratório com agregados do mesmo tipo.

3.2.3. Determinação da Curva Granulométrica dos Agregados

Para a determinação da curva granulométrica dos agregados presentes no material fresado, o material usado é o resultante do processo de queima do MF efetuado para determinação da percentagem de betume. A determinação da granulometria consiste na peneiração desse material, fazendo-o passar através duma série de peneiros com abertura maior para peneiros com abertura menor, tal como referido na norma EN 933-1 (CEN, 2012a).

Este processo permite verificar qual a fração de material que passa na dimensão correspondente à abertura de cada peneiro, cujo cálculo se efetua com base no peso de material retido nos diversos peneiros. A partir deste ensaio é possível desenhar a curva granulométrica do material fresado, cujo conhecimento é fundamental para se proceder mais tarde à formulação ou ajuste da curva granulométrica das misturas betuminosas recicladas de acordo com os valores especificados no Caderno de Encargos para essas misturas.

3.3. Métodos de Caracterização dos Betumes

Como já se referiu, inicialmente foi necessário caracterizar o betume recuperado do material fresado. Depois foi necessário caracterizar os betumes ao estudar os aditivos rejuvenescedores. Finalmente, foi necessário caracterizar os betumes utilizados nas misturas com betume-espuma. Assim, nas diferentes fases deste trabalho foi necessário proceder à caracterização de betumes de acordo com os métodos de ensaio a seguir descritos.

3.3.1. Ensaio “Anel e Bola”

O ensaio tradicionalmente designado por “Anel e Bola” (Figura 3.6) permite a determinação do ponto de amolecimento do betume segundo a norma EN 1427 (CEN, 2007b). Desta forma, este ensaio avalia a temperatura limite de serviço a partir da qual o betume apresenta uma consistência demasiado baixa para garantir uma estabilidade suficiente ao ser aplicado em misturas betuminosas.



Figura 3.6 – Detalhe do ensaio “Anel e Bola”.

Neste ensaio coloca-se uma esfera de aço, que exerce um determinado peso, sobre cada amostra de betume a ser ensaiada, estando estas contidas em dois anéis metálicos. Este dispositivo é colocado em água, que vai ser aquecida gradualmente a uma determinada razão. Devido ao aquecimento, o betume vai reduzindo continuamente a sua viscosidade, até que se torna visível o seu escoamento ou deformação. Quando a amostra de betume com a esfera tocam na base do suporte metálico regista-se a temperatura da água. Esta é denominada de temperatura “Anel e Bola” e é o resultado final deste ensaio.

3.3.2. Ensaio de Penetração a 25 °C

O ensaio de penetração a 25 °C (Figura 3.7) tem elevada importância por estar diretamente relacionado com a classificação dos betumes utilizada em Portugal e nos restantes países Europeus. Este ensaio, cujo processo se encontra normalizado pela norma EN 1426 (CEN, 2007a), permite determinar indiretamente a viscosidade do betume ou a sua resistência à deformação a uma temperatura serviço média em que este vai estar a atuar no pavimento.

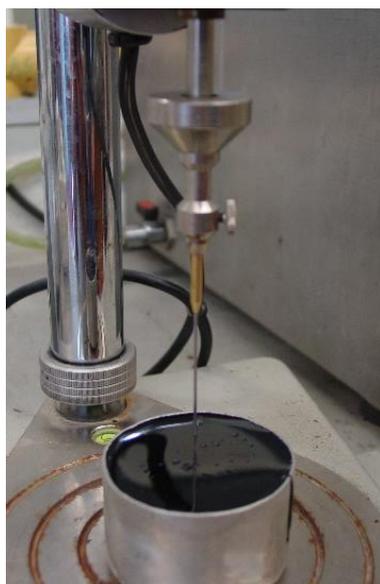


Figura 3.7 – Detalhe do ensaio de penetração a 25 °C.

De forma sucinta, no ensaio de penetração coloca-se uma agulha, com um peso de 100 gramas, sobre uma amostra de betume. Esta agulha é libertada durante 5 segundos para se verificar qual a profundidade a que a mesma penetrou no betume, medida em décimas de milímetro. Neste ensaio devem ser feitas 3 medições em pontos diferentes de cada amostra de betume, sendo o resultado final a média desses 3 valores.

3.3.3. Ensaio de Viscosidade Dinâmica

O ensaio de viscosidade dinâmica ou rotacional foi realizado de acordo com a norma EN 13302 (CEN, 2010), e utiliza o viscosímetro rotacional de “Brookfield” (Figura 3.8) para determinar a viscosidade do betume ou a sua resistência ao escoamento a uma temperatura de referência. Contudo, para se conhecer a viscosidade do betume nas condições de produção e compactação, neste estudo optou-se por repetir este ensaio a várias temperaturas.



Figura 3.8 – Equipamento de ensaio para determinação da viscosidade dinâmica.

Neste ensaio é colocado um prumo cilíndrico (*spindle*) em rotação, a uma velocidade constante, dentro de uma amostra de betume fluído que está inserida num recipiente cilíndrico de diâmetro ligeiramente superior ao prumo. De referir que devido ao betume ter de estar fluído neste ensaio, normalmente é impossível a realização de ensaios a temperaturas inferiores a 100 °C. A resistência que o betume oferece ao escoamento entre o prumo em movimento e o recipiente fixo vai obrigar a aplicar um determinado esforço de torque no prumo para manter a velocidade de rotação constante, que é proporcional à viscosidade do betume. O equipamento utilizado neste ensaio tem uma célula de carga com precisão suficiente para avaliar pequenas variações no esforço de torque, e correspondentes variações da viscosidade do betume.

Para avaliar a evolução da viscosidade para diferentes patamares de temperatura, esta foi habitualmente sujeita a incrementos sucessivos de 10 °C, desde um valor inicial de 100 °C até atingir 180 °C, com base no procedimento descrito por Silva *et al.* (2009).

3.3.4. Ensaio de Reologia

Para a determinação das propriedades reológicas dos betumes foi utilizado um reómetro do tipo DSR (*Dynamic Shear Rheometer*), tal como apresentado na Figura 3.9. Este equipamento permite aplicar deformações cíclicas de torção a pequenas amostras de betume, a uma frequência de 10 rad/s e a diferentes temperaturas, enquanto mede o torque aplicado para atingir essas deformações. Ao conhecer o esforço de torque e correspondente deformação de torção é possível determinar diversas propriedades reológicas do betume. Este ensaio foi realizado com base na norma EN 13302 (CEN, 2010).



Figura 3.9 – Equipamento e pratos do ensaio reológico realizado no DSR.

Uma vez que se pretendeu ensaiar os betumes numa gama alargada de temperaturas, dos 19 até aos 88 °C, foi necessário utilizar duas configurações de ensaio diferentes correspondentes à utilização de dois pratos de diâmetro diferente: para temperaturas mais baixas utilizou-se um prato de 8 mm para uma espessura da amostra de betume (*gap*) de 2 mm, e para temperaturas mais altas utilizou-se um prato de 25 mm para uma espessura de betume de apenas 1 mm. Através deste ensaio é possível determinar diversas propriedades reológicas do betume, tais como o módulo complexo (G^*) e o ângulo de fase (δ), permitindo, o módulo elástico e viscoso e a viscosidade. Ainda é possível determinar a temperatura elevada do grau de desempenho ou PG (*performance grade*) do betume, de acordo com o sistema de classificação americana.

3.3.5. Ensaio de Envelhecimento RTFOT

O ensaio de envelhecimento do betume RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) também é bastante importante para avaliação da durabilidade do mesmo em serviço. Este ensaio permite prever a forma como o betume se comporta depois de submetido ao processo de envelhecimento a curto prazo, sendo o seu procedimento estipulado pela norma EN 12067-1 (CEN, 2007c).

Durante este ensaio, uma película de betume muito fina é submetida ao efeito de temperaturas elevadas e de um jato de ar que, em conjunto, aumentam o processo de oxidação do betume. Permite prever o envelhecimento do betume aquando do fabrico e da compactação das misturas betuminosas, recorrendo a um equipamento específico. Durante o ensaio, o betume perde parte das suas componentes voláteis provocando uma perda de massa e, conseqüentemente, uma redução dos valores de penetração e um aumento da temperatura de amolecimento. A perda de massa e a variação das propriedades do betume são o principal indicador do envelhecimento do betume, e devem apresentar valores reduzidos.

3.4. Determinação das Temperaturas de Fabrico das Misturas

3.4.1. Misturas Betuminosas Recicladas a Quente

Numa primeira fase deste trabalho estudaram-se misturas betuminosas recicladas a quente, com percentagens crescentes de incorporação de material fresado e com possível inclusão de aditivos rejuvenescedores. Nesta fase utilizou-se como referência uma mistura betuminosa a quente convencional, sem incorporação de material fresado, que foi produzida com um betume 35/50. Ao utilizar este betume, e de acordo com a norma EN 12697-35, a temperatura de produção desta mistura deve ser aproximadamente 165 °C, o que implicou o aquecimento dos agregados a uma temperatura de 175 °C.

Quanto às misturas betuminosas recicladas a quente com incorporação de material fresado, o estudo das temperaturas de aquecimento dos diferentes materiais foi efetuado de forma a garantir a obtenção duma temperatura final de mistura/produção semelhante à utilizada na mistura de referência.

Nas Figura 3.10 e Figura 3.11 são apresentadas as diferentes combinações de temperaturas usadas, respetivamente para as misturas com 30% e 50% de MF, bem como a temperatura final de mistura/produção que foi obtida.

Betume	FG	Agregados	FF	Mistura	
		180 °C		130 °C	Mistura 1
	100 °C	200 °C		135 °C	Mistura 2
150 °C		230 °C	Temperatura ambiente	163 °C	Mistura 3
	210 °C	210 °C		161 °C	Mistura 4

Figura 3.10 – Estudo das temperaturas a utilizar nas misturas recicladas a quente com 30% de material fresado.

Betume	FG	Agregados	FF	Mistura	
		180 °C		120 °C	Mistura 1
	100 °C	200 °C		130 °C	Mistura 2
150 °C		230 °C	Temperatura ambiente	142 °C	Mistura 3
	230 °C	230 °C		152 °C	Mistura 4
	100 °C	230 °C	50 °C	145 °C	Mistura 5

Figura 3.11 – Estudo das temperaturas a utilizar nas misturas recicladas a quente com 50% de material fresado.

Nestas combinações procurou replicar-se o processo de produção da central betuminosa da empresa parceira neste trabalho, que incorpora o fresado fino (FF) diretamente no misturador à temperatura ambiente, e o fresado grosso (FG) na parte final do tambor secador (o que implica uma temperatura igual ou ligeiramente inferior à dos agregados). O betume foi aquecido a 150 °C por ser a temperatura de aquecimento adequada para o betume 70/100 utilizado em ambas as misturas recicladas a quente. Assim, essencialmente alterou-se a temperatura de aquecimento dos agregados e, por consequência, do fresado grosso, até encontrar uma combinação de temperaturas que permitisse atingir a temperatura de produção desejada.

No final deste estudo determinou-se que para as misturas com 30% de material fresado era necessário utilizar uma temperatura de 210 °C para aquecimento dos agregados novos e da fração grossa do MF, enquanto para a mistura com 50% de material fresado essa temperatura deve ser de 230 °C.

Estas temperaturas elevadas são uma consequência da incorporação duma quantidade significativa de fresado fino à temperatura ambiente, que na mistura com 50% de MF não permitiu atingir uma temperatura de produção mais próxima da desejada (dado que se optou por não aquecer os agregados e o FG acima de 230 °C por questões de segurança).

3.4.2. Misturas Betuminosas Recicladas com Betume-Espuma

No que respeita ao estudo das misturas com betume-espuma, e uma vez que se pretende que estas sejam produzidas a temperaturas mais baixas, recorreu-se ao ensaio de compactabilidade de modo a verificar qual a redução de temperatura que pode ser conseguida. Assim, para cada uma das misturas com betume-espuma em estudo (sem MF; com 30% de MF; com 50% de MF), inicialmente efetuou-se uma mistura a quente sem betume-espuma que serviu de referência.

Em seguida, as mesmas misturas foram produzidas com betume-espuma, tendo-se feito reduções sequenciais de 20 °C na temperatura de aquecimento dos agregados e do fresado grosso (no caso das misturas com MF), enquanto se comparavam os resultados obtidos com os das misturas a quente de referência.

No caso da mistura sem material fresado produziu-se a mistura a quente a 160 °C, por ser a temperatura adequada para o betume 50/70 utilizado nessa mistura, e depois produziram-se misturas com betume-espuma a 160, 140 e 120 °C. No caso da mistura com 30% de material fresado, a mistura a quente foi realizada com temperaturas de aquecimento dos agregados e da fração grossa de 210 °C, enquanto as misturas com betume-espuma foram produzidas a 210, 190, 170 e 150 °C. Finalmente, a mistura com 50% de material fresado foi produzida a quente aquecendo os agregados e a fração grossa a 230 °C, produzindo-se em seguida misturas equivalente com betume-espuma às temperaturas de 230, 210, 190 e 170 °C.

O ensaio de compactabilidade consiste na verificação do adensamento das misturas quando submetidas ao processo de compactação. Neste caso, a compactabilidade é medida aquando da compactação de um provete cilíndrico no compactador de Marshall, ao longo de 200 pancadas em apenas um dos lados dos provetes, tal como descrito na norma EN 12697-10 (CEN, 2001).

Com este ensaio é possível avaliar a evolução das características volumétricas das misturas ao longo do tempo, ao serem sujeitas a um processo compactação, que neste caso é efetuado pela aplicação de pancadas sucessivas que incrementam a energia de compactação aplicada aos provetes. As características volumétricas são determinadas pela variação da altura do provete, cujo controlo é efetuado com um LVDT – *Linear Variable Differential Transformer* (Figura 3.12).



Figura 3.12 – LVDT utilizado para medir o adensamento da mistura no ensaio de compactabilidade.

Através da variação do adensamento (volume de vazios) com a energia de compactação (número de pancadas) podem ser retiradas conclusões sobre a resistência à compactação da mistura. No entanto, neste estudo utilizou-se o ensaio de compactabilidade em especial para selecionar a temperatura de produção mais adequada para as misturas com betume-espuma.

3.5. Formulação das Misturas Betuminosas

3.5.1. Composição Granulométrica das Misturas Betuminosas

No que respeita à composição granulométrica das misturas betuminosas que serão usadas neste estudo, teve-se em atenção que se pretende obter uma mistura do tipo AC 14 (BB) que possa ser utilizada quer em camada de ligação, quer em camada de desgaste. Este pressuposto foi de encontro à necessidade de estudar uma mistura bastante utilizada no mercado nacional, e que tivesse a flexibilidade de poder ser utilizada em múltiplas camadas. Os limites para o fuso granulométrico desta mistura são os indicados na Figura 3.13, que representa os valores impostos no Caderno de Encargos (EP, 2014).

De referir que este fuso granulométrico foi o utilizado para todas as misturas produzidas ao longo do trabalho, com ou sem material fresado na sua composição. No entanto, dado que se impunha a percentagem de MF pretendida nas misturas recicladas (e também a quantidade dividida pelas suas frações fina e grossa), as percentagens em que os agregados novos foram incorporados tiveram de ser ajustadas em função da composição do material fresado.

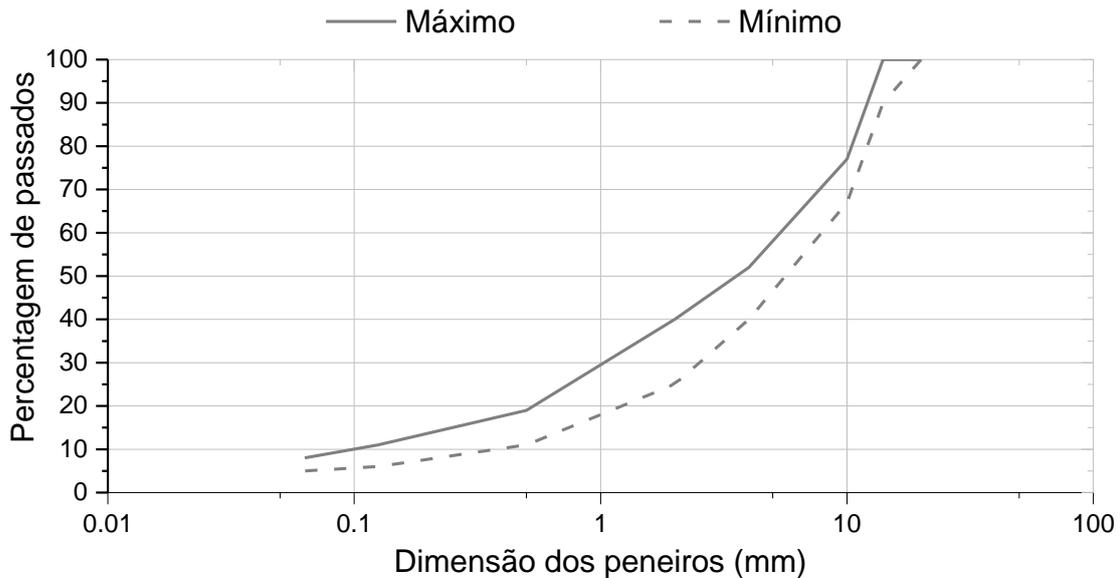


Figura 3.13 – Fuso granulométrico da mistura AC 14 (BB) avaliada neste trabalho.

3.5.2. Método de Formulação e Ensaio Marshall

Para se determinar a percentagem ótima de betume das misturas betuminosas com diferentes taxas de reciclagem utilizou-se o método de formulação Marshall, tal como referido no anexo nacional da norma EN 13108-1. De acordo com este método, é necessário fazer cinco conjuntos de três provetes no compactador de impacto de Marshall, em que cada conjunto é obtido a partir de amassaduras produzidas uma percentagem de betume diferente (com uma variação de 0,5% entre si). De referir que idealmente se deve ter dois conjuntos acima e abaixo da percentagem “ótima teórica”, que pode ser calculada com base na superfície específica dos agregados.

De referir ainda que é necessário ter em consideração qual a percentagem de betume existente nas frações fina e grossa do material fresado, e qual a quantidade em que cada um destes materiais é adicionado nas misturas recicladas (com 30 ou 50% de MF), de forma a ajustar a quantidade de betume novo a adicionar para se conseguir atingir cada uma das percentagens de betume a estudar no método de formulação Marshall destas misturas. Assim, a formulação das misturas recicladas é um pouco mais complexa do que a realizada para a mistura sem MF.

Os diversos provetes produzidos durante a formulação são caracterizados volumetricamente, e em seguida são ensaiados com base no ensaio de estabilidade Marshall (determinando-se a estabilidade ou força máxima e correspondente deformação). O ensaio de estabilidade Marshall é um ensaio destrutivo realizado a 60 °C, no qual os provetes cilíndricos são sujeitos a uma

força de compressão diametral no estabilômetro Marshall para se obter a força máxima resistente (estabilidade) e respetiva deformação.

As características volumétricas dos vários provetes, e os resultados obtidos no ensaio de estabilidade Marshall, permitem determinar a percentagem ótima de betume de cada mistura betuminosa em estudo. O método atual refere que a percentagem ótima de betume corresponde à média de três percentagens de betume para as quais: i) a baridade aparente é máxima; ii) a estabilidade é máxima; iii) o volume de vazios corresponde ao valor desejado para a mistura em estudo, que neste caso é 4%.

3.6. Métodos para a Caracterização Volumétrica das Misturas

3.6.1. Ensaio de Baridade Aparente

A baridade aparente (BA) de cada provete pode ser obtida por vários métodos, tal como preconizado na norma EN 12697-6 (CEN, 2012b). Para este estudo, no qual se está a avaliar uma mistura fechada, optou-se pela utilização do método B preconizado nessa norma. Assim, neste método faz-se a pesagem a seco do provete, que em seguida é colocado dentro de água durante meia hora, de modo a ficar saturado, voltando a pesar-se o provete neste momento, mas desta vez submerso em água. Por último, após uma secagem rápida da sua superfície externa do provete, este é novamente pesado fora de água. A relação entre o peso seco e a diferença entre o peso saturado com superfície seca e o peso submerso, ponderado por um fator que é condicionado pela temperatura da água, permite determinar o valor da baridade aparente.

3.6.2. Ensaio de Baridade Máxima Teórica

A determinação da baridade máxima teórica (BMT) das misturas é realizada com recurso a um picnómetro de vácuo, de acordo com a norma EN 12697-5 (CEN, 2009). Neste ensaio a mistura utilizada não se encontra compactada, pois pretende avaliar-se qual o volume ocupado pela mistura solta dentro do picnómetro, sem que haja influência de ar ou vazios que existem nos provetes compactados.

Neste ensaio, a mistura solta é colocada dentro dum picnómetro, onde posteriormente é colocada água antes de se aplicar vácuo ao picnómetro. O vácuo permite que todos os vazios

entre partículas sejam preenchidos por água, e assim apenas o volume ocupado pela mistura é contabilizado. Mais uma vez existe a necessidade de controlar a temperatura da água que envolve a mistura para contabilizar o seu efeito no cálculo da BMT.

3.6.3. Determinação do Volume Vazios

O volume de vazios (V_v) é uma das características volumétricas com maior relevância para se garantir um adequado comportamento das misturas betuminosas, e o seu valor é obtido a partir da baridade aparente (BA) e da baridade máxima teórica (BMT), com base na Equação 3.1.

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

3.7. Metodologia de Otimização da Percentagem de Aditivos

3.7.1. Aditivos Rejuvenescedores

De modo a otimizar a percentagem de aditivo rejuvenescedor a adicionar às misturas betuminosas recicladas a quente (com 30 ou 50% de MF), numa fase inicial foi necessário verificar se a adição do betume 70/100 ao betume presente no material fresado seria suficiente para que o betume final resultante fosse equivalente ao betume 35/50 utilizado na mistura de referência.

Assim, inicialmente foi necessário determinar qual a proporção entre o betume novo a adicionar e o betume já existente no MF que vai permitir obter a percentagem de betume desejada (valor este conhecido após formulação) para as duas misturas recicladas a estudar (Equação 3.2). Para conhecer a percentagem de betume existente no MF, foi necessário determinar anteriormente qual a percentagem de betume existente em cada fração do MF (fina e grossa), bem como a quantidade em que cada uma destas frações devem ser utilizadas (Equação 3.3) nas misturas recicladas com 30% (20% FF; 10% FG) ou 50% (30% FF; 20% FG) de material fresado.

$$PB_{Mistura\ final} = PB_{Material\ Fresado} + PB_{BN} \quad (3.2)$$

$$PB_{Material\ Fresado} = PB_{FF} \times QM_{FF} + PB_{FG} \times QM_{FG} \quad (3.3)$$

Em que:

$PB_{Mistura\ final}$ – Percentagem de betume pretendida na mistura final;

$PB_{Material\ Fresado}$ – Percentagem de betume existente no material fresado;

PB_{BN} – Percentagem de betume novo a adicionar;

PB_{FF} – Percentagem de betume presente na fração fina do MF;

QM_{FF} – Quantidade de material fresado da fração fina a adicionar à mistura final;

PB_{FG} – Percentagem de betume presente na fração grossa do MF;

QM_{FG} – Quantidade de material da fração grossa a adicionar à mistura final.

Ao efetuar os cálculos anteriores para as misturas recicladas em estudo, conclui-se que as proporções de betume novo e envelhecido que melhor simulam o betume existente nas misturas recicladas finais são as apresentadas na Figura 3.14.

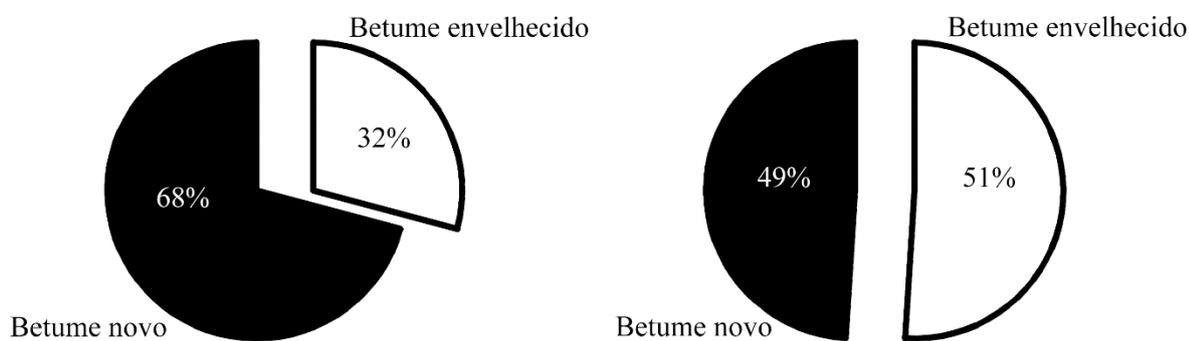


Figura 3.14 – Proporções dos betumes novo e envelhecido existentes nas misturas com 30% de material fresado (à esquerda) e com 50% de material fresado (à direita).

Dado que o estudo inicial da quantidade de rejuvenescedor a adicionar foi realizado apenas com betumes, foi necessário definir o tipo de ligante a utilizar para simular o betume envelhecido existente no MF. Tal como se referiu na Secção 3.1.3, numa primeira fase utilizou-se um betume 10/20 sujeito a um processo de envelhecimento para simular o betume existente no MF, uma vez que a recuperação do betume do MF é um processo muito moroso.

Assim, juntou-se o betume novo (70/100) e envelhecido (10/20 envelhecido) nas proporções que se determinou existir nas misturas recicladas com 30 e 50% de MF, e avaliou-se se o betume

final resultante apresentava características idênticas às do betume 35/50 da mistura de referência. Caso não se consiga atingir esse objetivo apenas com utilização do betume 70/100, então foram adicionadas percentagens crescentes de diferentes aditivos rejuvenescedores.

O processo de rejuvenescimento do betume consistiu em juntar, primeiramente, o betume envelhecido (10/20 envelhecido) com o betume 70/100. Quando esta mistura atingiu a temperatura de 160 °C, adicionou-se a quantidade pretendida de rejuvenescedor. Depois, esta mistura de materiais foi mantida à temperatura de 160 °C durante 10 minutos, a uma velocidade de 230 rpm, para permitir uma maior homogeneidade do betume.

Após ensaiar os betumes sem rejuvenescedores, foi possível verificar que a mistura reciclada com 30% de MF não necessita de aditivos rejuvenescedores para atingir o objetivo pretendido. Contudo, a mistura reciclada com 50% de MF tem de utilizar um rejuvenescedor para que o betume final possa ser idêntico ao betume 35/50 de referência. Nesse sentido, para avaliar qual o tipo e quantidade de rejuvenescedor a utilizar, foram produzidos vários ligantes de acordo com o processo de rejuvenescimento apresentado na Figura 3.15.

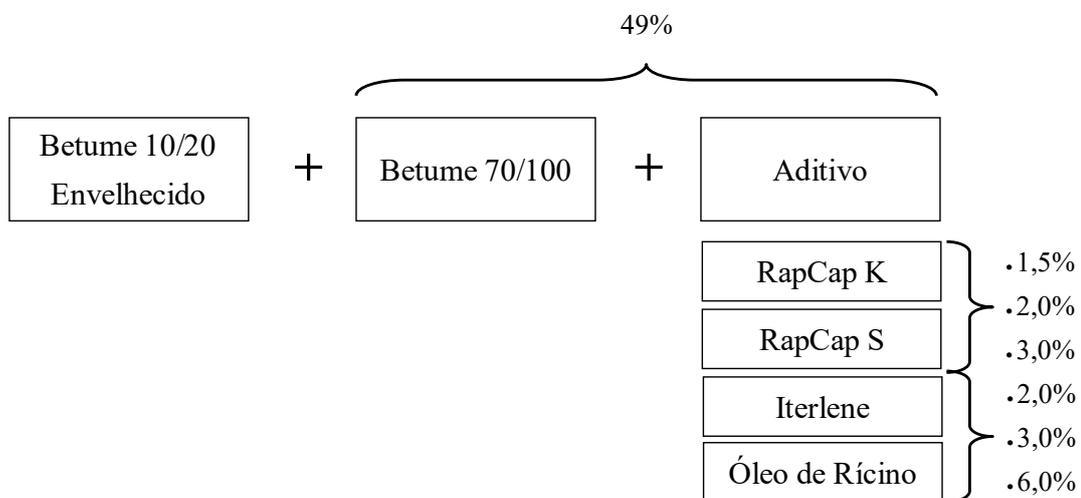


Figura 3.15 – Esquema do processo de rejuvenescimento do betume com diferentes aditivos.

De salientar que o aditivo rejuvenescedor, juntamente com o betume novo, deverá representar sempre 49% do ligante existente nesta mistura, e a percentagem de aditivo é indicada em função do total de betume (e não apenas em função do betume novo). Na fase de produção da mistura betuminosa reciclada, o rejuvenescedor terá de ser adicionado apenas ao betume novo, sendo que a proporção entre a quantidade de aditivo e betume novo terá de ser mantida (o que implica uma percentagem de rejuvenescedor mais elevada).

Depois de efetuar o estudo completo para determinação da percentagem e tipo ideal de aditivos rejuvenescedores a aplicar na mistura reciclada, recorrendo o betume 10/20 envelhecido para simular o betume existente no MF, será feita uma verificação dos resultados obtidos com recurso a betume efetivamente recuperado do MF. Isso permitirá confirmar a percentagem ideal de aditivo a utilizar na mistura reciclada com 50% de MF.

Finalmente, considerou-se importante verificar qual o efeito que o rejuvenescedor, devido à sua maior volatilidade, pode ter no envelhecimento a curto prazo do betume, com base no ensaio RTFOT já descrito.

3.7.2. Aditivos Estabilizadores de Espuma

Dado que ainda há pouco conhecimento acerca dos aditivos estabilizadores de betume-espuma, optou-se por analisar, de forma distinta, diversos aditivos. Assim, após terem sido analisados três betumes de diferente viscosidade (mas com a mesma origem) quanto à sua expansibilidade, optou-se por utilizar o betume mais viscoso (50/70) para estudo dos aditivos estabilizadores de espuma, dado que este betume apresentava piores características ao ser espumado.

O ativo E1 foi estudado de forma mais pormenorizada, por ser o mais indicado para esta aplicação, utilizando três percentagens deste aditivo (0,1, 0,2 e 0,3%) para efetuar injeções de betume-espuma às temperaturas de 160 e 170 °C. Como a temperatura de 160 °C proporcionou melhores resultados, os restantes aditivos ensaiados unicamente a esta temperatura. Em resumo, o Quadro 3.3 apresenta as percentagens avaliadas para os quatro aditivos em estudo.

Quadro 3.3 – Percentagens de aditivos estabilizadores utilizadas no estudo do betume-espuma.

Aditivo	Percentagem de aditivo (%)	
	Utilizada	Recomendada
E1	0,1; 0,2 e 0,3	0,25
E2	0,4	-
E3	0,1; 0,3 e 0,5	0,3 a 0,5
E4	0,2; 0,4 e 0,6	0,4 a 0,6

Duma forma geral procurou utilizar-se as percentagens de aditivo recomendadas pelos fornecedores, ou percentagens inferiores para reduzir os custos com os aditivos. A exceção foi o aditivo E2, que foi utilizado para garantir melhor adesividade entre o betume-espuma e os

agregados, cuja percentagem foi a recomendada para esse objetivo. Com este aditivo procurou essencialmente avaliar-se a possibilidade de manter/melhor a expansibilidade com um aditivo promotor de adesividade, solucionando assim duas possíveis necessidades da mistura.

3.8. Metodologia de Produção e Caracterização do Betume-Espuma

Para a produção do betume-espuma, em laboratório, foi utilizado um equipamento específico para esse fim, nomeadamente uma Wirtgen WLB 10 S (Figura 3.16) que permite reproduzir, em contexto laboratorial, as condições de produção de betume-espuma existentes num equipamento usado em escala real (Wirtgen, 2008).



Figura 3.16 – Equipamento laboratorial para a produção de betume-espuma.

Este equipamento é relativamente complexo e permite o controlo/definição de diversos parâmetros para a produção do betume-espuma (Figura 3.17), tais como a definição isolada da temperatura de cada um dos componentes do equipamento, a pressão de ar a utilizar, bem como a quantidade de água a adicionar, cujo ajuste tem de ser feito manualmente (Figura 3.18).



Figura 3.17 – Parâmetros a indicar ao equipamento de produção de betume-espuma.



Figura 3.18 – Ajuste da quantidade de água a ser usada para a produção de betume-espuma.

De salientar que embora todos os parâmetros anteriores tenham de ser necessariamente definidos antes de realizar injeções de betume-espuma, o equipamento utiliza algumas componentes de escala industrial (por exemplo, sistemas de bombagem do betume, resistências para aquecimento) que dificultam o controlo rigoroso do processo de produção de betume-espuma ao trabalhar com pequenas quantidades, como é habitual ao efetuar estudos laboratoriais. Um dos exemplos reside na dificuldade em controlar com bastante rigor a quantidade de betume-espuma injetado na produção das misturas betuminosas, o que originou pequenas flutuações na percentagem de betume final dessas misturas.

Isso obrigou a ter um cuidado especial na verificação da composição dessas misturas, como se poderá observar nos resultados apresentados no Capítulos 5 e 6. Apesar disso, este equipamento é aquele que demonstra ter melhores resultados a nível laboratorial, sendo utilizado em quase todos os estudos de investigação com betume-espuma.

3.8.1. Determinação das Propriedades de Expansibilidade do Betume-Espuma

Para a determinação das propriedades de expansibilidade do betume-espuma, o equipamento vem acompanhado por um recipiente de tamanho definido e uma escala (Figura 3.19), que são padronizados, e que permitem a medição das propriedades de expansão (taxa de expansão máxima e tempo de meia-vida) através de observação visual. De referir que a utilização desta escala exige, necessariamente, a injeção de 500 g de betume-espuma, uma vez que a mesma foi desenvolvida para essa mesma quantidade.



Figura 3.19 – Balde e escala associados ao equipamento Wirtgen WLB 10 S para medição das características de expansibilidade.

Dado que a observação humana é mais suscetível a erros, que podem originar uma maior variação dos resultados obtidos, optou-se por realizar sempre as medições da expansibilidade com dois operadores, sendo posteriormente considerada uma média dos valores observados pelos mesmos. Ainda no sentido de reduzir ao máximo a variabilidade dos resultados obtidos, para cada combinação de parâmetros em estudo (quantidade de água, betume e temperatura) foram realizadas três injeções distintas e considerada a média dos respectivos resultados.

Tal como se referiu no Capítulo 2, as propriedades de expansão (taxa de expansão máxima e tempo de meia-vida) medidas de acordo com o processo acima referido, também podem ser utilizadas para determinar o índice de espuma (FI) que integra ambas as propriedades num único valor que pode caracterizar o betume-espuma. Para a seleção de ligantes adequados para a produção de betume-espuma a utilizar em misturas betuminosas com incorporação de material fresado, Jenkins (2000) refere que o valor de FI deverá ser 180. Tendo por base este valor, bem como a Equação 2.7 e o Quadro 2.6 (para um tempo de *spray* de 5 e 10 segundos), foi possível definir uma área (a sombreado na Figura 3.20) dentro da qual os resultados da taxa de expansão (ER_a ou ER_m) e de tempo de meia-vida (HL) de um determinado betume-espuma poderão ser considerados adequados para garantir uma boa trabalhabilidade nas fases de aplicação e compactação deste tipo de misturas betuminosas recicladas (Abreu *et al.*, 2017). O limite mínimo de 8 estipulado para ER_m ou HL teve como base as indicações de Jenkins (2000).

A representação da Figura 3.20 será utilizada na Secção 5.3 para determinar quais os betumes-espuma, e respetivas condições de produção, que devem ser aplicadas para posterior produção de misturas recicladas. Apesar de ser possível realizar esta representação quer para ER_m quer para ER_a , neste estudo apenas será utilizado o gráfico de ER_m (por ser a propriedade que se mede diretamente no ensaio), para o tempo de *spray* mais adequado (geralmente 10 s).

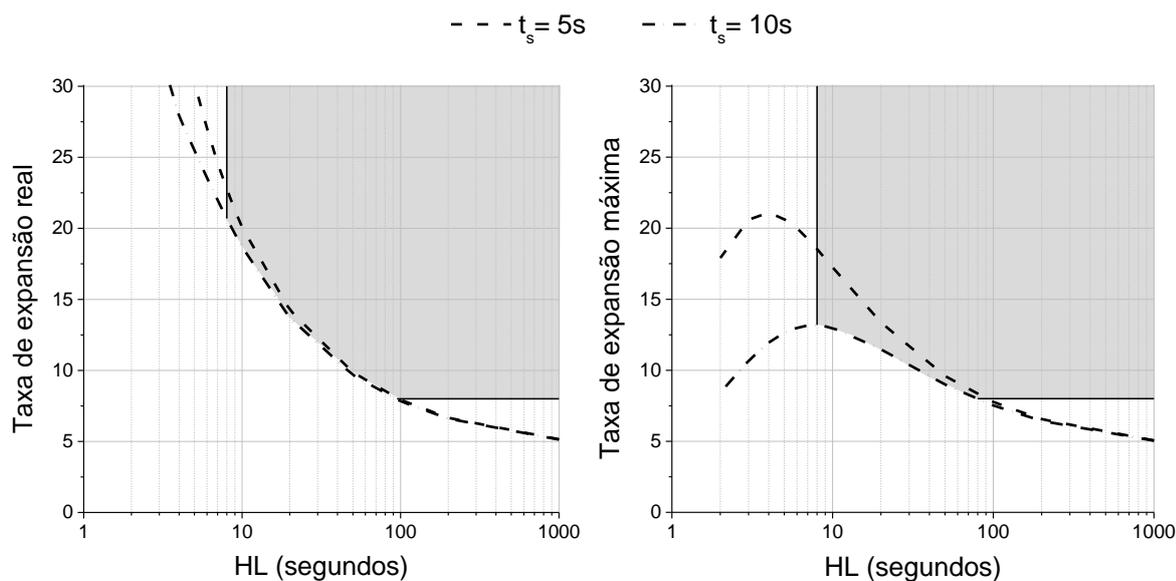


Figura 3.20 – Determinação da relação adequada entre o tempo de meia-vida e a taxa de expansão para a produção de betume-espuma a utilizar em misturas com incorporação de MF (Abreu *et al.*, 2017).

3.8.2. Determinação das Curvas de Decaimento

Para determinar as curvas de decaimento dos betumes foi necessário determinar, em contínuo, a variação do volume de betume-espuma após atingir a taxa de expansão máxima. Esta medição é complexa, uma vez que a superfície espelhada do betume dificulta a utilização de equipamentos típicos de medição, sendo necessário verificar de que forma é que estas questões poderiam ser ultrapassadas.

Newcomb *et al.* (2015) apresentam duas soluções distintas para efetuar este tipo de medição: uma consiste na utilização de um sensor ultrassónico, e a outra no uso de um laser. No entanto, esse autor refere que a utilização do laser, para medição, seria preferível por exigir a utilização de um sistema de equipamentos menos complexo.

Assim, neste estudo optou-se pelo uso de um sensor do tipo laser, que permite a medição da variação da altura de betume dentro da lata durante o processo de decaimento. Este equipamento foi colocado como se esquematiza na Figura 3.21. O equipamento laser utilizado foi um Keyence IL 2000, que permite a medição entre 1000 e 3500 mm, tendo-se optado por colocar o mesmo a uma distancia de cerca de 1,0 m do betume. Foram obtidas leituras a cada 2 ms de modo a determinar as curvas de decaimento que representam cada betume-espuma estudado, tal como referido por Abreu *et al.* (2017).

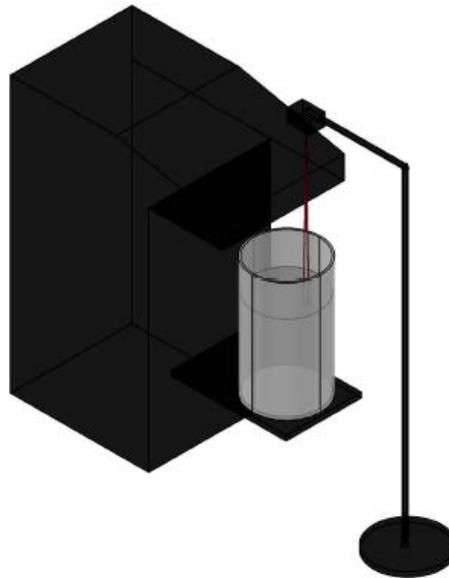


Figura 3.21 – Esquema do laser colocado para determinar as curvas de decaimento do betume-espuma.

3.9. Métodos de Caracterização Mecânica das Misturas Betuminosas

A última fase de estudo das diversas misturas betuminosas avaliadas neste trabalho foi a sua caracterização mecânica, que é essencial para se garantir uma elevada durabilidade e um adequado desempenho em serviço.

O ensaio de sensibilidade à água foi utilizado numa fase inicial de estudo prévio para seleção das misturas a estudar de forma mais pormenorizada, ou para seleção das condições ideais de produção das misturas. A aplicação deste ensaio numa fase inicial relaciona-se com a boa capacidade que o mesmo apresenta para detetar potenciais problemas de durabilidade das misturas menos promissoras, e com a maior facilidade na sua execução.

Em seguida, e apenas para as misturas seleccionadas na fase anterior, foram efetuados ensaios para avaliação da resistência à deformação permanente, do módulo de rigidez e da resistência ao fendilhamento por fadiga, tal como se descreve em seguida.

3.9.1. Ensaio de Sensibilidade à Água

Para efetuar o ensaio de sensibilidade à água são necessários seis provetes de dimensões idênticas, que são compactados com 75 pancadas de cada lado no compactador de Marshall. Seguidamente, é necessário agrupá-los em dois grupos distintos, de três provetes cada, com

baridades aparentes e altura médias idênticas. Dos dois grupos formados, um deles é mantido seco e à temperatura ambiente, enquanto o outro grupo é imerso em água a 40 °C durante pelo menos 68 horas, e no máximo 72 horas. Em seguida a temperatura da água é reduzida para 15 °C e os provetes ficam submersos mais 2 horas. Os provetes secos também são colocados a 15 °C ao ar, tal como especificado EN 12697-12 (CEN, 2008). Após todo o processo de condicionamento em água ou ao ar, os vários provetes são ensaiados à tração indireta a uma temperatura de ensaio de 15 °C, no equipamento da Figura 3.22, de forma a avaliar a resistência à tração indireta (ITS) de acordo com a norma EN 12697-23.



Figura 3.22 – Equipamento para realização de ensaios de tração indireta.

Após realizar o ensaio em todos os provetes procedeu-se ao cálculo da razão entre os valores médios de resistência à tração indireta dos provetes imersos e dos provetes secos, denominada de resistência conservada em tração indireta (ITSR). Este valor permite avaliar se a mistura em estudo não é muito sensível à água.

3.9.2. Ensaio de Resistência à Deformação Permanente

Para a caracterização da resistência à deformação permanente das misturas betuminosas existem diversos ensaios que, podendo ser realizados à escala real ou em laboratório, permitem determinar a evolução da deformação permanente das misturas a temperaturas elevadas, sob a ação de cargas estáticas ou rolantes. No presente estudo esta propriedade foi avaliada em laboratório com recurso ao ensaio de pista, também conhecido por ensaio WTT (*Wheel Tracking Test*), que consiste em fazer passar repetidamente uma roda com determinada carga

sobre uma lajeta de mistura betuminosa com $30 \times 30 \times 4 \text{ cm}^3$ (Figura 3.23), e medindo a evolução da profundidade da rodeira com o número de passagens a uma temperatura elevada. Este ensaio simula a passagem dos rodados dos veículos e a forma como estes originam rodeiras no pavimento, para avaliar a resistência que as misturas oferecem à formação dessas rodeiras.



Figura 3.23 – Colocação da lajeta de mistura betuminosa no molde para o ensaio de pista.

O ensaio de pista foi realizado em duas lajetas por cada mistura betuminosa, tendo como referência a norma EN 12697-22 (CEN, 2003), considerando uma temperatura de ensaio de $50 \text{ }^\circ\text{C}$, uma força de 700 N , uma frequência de $0,44 \text{ Hz}$ e a aplicação de $10\,000$ ciclos de carga. Quanto aos resultados obtidos, e de acordo com a mesma norma, os principais valores a ter em atenção 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}).

3.9.3. Ensaio de Módulo de Rigidez por Flexão em Quatro Pontos

O módulo de rigidez é uma das propriedades das misturas betuminosas com maior importância para o dimensionamento de pavimentos, e depende da temperatura a que esta se encontra, da frequência de carregamento e das características dos materiais usados nas misturas.

De modo a conhecer o módulo de rigidez das misturas, foram compactadas lajes a partir das quais foram cortadas 9 vigas com $6,3 \times 5 \times 38 \text{ cm}^3$, que foram ensaiadas a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, tal como indicado na norma EN 13108-20 (CEN, 2006). Além disso, também foram realizados ensaios às temperaturas de 0 , 10 e $30 \text{ }^\circ\text{C}$ apenas em três vigas de cada mistura. Nos ensaios de flexão cíclica em quatro pontos é realizado um varrimento de frequências ($0,1$, $0,2$, $0,5$, 1 , 2 , 5 , 8 , 10 , $0,1 \text{ Hz}$) de acordo com a norma EN 12697-26 (CEN, 2012c), com o equipamento apresentado na Figura 3.24, de modo a obter o módulo numa gama alargada de frequências/temperaturas.



Figura 3.24 – Equipamento utilizado para o ensaio de flexão em quatro pontos.

3.9.4. Ensaio de Resistência à Fadiga por Flexão em Quatro Pontos

A resistência ao fendilhamento por fadiga é uma propriedade fundamental nas misturas betuminosas e tem como principais agentes a ação do tráfego e ações de origem térmica. De acordo com a norma EN 12697-24, o ensaio de resistência à fadiga deve ser realizado a uma temperatura de ensaio de 20 °C para uma frequência de aplicação de carga de 10 Hz. Dado que o ensaio de módulo de rigidez não é destrutivo, as nove vigas que foram referidas nesse ensaio vão ser utilizadas em seguida neste ensaio de fadiga que, ao aplicar níveis de extensão mais elevados em combinação com um significativo número de aplicações de carga, já vai originar a rotura por fadiga desses provetes. De referir ainda que o equipamento de ensaio e a configuração de carga deste ensaio é igual à referida no ensaio do módulo de rigidez.

O ensaio de resistência à fadiga tem como intuito verificar ao fim de quando ciclos cada provete atinge a ruína. Neste caso, sendo o ensaio realizado em extensão controlada, a ruína é definida pelo número de ciclos de carga para o qual o valor de módulo de rigidez da viga se reduz a metade do valor seu inicial. Ao realizar este ensaio a vários provetes, para diferentes níveis de extensão, é possível determinar a lei de fadiga da mistura betuminosa, que relaciona o nível de extensão aplicada com o número de ciclos de carga que originam a sua rotura por fadiga.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE COMPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS COM REJUVENESCEDORES

4.1. Caracterização do Material Fresado

Tal como já foi referido, para que a incorporação de material fresado em novas misturas seja realizada da forma mais eficiente possível é essencial realizar um estudo aprofundado das suas características. Assim, tendo em conta os métodos apresentados no capítulo anterior, de seguida é apresentada a caracterização completa do betume e dos agregados presentes no material fresado utilizado no presente estudo.

A análise granulométrica das duas frações do material fresado (Figura 4.1) foi realizada após incineração do betume. Deste modo é possível verificar que a fração 0/6 (FF) não apresenta agregados com dimensões superiores a 6 mm. Já na fração 6/12 (FG) é possível verificar a existência de algumas partículas de menor dimensão, as quais se encontravam aglomeradas aquando da separação realizada no classificador industrial. No entanto, após a incineração do betume, essas partículas separaram-se, aumentando a percentagem de material passado nos peneiros de menores dimensões.

A percentagem de betume presente no MF e as suas características básicas são apresentadas no Quadro 4.1. Tal como seria de esperar, a fração com elementos mais finos (0/6), que têm maior superfície específica, é a que apresenta maior percentagem de betume. No que respeita ao estado de envelhecimento do betume, analisando os resultados das características básicas (penetração e temperatura de amolecimento), é possível concluir que o betume presente na fração 6/12 foi submetido a um envelhecimento ligeiramente superior.

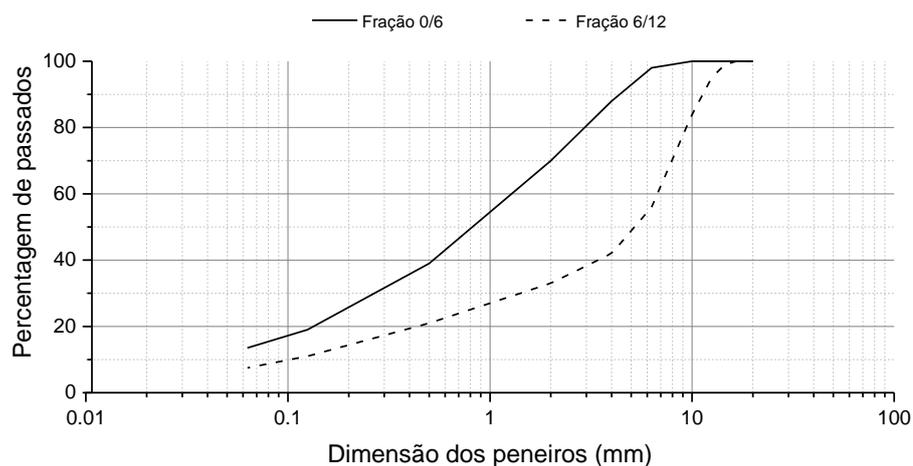


Figura 4.1 – Curva granulométrica do MF após incineração do betume.

Quadro 4.1 – Percentagem de betume e características do betume presente nas duas frações do MF.

Fração	0/6	6/12
Percentagem de betume (%)	6,0	4,0
Penetração (0,1 mm)	9,3	8,2
Temperatura de amolecimento (°C)	73,4	74,2

No que respeita à viscosidade dinâmica dos betumes presentes nas diferentes frações (Figura 4.2), é possível verificar que a altas temperaturas, a diferença entre os dois betumes não é significativa. Isto justifica o facto da temperatura de amolecimento não ser significativamente diferente. Já no que se refere aos resultados obtidos para temperaturas mais baixas, próximas daquela à qual é realizado o ensaio de penetração, a diferença entre os dois betumes é mais visível.

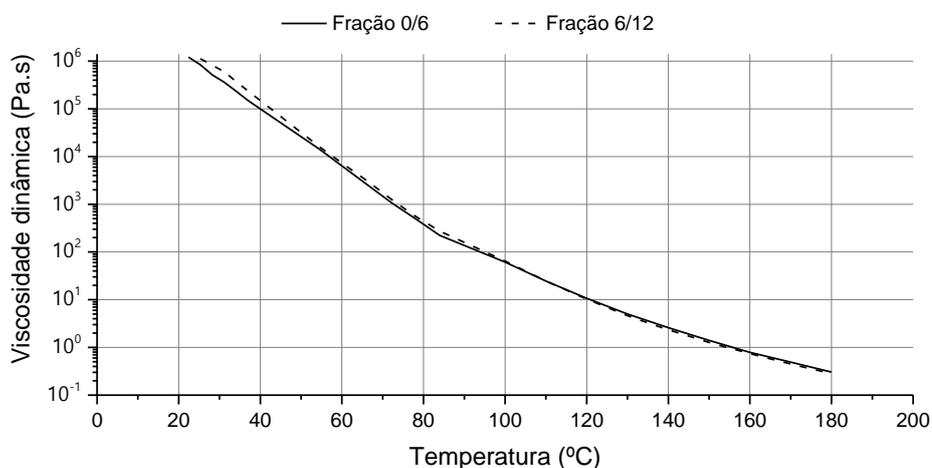


Figura 4.2 – Viscosidade dinâmica dos betumes recuperados das duas frações.

Para complementar a análise das características do betume presente no MF, realizou-se o ensaio de reologia (com um reômetro de corte), cujos resultados se apresentam na Figura 4.3. Por se tratar de betumes envelhecidos, as diferenças entre as suas características não são significativas, sendo mais uma vez, visíveis apenas para temperaturas mais baixas. Este ensaio permite ainda determinar a temperatura elevada do grau de desempenho ou PG (*performance grade*) do betume, de acordo com o sistema de classificação americana, tendo-se verificado que ambos os betumes apresentam valores superiores a 88 °C.

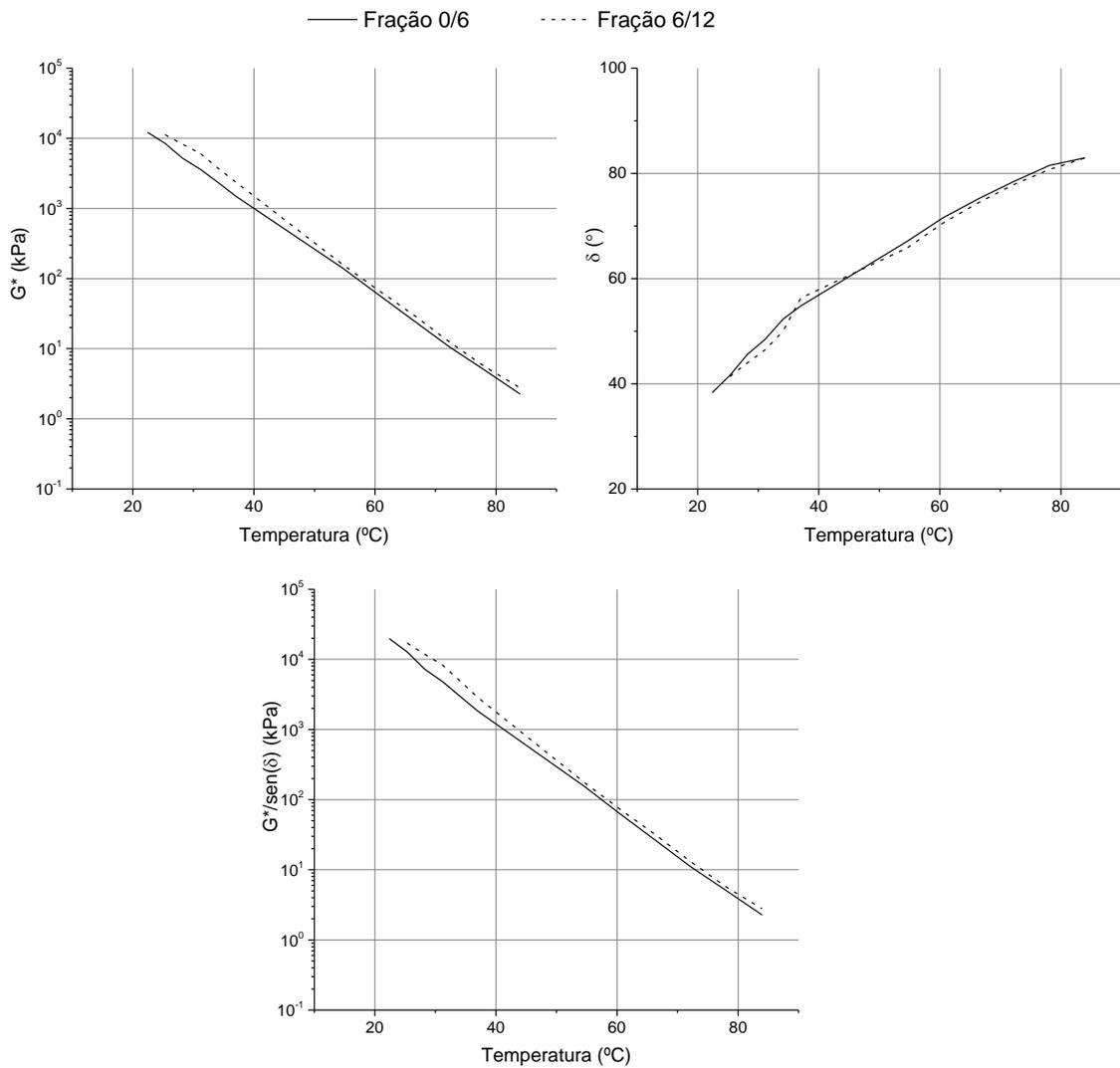


Figura 4.3 – Características reológicas dos betumes presentes nas frações do material fresado.

4.2. Formulação das Misturas Betuminosas

4.2.1. Mistura Convencional

No que respeita à mistura convencional, utilizada como mistura de controlo no presente trabalho, optou-se pela produção de uma mistura AC 14 Bin/Surf 35/50 (BB) por ser um dos tipos de mistura mais utilizado em Portugal, nomeadamente, na reabilitação de pavimentos degradados. Para a sua formulação procedeu-se à determinação da quantidade de cada agregado (Quadro 4.2) a ser misturado para que a curva granulométrica da mistura convencional (Figura 4.4) cumprisse os valores máximos e mínimos impostos pelo caderno de encargos.

Quadro 4.2 – Quantidades de agregado a usar para a mistura convencional.

Material	Filer comercial	Pó 0/4	Brita 4/10	Brita 8/14
Quantidade (%)	1,5	48,5	10,0	40,0

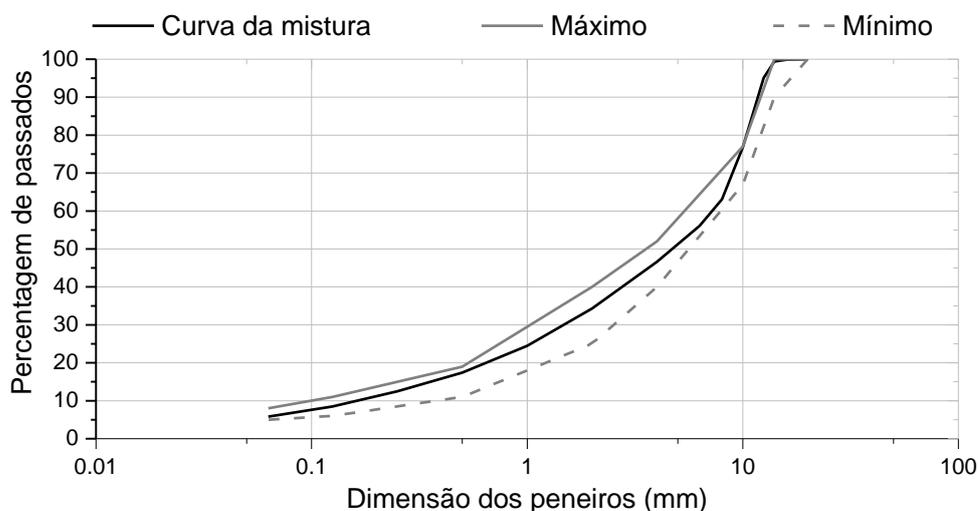


Figura 4.4 – Curva granulométrica da mistura convencional.

No caso da mistura convencional, optou-se pela utilização de um betume 35/50, uma vez que se trata de um dos betumes mais usados na pavimentação de estradas em Portugal. Para a determinação da percentagem ótima de betume utilizou-se o método de Marshall. O qual foi realizado com base em cinco percentagens de betume, a variar entre 4,0 a 6,0%, com intervalos de 0,5%, e os resultados são apresentados na Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7.

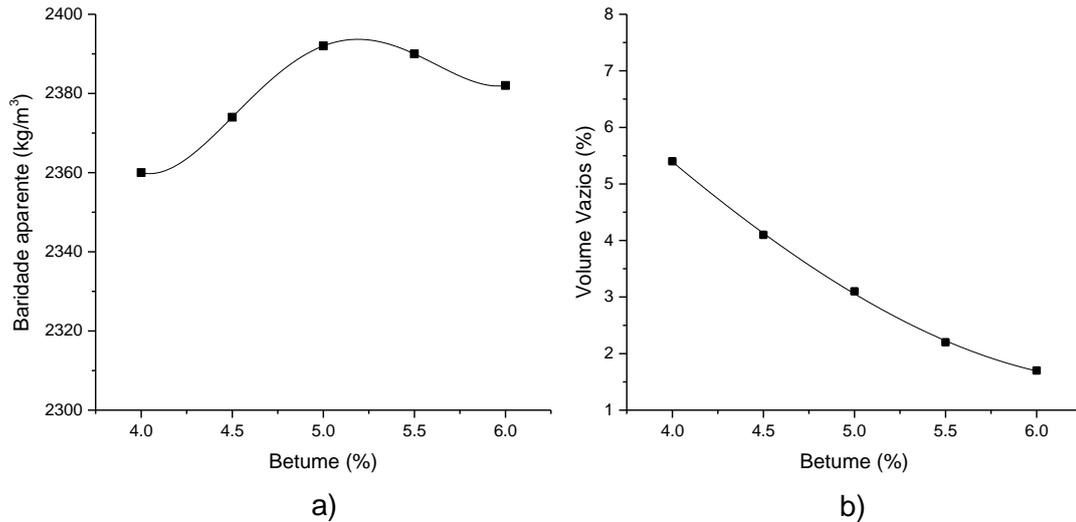


Figura 4.5 – Resultados estudo de Marshall para a mistura convencional: a) baridade aparente, b) volume de vazios.

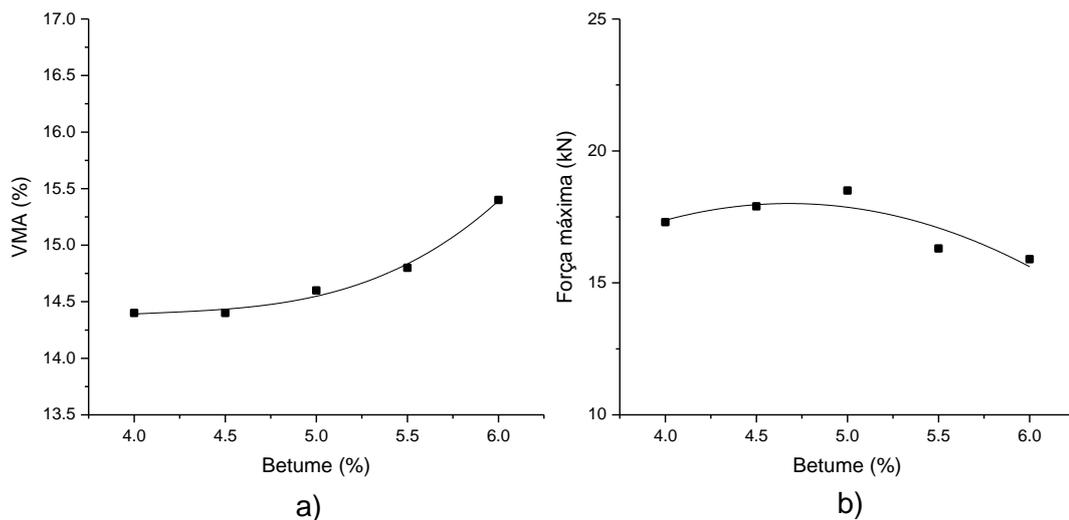


Figura 4.6 – Resultados estudo de Marshall para a mistura convencional: a) vazios no esqueleto de agregados, b) força máxima ou estabilidade do provete.

Analisando os resultados verifica-se que a estabilidade máxima é obtida para cerca de 4,8% de betume. No que respeita à baridade aparente, o valor máximo é obtido para cerca de 5,2% de betume e o volume de vazios de 4% (valor médio dos valores especificados no Caderno de Encargos) obtém-se para uma percentagem de betume mais baixa (4,5%). Com base nesses resultados concluiu-se que a percentagem ótima de betume é de, aproximadamente, 4,8%.

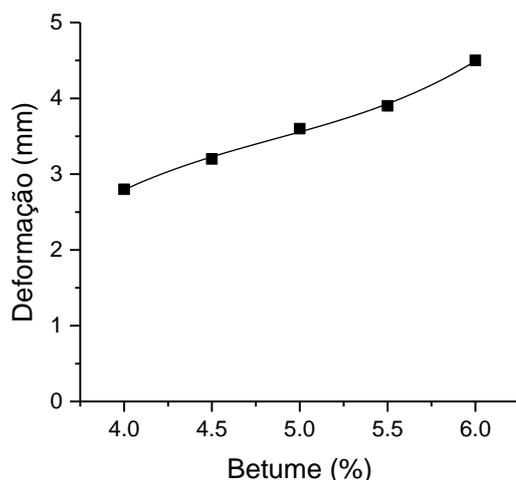


Figura 4.7 – Resultados estudo de Marshall para a mistura convencional: deformação no ponto de carga máxima.

Tendo esse valor como referência verificou-se que, quer os valores de VMA (> 14%), quer os valores de deformação no ponto de carga máxima (< 4 mm) são respeitados, pelo que se seleccionou os 4,8% como sendo a percentagem ótima de betume para a mistura convencional.

4.2.2. Mistura com 30% de Material Fresado

No estudo de formulação das misturas com incorporação de material fresado, conforme se referiu na Secção 3.1.3, utilizou-se um betume 70/100, com o objetivo de compensar a maior dureza do betume presente no MF, para se obter um betume equivalente ao 35/50 utilizado na mistura de referência.

No que respeita à composição da mistura, verifica-se que a melhor curva granulométrica encontrada é a apresentada na Figura 4.8, que resulta das quantidades de agregados de cada fração indicadas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Quantidades de agregado a usar para a mistura com 30% de material fresado.

Material	Filer comercial	Pó 0/4	Brita 4/10	Brita 8/14	Material Fresado	
					Fração 0/6	Fração 6/12
Quantidade (%)	1,0	24,8	5,5	38,8	19,8	10,1

Quando analisadas as quantidades de cada agregado a serem adicionada denota-se uma redução significativa nas frações Pó 0/4 e Brita 4/10, comparativamente à formulação da mistura

convencional. Esta redução justifica-se pela existência de uma elevada quantidade de material com estas dimensões no material fresado.

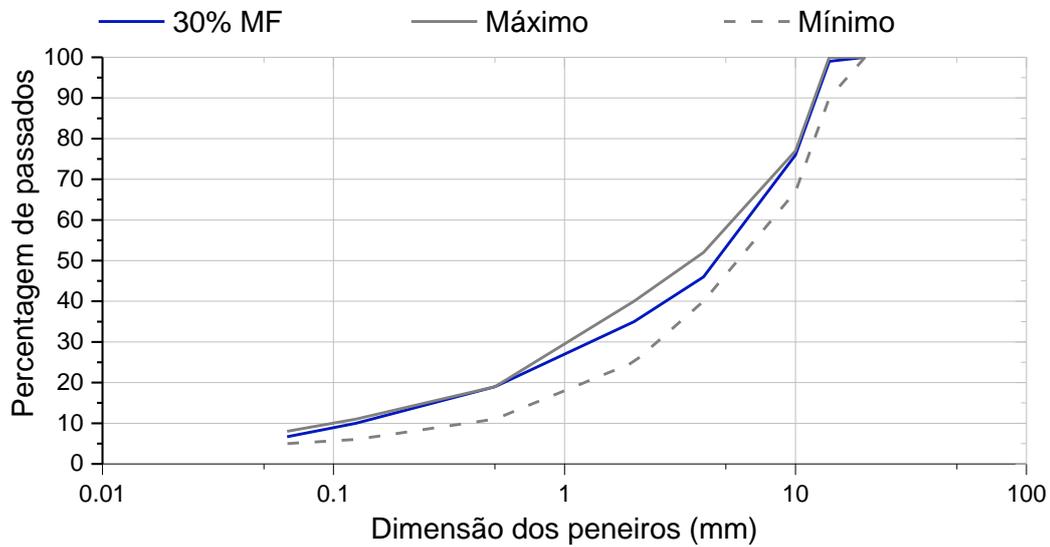


Figura 4.8 – Curva granulométrica da mistura com 30% de material fresado.

Em seguida são apresentados os resultados do estudo de Marshall (Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11), seguindo a metodologia já apresentada para a mistura convencional, através de uma representação gráfica, para facilitar a sua análise.

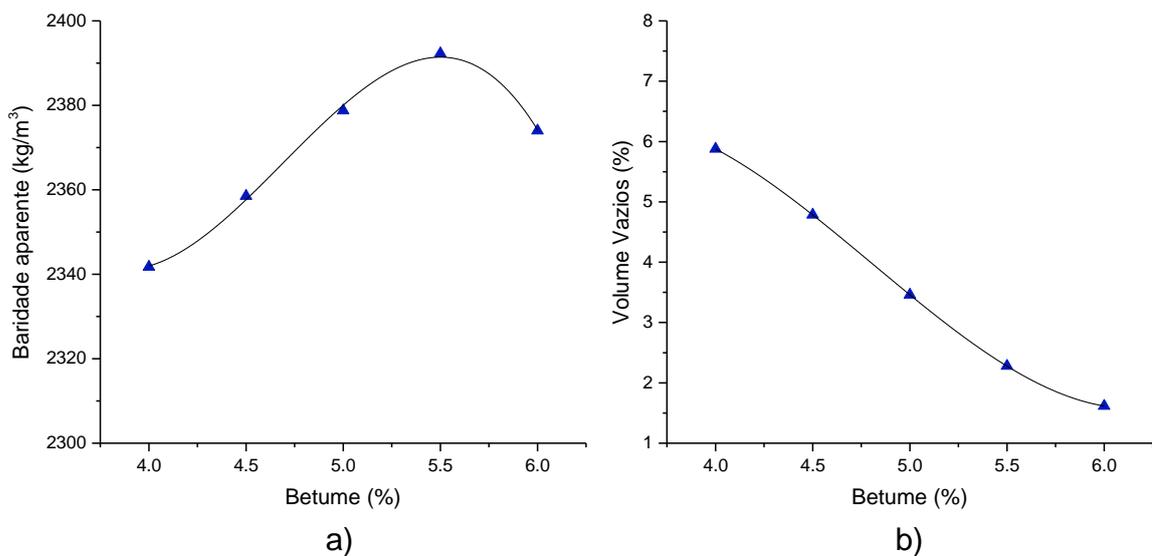


Figura 4.9 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 30% MF: a) baridade aparente, b) volume de vazios.

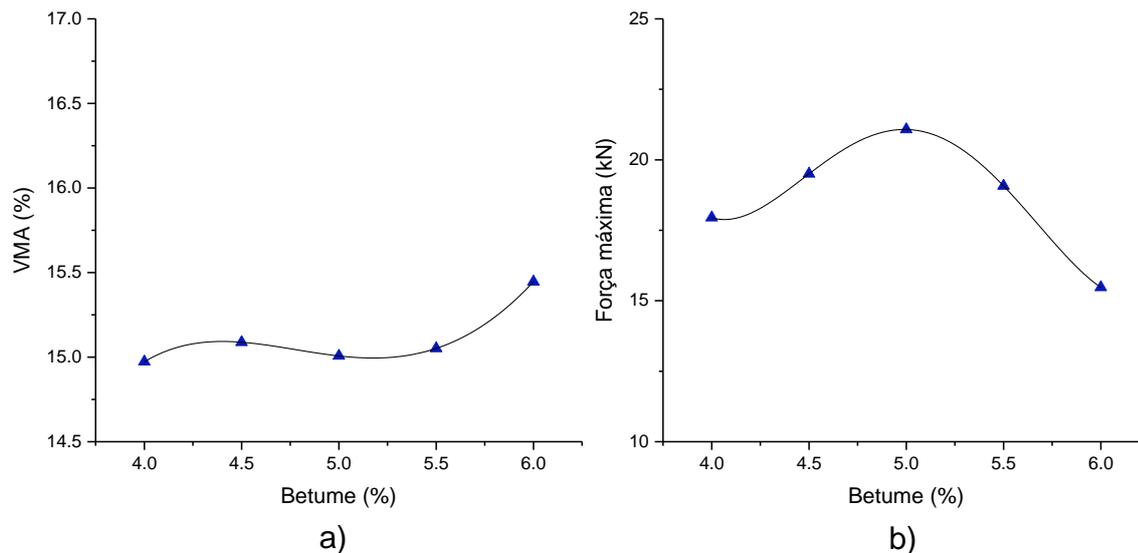


Figura 4.10 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 30% MF: a) vazios no esqueleto de agregados, b) força máxima ou estabilidade do provete.

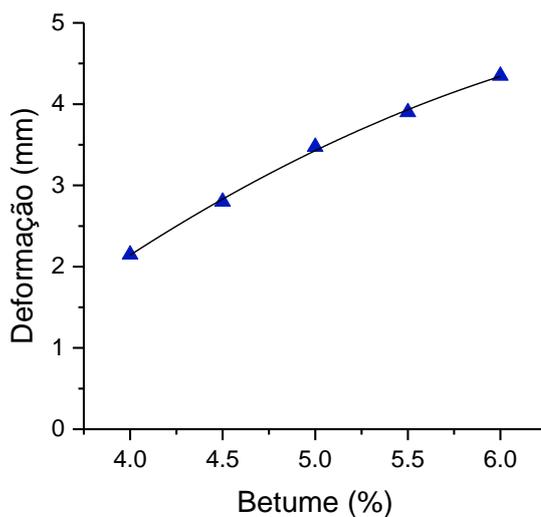


Figura 4.11 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 30% MF: deformação no ponto de carga máxima.

A percentagem ótima de betume advém da média entre as percentagens referentes ao valor máximo de estabilidade (5,0%), o valor máximo da baridade aparente (5,5%) e o valor de volume de vazios de 4% (aproximadamente 4,8%). Assim, para esta mistura a percentagem ótima de betume ronda os 5,0%.

Este valor verifica o cumprimento dos limites de VMA e de deformação. O VMA deve ser superior a 14% sendo verificado para as cinco percentagens de betume testadas. Já a deformação no ponto de carga máxima deve ser inferior a 4 mm, o que se verifica para quantidades de betume inferiores a 5,5%.

4.2.3. Mistura com 50% de Material Fresado

No que respeita à mistura com 50% de MF, mais uma vez optou-se por usar o betume 70/100 como ligante, para que o betume final se aproxime de um betume 35/50. Apesar do uso deste betume mais mole, conforme se apresenta na Secção 4.3 é imprescindível a introdução de um rejuvenescedor para que as características finais do betume se assemelhem às de um betume 35/50. No entanto, de modo a reduzir o número de variáveis para o estudo de Marshall, o estudo de formulação foi realizado sem incorporar nenhum rejuvenescedor. Esta opção permitiu usar esta mistura como referência para todas as misturas com incorporação de 50% de material fresado.

No que respeita à quantidade de agregados de cada fração, é novamente verificada uma redução muito significativa na percentagem de Pó 0/4 a adicionar à mistura. A quantidade de brita 4/10 sofre igualmente um decréscimo (Quadro 4.4). A curva granulométrica está representada na Figura 4.12, constatando-se através da mesma que, apesar dos limites máximos e mínimos serem cumpridos, o seu ajuste ao valor médio do fuso foi mais difícil de atingir, como se observa pela proximidade dos valores obtidos aos dos limites.

Quadro 4.4 – Quantidades de agregado a usar para a mistura com 50% de material fresado.

Material	Filer comercial	Pó 0/4	Brita 4/10	Brita 8/14	Material Fresado	
					Fração 0/6	Fração 6/12
Quantidade (%)	1,0	4,8	5,5	38,8	29,7	20,2

Quanto ao estudo de Marshall as quantidades de betume estudadas são as mesmas que as usadas para a formulação com 30% de material fresado. A respetiva representação gráfica dos resultados está apresentada na Figura 4.13, na Figura 4.14 e na Figura 4.15.

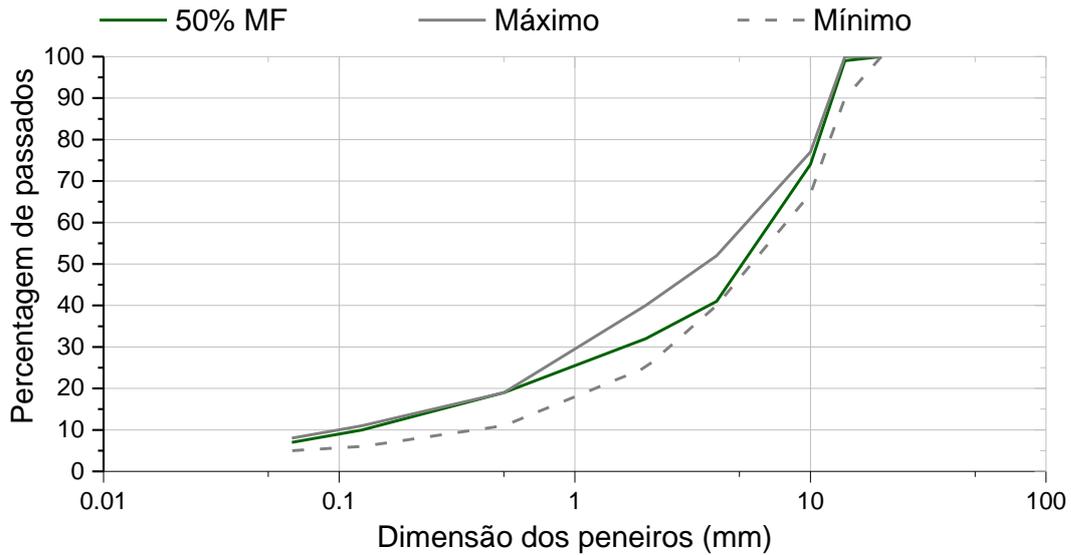


Figura 4.12 – Curva granulométrica da mistura com 50% de material fresado.

Analisando os resultados é possível verificar que a porcentagem ótima de betume (obtida pela média dos valores obtidos para a baridade máxima, porosidade de 4% e estabilidade máxima) é de aproximadamente 5,1%. Este valor pode ser considerado como o ideal, uma vez que, quer a deformação quer o VMA correspondentes a esse valor, respeitam as condições impostas no Caderno de Encargos.

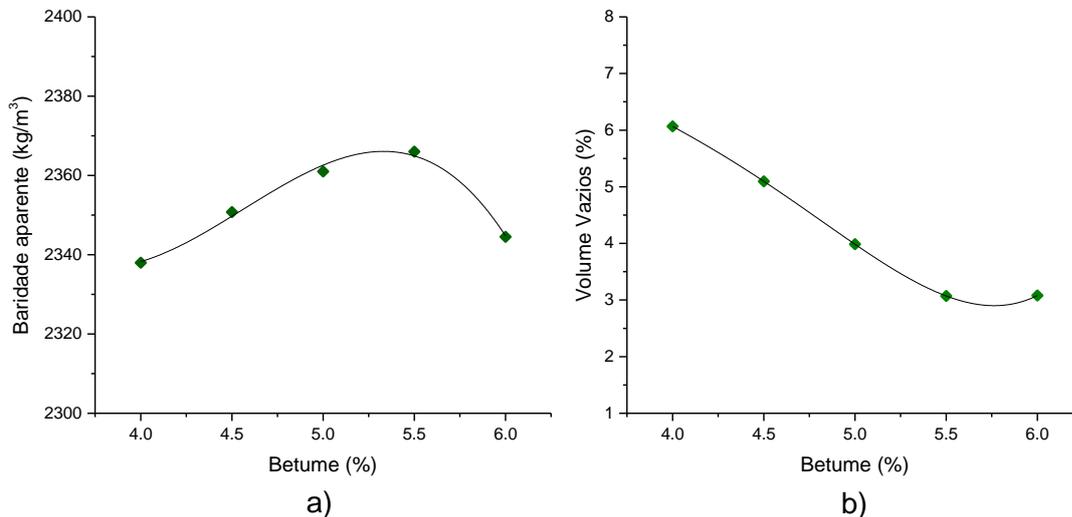


Figura 4.13 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 50% MF: a) baridade aparente, b) volume de vazios.

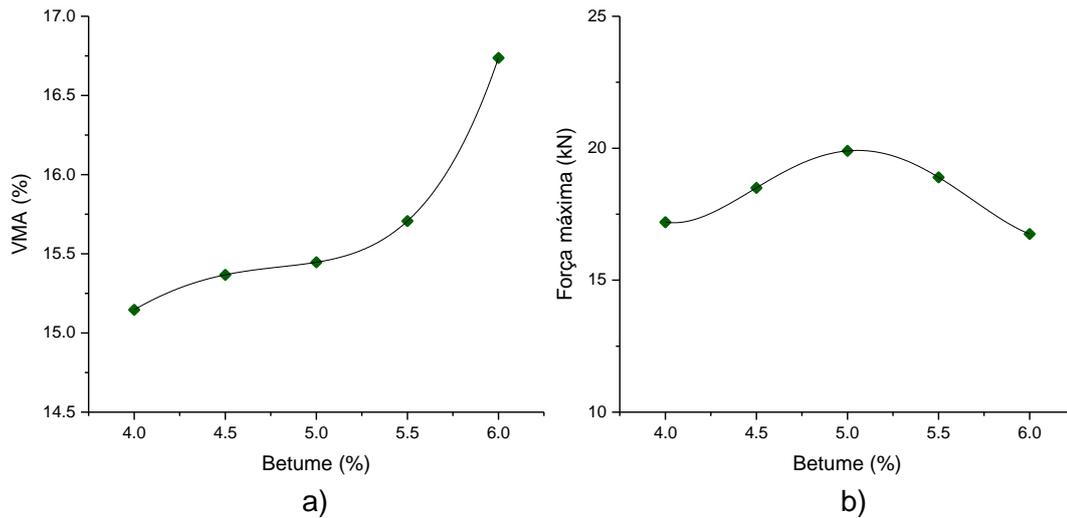


Figura 4.14 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 50% MF: a) vazios no esqueleto de agregados, b) força máxima ou estabilidade do provete.

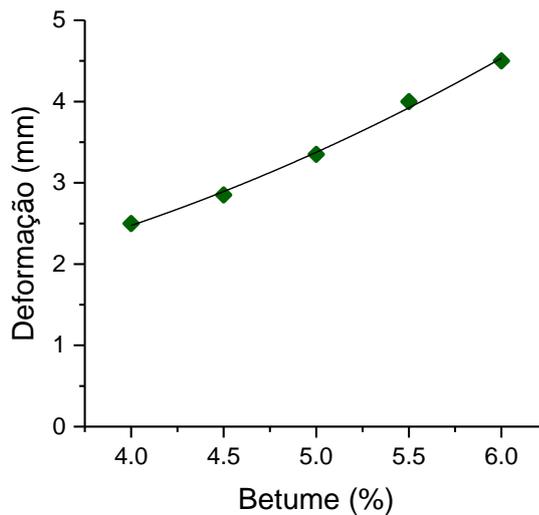


Figura 4.15 – Resultados estudo de Marshall para a mistura com 50% MF: deformação no ponto de carga máxima.

De seguida apresenta-se o estudo realizado para determinar as percentagens ótimas de aditivos rejuvenescedores que será necessário adicionar para que as características dos betumes finais das misturas se assemelhem a um betume da classe 35/50.

4.3. Estudo de Rejuvenescimento dos Betumes

O betume presente no material fresado é um betume bastante envelhecido, necessitando de ser rejuvenescido para se comportar como um betume novo. Para estudar adequadamente a influência que determinados aditivos rejuvenescedores têm nas características do betume final de uma mistura com incorporação de material fresado seria necessário extrair uma quantidade significativa de betume do MF através do processo de recuperação de betume. No entanto, este é um processo complexo e moroso, pelo que se optou numa primeira fase do presente estudo por substituir o betume envelhecido (recuperado do MF) por um betume envelhecido em laboratório e, posteriormente, avaliar as características de um betume rejuvenescido com a percentagem de aditivo considerada ideal, utilizando o betume recuperado. Desta forma, a quantidade de betume a recuperar do MF foi significativamente reduzida.

4.3.1. Simulação do Betume Presente no Material Fresado

Como referido, para simular o betume que se encontra no MF optou-se por envelhecer um betume 10/20 convencional até que este apresentasse características básicas similares ao betume recuperado do MF.

O processo de envelhecimento utilizado consistiu na colocação de cerca de 1000 g de betume 10/20 no balão do evaporador rotativo (*rotovapor*) habitualmente usado no processo de recuperação de betume, sendo este submetido a uma rotação 20 rpm, enquanto submerso no óleo de aquecimento à temperatura de 163 °C (temperatura normalmente utilizada no ensaio de envelhecimento acelerado de betumes RTFOT). A opção pelo evaporador rotativo, ao invés do procedimento do RTFOT, foi tomada tendo em conta a quantidade elevada de betume que se pretendia envelhecer, o que se tornava inviável de realizar no equipamento do RTFOT.

No sentido de perceber qual o tempo necessário para que o betume obtido pelo processo de envelhecimento se assemelhasse ao betume presente no MF, foram testados diferentes tempos de envelhecimento e analisados os respetivos betumes quanto à penetração (Figura 4.16) e temperatura de amolecimento (Figura 4.17). Nestas figuras faz-se uma comparação com os resultados obtidos para o betume recuperado de cada uma das frações de MF.

Avaliando ambos os critérios de análise é possível concluir que os valores de penetração e temperatura de amolecimento pretendidos não são obtidos em intervalos de tempo coincidentes.

Tendo em conta a diferença entre os valores de penetração e temperatura de amolecimento obtidos para diferentes tempos de envelhecimento, considerou-se adequado utilizar um valor ponderado de 15 horas para o processo de envelhecimento do betume.

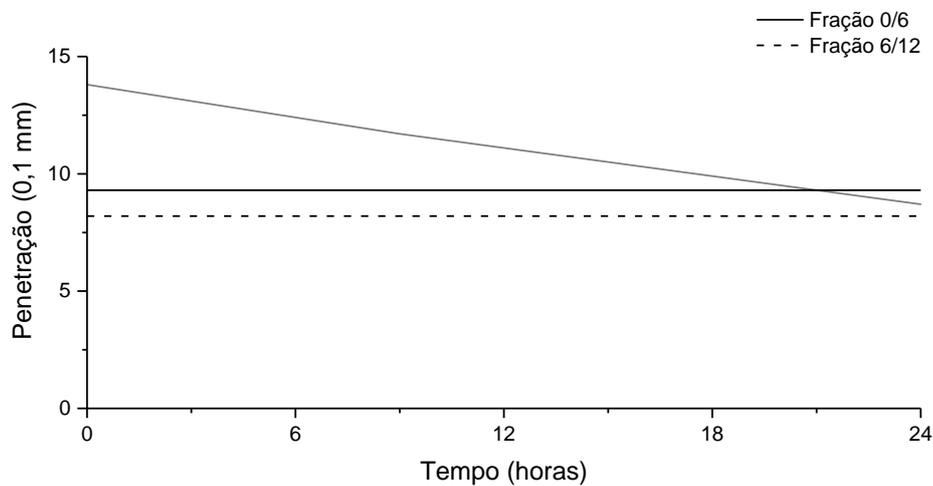


Figura 4.16 – Evolução da penetração do betume 10/20 durante o processo de envelhecimento.

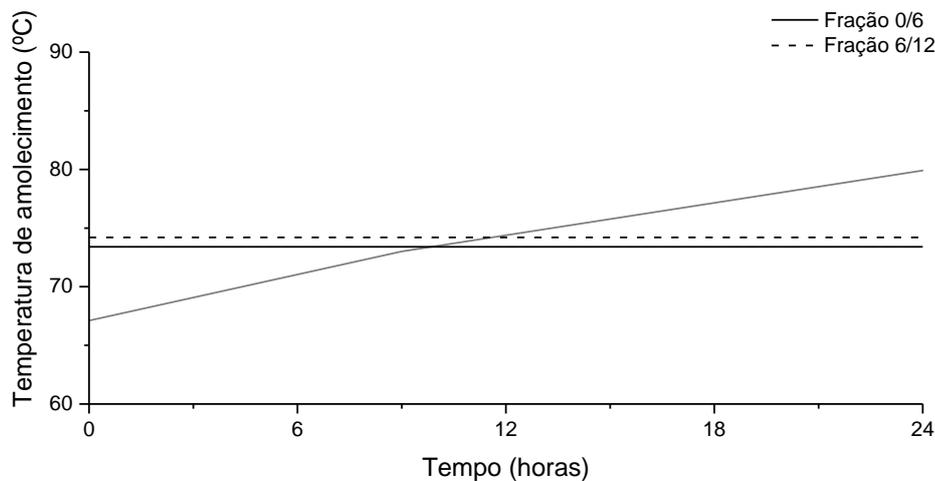


Figura 4.17 – Evolução da temperatura de amolecimento do betume 10/20 durante o processo de envelhecimento.

Assim sendo, analisando as propriedades do betume 10/20 (Figura 4.18) antes e após o processo de envelhecimento de 15 h é possível verificar que o valor de penetração obtido é idêntico aos obtidos para o betume recuperado nas duas frações. O valor da temperatura de amolecimento é até superior aos obtidos para o betume recuperado, demonstrando a eficácia do processo utilizado.

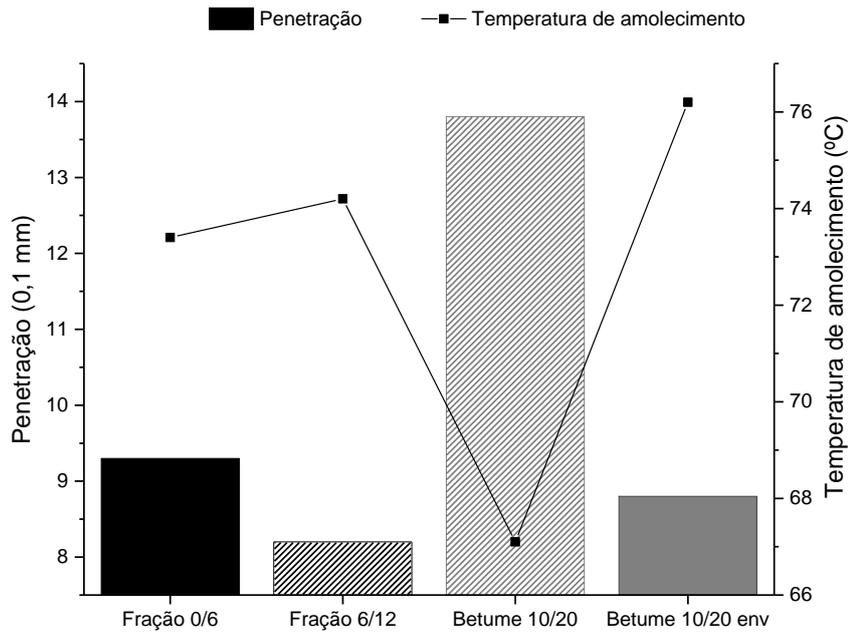


Figura 4.18 – Penetração e temperatura de amolecimento dos betumes recuperados de cada fração de MF, do betume 10/20 e do betume 10/20 envelhecido.

No que respeita à viscosidade dinâmica dos betumes (Figura 4.19) é possível, desde logo, constatar que após o processo de envelhecimento do betume 10/20, as características apresentadas são muito idênticas às do betume recuperado do MF.

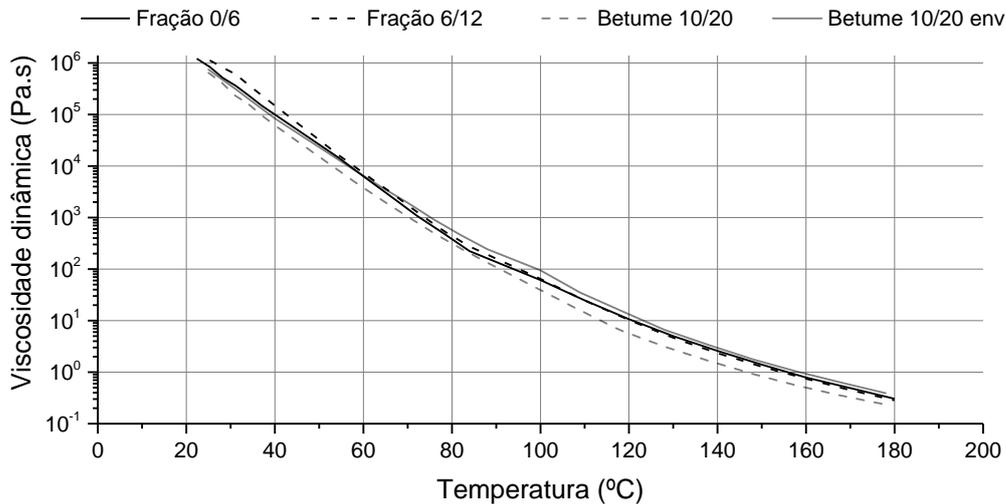


Figura 4.19 – Viscosidade dinâmica dos betumes recuperados em comparação com o betume 10/20 e o betume 10/20 envelhecido.

Em termos reológicos (Figura 4.20), analisando o comportamento do betume envelhecido dentro da gama de temperaturas correspondentes aos ensaios de penetração e temperatura de

amolecimento, é possível verificar que o processo de envelhecimento realizado permitiu obter um betume com um comportamento semelhante ao do betume que estará presente no MF.

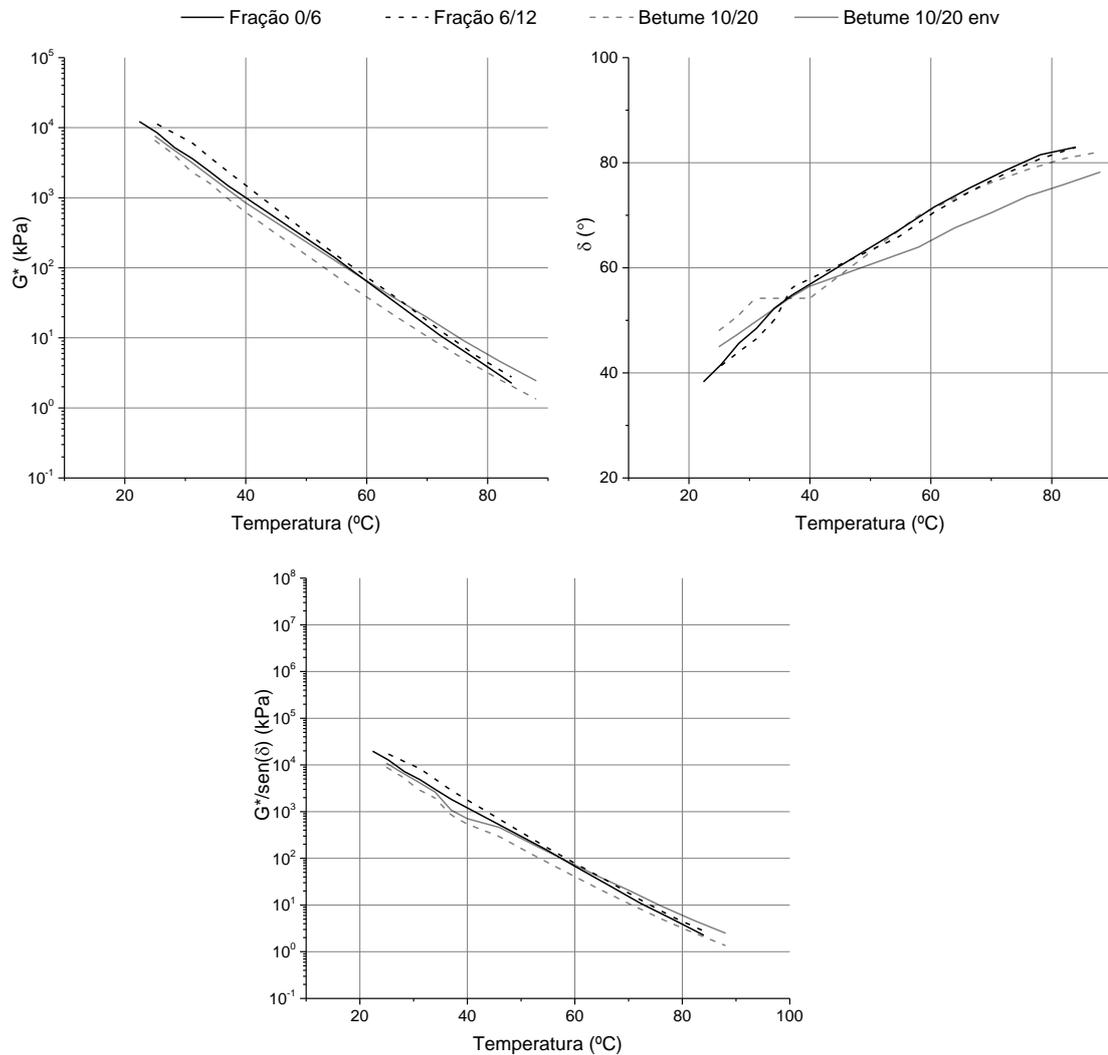


Figura 4.20 – Características reológicas dos betumes recuperados em comparação com o betume 10/20 e o betume 10/20 envelhecido.

4.3.2. Efeito dos Aditivos Rejuvenescedores nas Propriedades do Betume Envelhecido

O estudo de rejuvenescimento do betume iniciou-se com a verificação da necessidade de utilização de aditivos rejuvenescedores em duas misturas com diferentes percentagens de MF (30 e 50%). Após confirmada a necessidade de utilização de aditivos rejuvenescedores na mistura com 50% de MF, foram avaliados quatro aditivos distintos.

Como se pode verificar nas Figura 4.21 e Figura 4.22, as misturas com 30% de MF (cujo betume final equivale a aproximadamente 30% de betume envelhecido e 70% de betume novo 70/100), não necessitam de aditivo para atingir os valores de penetração e temperatura de amolecimento pretendidos. No entanto, o betume correspondente à incorporação de 50% de MF na mistura final (com aproximadamente 50% de betume envelhecido) necessita de ser rejuvenescido. Assim, o estudo prosseguiu com a avaliação das percentagens ótimas de aditivos no rejuvenescimento do betume envelhecido que simula a incorporação de 50% de MF. As percentagens utilizadas para cada aditivo basearam-se, numa primeira fase, nos valores indicados pelos produtores dos aditivos e na bibliografia existente.

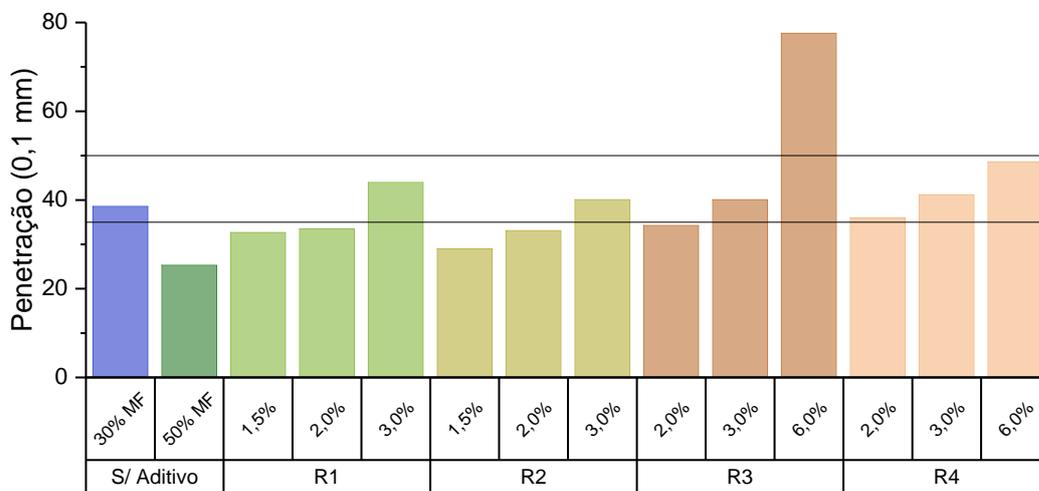


Figura 4.21 – Penetração dos betumes sem rejuvenescedores e com diferentes percentagens dos mesmos.

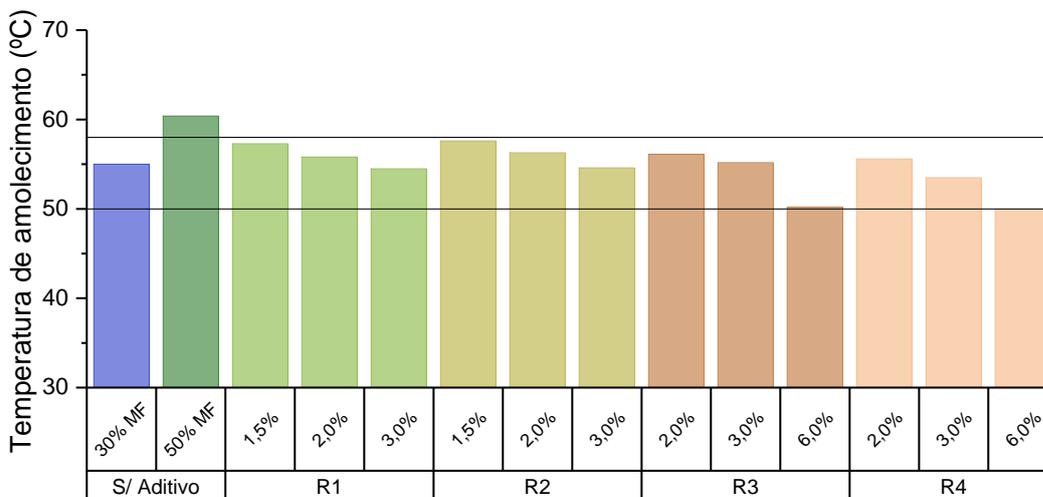


Figura 4.22 – Temperatura de amolecimento dos betumes sem rejuvenescedores e com diferentes percentagens dos mesmos.

Analisando os resultados apresentados na Figura 4.21 e na Figura 4.22 é possível verificar que, com 2,0% e 3% de aditivo, todos os rejuvenescedores apresentam valores muito próximos dos pretendidos (intervalo de valores identificado nas figuras pelas linhas horizontais). Tendo em conta que a utilização destes aditivos tem implicações no custo de produção das respetivas misturas, optou-se por seleccionar o valor de 2% para a fase seguinte do estudo. Nesta primeira fase é importante salientar o facto de a utilização de um óleo de origem vegetal (R4) permitir resultados equiparados aos obtidos com rejuvenescedores comerciais (R1, R2 e R3).

4.3.3. Efeito dos Aditivos Rejuvenescedores nas Propriedades do Betume Recuperado

Tendo em atenção os resultados obtidos com o betume envelhecido, de onde resultou uma percentagem ótima de aditivo de 2%, avaliou-se de seguida o efeito que essa percentagem (de cada um dos aditivos em estudo) teria no comportamento do betume recuperado do MF.

Analisando os resultados para essa percentagem de aditivo (Figura 4.23) é possível verificar que o rejuvenescimento do betume recuperado ficou aquém do pretendido, principalmente no que diz respeito aos valores de penetração, parâmetro para o qual os valores obtidos se encontram bastante afastados do intervalo pretendido, o que demonstra a necessidade de aumentar a percentagem de aditivo.

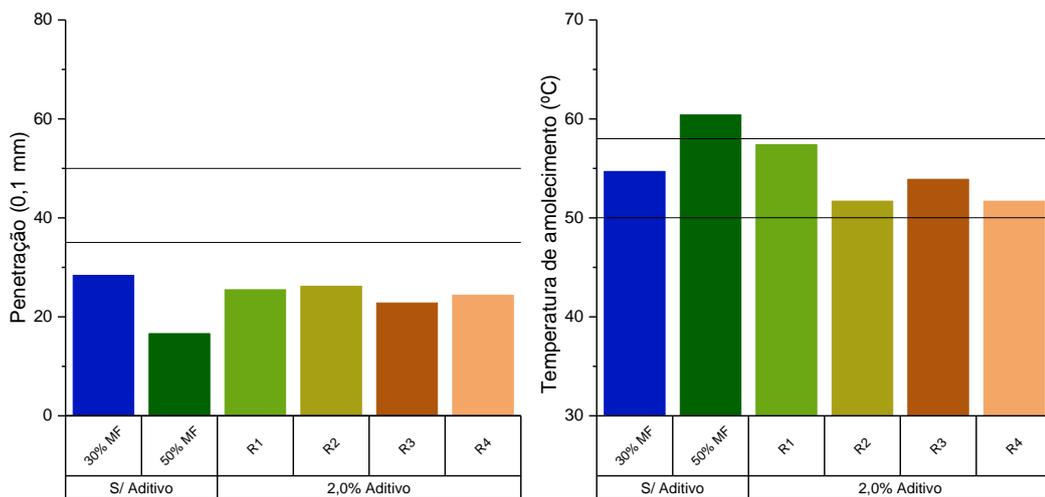


Figura 4.23 – Penetração e temperatura de amolecimento dos betumes produzidos com betume recuperado.

Estes resultados podem ser explicáveis uma vez que um betume novo, mesmo com características semelhantes às de um betume envelhecido, não apresenta o mesmo comportamento que um betume envelhecido quando lhe é adicionado um rejuvenescedor (Tanghe *et al.*, 2012).

Adicionalmente, de modo a avaliar a eventual perda de eficiência dos aditivos após o processo de produção das misturas com MF, realizou-se um estudo de envelhecimento acelerado, com recurso ao ensaio de RTFOT, sobre os betumes referidos anteriormente, produzidos com betume recuperado. Os resultados obtidos nesse estudo são apresentados na Figura 4.24, na Figura 4.25 e no Quadro 4.5, onde se inclui também o efeito do RTFOT no betume novo convencional utilizado como referência.

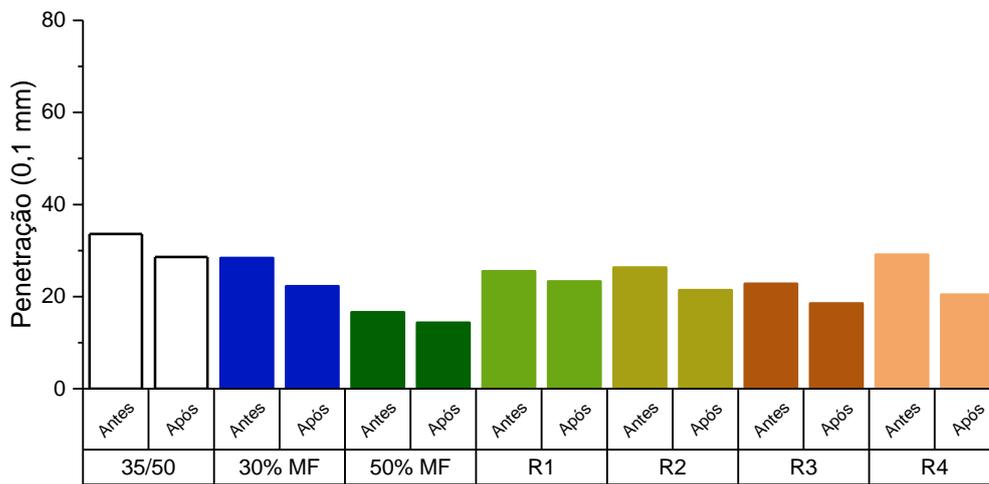


Figura 4.24 – Comparação da penetração antes e depois do ensaio de RTFOT.

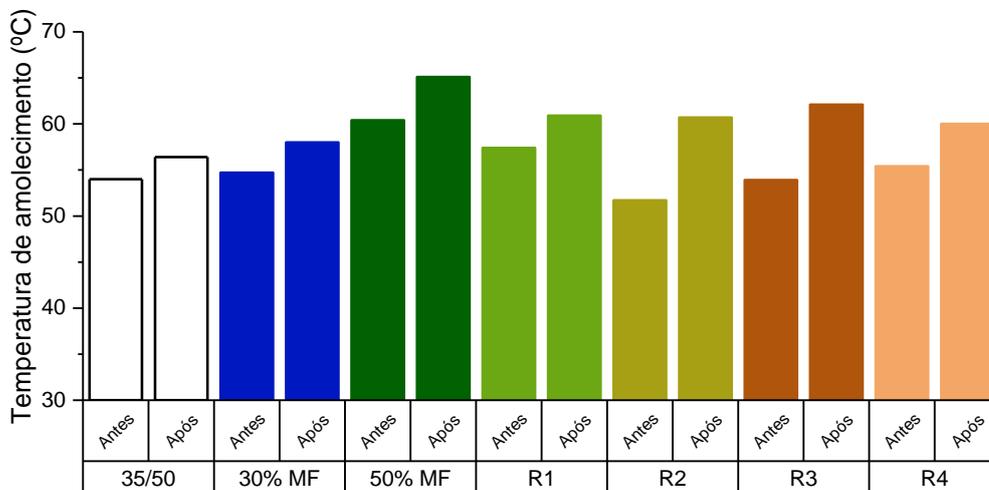


Figura 4.25 – Comparação da temperatura de amolecimento antes e depois do ensaio de RTFOT.

Quadro 4.5 – Características dos betumes após o ensaio de envelhecimento no RTFOT.

Betume	Perda de massa (%)	Penetração (% Retida)	Temperatura de amolecimento (Diferença °C)
Betume 35/50	0,01	85,12	2,4
30% MF	0,20	78,40	3,3
50% MF	0,23	86,35	4,7
R1	0,20	91,37	3,5
R2	0,21	81,37	9,0
R3	0,54	81,14	8,2
R4	0,18	70,21	4,6
Referência		≥ 53	≤ 11

Analisando os resultados verificou-se que, de entre os dois aditivos oriundos da mesma empresa (R1 e R2), o R2 apresenta piores resultados no que respeita à resistência ao envelhecimento do betume resultante. Por essa razão, esse aditivo deixou de ser alvo de estudo no presente trabalho. Apesar dos resultados obtidos não serem os melhores, o estudo prosseguiu com a avaliação do R4 por se tratar de um aditivo de origem vegetal, com possíveis vantagens, nomeadamente a nível económico e ambiental.

Após a realização desta análise decidiu-se continuar estudo com os aditivos R1, R3 e R4. Assim, procedeu-se a uma análise complementar a fim de verificar se o aumento da quantidade de aditivo para 3,0% seria vantajoso para se obter o tipo de betume pretendido. Os resultados desse aumento apresentam-se na Figura 4.26.

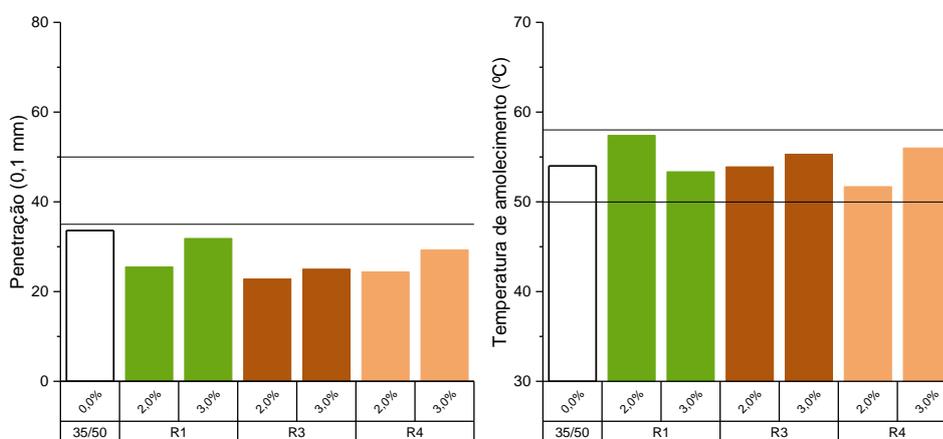


Figura 4.26 – Efeito do aumento da percentagem de aditivo nos valores de penetração e temperatura de amolecimento do betume recuperado.

Analisando os resultados obtidos é possível verificar que, mesmo com 3% de aditivo, o valor de penetração pretendido não é obtido, contrariamente, à temperatura de amolecimento. Contudo, estes valores podem ser aceites como adequados para o estudo uma vez que o betume 35/50, usado como referência, também apresenta valores de penetração inferiores aos referidos pela normalização. As características reológicas dos betumes rejuvenescidos são apresentadas na Figura 4.27 e na Figura 4.28.

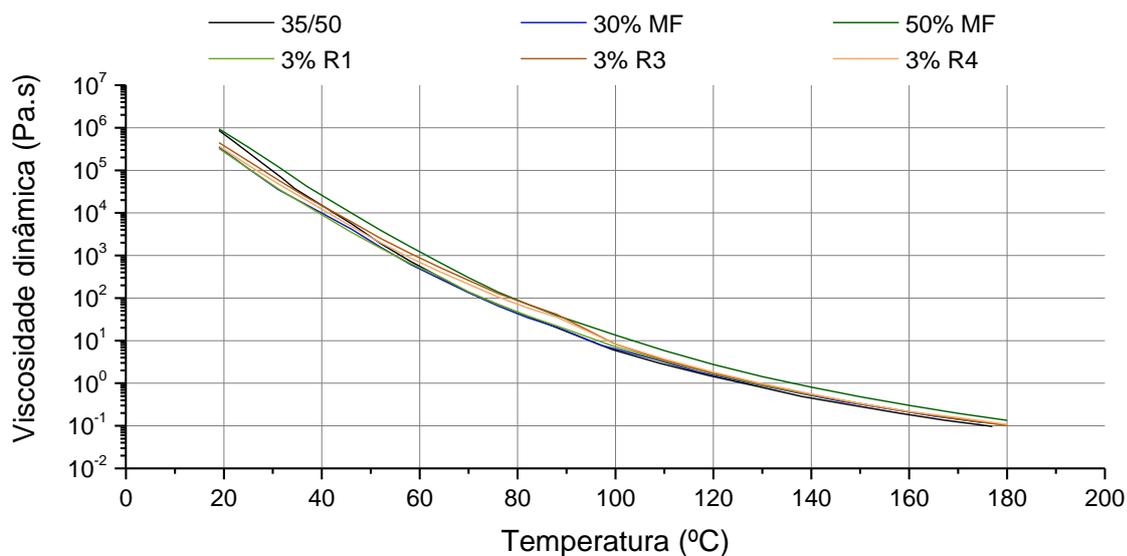


Figura 4.27 – Viscosidade dinâmica dos betumes rejuvenescidos com 3,0% de aditivo.

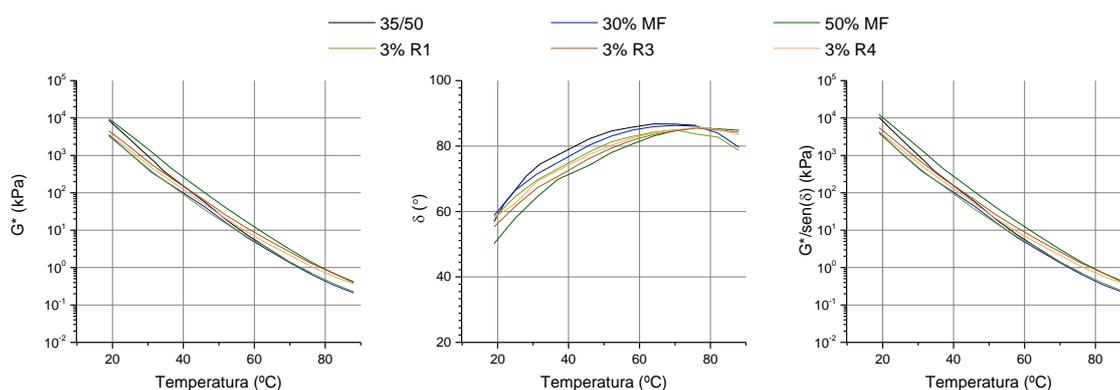


Figura 4.28 – Características reológicas dos betumes rejuvenescidos com 3,0% de aditivo.

Os resultados de reologia apresentados na Figura 4.28 permitem concluir que a percentagem de aditivo utilizada permite aproximar as características do betume resultante da incorporação de 50% de MF das características do betume convencional 35/50.

Em termos de aplicação prática destes resultados à produção de misturas betuminosas recicladas (MBR) é necessário ter em atenção que a percentagem de aditivo estudada corresponde a 3% do betume total presente na mistura. No entanto, na fase de produção, o aditivo rejuvenescedor será adicionado ao betume novo a acrescentar. Tendo em conta que as misturas com 50% de material fresado terão cerca de 51,0% de betume envelhecido, que advêm da utilização do fresado, o betume novo, em conjunto com o aditivo, representará 49,0% do betume total, mas corresponderá a 100% do betume adicionado. Desta feita foi necessário calcular a percentagem de aditivo a acrescentar ao betume 70/100, na proporção em que este betume é utilizado na mistura. Desta forma, foi possível verificar que a percentagem de aditivo a ser adicionado ao betume novo é de aproximadamente 6,12%. Por conseguinte, optou-se por verificar qual a penetração do betume 70/100 aditivado com 6,12% de aditivo, testando os três aditivos que serão posteriormente utilizados na produção de misturas em laboratório (Figura 4.29).

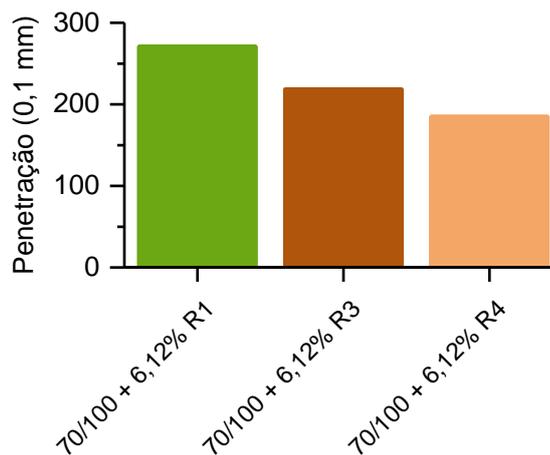


Figura 4.29 – Penetração do betume novo 70/100 aditivado com a percentagem de rejuvenescedor pré-determinada.

Analisando os valores obtidos, constata-se que os aditivos R3 e R4 (Iterlene e óleo de rícino) transformam o betume 70/100 num betume 160/220. Já o betume com o aditivo R1 (RapCap K) resulta num betume ainda mais mole que este, o que poderá ter alguma influência na trabalhabilidade das misturas durante as fases de produção e aplicação.

4.4. Avaliação do Desempenho das Misturas Betuminosas Recicladas com Rejuvenescedores

Nesta secção faz-se uma análise do desempenho das misturas betuminosas produzidas com os ligantes que resultaram da avaliação feita na secção anterior. Assim, apresenta-se de seguida os resultados obtidos em termos de sensibilidade à água (resistência conservada avaliada em ensaios de tração indireta), resistência à deformação permanente (em ensaios de pista), módulo de rigidez e resistência ao fendilhamento por fadiga (em ensaios de flexão a 4 pontos).

Conforme anteriormente referido, no caso da incorporação de 50% de material fresado, para além das misturas produzidas com os aditivos rejuvenescedores, foi também avaliada uma mistura sem qualquer aditivo para comparação.

4.4.1. Sensibilidade à Água e Resistência à Tração Indireta

Para avaliar a sensibilidade à água e a resistência à tração indireta das misturas em estudo foram produzidas misturas com os tipos e percentagens de aditivos resultantes da Secção 4.3., tendo as mesmas sido compactadas, sob a forma de provetes cilíndricos, com o compactador de impacto (Marshall). Esta avaliação permite tirar ilações sobre quais os aditivos que teriam melhores resultados quando submetidos à ação da água. No Quadro 4.6 apresentam-se as características volumétricas das misturas e as temperaturas observadas durante a sua produção. Nesse quadro é possível verificar que as temperaturas de fabrico e de compactação são idênticas para todas as misturas produzidas, tal como era pretendido.

Na preparação das misturas foi tido em consideração que a percentagem de betume varia de acordo com o tipo de mistura (convencional, 30% MF e 50% MF), mas mantém-se constante entre as misturas produzidas com diferentes aditivos rejuvenescedores. Quanto ao volume de vazios das misturas é possível verificar que as misturas com os rejuvenescedores R1 e R4 são as que apresentam menores volume de vazios, indicando uma maior influência dos mesmos na trabalhabilidade da mistura.

Quadro 4.6 – Condições de produção e características volumétricas das misturas betuminosas executadas a quente.

Mistura	Temperatura (°C)		Porcentagem de betume (%)	BMT (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
	Produção	Compactação			
Convencional	156,7	142,5	4,80	2450,95	3,18
30% MF	145,0	127,9	5,00	2430,52	2,60
50% MF	159,5	137,5	5,10	2427,85	2,90
50MF_3R1	144,0	134,5	5,10	2398,85	1,99
50MF_3R3	150,0	130,6	5,10	2409,45	3,52
50MF_3R4	155,0	131,0	5,10	2449,57	3,94

Através dos resultados obtidos, no que respeita à sensibilidade à água (Figura 4.30), verifica-se que todas as misturas com incorporação de MF apresentam um bom comportamento, ultrapassando até o resultado obtido para a mistura convencional. No entanto, a mistura 50MF_3R4 é a que apresenta melhores resultados em termos de ITSR. Já no que respeita aos valores da resistência à tração indireta dos provetes secos, é possível verificar que os provetes com incorporação de aditivos rejuvenescedores apresentam valores mais baixos que os provetes das misturas sem rejuvenescedores. Isto permite concluir que os rejuvenescedores conseguiram tornar a mistura menos rígida, comprovando-se assim a sua eficiência.

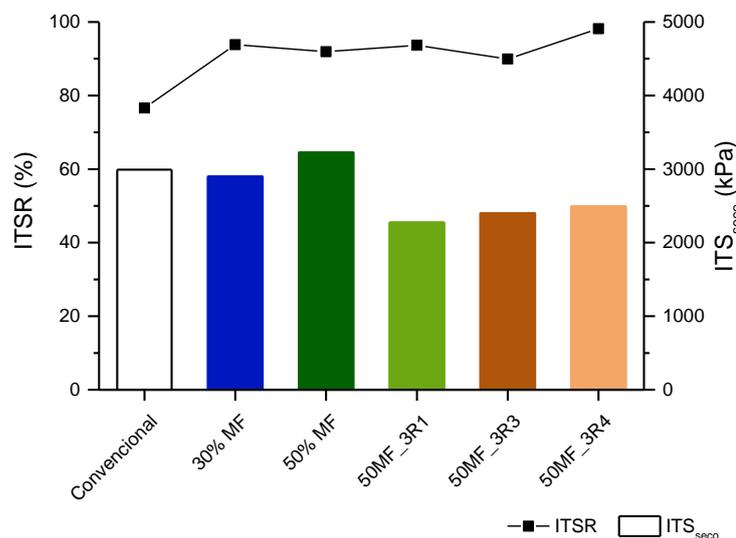


Figura 4.30 – Resultados de sensibilidade à água das misturas executadas a quente.

Ainda no que respeita às misturas sem aditivo, é possível verificar que a mistura com 50% de MF apresenta uma maior resistência à tração indireta comparativamente à mistura com 30% de

MF, o que pode indiciar uma maior rigidez e fragilidade da mistura, pela presença de um betume demasiadamente duro e envelhecido, o que poderá significar que a mistura pode ter um desempenho inferior em serviço.

4.4.2. Resistência à Deformação Permanente

A resistência à deformação permanente é um parâmetro que permite avaliar o desempenho das misturas quando sujeitas a cargas lentas sob temperaturas elevadas, sendo por isso um parâmetro de maior relevância em países com climas quentes. No presente trabalho, esta propriedade foi avaliada por meio do ensaio de pista descrito no Capítulo 3, cujos resultados se apresentam na Figura 4.31 e na Figura 4.32.

No que respeita às misturas sem qualquer tipo de aditivo (Figura 4.31), conforme se esperava é possível verificar que a incorporação de MF nas misturas torna-as mais resistentes à deformação permanente. Assim, quanto maior a quantidade de MF adicionada à mistura, melhor será a sua resistência à deformação permanente.

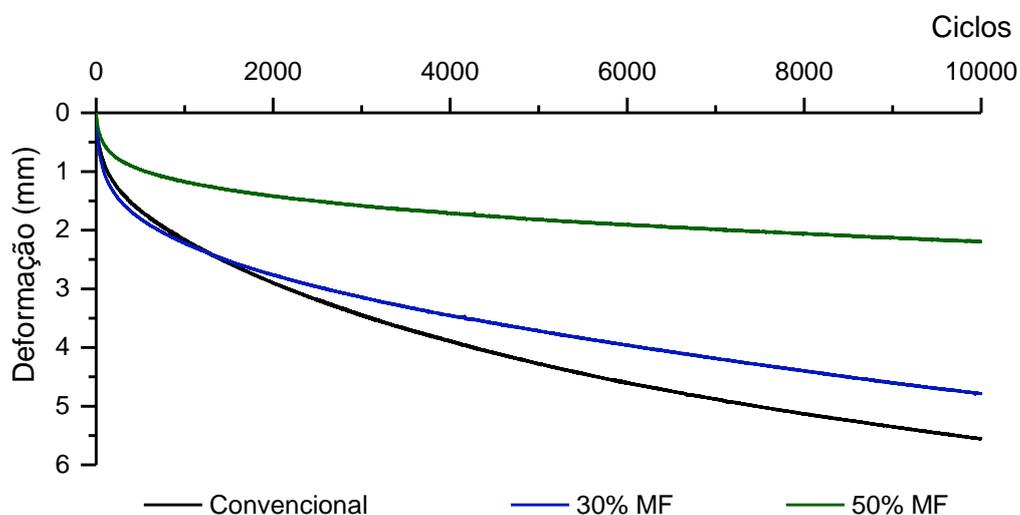


Figura 4.31 – Evolução da deformação nos ensaios de pista misturas sem aditivos.

No que respeita às misturas com 50% de MF (Figura 4.32) é possível verificar que a adição dos rejuvenescedores não comprometeu o excelente desempenho dessas misturas à deformação permanente. Inclusivamente, o melhor resultado obtido foi o da mistura com o aditivo R4 (óleo de rícino).

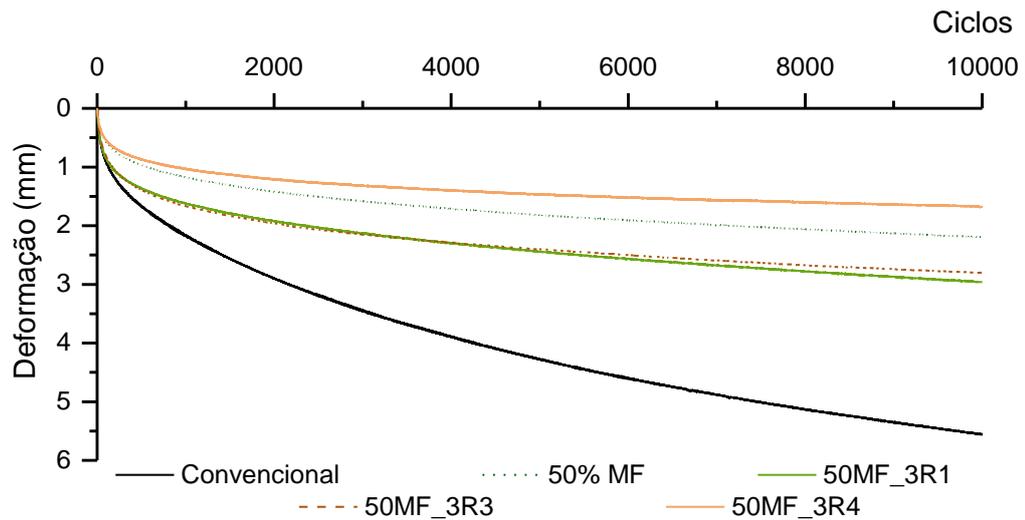


Figura 4.32 – Evolução da deformação nos ensaios de pista misturas com aditivos.

Para resumir os resultados obtidos no ensaio de pista (resistência à deformação permanente) são apresentados no Quadro 4.7 os resultados recolhidos durante o ensaio. Nesse quadro é perceptível que as misturas com 50% de MF e com 3% de rejuvenescedores apresentam propriedades muito semelhantes.

Quadro 4.7 – Resumo dos resultados dos ensaios de pista.

Mistura	Espessura média (mm)	BMT (kg/m ³)	WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	PRD _{AIR} (%)	PR _{AIR} (mm)
Convencional	40,09	2453,07	0,25	13,83	5,54
30% MF	40,36	2442,55	0,21	11,85	4,78
50% MF	40,26	2437,20	0,07	5,42	2,19
50MF_3R1	39,88	2427,75	0,10	7,41	2,96
50MF_3R3	40,23	2407,99	0,08	6,95	2,80
50MF_3R4	40,54	2408,39	0,04	4,11	1,67

Mais uma vez se constata que a mistura com óleo de rícino apresenta os melhores resultados, em termos de deformação permanente. Estes resultados podem eventualmente justificar-se pelo facto de o betume rejuvenescido com este aditivo ser mais suscetível ao envelhecimento durante a fase de produção, conforme se verificou pelos resultados apresentados na Secção 4.3.3, (valores de penetração mais baixos), tornando-o mais duro e, conseqüentemente, resultando numa mistura mais rígida e mais resistente à deformação. Tratando-se de um rejuvenescedor de origem vegetal, o interesse por esta mistura é ainda mais elevado, uma vez que se trata de um aditivo de origem renovável e que poderá significar um menor custo de produção das misturas.

4.4.3. Módulo de Rigidez a Várias Temperaturas

Conforme referido na Secção 3.9.3, de modo a ser possível obter uma maior abrangência em termos de condições de ensaio, o módulo de rigidez das misturas foi determinado realizando o ensaio a diferentes temperaturas e para uma gama de frequências de carregamento, o que possibilitou o traçado de uma curva mestra por mistura, com base numa temperatura de referência (neste caso, de 20 °C). Dado o comportamento viscoelástico deste tipo de materiais, a realização de ensaios a diferentes temperaturas permite ainda avaliar a evolução de diferentes parâmetros (módulo complexo, ângulo de fase, módulo elástico e módulo viscoso) com as diferentes condições de carregamento. Quanto ao módulo complexo, estão apresentadas na Figura 4.33 as curvas mestras para as misturas betuminosas sem aditivos, isto é, mistura convencional, mistura com 30% MF e mistura com 50% MF.

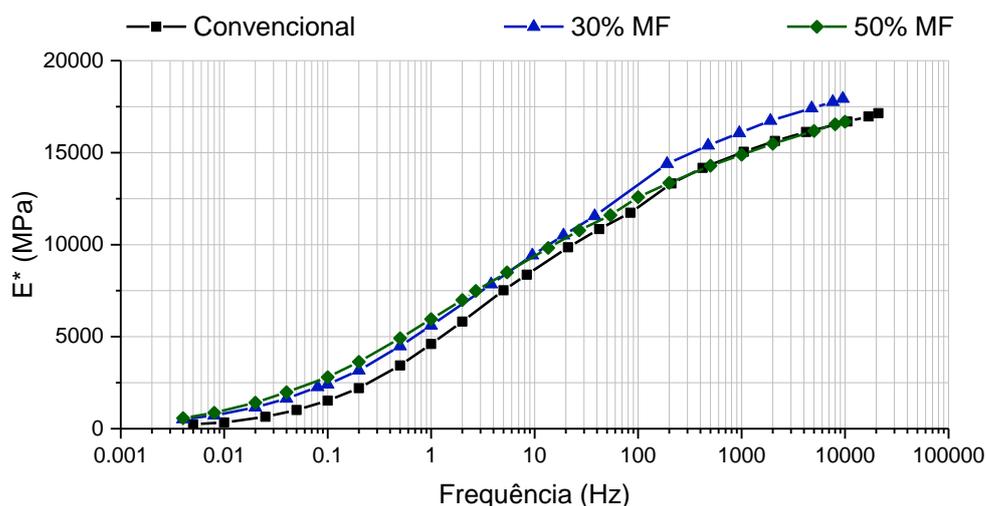


Figura 4.33 – Curvas mestras do módulo complexo para as misturas sem aditivos ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).

Analisando as curvas obtidas é possível verificar que, para frequências baixas, que correspondem a temperaturas mais altas e velocidades de carregamento mais baixas, as misturas com incorporação de MF têm comportamentos muito próximos e apresentam módulos de rigidez superiores aos da mistura convencional. Essa mesma tendência é observável de forma inversa no ângulo de fase, na Figura 4.34, onde essas misturas apresentam menores valores de ângulo de fase, indicando uma menor suscetibilidade à temperatura e à frequência de aplicação do carregamento.

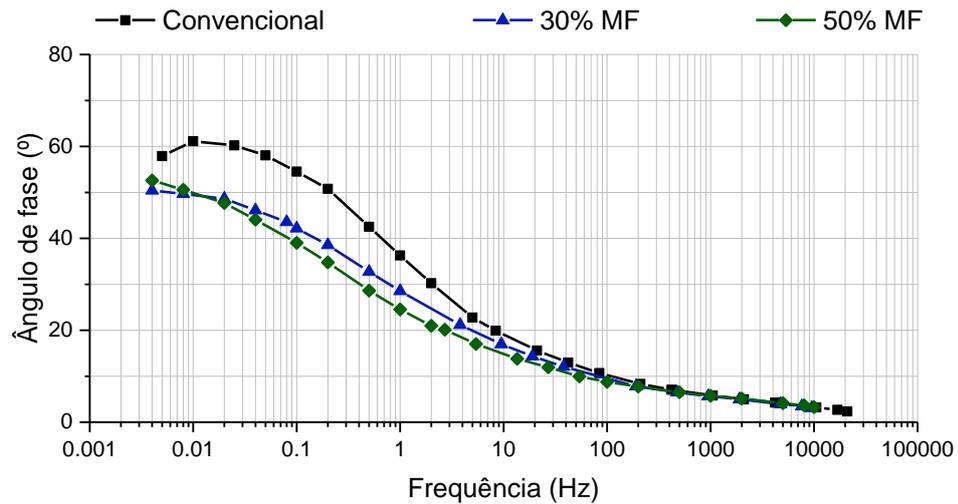


Figura 4.34 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas sem aditivos ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Os valores mais baixos de ângulo de fase que as misturas com material fresado apresentam, conduzem a valores de pico do módulo viscoso inferiores (conforme se verifica pela análise da Figura 4.35).

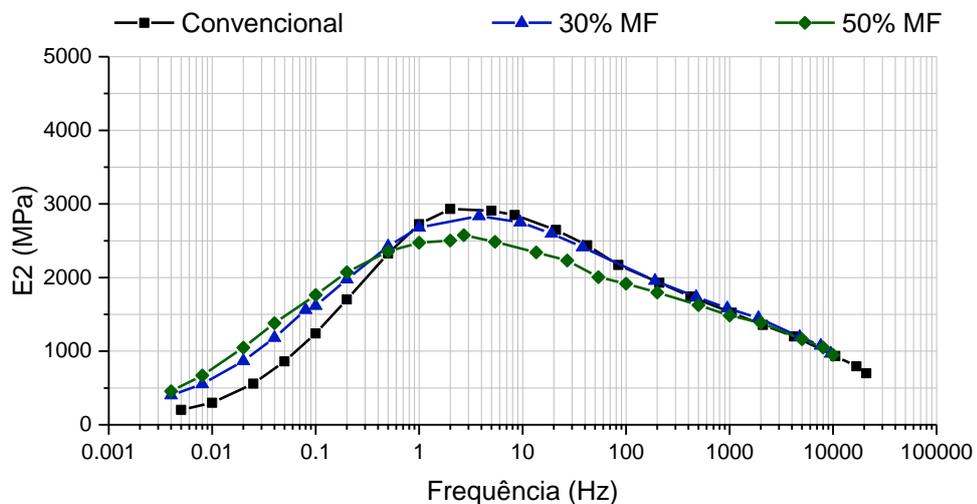


Figura 4.35 – Curvas mestras do módulo viscoso para as misturas sem aditivos ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Associando os valores de pico do módulo viscoso inferiores aos valores de módulo elástico superiores (Figura 4.36), conclui-se que este tipo de misturas terá menor deformabilidade que a mistura convencional.

No sentido de verificar a eficiência e o impacto da incorporação de aditivos rejuvenescedores nas misturas com 50% MF, estas foram também testadas quanto ao módulo de rigidez a diversas temperaturas.

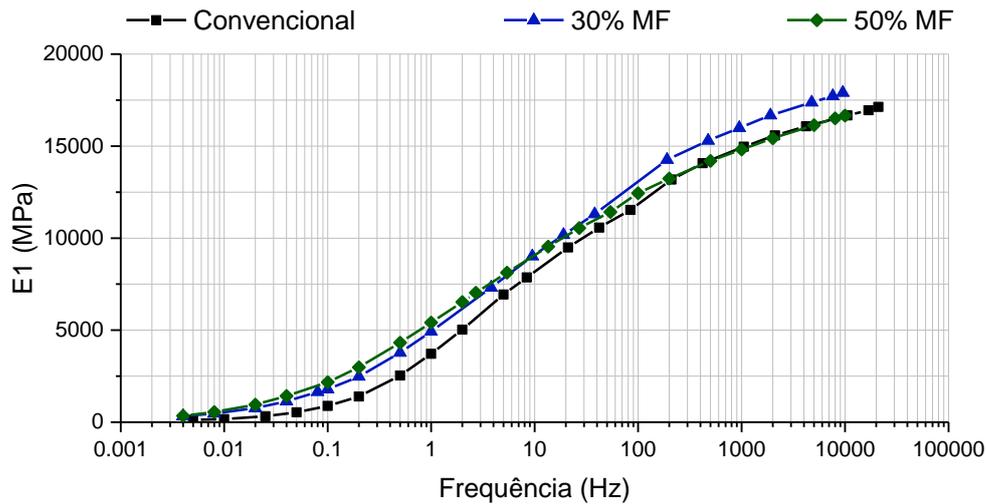


Figura 4.36 – Curvas mestras do módulo elástico para as misturas sem aditivos ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

No que respeita ao módulo complexo (Figura 4.37) observa-se que a mistura com 3% de R3 é a que apresenta comportamento mais similar ao da mistura convencional. No que respeita às misturas com 3% de R1 e 3% de R4 verifica-se uma menor sensibilidade às variações de temperatura, resultando num módulo inferior para temperaturas mais baixas e velocidades de carregamento mais altas.

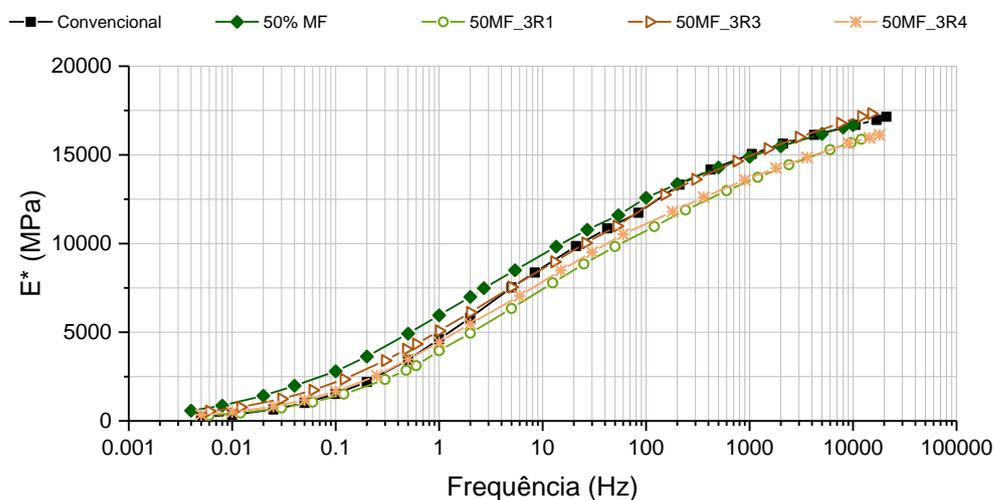


Figura 4.37 – Curvas mestras do módulo complexo para as misturas com rejuvenescedores e misturas de referência ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Como seria de esperar, a mistura convencional é a que apresenta valores mais altos de ângulo de fase (Figura 4.38), sendo que a incorporação de aditivos rejuvenescedores aumenta os valores de ângulo de fase relativamente à mistura com apenas 50% de material fresado, não atingindo no entanto os valores da mistura convencional.

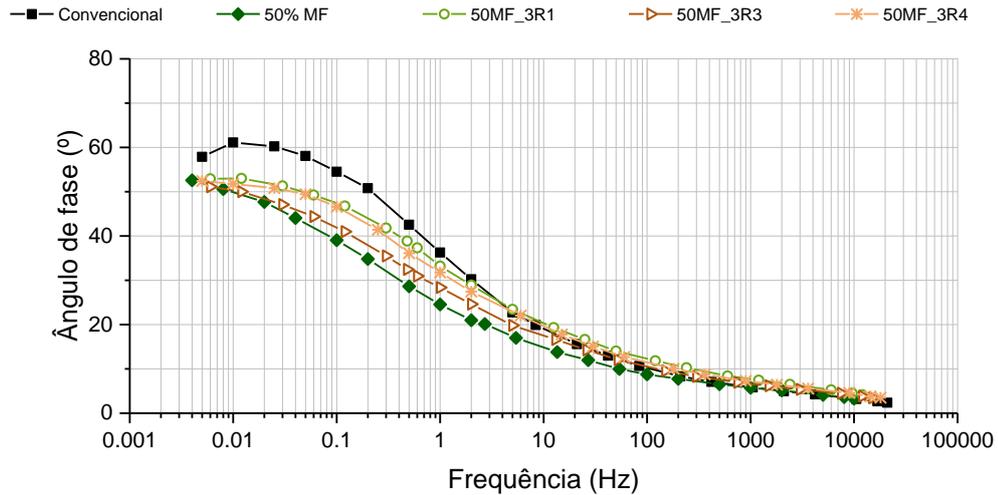


Figura 4.38 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas com rejuvenescedores e misturas de referência ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).

No que respeita ao módulo viscoso (Figura 4.39), verifica-se genericamente que os valores obtidos para as misturas com aditivos rejuvenescedores se encontram entre os valores obtidos para a mistura convencional e para a mistura sem aditivos, o que demonstra a eficácia dos aditivos no rejuvenescimento do betume envelhecido.

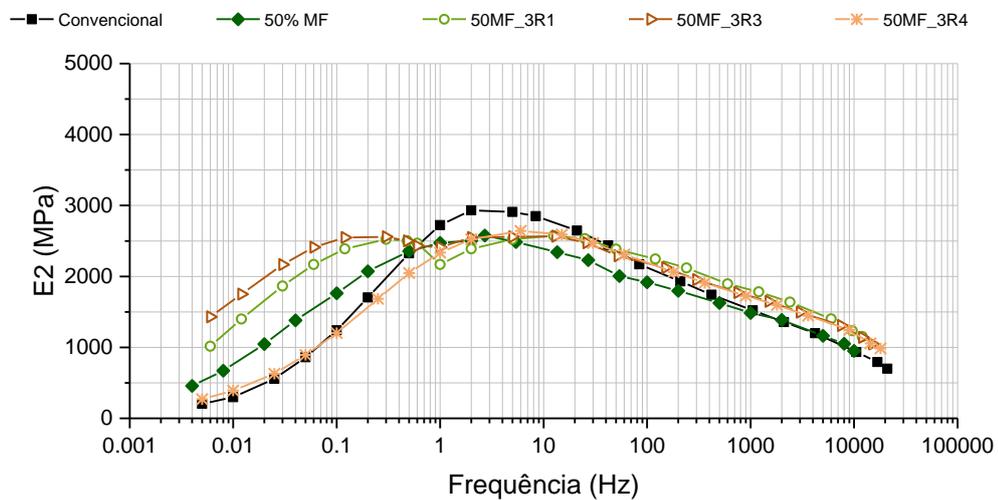


Figura 4.39 – Curvas mestras do módulo viscoso para as misturas com rejuvenescedores e misturas de referência ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).

Relativamente ao módulo elástico (Figura 4.40), é possível verificar as mesmas tendências observadas para o módulo complexo.

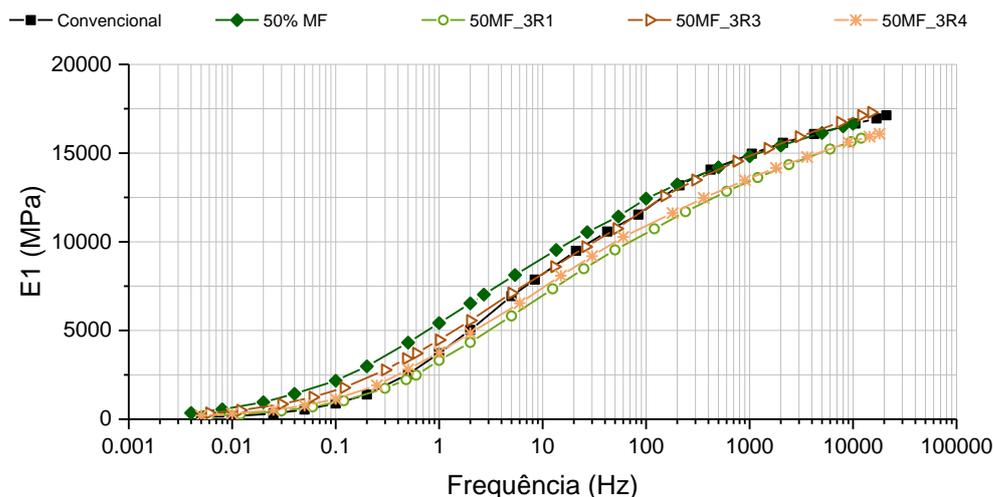


Figura 4.40 – Curvas mestras do módulo elástico para as misturas com rejuvenescedores e misturas de referência ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).

4.4.4. Resistência ao Fendilhamento por Fadiga

Relativamente à resistência ao fendilhamento por fadiga, conforme se pode observar pela análise da Figura 4.41, constata-se que as misturas com incorporação de material fresado apresentam melhores resultados do que a mistura convencional. Isto pode advir da utilização de um betume novo mais mole e, conseqüentemente, mais flexível do que o utilizado na mistura convencional, o que poderá resultar numa maior resistência à aplicação de carregamentos repetidos. Este superior comportamento à fadiga de misturas recicladas já foi referido anteriormente por outros autores (Huang *et al.*, 2005, Oliveira *et al.*, 2013). De referir que as misturas com 30% e 50% de material fresado apresentam um comportamento à fadiga idêntico entre si.

Quando a análise é realizada para as misturas com betumes aditivados com rejuvenescedores (Figura 4.42) é perceptível o melhoramento da vida à fadiga das misturas betuminosas na presença deste tipo de aditivo, salientando-se que, não sendo um aditivo comercial, o óleo de rícino (R4) alcança um dos melhores resultados.

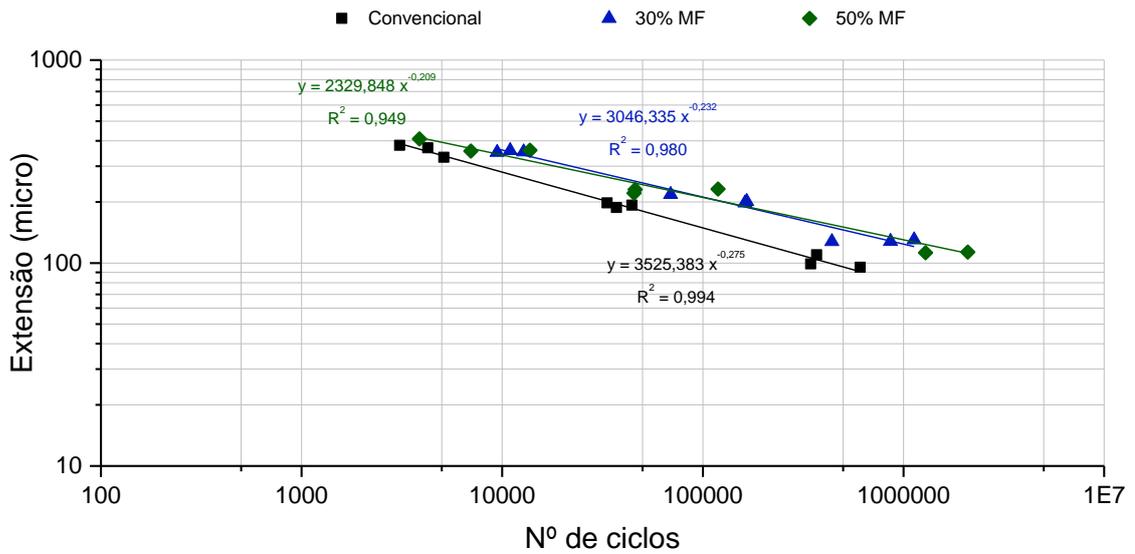


Figura 4.41 – Leis de fadiga das misturas sem aditivos.

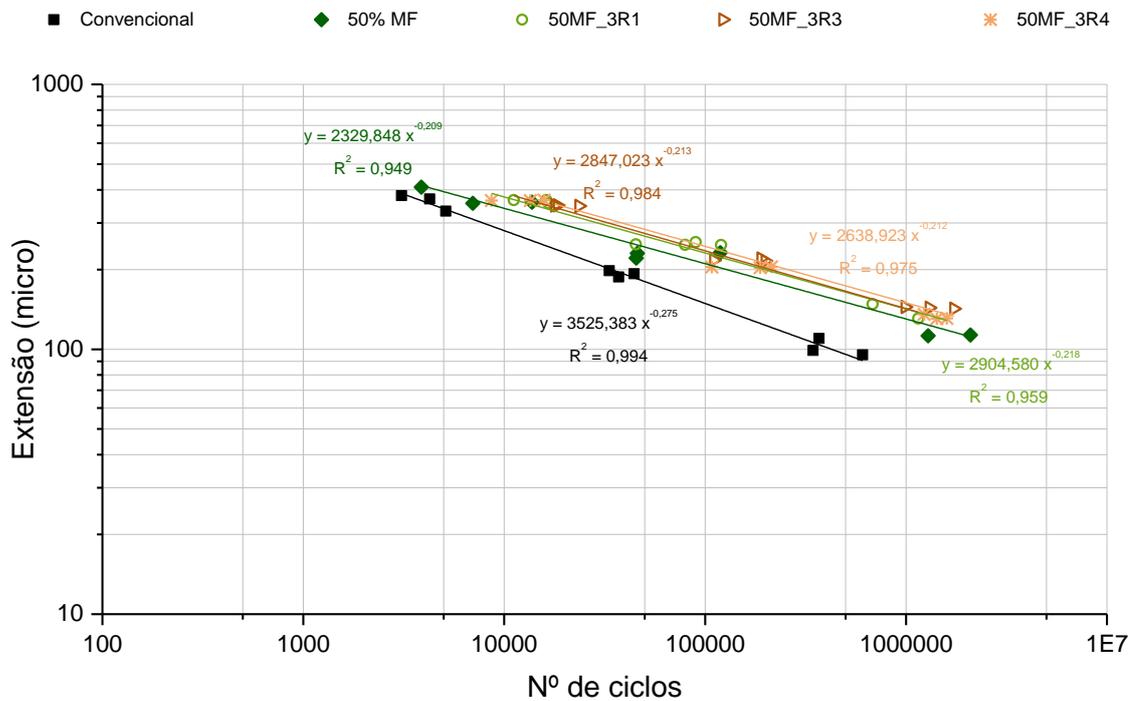


Figura 4.42 – Leis de fadiga das misturas com aditivos e misturas de referência.

Ainda no que respeita à resistência à fadiga é possível analisar o número de ciclos até à rotura correspondente a uma extensão de tração de 100×10^{-6} (N_{100}), e a extensão de tração que origina uma resistência ao fendilhamento por fadiga de 1×10^6 ciclos (ϵ_6). Estes dois parâmetros, apresentados no Quadro 4.8, são genericamente utilizados para comparar o comportamento das misturas quanto à resistência ao fendilhamento por fadiga.

Quadro 4.8 – Propriedades das leis de fadiga das MBQs estudadas no presente trabalho.

Mistura	Parâmetros da lei de fadiga			N ₁₀₀	ε ₆
	a	b	R ²		
Convencional	3525,383	-0,275	0,994	4,261E+05	79,101
30% MF	3046,335	-0,232	0,980	2,524E+06	123,931
50% MF	2329,848	-0,209	0,949	3,533E+06	130,154
50MF_3R1	2904,580	-0,218	0,959	5,055E+06	142,423
50MF_3R3	2847,023	-0,213	0,984	6,653E+06	149,773
50MF_3R4	2638,923	-0,212	0,975	5,228E+06	141,898

Com os resultados obtidos verifica-se que as misturas com incorporação de MF (sem aditivo) apresentam maior resistência à fadiga que a mistura convencional, sendo esta melhoria mais acentuada para a mistura com maior percentagem de MF. Quanto às misturas com aditivos rejuvenescedores é possível observar um comportamento semelhante entre elas, sendo este superior ao das misturas sem aditivos.

CAPÍTULO 5

ESTUDO DE COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS COM BETUME-ESPUMA

5.1. Estudo Preliminar das Condições de Produção de Betume-Espuma

Depois de finalizado o estudo das misturas betuminosas recicladas a quente, neste capítulo inicia-se o estudo da utilização de betume-espuma para se conseguir produzir essas misturas a temperaturas mais baixas.

Para se poder estudar esta tecnologia em laboratório houve necessidade de adquirir um novo equipamento bastante complexo para produção de betume-espuma (Wirtgen WLB 10 S), cujo funcionamento teve de ser avaliado de forma cuidada antes de se iniciar o estudo das características de expansibilidade de diferentes betumes-espuma. Assim, nesta fase inicial de definição das condições a utilizar para produção de betume-espuma, foi indispensável o estudo da influência da velocidade de injeção, das condições de fronteira que resultam do recipiente onde o betume-espuma é injetado, da possível utilização dum adaptador no bico injetor e da alteração da pressão do ar aplicada aquando da injeção.

De facto, estas variáveis podem alterar as propriedades de expansão do betume-espuma, sendo fundamental o seu estudo para definição das condições de base a utilizar posteriormente na avaliação de todos os ligantes e misturas que aplicam esta tecnologia.

De modo a reduzir a variabilidade de resultados, as condições em que foram realizadas as diversas injeções de betume-espuma foram mantidos constantes, modificando-se apenas cada uma das variáveis que se estava a estudar. Nesse sentido, foram sempre estudadas três percentagens de água (3, 4 e 5%) para cada variável em análise, e os resultados apresentados correspondem à média de três injeções.

5.1.1. Influência da Velocidade de Injeção

O equipamento de produção de betume-espuma é acompanhado por dois bicos injetores de diferentes dimensões, pelo que surgiu logo o interesse em analisar a influência destes nas propriedades de expansão dos betumes. Na prática, os bicos injetores apresentam diferentes velocidades de injeção, nomeadamente, 100 g/s e 50 g/s. Assim, para se produzir a mesma quantidade de betume-espuma (500 g), cada um dos bicos injetores vai originar tempos de *spray* distintos (5 s para 100 g/s; 10 s para 50 g/s), o que em princípio pode influenciar as propriedades de expansão dos betumes.

Neste estudo avaliou-se um único betume (betume 50/70 com 0,2% do aditivo E1) para uma temperatura de injeção de 170 °C. Os resultados de expansibilidade obtidos ao estudar a influência desta variável são apresentados na Figura 5.1.

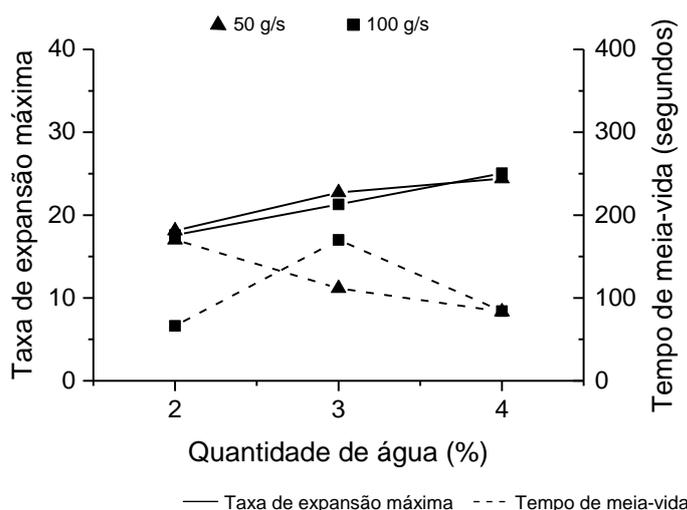


Figura 5.1 – Comparação da expansibilidade entre os bicos injetores de 50 g/s e de 100 g/s.

Ao analisar os resultados obtidos, verifica-se que a mudança do bico injetor não promove uma alteração significativa das taxas de expansão, não sendo evidente qual o efeito sobre os tempos de meia-vida (dado que os resultados obtidos para diferentes percentagens de água são variáveis). Assim, com base nestes resultados concluiu-se que a expansão do betume em estudo não é muito dependente da velocidade de injeção.

Deste modo, a seleção do bico injetor a utilizar ao longo do estudo baseou-se noutros fatores. A escolha incidiu sobre a utilização do bico injetor de 50 g/s que conduz a um tempo de *spray* superior, permitindo um melhor controlo das quantidades de betume a injetar nas misturas, o

que tem especial importância quando as amassaduras realizadas em laboratório não precisam de grandes quantidades de betume-espuma.

5.1.2. Influência das Condições de Fronteira

Em seguida, para estudar a influência das condições de fronteira no comportamento expansivo do betume-espuma, foi realizado um estudo comparativo entre dois recipientes de diferentes dimensões, nos quais se procedeu à medição das propriedades de expansibilidade após efetuar injeções de betume-espuma idênticas. Neste caso, recorreu-se a um recipiente fornecido com o equipamento de produção de betume-espuma (recipiente grande) e a um recipiente comum existente em laboratório (recipiente pequeno).

Neste estudo voltou a avaliar-se apenas um único betume (betume 50/70 com 0,2% do aditivo E1) para uma temperatura de injeção de 170 °C. O volume dos recipientes e as quantidades de betume injetadas em cada um deles são apresentados no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Características dos recipientes usados para medir as propriedades de expansão.

Característica	Recipiente grande	Recipiente pequeno
Volume (cm ³)	21382	6989
Quantidade de betume (g)	500	100
Ocupação do recipiente por betume (%)	2,34	1,43

Quanto à ocupação do recipiente por betume, este valor refere-se ao estado não espumado, o que explica a reduzida taxa de ocupação em ambos os casos (para evitar problemas de segurança na fase em que o betume apresenta a sua expansão máxima). Não se utilizou uma taxa de ocupação mais elevada no recipiente pequeno, porque havia um maior risco do betume extravasar do recipiente ao expandir. No recipiente grande injetou-se a quantidade de betume que permite utilizar a escala de expansão anteriormente referida.

No que diz respeito aos resultados de expansibilidade obtidos (Figura 5.2) com os dois recipientes, é possível verificar que o recipiente pequeno apresenta melhores resultados em termos de taxa expansão máxima, o que ainda é mais visível ao utilizar maiores quantidades de água para expandir o betume. No entanto, ao comparar os valores de tempo de meia-vida, os resultados invertem-se e são substancialmente melhores para o recipiente grande, independentemente da quantidade de água usada na produção do betume-espuma.

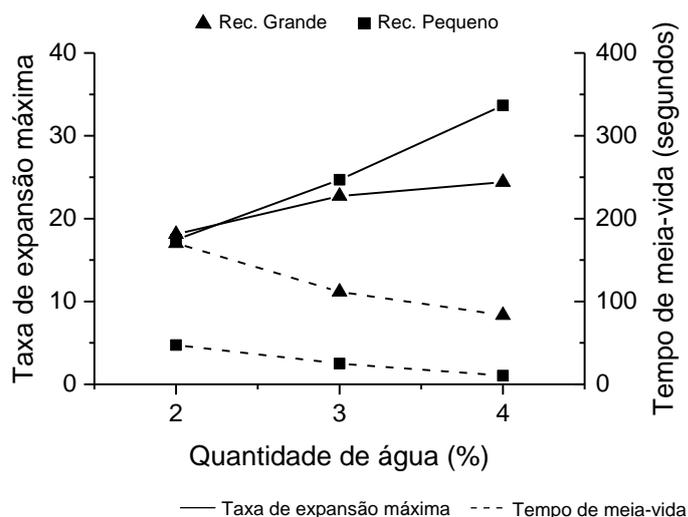


Figura 5.2 – Comparação da expansibilidade medida em diferentes recipientes que alteram as condições de fronteira.

Dos resultados obtidos pode concluir-se que o facto das “fronteiras” se encontrarem mais próximas (recipiente pequeno) conduz a um decaimento da espuma mais rápido, justificado pelo maior contacto entre as próprias paredes das bolhas de betume e entre estas e as paredes do recipiente, o que vai de encontro às observações de outros autores (Lesueur *et al.*, 2004).

Como se pretende que este estudo seja o mais replicável possível, optou-se pelo uso do recipiente de maiores dimensões que foi facultado pelo fornecedor do equipamento, e para o qual se dispunha da escala para medição da expansão que é geralmente usada nos trabalhos com betume-espuma. Além disso, verificou-se que os resultados obtidos com o recipiente grande são mais favoráveis, dado que aumentam muito o tempo de meia-vida.

5.1.3. Influência da Utilização do Adaptador no Bico Injetor

O manual do equipamento de produção de betume-espuma (Wirtgen, 2008) sugere que, ao utilizar o bico injetor de 50 g/s escolhido neste trabalho, o adaptador apresentado na Figura 5.3 deve ser colocado na câmara de expansão.

Para se compreender melhor o efeito deste adaptador nas propriedades de expansão dos betumes, optou-se por analisar dois betumes sem qualquer tipo de aditivo, um mais duro (50/70) e outro mais mole (160/220). Devido à diferente viscosidade dos dois betumes, o betume 50/70 foi espumado a 170 °C e o betume 160/220 a 150 °C (como se justifica na Secção 5.2), mantendo-se esta temperatura nos ensaios com e sem adaptador.



Figura 5.3 – Adaptador para o bico injetor de 50 g/s.

Apesar da sugestão do fornecedor do equipamento, ao analisar os resultados de expansão obtidos (Figura 5.4) é possível verificar que o uso do adaptador não é vantajoso para nenhum dos betumes estudados.

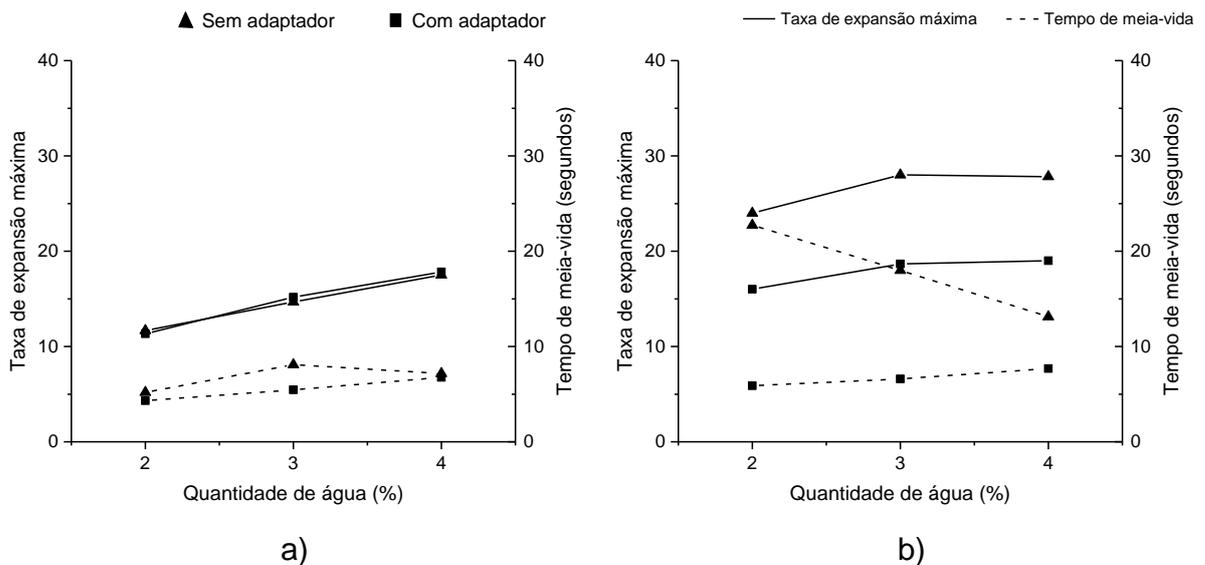


Figura 5.4 – Comparação da expansibilidade com e sem adaptador no bico injetor: a) betume 50/70 e b) betume 160/220.

O efeito negativo na expansão do betume associado à utilização do adaptador não é muito visível no betume mais viscoso (50/70), mas torna-se evidente no betume menos viscoso (160/220), para o qual, para além do decréscimo da taxa de expansão máxima, existe igualmente um decréscimo no tempo de meia-vida. Deste modo, ao prosseguir com a realização deste trabalho optou-se por não utilizar o referido adaptador.

5.1.4. Influência da Pressão do Ar

A pressão do ar e da água aquando do processo de expansão do betume pode alterar significativamente o comportamento do betume-espuma. Dessa forma, e apesar de existirem algumas limitações por parte do equipamento no controlo destes parâmetros, optou-se por fazer ensaios a valores de pressão do ar distintos (não tendo sido possível alterar a pressão da água).

De referir que a existência de um compressor dentro do equipamento faz com que a pressão do ar dentro do mesmo não seja sempre constante, uma vez que este vai perdendo pressão à medida que a injeção é realizada. No entanto, é possível ajustar os valores da pressão do ar de controlo indicadas ao equipamento, sendo ensaiados valores de 5,5 e 8,0 bar para estudar a sua influência no comportamento do betume sujeito ao processo de expansão. Neste estudo avaliou-se apenas o betume 50/70 sem aditivo, para uma temperatura de injeção de 170 °C.

Os resultados de expansibilidade obtidos neste estudo são apresentados na Figura 5.5, onde é possível verificar que uma maior pressão do ar (8,0 bar) aquando da expansão do betume implica melhores taxas de expansão máxima.

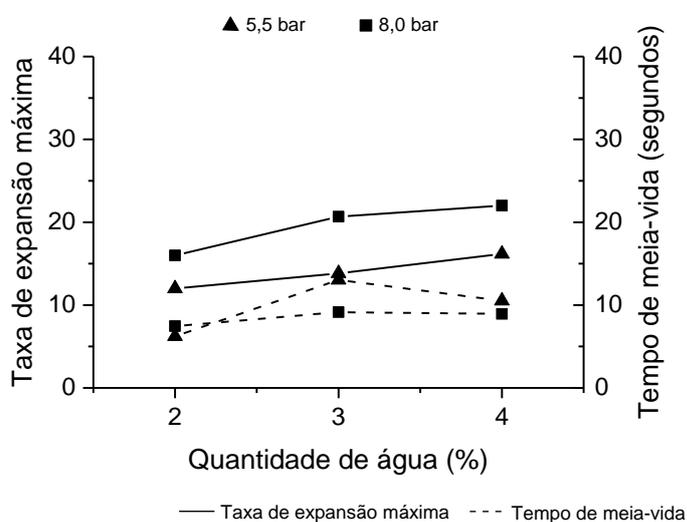


Figura 5.5 – Comparação da expansibilidade do betume ao alterar a pressão de ar na injeção.

No entanto, no que respeita aos tempos de meia-vida os resultados são mais favoráveis para uma menor pressão do ar, apesar das diferenças serem reduzidas. Apesar da aparente vantagem em utilizar uma pressão do ar mais elevada, ao longo do estudo optou-se por utilizar o valor de 5,5 bar por ser o que vem por definição com o equipamento, garantindo desse modo uma maior reprodutibilidade das condições de funcionamento aplicadas neste trabalho.

5.2. Propriedades dos Betumes Usados na Produção de Betume-Espuma

5.2.1. Propriedades dos Betumes sem Aditivos

Depois de definidas as condições de operação do equipamento de produção de betume-espuma (bico injetor de 50 g/s sem adaptador e pressão do ar de 5,5 bar, com injeção no recipiente grande), a fase seguinte do trabalho consistiu em avaliar a expansão de diferentes betumes, para temperaturas de injeção variáveis (selecionadas em função da viscosidade do betume).

Assim, no sentido de perceber de que forma o betume e a temperatura afetam as propriedades do betume-espuma, numa primeira fase foram ensaiados três betumes com penetração diferente (50/70, 70/100 e 160/220), cujas injeções foram realizadas a temperaturas distintas, embora garantindo que os betumes apresentam viscosidades idênticas. A definição das temperaturas de referência para injeção de cada betume consistiu em determinar as temperaturas às quais se obtinha uma equiviscosidade de 0,1 Pa.s, como se pode ver na linha a azul da Figura 5.6.

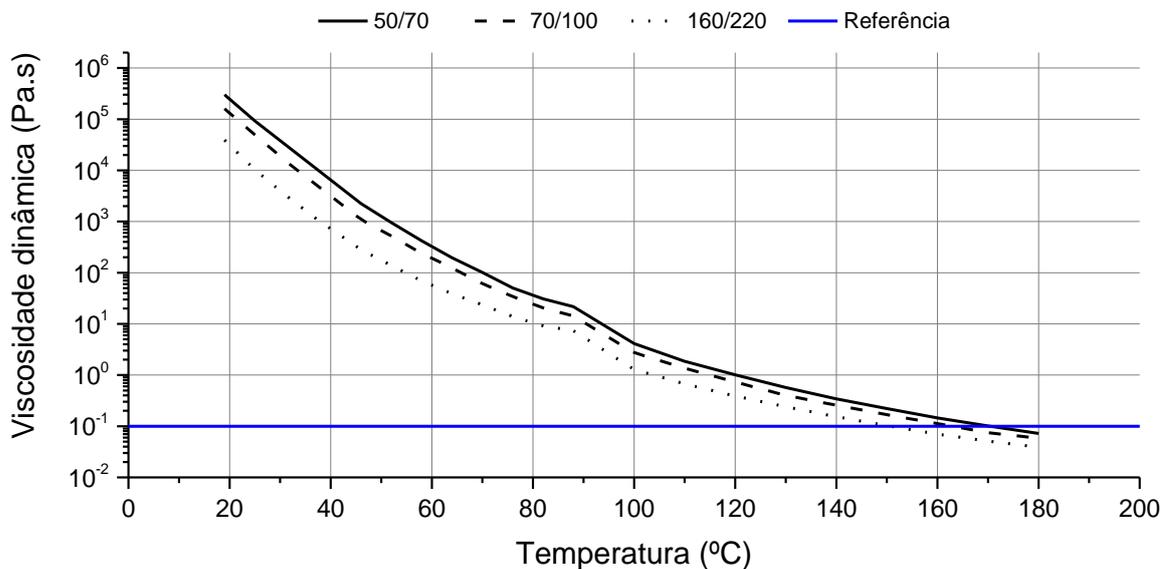


Figura 5.6 – Variação da viscosidade dinâmica dos betumes e indicação da viscosidade de referência para definição das temperaturas a usar no estudo de expansibilidade dos betumes.

Assim, obtiveram-se temperaturas de referência de 170 °C para o betume 50/70, de 160 °C para o betume 70/100 e de 150 °C para o betume 160/220. Após definir a temperatura de referência para cada betume, as propriedades de expansão foram avaliadas para essa temperatura, bem como para temperaturas dez graus abaixo e acima da mesma. No Quadro 5.2 são apresentadas as temperaturas que serão usadas para o estudo de expansão dos três betumes.

Quadro 5.2 – Temperaturas usadas no estudo das propriedades de expansão dos betumes.

Temperatura (°C)	Betume		
	50/70	70/100	160/220
140			
150			Referência
160		Referência	
170	Referência		
180			

A temperatura de 160 °C é a única que é comum a todos os betumes analisados. Posteriormente podem ser feitas comparações dos resultados de expansão obtidos para os vários betumes de duas formas: i) tendo por base a mesma temperatura de injeção (neste caso apenas se pode fazer essa comparação a 160 °C), ou; ii) tendo por base as temperaturas de referência, para as quais se garante uma equiviscosidade dos vários betumes.

Antes de se proceder ao estudo da expansão, numa primeira fase é importante conhecer as características básicas dos betumes em estudo, que certamente vão ter influência nas respetivas propriedades de expansibilidade. Assim, os resultados de penetração a 25 °C e a temperatura de amolecimento dos betumes analisados são apresentados na Figura 5.7.

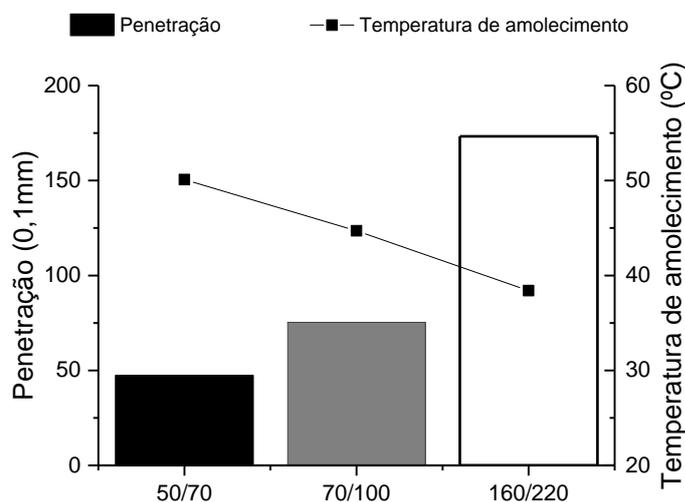


Figura 5.7 – Penetração a 25 °C e temperatura de amolecimento dos betumes em estudo.

Os resultados demonstram que o betume 160/220 é muito menos viscoso do que os restantes betumes, razão pela qual é expectável que apresente diferentes propriedades de expansão. Os betumes 50/70 e 70/100 encontram-se próximos dos limites inferiores de referência para a

penetração, o que diferencia ainda mais o betume 160/220. Aliás, o betume 50/70 até se encontra ligeiramente abaixo do limite inferior de penetração, mas optou-se por manter a sua designação comercial e por prosseguir o estudo com este betume para compreender as eventuais dificuldades em expandir um betume um pouco mais viscoso.

Em seguida avaliaram-se as características reológicas dos três betumes em estudo numa gama mais alargada de temperaturas, entre 19 e 88 °C, nomeadamente o módulo complexo e o ângulo de fase (Figura 5.8).

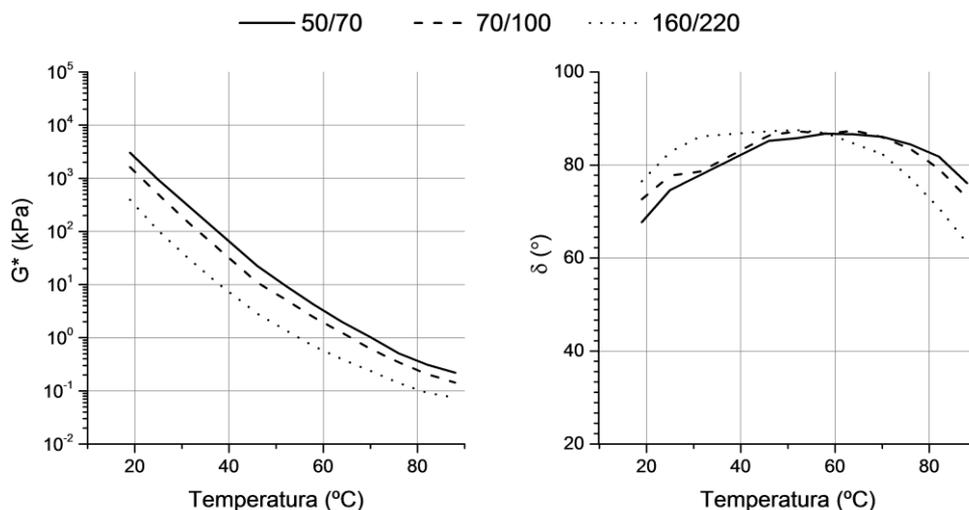


Figura 5.8 – Características reológicas dos betumes base usados no estudo: módulo complexo (à esquerda) e ângulo de fase (à direita).

Existe uma diferença significativa no comportamento reológico entre os três betumes utilizados para o estudo de expansibilidade. Tal como seria de esperar, o betume com maior penetração (160/220) é o betume com o menor módulo complexo a todas as temperaturas de ensaio, acontecendo o inverso para o betume mais viscoso (50/70). Ao analisar o ângulo de fase verifica-se que o seu valor máximo (zona de transição de comportamento, com um significado próximo do observado no ensaio Anel e Bola) é atingido para temperaturas mais baixas quando os betumes são menos viscosos, confirmando os resultados da caracterização básica.

Os valores de $G^*/\sin(\delta)$ obtidos no ensaio de reologia podem ser utilizados para determinar a temperatura superior do grau PG dos betumes em estudo, que é a temperatura à qual $G^*/\sin(\delta)$ tem um valor igual a 1 kPa (Figura 5.9). Essa classificação é utilizada, por exemplo, nos E.U.A, e pode ter interesse para estudos comparativos.

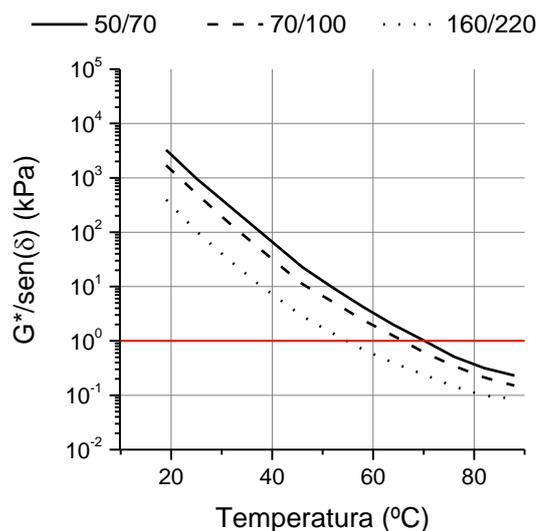


Figura 5.9 – Variação de $G^*/\text{sen}(\delta)$ e valor utilizado como referência (a vermelho) para determinar a temperatura superior do grau PG dos betumes base em estudo.

Ao aplicar o procedimento descrito verificou-se que a temperatura superior do grau PG para o betume menos viscoso (160/220) é de 52 °C, para o betume mais viscoso (50/70) é de 70 °C e para o betume 70/100 é de 64 °C. Desta forma, é possível confirmar que a classificação PG também demonstra que existem claras diferenças entre os três betumes em estudo (tal como se pretendia), sendo novamente o betume 160/220 o que mais se distingue dos restantes.

5.2.2. Propriedades dos Betumes com Aditivos

Neste trabalho também se procurou avaliar as possíveis vantagens associadas à utilização de aditivos estabilizadores de espuma (aditivos E1 a E4 descritos no Capítulo 3), no sentido de melhorar as propriedades de expansibilidade de betumes menos expansivos. Dado que o betume que previsivelmente terá piores características de expansão é o 50/70 (por ser o mais viscoso), foi este o betume escolhido para avaliar o efeito dos aditivos E1 a E4. É importante salientar que não se pretende que estes aditivos alterem as propriedades básicas do betume, mas que atuem apenas na fase em que o betume é espumado.

Assim, procedeu-se à determinação das características básicas de todos os betumes com aditivos estabilizadores utilizados ao longo do estudo, cujos resultados são apresentados na Figura 5.10 (ensaio de penetração a 25 °C) e na Figura 5.11 (ensaio anel e bola). Não se procedeu a uma caracterização mais exaustiva destes betumes aditivados (viscosidade e reologia), visto que no essencial se pretende que as propriedades do betume 50/70 não se alterem, o que pode ser avaliado de forma simples e rápida com a caracterização básica.

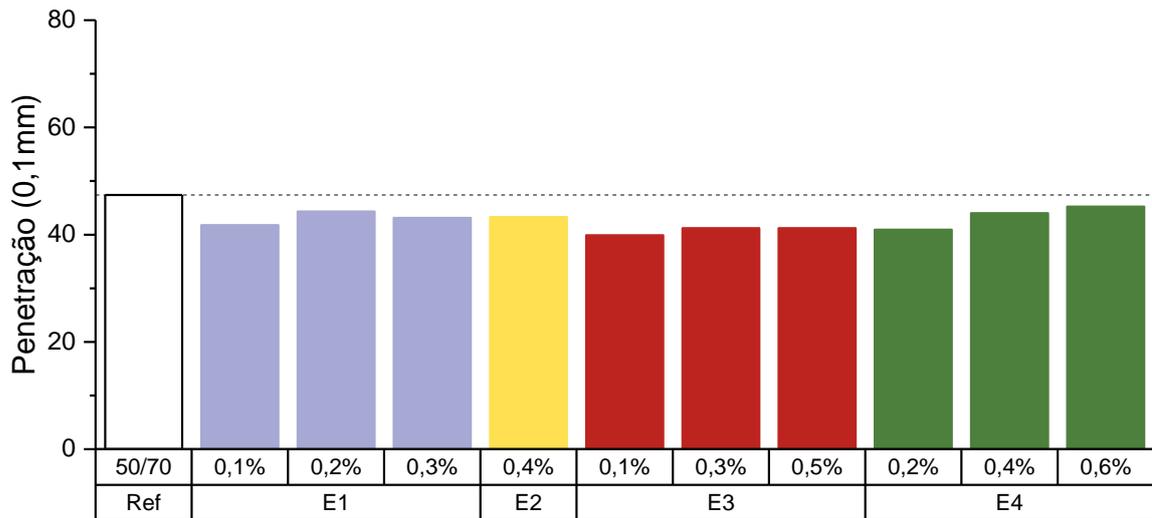


Figura 5.10 – Penetração a 25 °C dos betumes aditivados utilizados no estudo da expansibilidade.

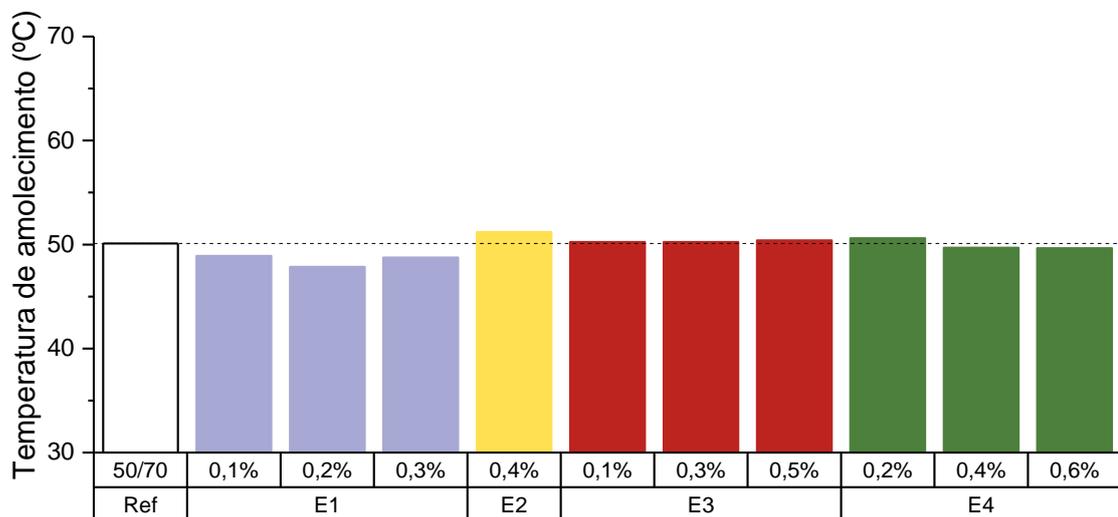


Figura 5.11 – Temperatura de amolecimento dos betumes aditivados utilizados no estudo da expansibilidade.

Os resultados obtidos permitem concluir que estes aditivos não alteram significativamente as propriedades básicas do betume 50/70, o que permite utilizar os diversos aditivos para estudo da expansibilidade sem que isso implique uma alteração inesperada de comportamento do betume nas misturas causada pela utilização do aditivo. Nesse sentido, as temperaturas de injeção a usar para os betumes aditivados serão iguais às definidas para o betume 50/70. Apesar das alterações dos betumes aditivados não serem expressivas, é possível observar que todos os aditivos reduziram um pouco a penetração do betume 50/70, e que os aditivos mais apropriados para estabilizar espuma (E1 e E4) foram os únicos que reduziram a temperatura de amolecimento.

De referir ainda que se procurou avaliar as propriedades dos diversos betumes, com ou sem aditivos, após a produção de betume-espuma, para analisar se esse processo alterava de alguma forma o comportamento reológico do betume. No entanto, não foi possível obter esses resultados numa forma consistente, dado que ainda se verificava a presença de moléculas de água nas amostras a ensaiar (um ou mais dias após a injeção), que impedem ou alteram a forma de realizar os vários ensaios de caracterização de betumes.

5.3. Propriedades de Expansibilidade do Betume-Espuma

5.3.1. Expansibilidade dos Betumes-Espuma sem Aditivos

Depois de estudadas as propriedades básicas e reológicas dos vários betumes, e conhecidas as temperaturas de ensaio às quais se deve proceder à injeção de cada um dos betumes, nesta fase procede-se ao estudo das suas propriedades de expansibilidade. Para garantir a temperatura de injeção do betume desejada, tanto o betume como todas as componentes do equipamento de produção de betume-espuma foram colocadas à mesma temperatura. Além disso, as condições de operação do equipamento de produção de betume-espuma (bico injetor de 50 g/s sem adaptador e pressão do ar de 5,5 bar, com injeção no recipiente grande) foram mantidas.

Dado que a percentagem de água tem uma grande influência na expansão dos betumes, esta variável vai continuar a ser avaliada nesta parte do estudo para se definir a quantidade de água ideal a adicionar para produção de cada um dos betumes-espuma. Tal como nos estudos iniciais do equipamento, optou-se por continuar a utilizar percentagens de água de 2, 3 e 4%. Não se estudaram percentagens de água mais baixas porque a expansão era praticamente inexistente, nem mais altas porque o tempo de meia-vida também apresentava valores muito baixos (além de se poder prejudicar o comportamento da mistura em serviço ao inserir quantidades de água mais elevadas no betume-espuma).

Tal como se indicou na Secção 3.8, ao estudar a expansibilidade do betume obteve-se como principais resultados a taxa de expansão máxima e o tempo de meia-vida, com as quais se determinou o índice de espuma. Esses resultados vão ser apresentados em seguida num gráfico que relaciona as duas propriedades, e onde cada betume-espuma estudado vai corresponder a um ponto único ao lado do qual se apresenta o valor do índice de espuma. Os betumes com maiores taxas de expansão e tempos de meia-vida vão situar-se, respetivamente, mais a cima e

mais à direita quando se representa a expansibilidade desta forma, o que vai dar origem a valores de índice de espuma mais elevados. Assim, esta representação facilita a comparação dos vários betumes e das condições em que são produzidos, para definição das condições ideais de produção. Além disso, nesta representação ainda é possível avaliar a adequação dos betumes-espuma para utilização em misturas recicladas, tendo por base o valor mínimo de 180 para o índice de espuma e o valor mínimo de 8 para a taxa de expansão máxima e para o tempo de meia-vida (linhas representadas a traço interrompido) já indicados anteriormente. Os betumes-espuma a utilizar devem situar-se acima e à direita destas linhas.

Assim, começou por estudar-se as propriedades de expansão do betume mais viscoso (50/70), para temperaturas de injeção entre 160 e 180 °C, e para as três percentagens de água atrás referidas, cujos resultados são apresentados na Figura 5.12.

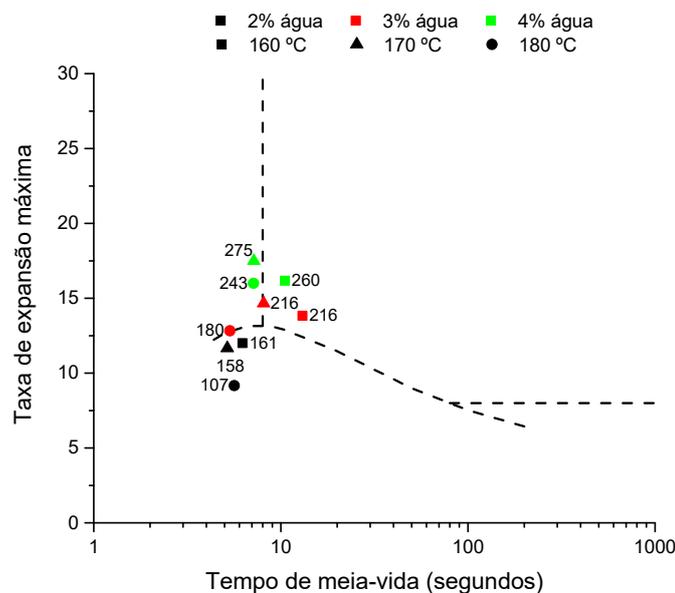


Figura 5.12 – Características de expansibilidade do betume 50/70 a diferentes temperaturas e com diferentes percentagens de água.

Tendo como referência a área que traduz o betume-espuma com qualidade aceitável para misturas recicladas, os resultados obtidos demonstram que apenas três combinações de parâmetros originam betume-espuma de qualidade (3 e 4% de água a 160 °C, e 3% de água a 170 °C). Esta dificuldade em garantir condições de expansão adequadas para o betume 50/70 resulta da maior viscosidade deste betume, que por esse motivo dificulta a formação de bolhas de grande dimensão e estáveis. De referir que a temperatura de 160 °C originou os melhores resultados em termos de propriedades de expansão, sendo também aconselhável a utilização de

3% de água para expandir este betume. Por regra, para os vários betumes em análise, deve utilizar-se a menor quantidade de água que apresenta resultados de expansão adequados, para minimizar o possível efeito que esta pode ter no desempenho das misturas em serviço.

Em seguida estudou-se as propriedades de expansão do betume 70/100, cujos resultados são apresentados na Figura 5.13. Como este betume menos viscoso foi o utilizado nas misturas recicladas a quente, há um interesse adicional em compreender se também terá características de expansão que permitam a sua utilização em misturas recicladas com betume-espuma.

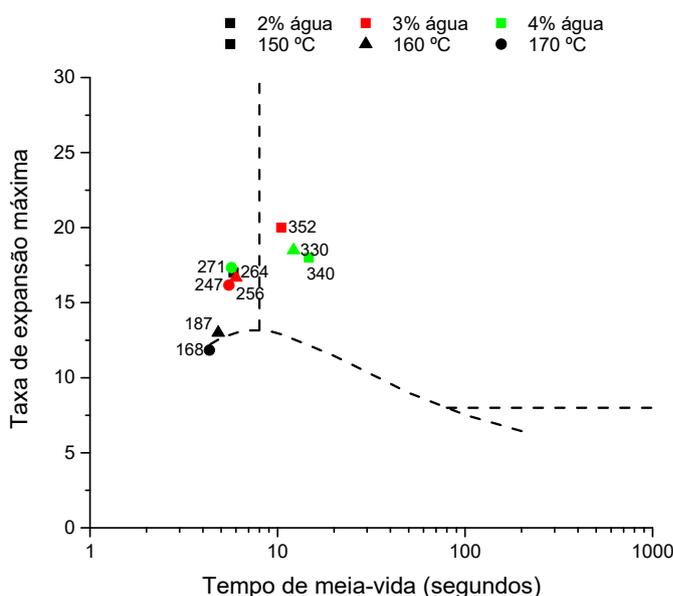


Figura 5.13 – Características de expansibilidade do betume 70/100 a diferentes temperaturas.

Apesar dos resultados de expansão obtidos para o betume 70/100 serem um pouco melhores do que os do betume 50/70, em especial no que diz respeito à taxa de expansão máxima, ainda continua a ser difícil garantir que a espuma deste betume menos viscoso tem as características necessárias para utilização em misturas recicladas. Assim, apenas três combinações de parâmetros (3 e 4% de água a 150 °C, e 4% de água a 160 °C) originam um betume-espuma de qualidade aceitável. A temperatura de 150 °C e a utilização de 3% de água originaram os melhores resultados em termos de propriedades de expansão deste betume.

Quanto ao betume menos viscoso (160/220), os resultados de expansão obtidos são muito superiores aos dos restantes betumes, tal como se pode observar na Figura 5.14. De facto, praticamente todas as combinações de parâmetros utilizadas para expansão deste betume resultaram num betume-espuma de qualidade aceitável.

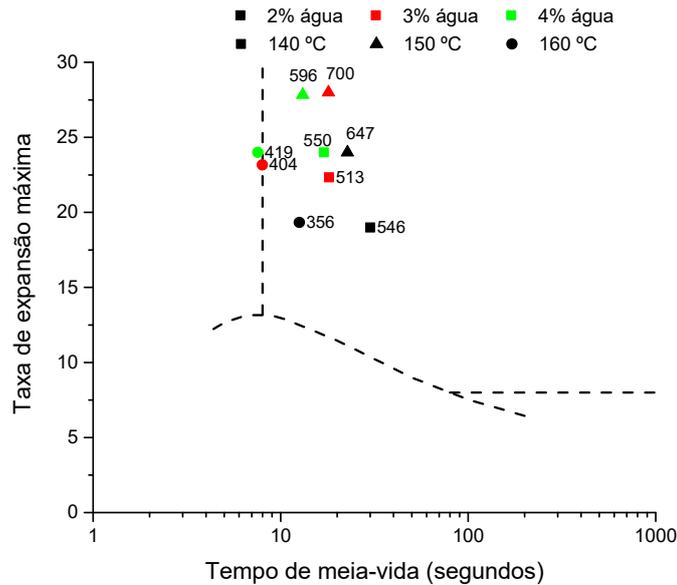


Figura 5.14 – Características de expansibilidade do betume 160/220 a diferentes temperaturas.

Os valores da taxa de expansão máxima obtidos com este betume apresentaram um acréscimo de cerca de 25%, e os tempos de meia-vida também foram significativamente melhorados. Apenas se verificaram alguns problemas em relação à qualidade da espuma produzida com este betume para as temperaturas mais altas e maiores percentagens de água (3 e 4%). As condições ideais de produção deste betume-espuma ocorrem a uma temperatura de 140 ou 150 °C, independentemente da quantidade de água utilizada.

Analisando os três betumes que foram ensaiados sem qualquer tipo de aditivo é possível verificar que a ideia de que as temperaturas mais altas conduzem a melhores propriedades de expansão não se comprova. Aliás, pode referir-se que as temperaturas mais baixas conduzem a resultados mais positivos. A percentagem de água de 3% aparenta ser a que dá maiores garantias de se obter um betume-espuma de qualidade aceitável para os diversos betumes. Finalmente, e tal como referido pela bibliografia, confirma-se que os betumes mais moles apresentam resultados melhores em termos de expansibilidade.

5.3.2. Expansibilidade dos Betumes-Espuma com Aditivos

Depois de se terem estudado as características de expansão dos betumes sem aditivos estabilizadores de espuma, procedeu-se em seguida à avaliação da expansibilidade dos betumes aditivados. Estudou-se apenas o betume que apresentou piores características de expansão (50/70), avaliando-se o efeito que quatro aditivos (E1 a E4) podem ter na melhoria da sua

expansibilidade. Todas as condições de injeção utilizadas para o betume 50/70 foram mantidas nesta fase do estudo, de modo a poder isolar-se o efeito do aditivo.

Começou por estudar-se o efeito que o aditivo E1, aplicado nas percentagens de 0,1, 0,2 e 0,3%, tem na expansão do betume 50/70. De acordo com os fornecedores, este aditivo foi desenvolvido especificamente para estabilização de espumas. Tendo em conta os resultados anteriores do betume 50/70, e modo a reduzir o número de variáveis, nesta fase estudou-se apenas as temperaturas de 170 °C (temperatura de referência para o betume 50/70) e de 160 °C (que apresentou os melhores resultados de expansão para o betume 50/70 não aditivado).

Nos resultados obtidos a 160 °C (Figura 5.15) é visível a influência positiva do aditivo E1 no comportamento do betume 50/70 em termos de expansibilidade.

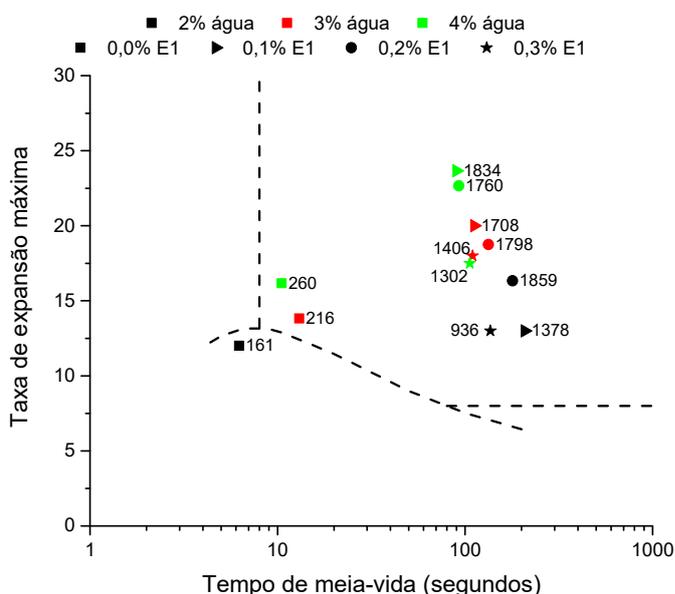


Figura 5.15 – Influência do ativo E1 nas características de expansibilidade do betume 50/70 a 160 °C.

A maior influência do aditivo E1 acontece ao nível do tempo de meia-vida, que apresenta valores cerca de 10 vezes superiores ao betume não aditivado. Todas as combinações estudadas com utilização deste aditivo resultaram num betume-espuma de qualidade aceitável. Apesar disso, os melhores resultados foram obtidos para 0,1 e 0,2% de aditivo e para percentagens de água de 3 e 4%.

Em seguida, nos resultados obtidos a 170 °C (Figura 5.16) também se verifica que a presença do aditivo E1 melhora significativamente as qualidades de expansão do betume 50/70.

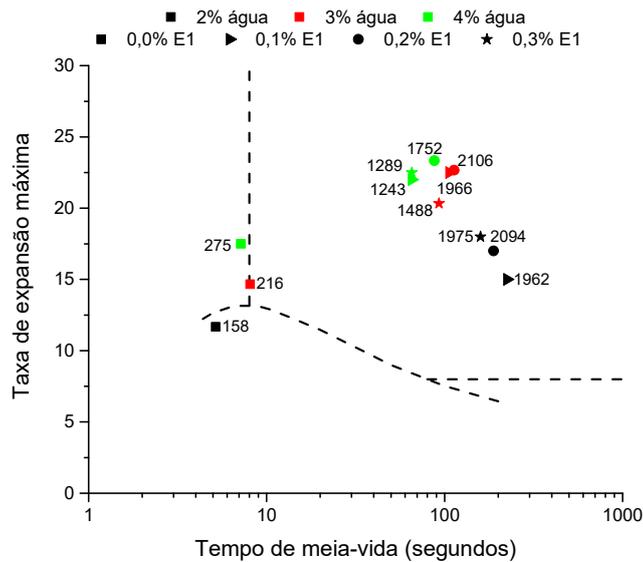


Figura 5.16 – Influência do ativo E1 nas características de expansibilidade do betume 50/70 a 170 °C.

Após análise dos resultados de expansão obtidos às duas temperaturas é possível referir que a quantidade mínima de aditivo E1 (0,1%) é suficiente para obter melhorias significativas na expansibilidade dos betumes. Assim, por razões de custo essa será a percentagem de aditivo indicada para estudos posteriores com este aditivo E1. Dado que as características de expansão obtidas com as duas temperaturas de injeção foram semelhantes, é importante isolar os resultados obtidos para o betume 50/70 aditivado com 0,1% do aditivo E1 para entender qual a temperatura ideal de produção do betume-espuma com aditivos (Figura 5.17).

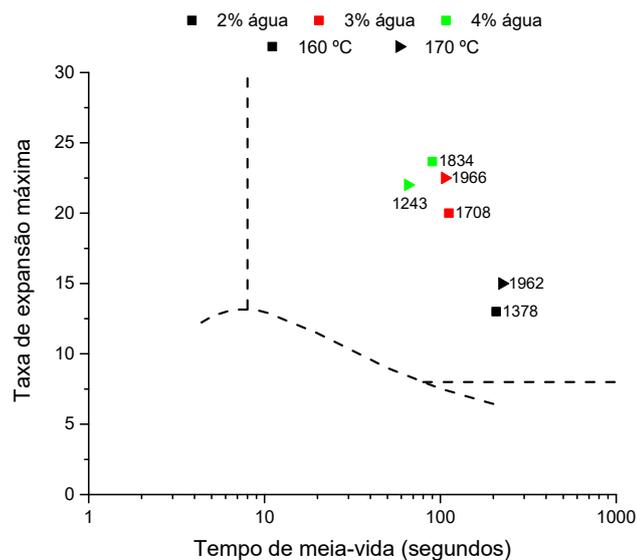


Figura 5.17 – Comparação das características de expansibilidade do betume 50/70 aditivado com 0,1% do aditivo E1 às temperaturas de 160 e 170 °C.

Ao analisar a expansão do betume aditivado para as duas temperaturas de injeção é possível verificar que os resultados de tempo de meia-vida e de taxa de expansão máxima são, em geral, ligeiramente superiores para a temperatura de 170 °C. Apesar disso, essa diferença é reduzida, ocorrendo um menor envelhecimento do betume a 160 °C. Assim, as percentagens de 0,1% do aditivo E1 e 3% de água, e a temperatura de 160 °C, foram a alternativa selecionada para a produção de misturas com este tipo de betume-espuma. Após esta primeira análise do aditivo E1, optou-se por fazer os ensaios dos restantes aditivos apenas para a temperatura de 160 °C (dado que a temperatura não teve uma grande influência na expansão do betume).

Em seguida estudou-se o efeito do aditivo E2 na expansão do betume 50/70 (Figura 5.18). Para o aditivo E2 apenas foi estudada a percentagem de 0,4%. Esta quantidade foi escolhida tendo por base as indicações do fornecedor para melhorar a sensibilidade à água (principal função deste aditivo, agora testado de forma experimental como estabilizador de espuma).

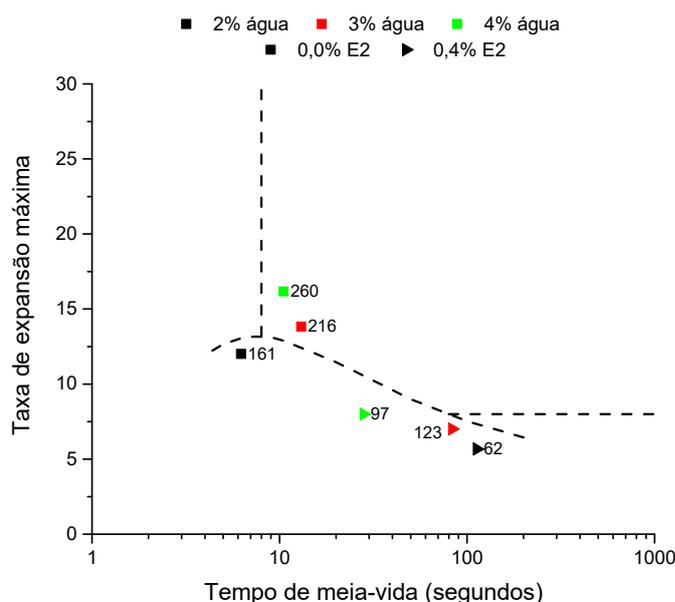


Figura 5.18 – Características de expansibilidade do betume 50/70 com 0,4% do aditivo E2 à temperatura de 160 °C

Apesar do tempo de meia-vida do betume-espuma ser claramente superior após adição de 0,4% do aditivo E2 ao betume 50/70, este aditivo reduz bastante a taxa de expansão máxima do betume original (que já não era elevada). De facto, os maus resultados de taxa de expansão máxima fazem com que este aditivo E4 seja ineficiente para estabilização da espuma produzida com o betume 50/70.

No que diz respeito ao efeito do aditivo E3, adicionado ao betume 50/70 nas percentagens de 0,1, 0,3 e 0,5%, os resultados de expansibilidade obtidos são apresentados na Figura 5.19. Lembra-se que a principal função deste aditivo é reduzir a temperatura de produção das misturas, avaliar-se neste trabalho o seu potencial como aditivo estabilizador de espuma.

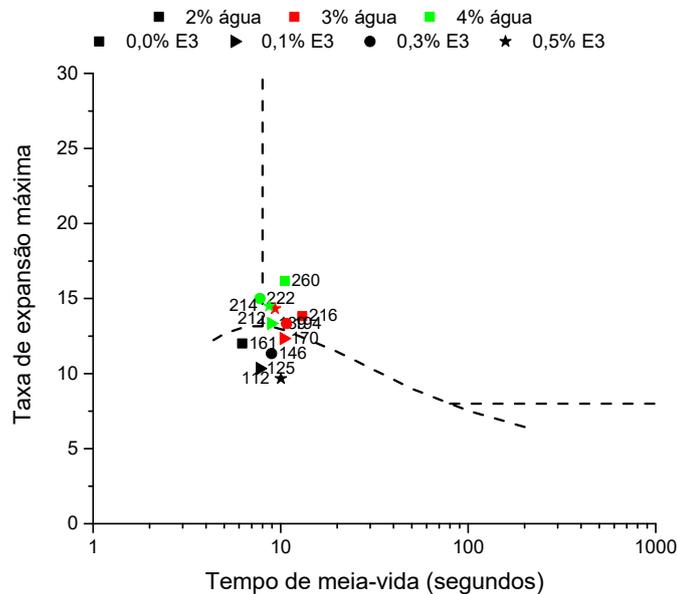


Figura 5.19 – Características de expansibilidade do betume 50/70 com diferentes percentagens do aditivo E3 à temperatura de 160 °C.

Tal como aconteceu para o aditivo E2, os resultados de obtidos demonstram que este aditivo E3 não permite melhorias significativas nas propriedades expansivas do betume 50/70 (que quase não variam em função da quantidade de aditivo utilizada). Aliás, ao avaliar os resultados mais em pormenor até se verifica que este aditivo reduz a taxa de expansão máxima, razão pela qual não se aconselha a sua utilização para este fim.

Finalmente estudou-se o efeito do aditivo E4 (usado nas percentagens de 0,2, 0,4 e 0,6%) nas características de expansão do betume 50/70, cujos resultados são apresentados na Figura 5.20. Tal como o aditivo E1, este aditivo E4 também é indicado para estabilização de espuma de betume, embora não tenha sido desenvolvido unicamente para esse fim.

Ao analisar os resultados obtidos é possível verificar que o aditivo E4 também permite melhorar as propriedades de expansão do betume, quer em termos de taxa de expansão máxima, quer em termos de tempo de meia-vida. Ainda é visível que a quantidade de aditivo ideal a adicionar ao betume 50/70 é igual a 0,4%, para qualquer percentagem de água.

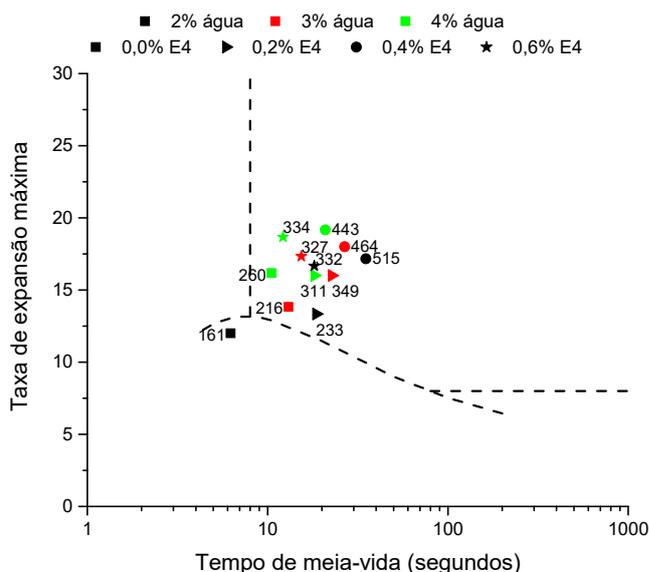


Figura 5.20 – Características de expansibilidade do betume 50/70 com diferentes percentagens do aditivo E4 à temperatura de 160 °C.

A alternativa selecionada para a produção de misturas com este tipo de betume-espuma foi a adição de 0,4% do aditivo E4 ao betume 50/70, para 3% de água e uma temperatura de injeção de 160 °C. Salienta-se ainda que ao comparar o aditivo E4 com o aditivo E1, relativamente à capacidade de expandir o betume 50/70, constata-se que as propriedades de expansão facultadas pelo aditivo E1 são muito superiores. Em resumo, o aditivo E1 é o mais aconselhável para estabilização de betume-espuma, até por ser usado numa menor percentagem.

5.4. Estudo das Curvas de Decaimento do Betume-Espuma

5.4.1. Análise das Medições Experimentais das Curvas de Decaimento

De modo a serem obtidas as curvas de decaimento dos diferentes betumes estudados optou-se pela realização de medições em contínuo, tal como referido no Capítulo 3. Este método permitirá um conhecimento mais exato do comportamento do betume quando sujeito ao processo de expansão e da forma como a mesma decresce ao longo do tempo. Os aditivos E2 e E3 não serão avaliados nesta fase devido aos maus resultados apresentados na Secção 5.3.

Neste trabalho, cada resultado de expansão do betume-espuma resulta de três injeções diferentes, o que origina três curvas de decaimento distintas para cada situação em análise. No entanto, as curvas obtidas nessas três injeções são normalmente idênticas, o que permite a

obtenção de uma curva única que traduz o comportamento geral das três injeções efetuadas. Assim, ao representar as curvas de decaimento num gráfico, para determinadas condições de produção do betume-espuma, é possível realizar um ajuste que permita uma correta tradução do comportamento desse betume-espuma.

Dessa forma, começou por fazer-se o ajuste das curvas de decaimento para os diversos betumes-espuma produzidos com o betume 50/70 não aditivado. Um exemplo desse ajuste é apresentado na Figura 5.21 para as três injeções efetuadas com o betume 50/70 a 160 °C e com 2% de água, para demonstrar o tipo de ajuste obtido e a reduzida dispersão de resultados.

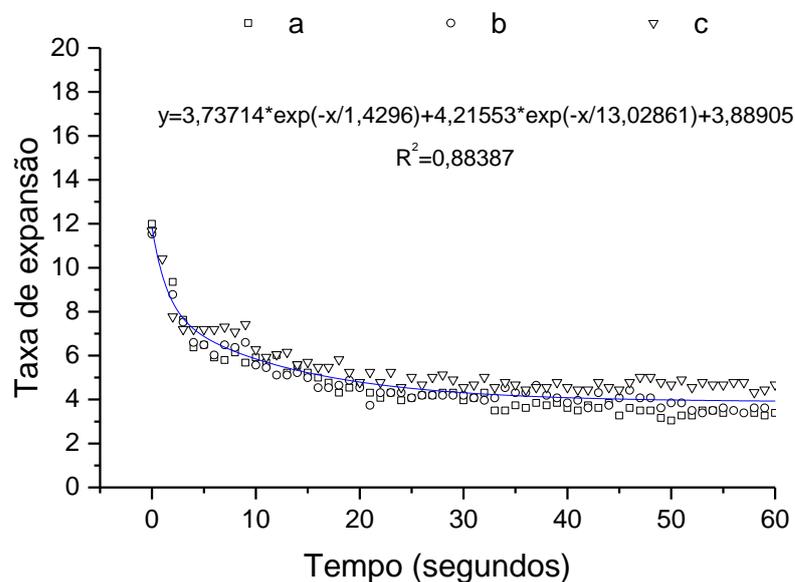


Figura 5.21 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 50/70 a 160 °C e com 2% de água.

Ao fazer o mesmo ajuste para as diferentes percentagens de água e temperaturas, é possível verificar que os coeficientes de determinação (R^2) obtidos para o betume 50/70 são bastantes aceitáveis (Quadro 5.3). De facto, o coeficiente de determinação apresenta valores muito próximos de 1, o que demonstra que o modelo se aproxima dos valores observados.

Quadro 5.3 – Coeficientes de determinação resultantes dos ajustes às curvas de decaimento obtidas para o betume 50/70.

Temperatura (°C)	Percentagem de água (%)		
	2	3	4
140	0,884	0,917	0,972
150	0,843	0,830	0,871
160	0,782	0,938	0,904

Relativamente ajuste das curvas de decaimento para os diversos betumes-espuma produzidos com o betume 70/100, das quais se apresenta um exemplo na Figura 5.22 (betume 70/100 a 160 °C e com 3% de água), o tipo de curva resultante do ajuste é semelhante à do betume 50/70. Este tipo de curvas é referida por Jenkins (2000) como sendo de rápida expansão e rápido decaimento (RE:RD), e estão normalmente associadas a betumes que não são os mais adequados para a utilização em misturas com betume-espuma.

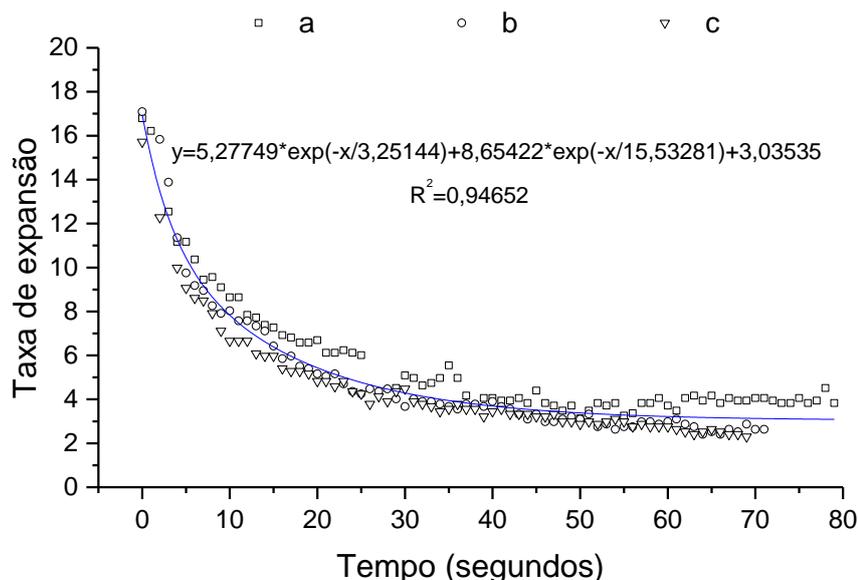


Figura 5.22 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 70/100 a 160 °C e com 3% de água.

Os coeficientes de determinação (R^2) obtidos para este betume 70/100 (Quadro 5.4) são igualmente altos, o que implica um bom ajuste dos modelos das curvas de decaimento aos resultados experimentais obtidos para as várias condições em que foram feitas as injeções.

Quadro 5.4 – Coeficientes de determinação resultantes dos ajustes às curvas de decaimento obtidas para o betume 70/100.

Temperatura (°C)	Percentagem de água (%)		
	2	3	4
140	0,867	0,962	0,975
150	0,790	0,946	0,930
160	0,894	0,842	0,881

No que respeita ao betume 160/220, a sua utilização em betume-espuma é ajustada por curvas de decaimento com uma forma ligeiramente diferente das anteriores, como se pode verificar no exemplo da Figura 5.23 para o betume 160/220 a 140 °C e com 3% de água.

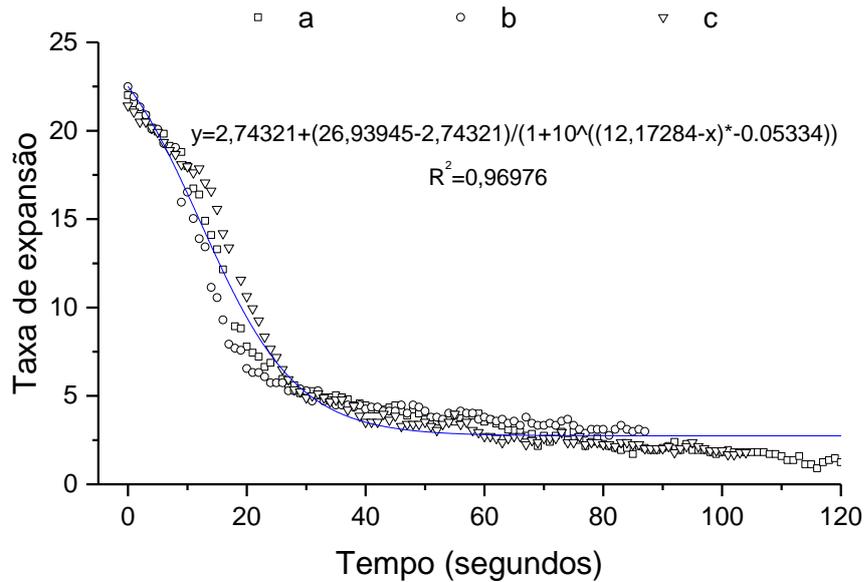


Figura 5.23 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 160/220 a 140 °C e com 3% de água.

Este tipo de curvas corresponde às situações em que o decaimento é assintótico e onde a expansão é rápida. Segundo Jenkins (2000) este tipo de curvas é comum em betumes que são adequados ao processo de expansão e onde as condições impostas ao betume para a sua expansão são próximas das ideais.

Quanto aos valores dos coeficientes de determinação (R^2) obtidos para este betume 160/220 (Quadro 5.5), os seus valores são sempre superiores a 0,90. Assim, além do modelo de ajuste ser muito adequado, o tipo de curva obtida para as várias injeções é muito idêntica.

Quadro 5.5 – Coeficientes de determinação resultantes dos ajustes às curvas de decaimento obtidas para o betume 160/220.

Temperatura (°C)	Porcentagem de água (%)		
	2	3	4
140	0,977	0,970	0,968
150	0,959	0,985	0,944
160	0,973	0,983	0,931

De modo a compreender como se ajusta a curva teórica de Jenkins (Equação 2.1) aos resultados experimentais obtidos com o laser neste trabalho, fez-se novamente essa representação para o exemplo do betume 160/220 a 140 °C e com 3% de água (Figura 5.24). Assim, foi interessante verificar que o ajuste obtido neste trabalho representa mais corretamente o tipo de decaimento dos betumes em estudo do que o modelo teórico de Jenkins.

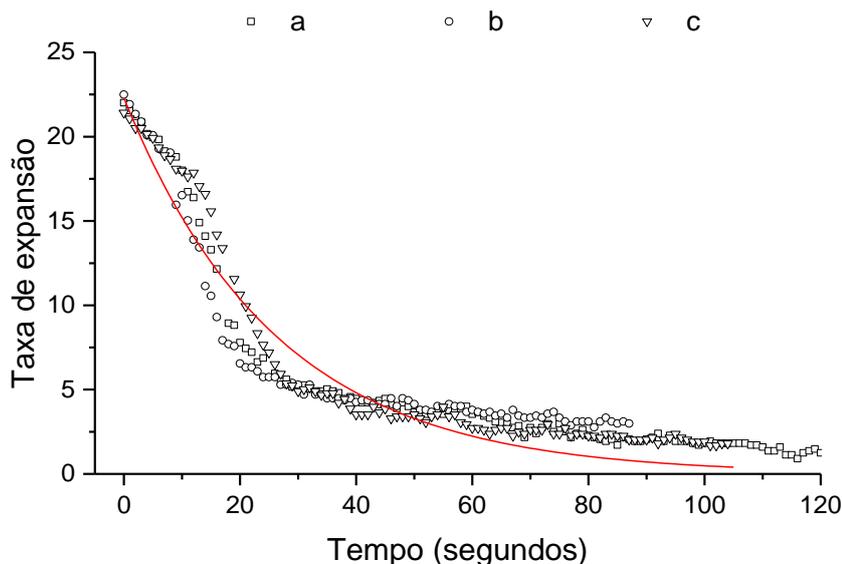


Figura 5.24 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 160/220 a 140 °C com 3% de água recorrendo à curva teórica de Jenkins.

Em seguida, dado que os betumes mais duros se mostraram pouco adequados ao processo de expansão, fez-se a análise das curvas de decaimento do betume 50/70 com os aditivos estabilizadores E1 e E4.

No que respeita ao betume 50/70 com o aditivo E1, o tipo de curva de decaimento obtida após ajuste é exemplificada para o caso do betume 50/70 com 0,1% do aditivo E1 a 170 °C e com 3% de água (Figura 5.25).

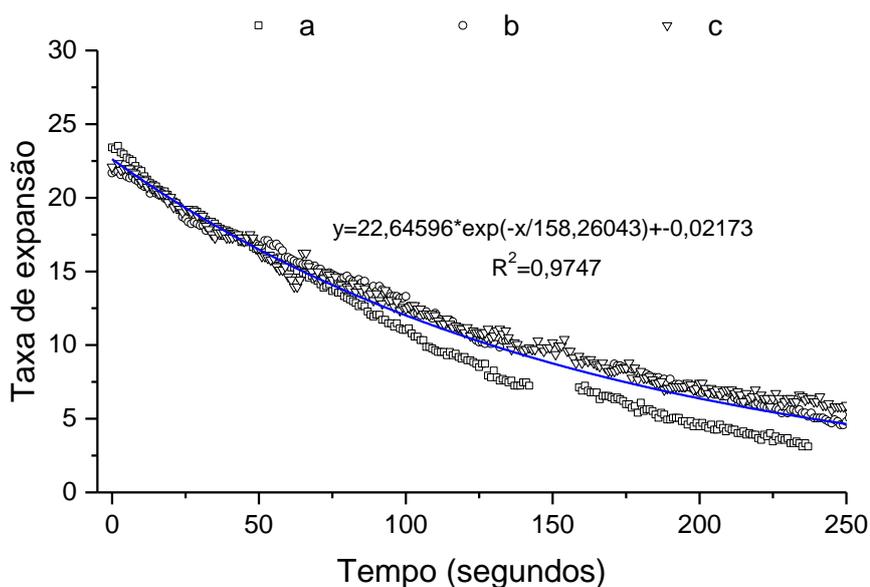


Figura 5.25 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 50/70 com 0,1% do aditivo E1 a 170 °C e com 3% de água.

O tipo de ajuste da curva de decaimento do betume 50/70 com o aditivo E1 assume uma forma diferente das obtidas para os vários betumes não aditivados. De facto, a sua forma corresponde a uma curva típica de um betume com aditivo (expansão rápida: decaimento linear), o que vai de encontro ao que é referido por Jenkins (2000).

Os valores dos coeficientes de determinação (Quadro 5.6) obtidos para este betume aditivado são em geral próximos de 1, devido ao bom ajuste do modelo aos dados experimentais. Um dos valores é mais baixo devido a um problema pontual de leitura do laser numa das injeções.

Quadro 5.6 – Coeficientes de determinação resultantes dos ajustes às curvas de decaimento obtidas para o betume 50/70 com o aditivo E1.

Temperatura (°C)	Aditivo (%)	Percentagem de água (%)		
		2	3	4
160	0,1	0,961	0,993	0,939
	0,2	0,992	0,889	0,965
	0,3	0,955	0,863	0,940
170	0,1	0,882	0,975	0,904
	0,2	0,593	0,890	0,889
	0,3	0,952	0,928	0,909

Finalmente, o ajuste da curva de decaimento obtido para o betume 50/70 com o aditivo E4 é ilustrado na Figura 5.26 para o betume 50/70 com 0,2% do aditivo E4 e 3% de água a 160 °C.

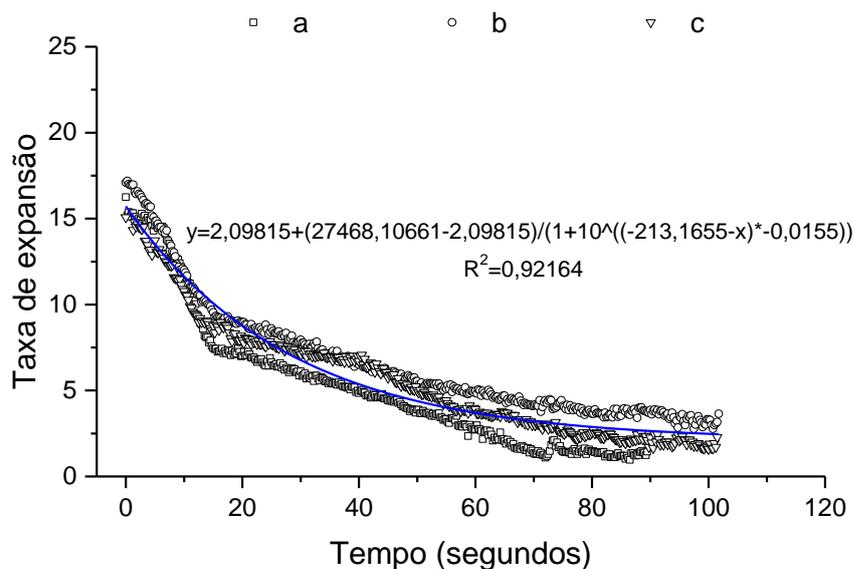


Figura 5.26 – Ajuste das curvas de decaimento do betume 50/70 com 0,2% do aditivo E4 a 160 °C e com 3% de água.

O tipo de curva de decaimento obtida para o betume 50/70 com o aditivo E4 é mais idêntica ao betume 160/220 do que ao betume 50/70 com o aditivo E1. Nesse sentido, é possível referir que ao adicionarmos este aditivo E4 ao betume 50/70, o mesmo altera a forma como evolui a expansão ao longo do tempo, e o betume já pode ser considerado adequado para o processo de produção de betume-espuma. No entanto, a forma da curva de decaimento não corresponde à curva típica de um betume com aditivo estabilizador de espuma.

Os valores dos coeficientes de determinação (Quadro 5.7) obtidos para este betume com o aditivo E4 continuam a ser muito elevados, confirmando mais uma vez o bom ajuste do modelo aos dados experimentais.

Quadro 5.7 – Coeficientes de determinação resultantes dos ajustes às curvas de decaimento obtidas para o betume 50/70 com o aditivo E4 à temperatura de 160 °C.

Aditivo (%)	Percentagem de água (%)		
	2	3	4
0,2	0,866	0,922	0,962
0,4	0,878	0,935	0,927
0,6	0,960	0,895	0,902

5.4.2. Tipos de Curvas de Decaimento Obtidas e Respetivos Ajustes Teóricos

De uma forma geral é possível verificar que se obtiveram três tipos distintos de curvas de decaimento do betume-espuma, que são traduzidas por três tipos de equações para ajuste aos dados experimentais, tal como se observou na secção 5.4.1.

As curvas de decaimento obtidas para os betumes com maior viscosidade, nomeadamente os betumes 50/70 e 70/100, são descritas pela Equação 5.1, em que os parâmetros a, b, c, d e f são obtidos experimentalmente.

$$ER = a \times e^{-\frac{t}{b}} + c \times e^{-\frac{t}{d}} + f \quad (5.1)$$

Este tipo de equação traduz-se numa curva de decaimento teórica do tipo ER:DA, com expansão rápida e decaimento assintótico, tal como se pode ver na Figura 5.27. De facto, ambos os betumes têm curvas semelhantes ao modelo teórico, apesar do betume 70/100 ser mais expansivo que o betume 50/70.

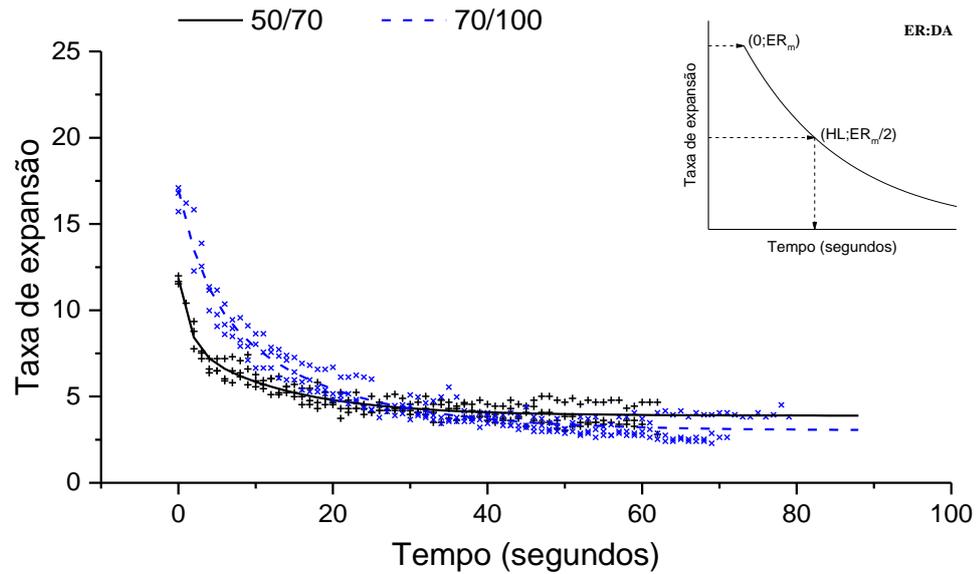


Figura 5.27 – Tipo de curva de decaimento dos betumes 50/70 e 70/100 e respetiva curva teórica.

Por outro lado, o tipo de curvas de decaimento obtidas para o betume 160/220 e o betume 50/70 com o aditivo estabilizador E4 são traduzidas pela Equação 5.2, em que os parâmetros g , h , j e k são obtidos experimentalmente. Esta equação traduz-se numa curva teórica do tipo EL:DG, com expansão lenta e decaimento gradual, tal como se pode verificar na Figura 5.28.

$$ER = g + \frac{h - g}{1 + 10^{-j \times (k-t)}} \quad (5.2)$$

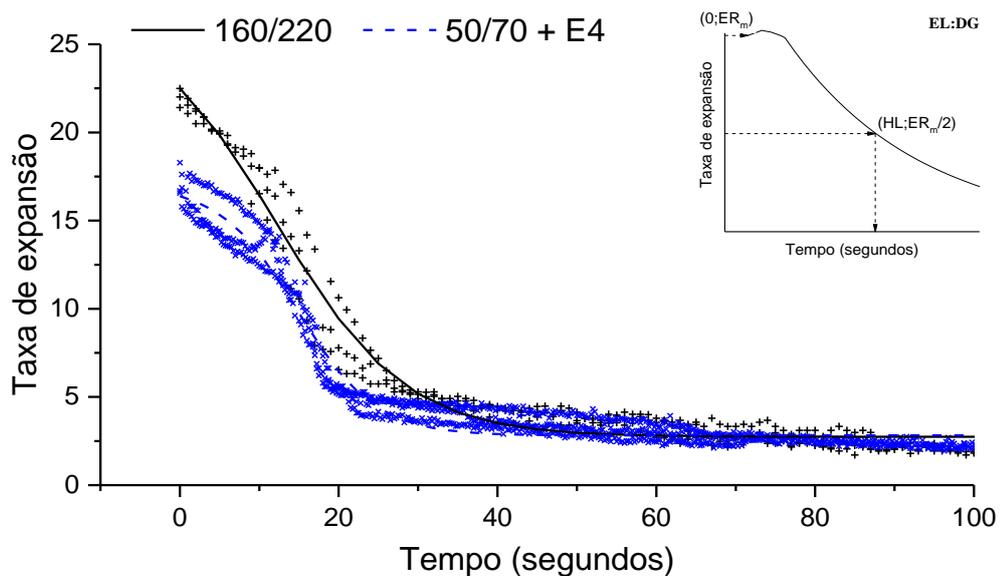


Figura 5.28 – Tipo de curva de decaimento do betume 160/220 e do betume 50/70 aditivado com o aditivo E4 e respetiva curva teórica.

Por último, o betume 50/70 aditivado com o aditivo E1 apresenta uma curva de decaimento teórica do tipo ER:DL, com expansão rápida e decaimento linear (Figura 5.29), que corresponde à Equação 5.3, onde m, n e p são parâmetros obtidos experimentalmente.

$$ER = m \times e^{\frac{-t}{n}} - p \quad (5.3)$$

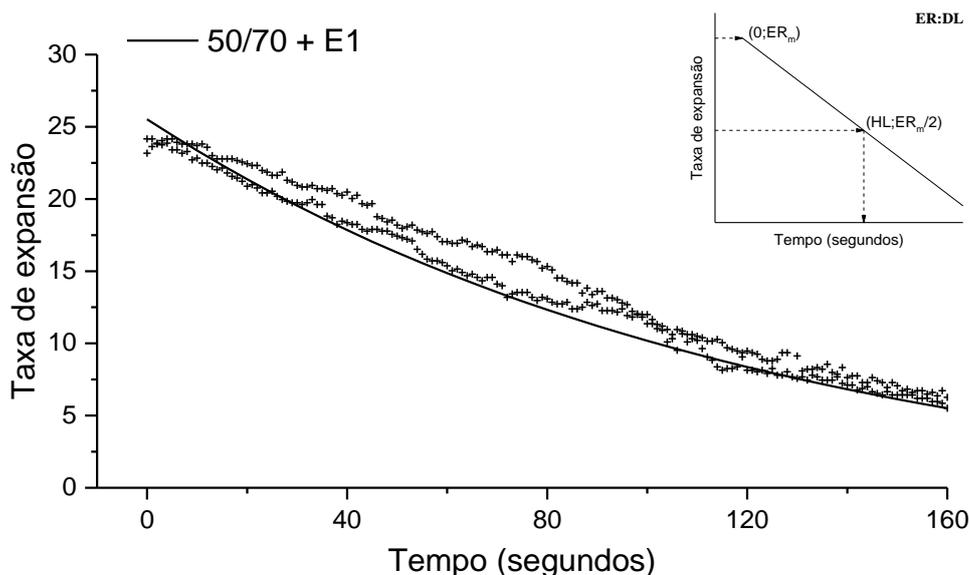


Figura 5.29 – Tipo de curva de decaimento do betume 50/70 com o aditivo E1 e respetiva curva teórica.

5.4.3. Variação das Curvas de Decaimento com as Condições de Produção do Betume-Espuma

Depois de se ajustadas todas as curvas de decaimento dos diversos betumes-espuma estudados neste trabalho, nesta fase do trabalho apenas foram assumidas as combinações que permitiram obter uma espuma de qualidade aceitável para aplicação em misturas betuminosas (índice de espuma superior a 180; taxa de expansão máxima e tempo de meia-vida superior a 8).

Assim, vai avaliar-se de que forma variam as curvas de decaimento ajustadas para cada betume quando se alteram as condições de produção do betume-espuma, em especial a quantidade de água e a temperatura de injeção.

Inicialmente apresentam-se na Figura 5.30 as curvas de decaimento dos betumes 50/70 e 70/100 que originaram betumes-espuma de qualidade aceitável.

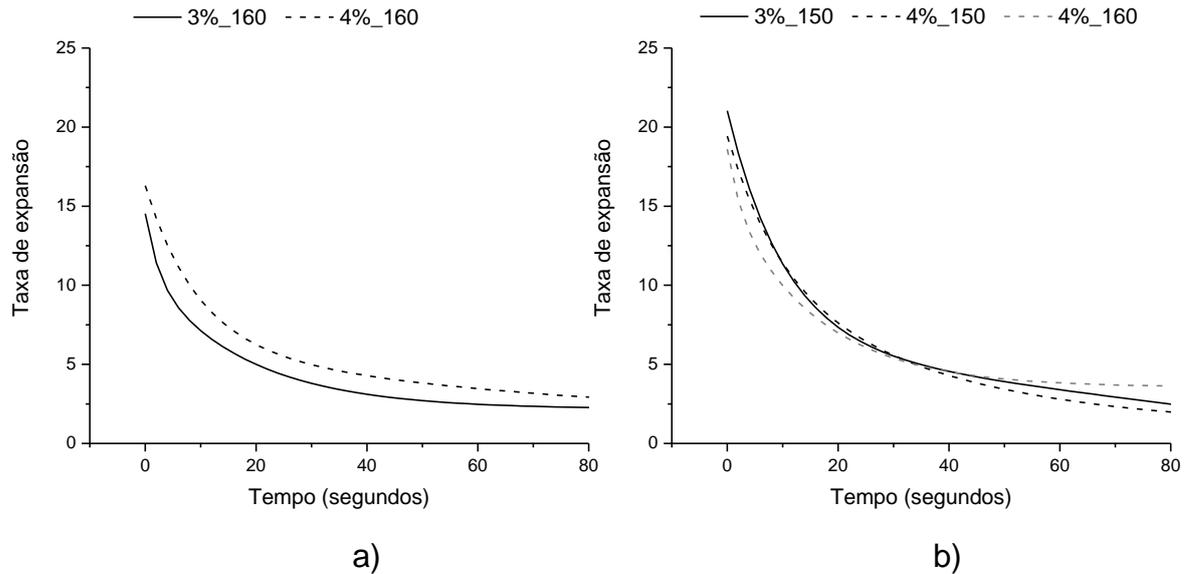


Figura 5.30 – Curvas de decaimento obtidas com os betumes (a) 50/70 e (b) 70/100.

Devido à maior dificuldade em espumar estes betumes mais viscosos, o número de situações em que se obteve betumes-espuma de qualidade aceitável foi reduzido.

Analisando os resultados obtidos para o betume 50/70, é possível verificar que o tipo de decaimento obtido para ambas as percentagens de água é muito idêntico, embora a taxa de expansão máxima seja mais alta ao utilizar 4% de água.

No betume 70/100 observa-se que a temperatura teve maior influência do que a percentagem de água na forma da curva de decaimento. Para a temperatura mais alta (160 °C) o valor da taxa de expansão máxima é inferior, e além disso há uma estabilização mais rápida da expansão (o que origina em princípio um menor tempo de meia-vida).

Em seguida apresentam-se na Figura 5.31 as curvas de decaimento do betume 160/220 que originaram betumes-espuma de qualidade aceitável. Devido à maior facilidade em espumar este betume menos viscoso, o número de situações em que se obteve betumes-espuma de qualidade aceitável foi elevado. Assim, agruparam-se os resultados para temperaturas de injeção iguais.

No que respeita às curvas de decaimento do betume 160/220 é possível verificar que de uma forma geral maiores percentagens de água implicam valores da taxa de expansão máxima superiores, enquanto o valor do tempo de meia-vida tem tendência a reduzir devido a uma redução mais rápida da expansão.

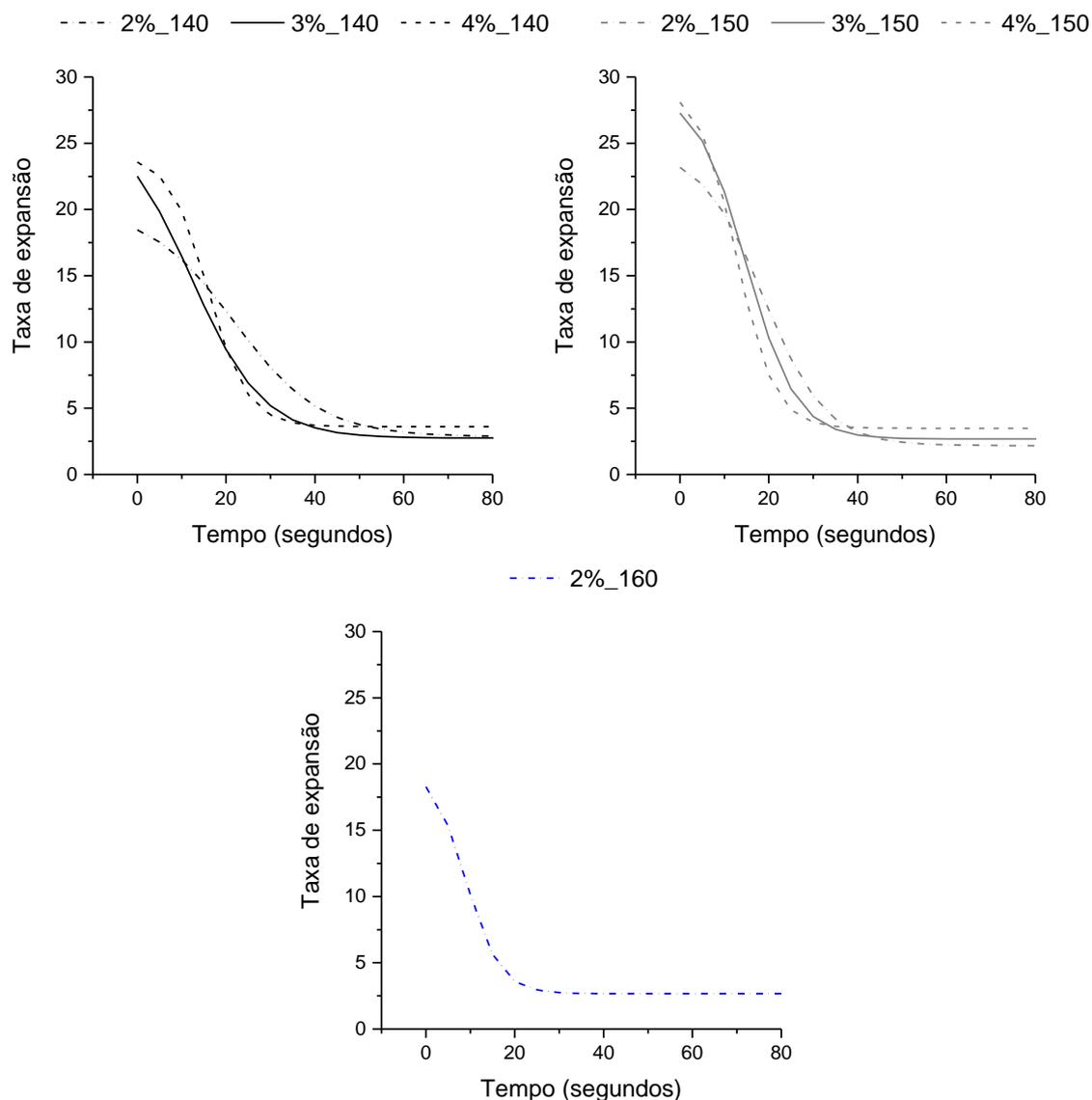


Figura 5.31 – Curvas de decaimento obtidas com o betume 160/220.

Quanto às temperaturas de injeção utilizadas no betume 160/220 é desde logo possível verificar que para a temperatura mais alta não se verifica um aumento da taxa de expansão máxima, o que condiciona a ideia que para temperaturas mais altas se conseguem melhores resultados de expansibilidade. A temperatura de 150 °C favorece a taxa de expansão máxima, não sendo evidente o efeito da temperatura sobre o tempo de meia-vida.

Finalmente, ao analisar os resultados para o betume 50/70 com os aditivos estabilizadores E1 (Figura 5.32) e E4 (Figura 5.33) é possível observar curvas de decaimento com formas totalmente distintas, independentemente das quantidades de aditivo e das condições de produção da espuma. Logo, os dois aditivos não atuam da mesma forma sobre o betume.

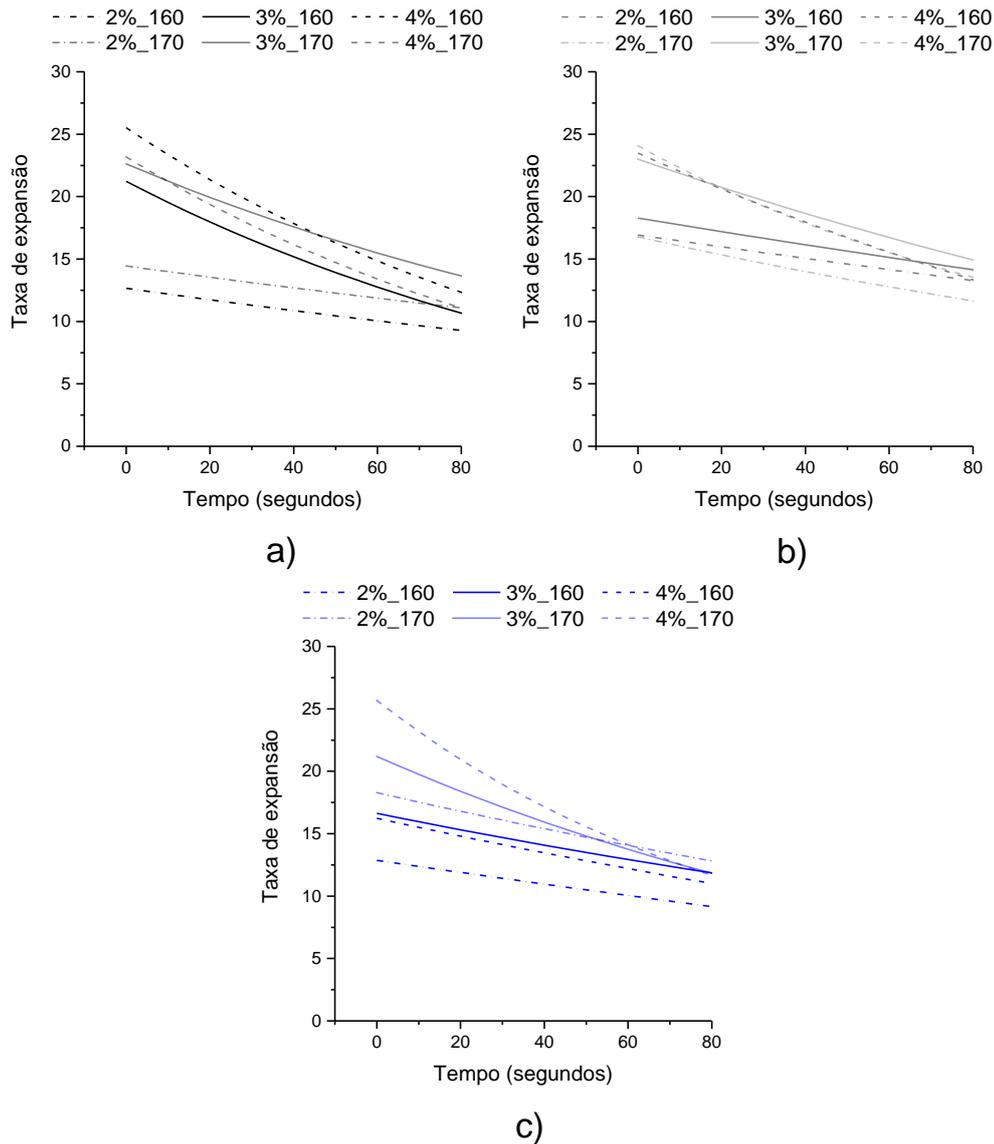


Figura 5.32 – Curvas de decaimento obtidas com o betume 50/70 aditivado com o aditivo E1, ao usar percentagens de aditivo de a) 0,1%, b) 0,2% e c) 0,3%.

Ao avaliar os resultados obtidos com o aditivo E1 não é possível retirar conclusões definitivas sobre o efeito do aumento de temperatura e da percentagem de aditivo, pois há alguma variação no efeito causado por estes parâmetros. Assim, optou-se por utilizar a percentagem mínima de aditivo (0,1%) e a temperatura de 160 °C. Nota-se ainda uma melhoria da expansibilidade ao usar percentagens de água mais altas (3 ou 4%).

No aditivo E4 é possível verificar que as curvas de decaimento mais favoráveis são obtidas para 0,4% de aditivo (maiores taxas de expansão e tempos de meia-vida). Devido à variação no efeito da água, aconselha-se a utilização da percentagem intermédia de 3%.

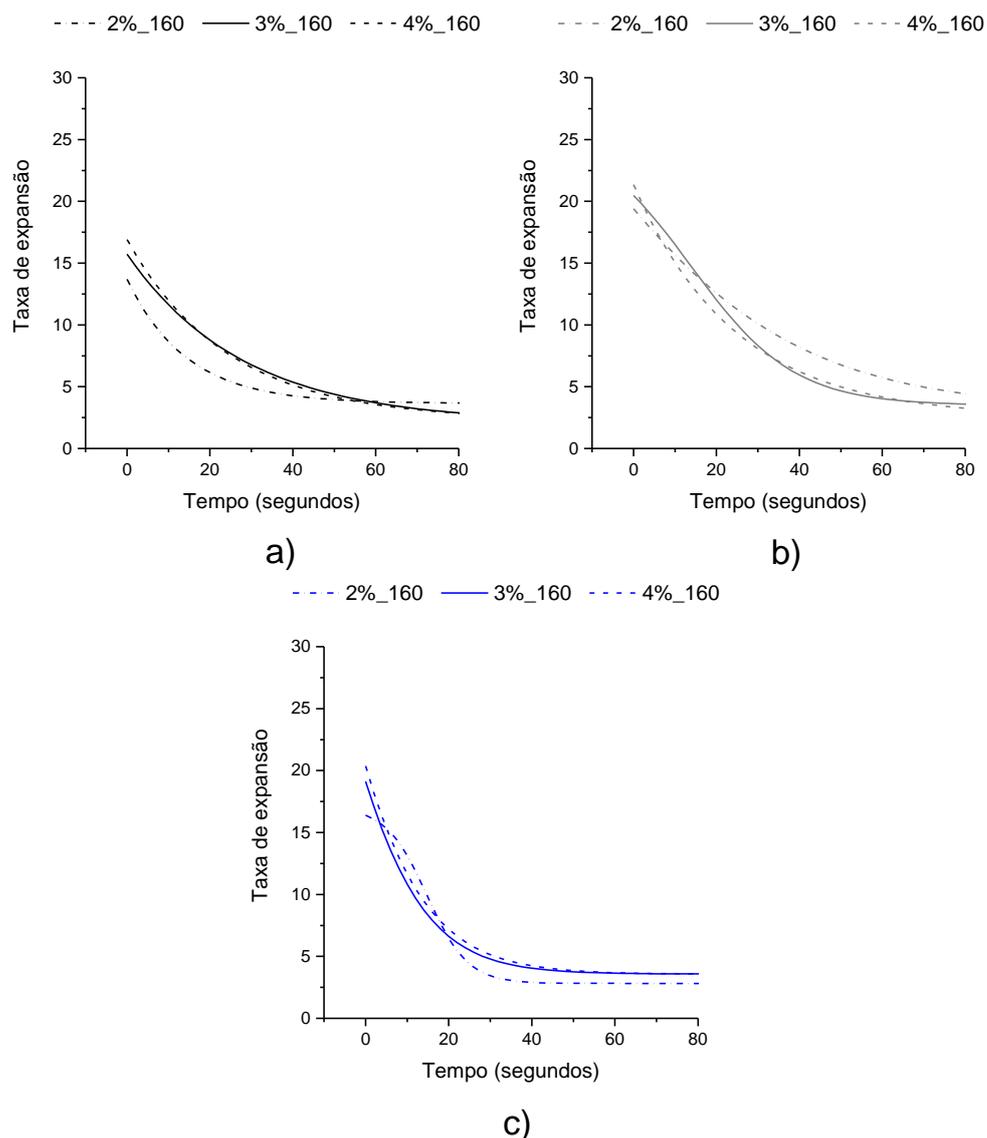


Figura 5.33 – Curvas de decaimento do betume 50/70 aditivado com o aditivo E4 a 160 °C, ao usar percentagens de aditivo de a) 0,2%, b) 0,4% e c) 0,6%.

5.4.4. Comparação das Áreas das Curvas de Decaimento com o Índice de Espuma

Depois de conhecidas as curvas de decaimento dos vários betumes, é possível calcular as áreas abaixo dessas curvas para verificar, com base em resultados experimentais, qual o erro relativo associado aos valores do índice de espuma (FI) determinados anteriormente. Na prática, o valor de FI pode ser um parâmetro eficaz para definição das melhores condições de produção de betume-espuma, mas apenas caso não tenha elevados erros associados ao seu cálculo. De referir que para o cálculo da área com a curva de decaimento foi considerado que ERa seria obtido tal como Jenkins (2000) refere. Para o cálculo do erro relativo, apresentado em seguida, considerou-se como valor real a área medida abaixo da curva de decaimento experimental.

Quanto aos betumes convencionais sem aditivos (Quadro 5.8, Quadro 5.9 e Quadro 5.10) é possível verificar que os erros relativos obtidos ao comparar o valor de FI com a área abaixo da curva de decaimento são relativamente baixos, levando a concluir que a aproximação conseguida com a equação alterada do FI permite uma correta previsão dessa área.

Quadro 5.8 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 50/70.

Temperatura (°C)	3% de água			4% de água		
	FI	Área	Erro relativo	FI	Área	Erro relativo
160	216,39	223,21	3%	259,97	293,90	13%

Quadro 5.9 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 70/100.

Temperatura (°C)	3% de água			4% de água		
	FI	Área	Erro relativo	FI	Área	Erro relativo
150	352,10	417,60	19%	339,79	386,29	14%
160	-	-	-	330,03	352,77	7%

Quadro 5.10 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 160/220.

Temperatura (°C)	2% de água			3% de água			4% de água		
	FI	Área	Erro relativo	FI	Área	Erro relativo	FI	Área	Erro relativo
140	545,54	490,42	10%	513,21	497,36	3%	550,20	544,78	1%
150	647,19	573,83	11%	699,76	628,15	10%	595,55	608,44	2%
160	355,66	314,94	11%	-	-	-	-	-	-

Quanto ao betume 50/70 com aditivos (Quadro 5.11, Quadro 5.12 e Quadro 5.13) é possível desde logo verificar que os erros relativos são em geral superiores, em especial para o aditivo E1, podendo este facto estar relacionado com o tipo de curvas de decaimento deste betume (que originam elevados valores de FI). Mesmo assim, os erros obtidos são relativamente baixos, o que mais uma vez permite concluir que a previsão realizada com o FI é confiável.

Em resumo, tendo em consideração os resultados apresentados anteriormente, é possível verificar que a equação proposta para as curvas de decaimento pode não ser a mais apropriada para proceder ao ajuste das curvas reais obtidas, mas a sua utilização para determinar o índice de espuma (FI) demonstra ser adequada.

Quadro 5.11 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 50/70 com o aditivo E1 a 160 °C.

Aditivo (%)	2% de água			3% de água			4% de água		
	FI	Área	Erro relativo	FI	Área	Erro relativo	FI	Área	Erro relativo
0,1	1377,81	1086,11	21%	1708,06	1375,43	20%	1834,03	1744,65	5%
0,2	1859,08	2115,26	14%	1798,18	2329,63	30%	1760,11	1811,25	3%
0,3	935,71	982,39	5%	1406,02	1682,34	20%	1301,59	1374,56	6%

Quadro 5.12 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 50/70 com o aditivo E1 a 170 °C.

Aditivo (%)	2% de água			3% de água			4% de água		
	FI	Área	Erro relativo	FI	Área	Erro relativo	FI	Área	Erro relativo
0,1	1962,20	1606,78	18%	1966,44	2039,12	4%	1242,96	1485,77	20%
0,2	2093,50	1658,43	21%	2106,07	2225,47	6%	1751,90	2237,36	28%
0,3	1975,29	1817,38	8%	1488,17	1570,39	6%	1288,71	1714,36	33%

Quadro 5.13 – Comparação entre o valor FI e a área da curva de decaimento do betume 50/70 com o aditivo E4 a 160 °C.

Aditivo (%)	2% de água			3% de água			4% de água		
	FI	Área	Erro relativo	FI	Área	Erro relativo	FI	Área	Erro relativo
0,2	232,53	240,17	3%	348,86	357,48	3%	311,17	374,34	20%
0,4	515,32	608,08	18%	464,48	540,36	16%	442,87	533,54	21%
0,6	331,71	323,80	2%	327,21	360,04	10%	334,34	398,93	19%

Finalizado o estudo dos betumes e da sua expansibilidade após serem espumados, este trabalho vai prosseguir com o estudo das condições de produção de misturas com betume-espuma.

5.5. Estudos Preliminares das Condições de Produção das Misturas com Betume-Espuma

Ao iniciar a produção de misturas betuminosas com betume-espuma, sentiu-se a necessidade de realizar estudos preliminares para definição de diversas condições de produção, como consequência da falta de conhecimento e informação sobre a utilização desta tecnologia.

Nestes estudos procurou aferir-se a influência de várias condições descritas em seguida: o tempo de cura, o tipo de filer e agregados utilizados, a quantidade de água e pressão do ar a usar no betume-espuma, o processo de produção da mistura, e o condicionamento após produção.

5.5.1. Influência do Processo de Cura

Relativamente ao processo de cura foram estudadas duas alternativas distintas após produção de uma única mistura AC 14 (BB) com betume-espuma, cuja composição granulométrica foi indicada na Secção 3.5.1. Dessa mistura compactaram-se doze provetes, sendo cada grupo de seis provetes submetido a um processo de cura diferente. Ao utilizar uma mistura única reduz-se as variáveis exógenas, dado que a BMT, o teor em betume (4,8%) e as temperaturas de produção são iguais para ambos os grupos. Quanto aos processos de cura considerou-se o mesmo tempo de cura em ambos os grupos (72 horas), mas a temperaturas diferentes (40 e 60 °C). Estes valores basearam-se nas indicações da Wirtgen (2008) para esta tecnologia.

Ao realizar este estudo inicial utilizou-se um betume aditivado com o aditivo E1, com uma taxa de expansão máxima igual a 9 e um tempo de meia-vida de 160,5 s, que foi injetado na mistura à temperatura de 170 °C. Os agregados foram aquecidos a 120 °C (na Secção 5.6 ver-se-á que esta temperatura é insuficiente para um adequado desempenho da mistura). A temperatura de compactação rondou os 100 °C, o que originou volumes de vazios elevados (Quadro 5.14).

Os dois grupos de provetes foram ensaiados recorrendo ao principal ensaio de desempenho utilizado nestes estudos preliminares: o ensaio de sensibilidade à água (EN 12697-12 e EN 12697-23). Dado que os resultados de sensibilidade à água (ITSR) e de resistência à tração indireta (ITS_{seco}) nos dois processos de cura são muito semelhantes (Quadro 5.14), verifica-se que a influência da temperatura de cura não é muito significativa. Também é notório que esses resultados são muito baixos, como consequência do elevado volume de vazios e reduzida temperatura de produção, que causou problemas de sensibilidade à água devido a um fraco envolvimento dos agregados (Figura 5.34).

Quadro 5.14 – Resultados de sensibilidade à água para os dois processos de cura.

Temperatura de cura da mistura	Volume de Vazios (%)	ITS _{seco} (kPa)	ITSR (%)
40 °C	7,83	1863,97	36,75
60 °C	6,84	1848,48	38,74

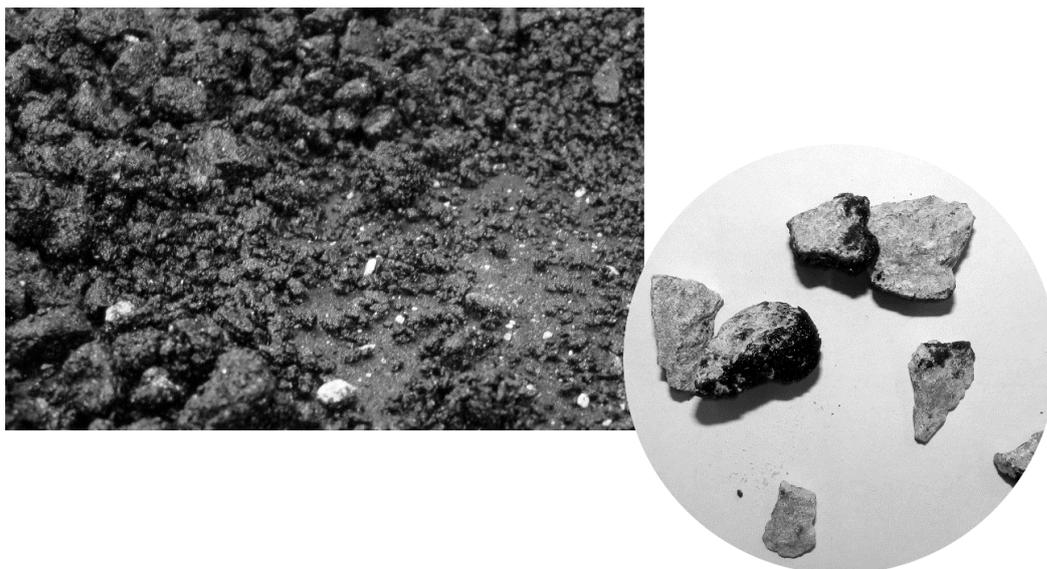


Figura 5.34 – Problemas de envolvimento da mistura executada para análise do processo de cura.

Apesar deste problema que ocorreu nesta primeira mistura produzida com betume-espuma, o estudo permitiu concluir que a temperatura de cura (40 ou 60 °C) não influencia muito o desempenho da mistura. Assim, optou-se por não utilizar nenhum processo de cura.

5.5.2. Influência do Tipo de Filer e da Percentagem de Betume

Os problemas de sensibilidade à água das primeiras misturas com betume-espuma levaram ao estudo da influência que o tipo de filer (quatro tipos de filer distintos) pode ter na melhoria desse desempenho. Simultaneamente, para cada tipo de filer foi avaliada a influência da percentagem de betume no desempenho da mistura, com base no esquema da Figura 5.35. As misturas produzidas nesta fase foram idênticas às descritas na Secção 5.5.1 (tipo de betume-espuma, granulometria, temperaturas), sem nenhum processo de cura.

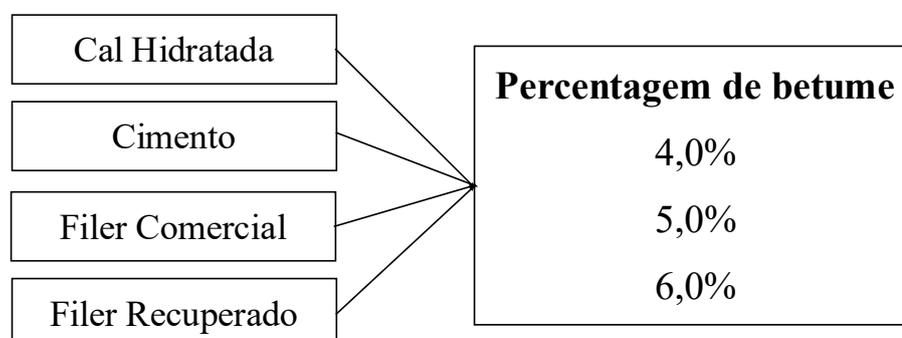


Figura 5.35 – Esquema das misturas produzidas para verificar a influência do tipo de filer.

Dos tipos de filer utilizados, dois são também ligantes hidráulicos (cal hidratada e cimento), sendo expectável que obtenham melhores resultados de sensibilidade à água. O filer comercial é o mais usual na produção de misturas betuminosas, sendo essencial a sua análise. O filer recuperado é um material resultante da lavagem dos agregados, e por norma não é utilizado, embora seja vantajoso o seu estudo para possível aproveitamento futuro.

As temperaturas de produção e de compactação das várias misturas foram sempre registadas (Quadro 5.15), e em geral verificou-se que as mesmas (respetivamente 110 e 100 °C) foram idênticas para todas as misturas. A mistura com cal e 6% de betume salienta-se por ter sido produzida e compactada a uma temperatura mais baixa, o que resultou num maior volume de vazios. No entanto, a quantidade de betume utilizada nas misturas foi o fator que mais influenciou o volume de vazios, verificando-se que as misturas com 4% de betume têm volumes de vazios demasiado altos e inaceitáveis. Também se observou que as percentagens reais de betume-espuma injetadas nas misturas foram, por vezes, relativamente diferentes das pretendidas. Este problema foi posteriormente mitigado com o uso de um bico injetor com menor velocidade de injeção, bem como pela realização de injeções prévias de calibração antes da produção de cada mistura.

Quadro 5.15 – Misturas produzidas para análise da influência do filer e da percentagem de betume.

Tipo de filer	Percentagem de betume (%)		Temperatura (°C)		BMT (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
	Pretendida	Real ¹	Produção	Compactação		
Cal Hidratada	4,00	4,28	109,40	100,38	2381,38	10,34
	5,00	5,51	109,90	100,62	2363,23	3,94
	6,00	6,05	97,00	93,68	2373,84	5,19
Cimento	4,00	4,34	109,90	98,48	2430,49	10,51
	5,00	4,84	111,90	101,25	2394,75	6,26
	6,00	6,37	111,50	99,70	2374,27	3,23
Filer Comercial	4,00	4,00	107,30	96,50	2428,15	11,00
	5,00	5,60	107,50	98,57	2385,53	5,33
	6,00	6,40	112,00	101,15	2366,91	3,43
Filer Recuperado	4,00	3,90	107,00	95,85	2420,46	12,44
	5,00	5,71	110,00	99,75	2386,61	4,65
	6,00	6,38	108,90	100,46	2367,09	3,45

¹ Quantidade de betume real foi obtida com recurso ao método de incineração do betume (Secção 3.2.2).

Em seguida determinou-se a sensibilidade à água das diferentes misturas, cujos resultados de ITS_{seco} médio e de $ITSR$ são apresentados, respetivamente, na Figura 5.36 e na Figura 5.37.

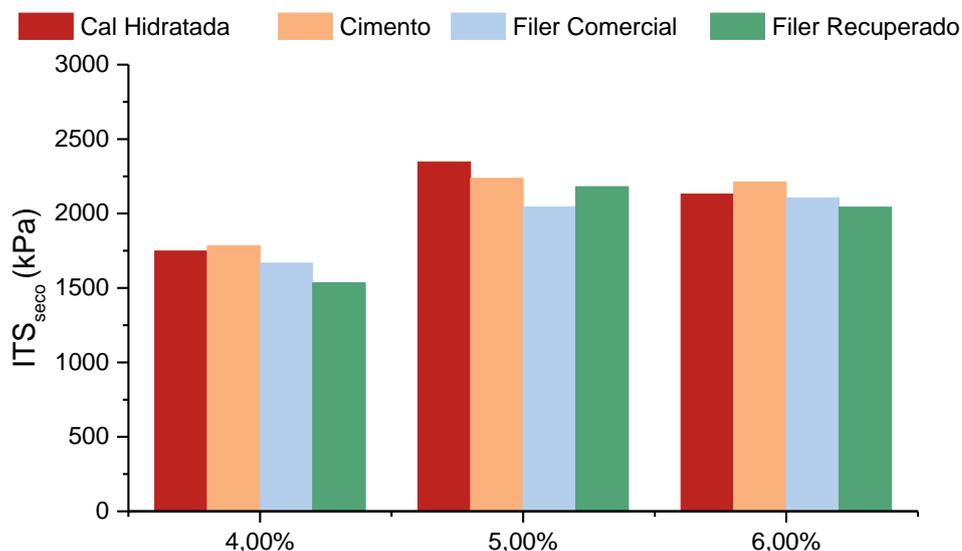


Figura 5.36 – Valores de ITS_{seco} médio das misturas com diferentes tipos de filer tendo em conta a percentagem de betume.

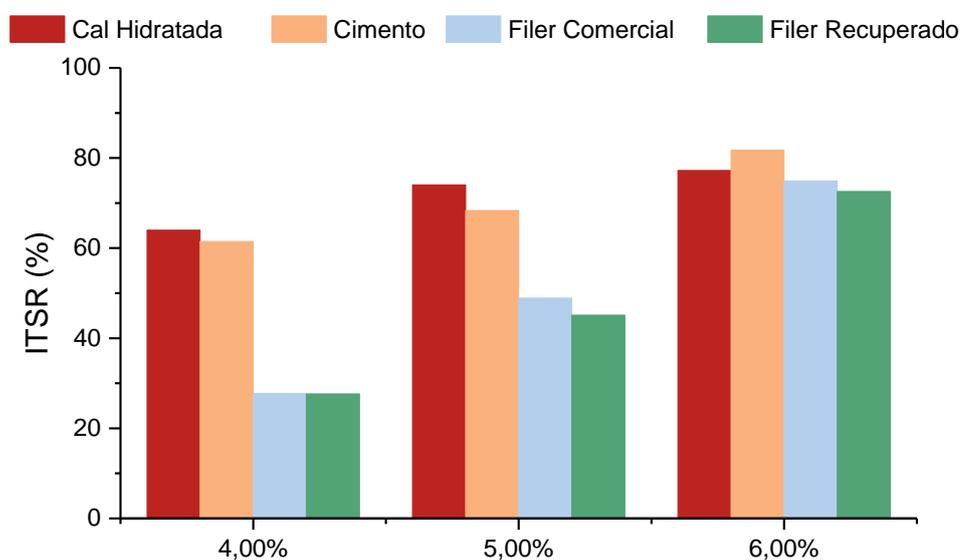


Figura 5.37 – Valores de $ITSR$ das misturas com diferentes tipos de filer tendo em conta a percentagem de betume.

Em relação à resistência à tração indireta (ITS_{seco}) é possível verificar que os valores são idênticos entre si para a mesma percentagem de betume, embora as misturas com cal e cimento apresentem sempre valores de ITS mais elevados. Nota-se ainda que a resistência é claramente inferior nas misturas com 4% de betume (devido ao elevado volume de vazios).

Relativamente aos valores de ITSR verifica-se que a incorporação de cimento ou cal melhora significativamente o comportamento das misturas com betume-espuma, o que ainda é mais evidente para percentagens de betume mais baixas. A utilização de filer recuperado reduz um pouco o desempenho em relação ao filer comercial, mas ambos originam valores de ITSR reduzidos nas misturas com 4 ou 5% de betume. A percentagem de betume tem uma influência muito grande na sensibilidade à água, sendo possível obter resultados de ITSR a rondar os 80% nas misturas com 6% de betume para os quatro tipos de filer.

Em resumo, é possível concluir que a utilização de 6% de betume, ou a aplicação de cal ou cimento, conduzem a melhores resultados de sensibilidade à água. Contudo, estas opções não são as desejáveis porque aumentam os custos de produção, quer ao utilizar cal ou cimento, quer ao aumentar a quantidade de betume na mistura (que, neste caso, também pode originar problemas de deformação permanente). Assim, a utilização de cal ou cimento será uma opção de recurso aconselhada para resolver problemas de sensibilidade à água de misturas com betume-espuma, mas este estudo vai continuar com a utilização de filer comercial. A percentagem de betume de formulação (4,8%), determinada no Capítulo 4, também será o valor a utilizar na continuação deste estudo. Tendo isto em atenção, os estudos preliminares das condições de produção vão prosseguir no sentido de detetar outros fatores que possam estar influenciar negativamente a sensibilidade à água das misturas com betume-espuma.

5.5.3. Influência da Composição Granulométrica e do Tipo de Agregados

No sentido de solucionar o problema de sensibilidade à água já referido, optou-se por incorporar mais 1% de filer comercial na mistura ou utilizar agregados de origem calcária, dado que estes fatores podem condicionar o comportamento da mistura com betume-espuma. Assim, para esse estudo foram produzidas as quatro misturas AC 14 (BB) a seguir indicadas:

- Mistura com 4,8% de betume não espumado, com agregados graníticos e com a granulometria indicada na Secção 3.5.1, produzida a 160 °C (FO_BC_AG);
- Mistura com 4,8% de betume-espuma, com agregados graníticos e com a granulometria indicada na Secção 3.5.1, produzida a 110 °C (FO_BE_AG);
- Mistura com 4,8% de betume-espuma, com agregados graníticos e com 1% de filer adicional, produzida a 110 °C (FA_BE_AG);
- Mistura com 4,8% de betume-espuma, com agregados calcários, produzida a 110 °C (FO_BE_AC).

Na mistura FA_BE_AG em que se aumentou a percentagem de filer em 1%, diminuiu-se a quantidade de pó 0/4 na mesma proporção, o que permitiu continuar a cumprir o fuso da mistura AC 14 (BB). No que respeita aos agregados calcários (Figura 5.38), dado que estes têm dimensões diferentes, foi necessário ajustar a curva granulométrica desta mistura ao fuso granulométrico da mistura AC 14 (BB), o que foi conseguido com sucesso (Figura 5.39).



Figura 5.38 – Aspeto das diferentes dimensões dos agregados calcários utilizados.

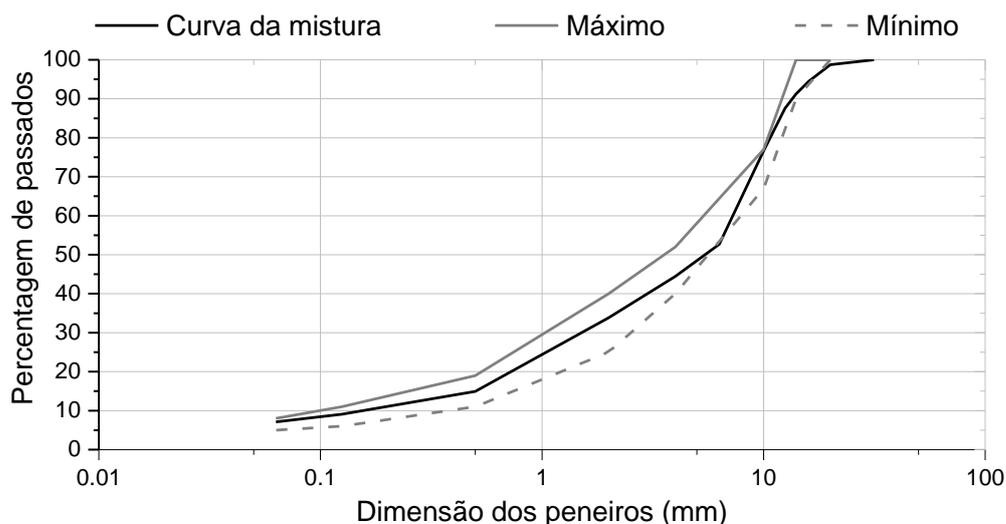


Figura 5.39 – Curva granulométrica da mistura com agregados calcários.

De referir que nesta parte do estudo, o betume utilizado foi o betume 50/70 aditivado com 0,1% do aditivo E1, submetido ao processo de expansão segundo os seguintes parâmetros:

- Temperatura do betume igual a 160 °C;
- Pressão do ar: 5,5 bar;
- Uso de 3% de água;
- Bico injetor de 50 g/s.

Na fase de produção das misturas controlou-se de novo as temperaturas de fabrico e compactação (Quadro 5.16), verificando-se que as temperaturas de compactação das misturas com betume-espuma foram relativamente baixas, o que originou volumes de vazios relativamente altos. No entanto, os agregados calcários conferem maior trabalhabilidade à mistura, originando o volume de vazios desejado, mesmo a essas temperaturas mais baixas. Verifica-se ainda que a melhoria no processo de injeção do betume referido anteriormente já permitiu controlar muito melhor a percentagem de betume das misturas.

Quadro 5.16 – Misturas produzidas para análise da influência da composição granulométrica e do tipo de agregados.

Mistura	Percentagem de betume (%)	Temperatura (°C)		BMT (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
		Produção	Compactação		
FO_BC_AG	4,80	155,70	134,90	2473,04	4,78
FO_BE_AG	4,70	115,80	93,18	2470,16	7,19
FA_BE_AG	4,90	111,90	92,33	2479,26	6,91
FO_BE_AC	4,80	110,10	90,43	2499,10	4,79

Finalmente determinou-se a sensibilidade à água das diferentes misturas, cujos resultados de ITSR e ITS_{seco} são apresentados na Figura 5.40.

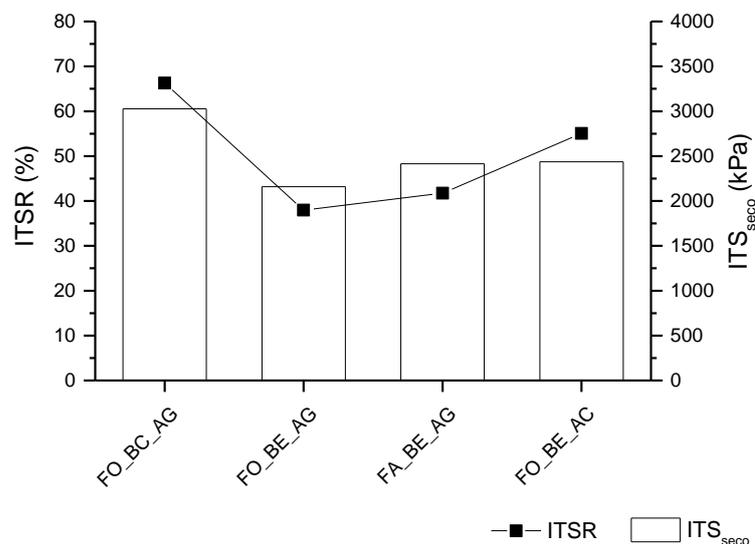


Figura 5.40 – Influência da granulometria e do tipo de agregados nos valores de ITSR e ITS_{seco}.

A mistura produzida a quente e sem betume-espuma é a que apresenta melhores resultados de sensibilidade à água e resistência à tração indireta, embora o valor de ITSR não seja tão elevado

como seria expectável. Relativamente às misturas com betume-espuma, verifica-se que o aumento da quantidade de filer e a utilização de agregados calcários melhoram os resultados de sensibilidade à água em comparação com a mistura com betume-espuma original. Essa melhoria é mais evidente na mistura com agregados calcários devido à sua melhor compactação. Apesar das alterações efetuadas serem vantajosas, os valores de ITSR obtidos são ainda bastante baixos, além de que estas soluções iriam limitar as situações em que se poderia utilizar a tecnologia de betume-espuma. Assim, vai manter-se a composição original para prosseguir o estudo, de modo a encontrar outros fatores mais influentes no desempenho destas misturas.

5.5.4. Influência da Quantidade de Água Usada na Produção do Betume-Espuma

A percentagem de água utilizada para expansão do betume pode ser otimizada para melhorar os resultados de sensibilidade à água destas misturas. A quantidade de aditivo E1 utilizado também pode estar a influenciar esse comportamento da mistura. Para estudar estes parâmetros foram produzidas as misturas apresentadas no Quadro 5.17, que são variações das condições de produção indicadas na secção anterior para produção da mistura AC 14 (BB) com betume-espuma.

Quadro 5.17 – Misturas com betume-espuma produzido com diferentes quantidades de água e aditivo.

Betume-Espuma	Quantidade aditivo (%)	Quantidade água (%)
BE_0.1E1_2	0,1	2,0
BE_0.1E1_3	0,1	3,0
BE_0.1E1_4	0,1	4,0
BE_0.2E1_3	0,2	3,0

Além destas misturas com betume-espuma, também foram produzidas mais duas misturas convencionais sem betume-espuma às temperaturas de 160 °C e de 110 °C, que serão utilizadas em termos comparativos. A primeira corresponde à mistura a quente já referida na secção anterior, e a segunda foi produzida a menor temperatura para compreender a importância de se espumar o betume para poder produzir misturas a temperaturas mais baixas.

As temperaturas de produção e compactação das várias misturas em análise nesta fase são apresentadas no Quadro 5.18, verificando-se que as mesmas cumpriram o valor de referência definido para sua produção, razão pela qual foi possível garantir temperaturas idênticas para as diversas misturas (exceto para a mistura a quente, como é óbvio).

Quadro 5.18 – Condições de produção e volume de vazios das misturas produzidas com diferentes quantidades de água e aditivo .

Mistura	Porcentagem de betume (%)	Temperatura (°C)		BMT (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
		Produção	Compactação		
Conv_160	4,80	155,7	134,9	2473,04	4,78
Conv_110	4,80	115,8	105,4	2471,08	6,12
BE_0.1E1_2	5,00	113,2	105,3	2482,53	7,23
BE_0.1E1_3	5,00	108,1	105,3	2476,46	4,65
BE_0.1E1_4	5,00	110,8	107,5	2485,07	4,70
BE_0.2E1_3	4,40	109,4	104,3	2480,02	6,90

Nesta fase verificou-se de novo alguma dificuldade em controlar a quantidade de betume-espuma injetado, o que foi evidente na mistura BE_0.2E1_3, na qual se introduziu apenas 4,4% de betume (o valor alvo era 4,8%). Isso originou um volume de vazios mais alto para esta mistura, que poderá comprometer o seu desempenho. Outras misturas com volumes de vazios elevados foram a mistura sem betume-espuma produzida a 110 °C (o que demonstra a importância de espumar o betume para se reduzir a temperatura de produção) e a mistura com betume-espuma e 2% de água (valor insuficiente para espumar o betume de forma adequada).

Em seguida determinou-se a sensibilidade à água das diferentes misturas, cujos resultados de ITSR e ITS_{seco} são apresentados na Figura 5.41.

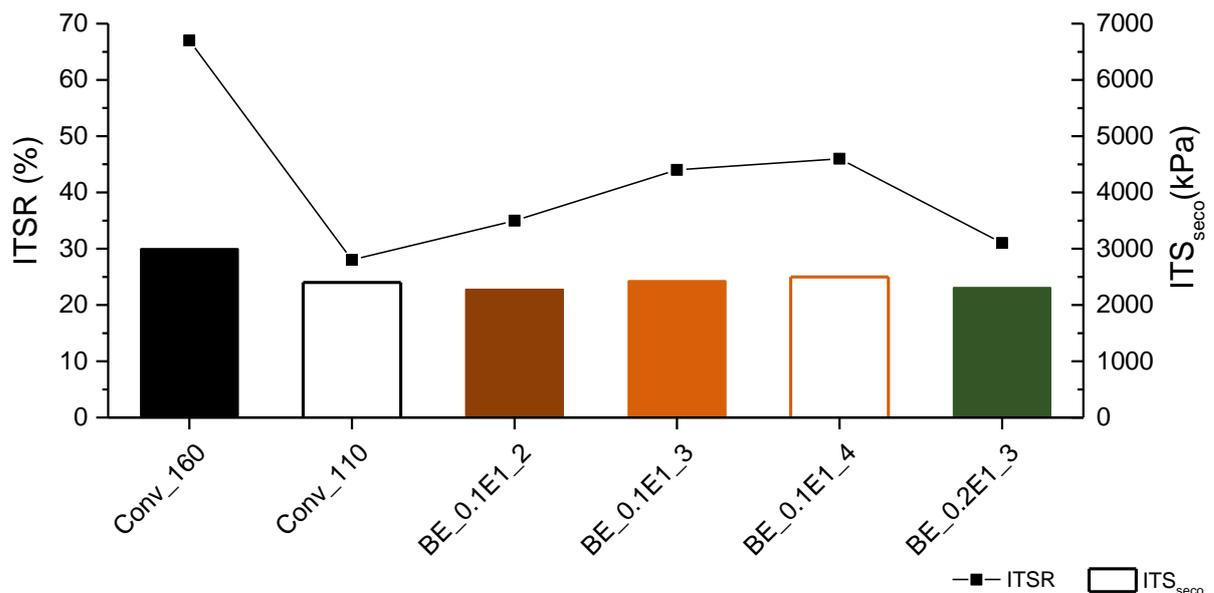


Figura 5.41 – Influência da quantidade de água e aditivo nos valores de ITSR e ITS_{seco}.

Os valores de ITS_{seco} das várias misturas produzidas a temperatura mais baixa são idênticos entre si, sendo inferiores aos obtidos para a mistura a quente (em princípio devido a um menor envelhecimento durante a fase de produção). Assim, a quantidade de água e aditivo não aparenta ter uma grande influência sobre esta propriedade.

Os valores de $ITSR$ das várias misturas produzidas a 110 °C são bastante inferiores ao obtido para a mistura convencional a 160 °C, voltando a demonstrar ainda não ser possível atingir valores satisfatórios de sensibilidade à água ao produzir misturas a 110 °C, com ou sem betume-espuma. Apesar disso, a utilização de betume-espuma melhora os resultados para misturas produzidas à mesma temperatura. Quanto às misturas com betume-espuma, os melhores resultados foram obtidos para as misturas com 0,1% de aditivo E1 com 3 ou 4% de água. Desta forma, é evidente que as misturas com volumes de vazios mais altos apresentaram um desempenho inadequado.

Com base nestes resultados foi possível definir que a percentagem de aditivo E1 a utilizar deve ser 0,1%, porque a utilização de percentagens mais elevadas iria aumentar os custos de produção sem benefícios em termos de desempenho. Verifica-se ainda que a percentagem de água de 2% é insuficiente para o processo de expansão do betume. Apesar dos resultados serem muito idênticos para as restantes percentagens de água, optou-se por utilizar o menor dos dois valores (3%) para reduzir a quantidade de água adicionada às misturas com betume-espuma, e o seu eventual efeito negativo.

5.5.5. Influência do Método de Pesagem na Fase de Produção da Mistura

Durante a fase de produção das misturas com betume-espuma, realizou-se sempre um procedimento de pesagem das amassaduras em diferentes fases (antes e após injeção) para um melhor controlo da quantidade de betume injetado (devido à flutuação deste valor, como referido anteriormente). Assim, no que diz respeito ao método de pesagem, numa fase inicial optou-se por pesar a quantidade de betume logo após a injeção (Método A), e só depois se iniciava a amassadura. No entanto, durante o tempo de pesagem a taxa de expansão do betume ia diminuindo, desperdiçando-se desta forma parte do tempo de meia-vida do betume-espuma. Neste sentido, alterou-se o processo de pesagem (Método B) da quantidade de betume injetado, que passou a ser realizado apenas após a execução da mistura, de modo a aproveitar a fase em que o betume-espuma tem uma maior expansão. Ambas as metodologias de pesagem são apresentadas na Figura 5.42.

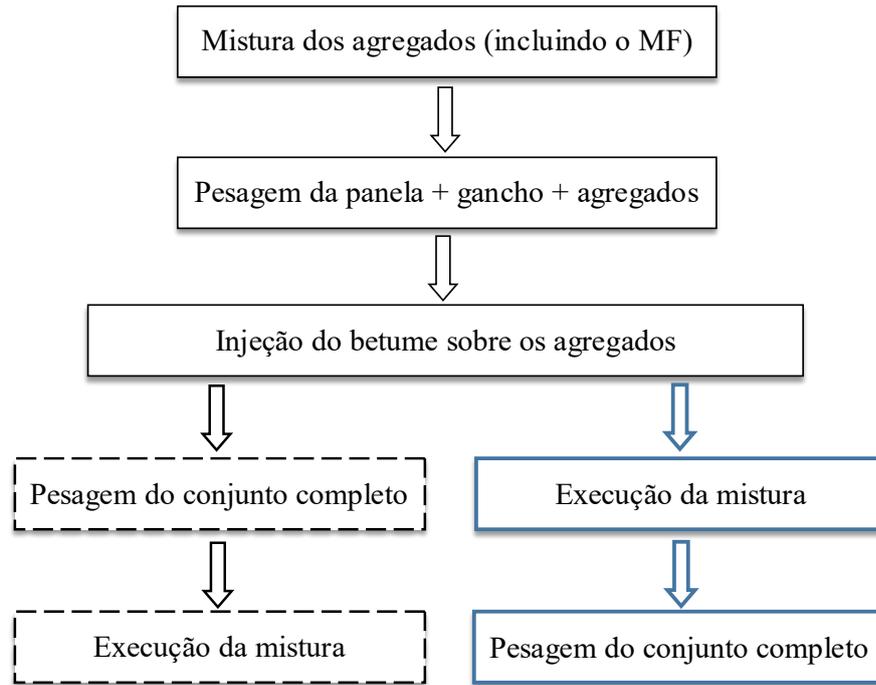


Figura 5.42 – Esquema dos métodos de pesagem: método A (traço interrompido) e método B (a azul).

Nesta fase do trabalho foram produzidas duas misturas AC 14 (BB) com betume-espuma, uma com 0,1% do aditivo E1 (Conv_01E1) e outra com 0,4% do aditivo E4 (Conv_04E4), utilizando as condições de produção definidas nas secções anteriores. Para cada uma destas misturas utilizou-se o método de pesagem A e B para se avaliar o seu efeito.

Comparando ambos os métodos de pesagem utilizados durante a fase de produção, verifica-se claramente que o método B origina uma melhor trabalhabilidade das duas misturas estudadas, o que permite obter um menor volume de vazios (Quadro 5.19). Aliás, ao utilizar este método de pesagem foi possível atingir o volume de vazios especificado para a mistura AC 14 (BB).

Quadro 5.19 – Misturas efetuadas para comparação dos métodos de pesagem.

Mistura	Percentagem de betume (%)	Temperatura (°C)		BMT (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
		Produção	Compactação		
Conv_01E1_A	4,70	115,80	93,18	2470,16	7,19
Conv_04E4_A	4,80	117,40	106,30	2486,89	5,81
Conv_01E1_B	4,80	115,00	105,53	2471,59	4,65
Conv_04E4_B	4,80	120,10	105,72	2475,43	4,20

Em seguida determinou-se a sensibilidade à água das diferentes misturas, cujos resultados de ITSR e ITS_{seco} são apresentados na Figura 5.43.

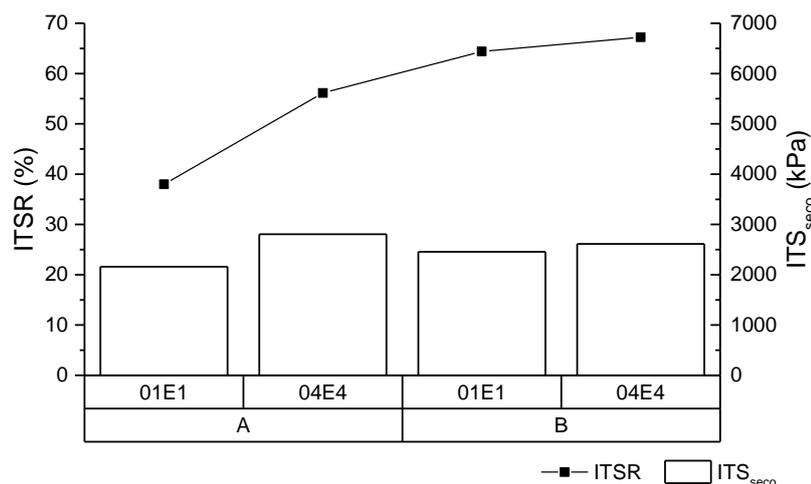


Figura 5.43 – Resultados de sensibilidade à água das misturas ao usar diferentes métodos de pesagem.

A alteração do método de pesagem não teve grande efeito sobre o valor de ITS_{seco} , que apresenta um valor próximo de 2500 kPa para as várias misturas em estudo. Aliás, o tipo de aditivo utilizado teve um maior efeito nesta propriedade, cujos valores foram superiores ao utilizar o aditivo E4. No entanto, o método de pesagem teve um grande efeito sobre o valor de ITSR, dado que o novo método de pesagem B melhorou significativamente a sensibilidade à água das duas misturas com betume-espuma. De facto, esta alteração de procedimento originou valores de ITSR muito próximos dos obtidos para a mistura a quente (160 °C) estudada nas secções anteriores, solucionando em grande parte os problemas de sensibilidade à água e permitindo produzir misturas com betume-espuma a uma temperatura mais baixa.

Após esta parte do estudo, conclui-se que é essencial utilizar o método de pesagem B para garantir um desempenho adequado das misturas com betume-espuma, aproveitando a fase de expansão do betume para produzir as misturas. Assim, este método de pesagem B foi o utilizado durante o restante estudo.

5.5.6. Influência do Condicionamento Após Produção da Mistura

Quando a mistura é produzida em central e transportada para o seu local de aplicação, é sujeita a um condicionamento até à sua aplicação devido à temperatura elevada a que se encontra. Este condicionamento foi simulado em laboratório pela colocação da mistura num tabuleiro coberto (Figura 5.44), de modo a reduzir a evaporação, que esteve em estufa durante 2 horas à temperatura de 105 °C. Estes parâmetros cronológico e térmico basearam-se no estudo de (Newcomb *et al.* (2015)).



Figura 5.44 – Condicionamento da mistura em tabuleiro coberto com folha de alumínio.

Nesta fase do trabalho foram produzidas as mesmas misturas com betume-espuma indicadas na Secção 5.5.5, uma com 0,1% do aditivo E1 (Conv_01E1) e outra com 0,4% do aditivo E4 (Conv_04E4), utilizando o método de pesagem B durante a sua produção.

As misturas submetidas ao processo de condicionamento apresentaram um maior volume de vazios (Quadro 5.20), que será consequência duma maior dificuldade em compactar as misturas após o seu envelhecimento adicional e uma ligeira redução da temperatura de compactação (ambos decorrente do condicionamento). No entanto, estas situações também são expectáveis aquando do transporte da mistura para o local de aplicação.

Quadro 5.20 – Misturas efetuadas para avaliar o efeito do condicionamento da mistura após produção.

Mistura	Percentagem de betume (%)	Temperatura (°C)		BMT (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
		Produção	Compactação		
Conv_01E1_s/cond	4,80	115,00	105,53	2471,59	4,65
Conv_04E4_s/cond	4,80	120,10	105,72	2475,43	4,20
Conv_01E1_c/cond	4,80	115,00	97,80	2471,59	5,64
Conv_04E4_c/cond	4,80	116,90	98,30	2461,79	6,37

Ao avaliar estas misturas em termos da sua sensibilidade à água (Figura 5.45), inicialmente verificou-se que os valores de ITS_{seco} são muito idênticos entre si (aproximadamente 2500 kPa para as várias misturas em estudo). Os valores de ITSR também são semelhantes, com exceção da mistura condicionada e com o aditivo E4 que é mais sensível à água (menor ITSR), previsivelmente devido ao aumento do volume de vazios. Não sendo óbvio que o condicionamento melhora ou prejudica o desempenho das misturas com betume-espuma, optou-se por prosseguir este trabalho sem efetuar o condicionamento das misturas.

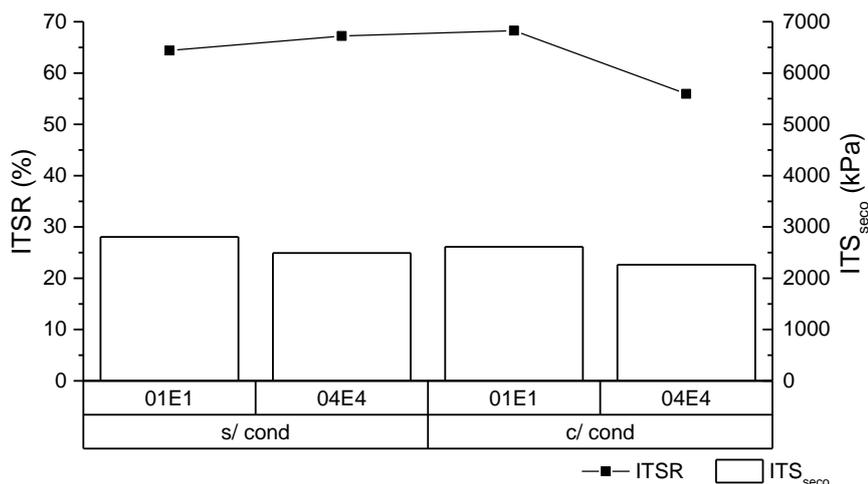


Figura 5.45 – Resultados sensibilidade à água antes e após condicionamento da mistura.

5.5.7. Influência da Pressão do Ar Usada na Produção do Betume-Espuma

Por último, analisou-se qual o efeito de aumentar a pressão do ar de injeção do betume-espuma nos resultados de sensibilidade à água, produzindo misturas equivalentes nas quais o betume-espuma foi injetado com pressões do ar distintas. Uma vez que se tinha ensaiado anteriormente as pressões de 5,5 e 8,0 bar, optou-se por utilizar de novo esses valores.

Neste caso foi produzida uma mistura convencional AC 14 (BB), com o betume 50/70 e 0,1% do aditivo E1, cujas características e condições de produção são apresentadas no Quadro 5.21. Verificou-se que a mistura produzida com maior pressão de ar de injeção do betume-espuma apresenta um elevado volume de vazios, não cumprindo os valores especificados para uma mistura do tipo AC 14 (BB), mesmo quando as condições de produção de ambas as misturas em estudo foram muito semelhantes.

Quadro 5.21 – Características das misturas produzidas com diferentes níveis de pressão do ar.

Mistura	Porcentagem de betume (%)	Temperatura (°C)		BMT (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
		Produção	Compactação		
Conv_BE_5,5	4,80	128,40	117,08	2431,20	3,82
Conv_BE_8,0	4,90	124,60	112,45	2455,47	5,72

Quanto aos resultados de sensibilidade à água (Figura 5.46) é possível verificar que a mistura produzida com maior pressão de ar de injeção apresenta valores de ITS_{seco} e ITSR inferiores. Assim, não se justifica a utilização de pressões superiores ao valor de referência de 5,5 bar, uma vez que estas conduzem a piores resultados de sensibilidade à água.

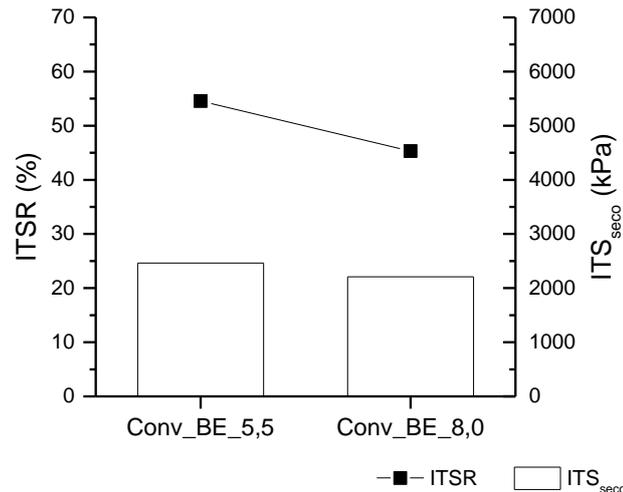


Figura 5.46 – Resultados sensibilidade à água obtidos ao alterar a pressão do ar na injeção do betume-espuma.

5.5.8. Principais Recomendações Resultantes dos Estudos Preliminares

Depois de terminados os vários estudos preliminares, foi importante sintetizar algumas recomendações quanto ao método de produção das misturas com betume-espuma.

Assim sendo, no que respeita ao processo de cura verificou-se que o mesmo não precisava ser aplicado, dado que tem pouca influência no desempenho da mistura. O tipo de filer e a percentagem de betume a utilizar nas misturas não foram alterados em relação ao previsto nos Capítulos 3 e 4. Desse modo, deverá utilizar-se filer comercial de origem calcária, e a percentagem de betume a utilizar deve ser a que resulta do estudo de formulação (4,8% no caso das misturas sem material fresado). Relativamente às quantidades de aditivo e água a utilizar no betume-espuma deve utilizar-se uma percentagem de 3% de água, enquanto a quantidade de aditivo ideal é variável em função do tipo de aditivo utilizado: 0,1% para o aditivo E1 e 0,4% para o aditivo E4. No entanto, aconselha-se a utilização do aditivo E1 que é aplicado em menores quantidades. A pressão do ar a utilizar na injeção de betume-espuma deve ser 5,5 bar.

O fator com maior impacto no desempenho destas misturas acabou por ser a rapidez com que se efetua a mistura após injeção do betume-espuma, tirando o máximo partido do tempo de meia-vida durante a qual o betume está expandido e envolve melhor os agregados. Assim, o método de pesagem a utilizar para controlo da quantidade de betume-espuma injetado nas misturas deve ser realizado apenas após conclusão da amassadura (método B), para não comprometer o sucesso na aplicação da tecnologia de betume-espuma (Figura 5.47).



Figura 5.47 – Esquemática do sistema de pesagem adotada nas misturas com betume-espuma.

Estas recomendações foram apresentadas para resumir as condições utilizadas no restante trabalho e para que, posteriormente, seja possível replicar este estudo ou utilizá-lo como referência comparativa.

5.6. Definição da Temperatura de Produção e Compactação

Depois de definidas as condições ideais de produção das misturas com betume-espuma, nesta fase vai avaliar-se a temperatura ideal de produção e compactação das misturas sem material fresado e com 30 e 50% de MF. Esse estudo será realizado com base no ensaio de compactabilidade, tal como descrito no Capítulo 3. Depois de produzir misturas a quente de referência, serão produzidas misturas equivalentes com betume-espuma a temperaturas progressivamente mais baixas, cuja composição volumétrica e desempenho serão comparadas com a mistura de referência para determinar a temperatura ideal de produção.

5.6.1. Misturas sem Material Fresado

No que respeita às misturas sem material fresado, e uma vez que se utilizou um betume 50/70, para a mistura de referência produzida a quente considerou-se a temperatura de aquecimento dos agregados de 160 °C (CONV_BC_160). As misturas com betume-espuma e com o aditivo

E1 (CONV_01E1) reduziram essa temperatura dos agregados em intervalos progressivos, tal como apresentado no Quadro 5.22.

Quadro 5.22 – Temperaturas utilizadas para produção das misturas sem material fresado.

Mistura	Temperatura (°C)		
	Agregados novos	Produção	Compactação
CONV_BC_160	160,6	150,8	139,7
CONV_01E1_160	160,1	144,6	137,4
CONV_01E1_140	140,6	133,3	124,3
CONV_01E1_120	121,8	119,5	112,1

Os resultados dos ensaios de compactabilidade efetuados a estas misturas sem material fresado são apresentados na Figura 5.48.

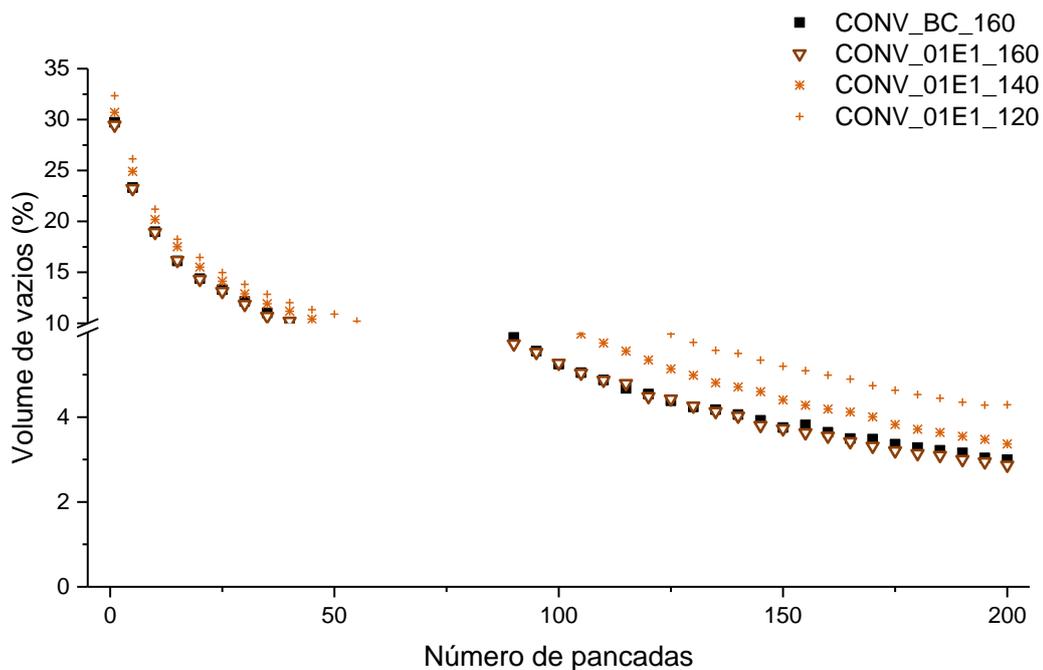


Figura 5.48 – Resultados de compactabilidade das misturas sem material fresado.

Verifica-se que as misturas produzidas a 160 °C, com ou sem betume-espuma, apresentam uma idêntica evolução do volume de vazios com o número de pancadas. Ao reduzir a temperatura de produção das misturas com betume-espuma o volume de vazios aumentou gradualmente, e a 120 °C o volume de vazios já apresenta uma grande diferença em comparação com a mistura de referência. Aparentemente não será possível reduzir muito a temperatura de produção destas misturas com betume-espuma, talvez pelo pior comportamento expansivo do betume 50/70.

Ao analisar o volume de vazios no ensaio de compactabilidade às 150 pancadas (Quadro 5.23) confirma-se a análise anterior. Além disso, verifica-se que a redução máxima de temperatura que se pode fazer ao utilizar betume-espuma é de 20 °C, porque a mistura produzida a 120 °C tem um volume de vazios acima do máximo especificado (5%) para a mistura AC 14 (BB).

Quadro 5.23 – Volume de vazios às 150 pancadas das misturas sem material fresado no ensaio de compactabilidade.

Mistura	Volume de vazios (%)
CONV_BC_160	3,67
CONV_01E1_160	3,73
CONV_01E1_140	4,24
CONV_01E1_120	5,52

Por último avaliou-se o efeito que a redução da temperatura de produção das misturas sem material fresado e com betume-espuma tem em termos de sensibilidade à água (Figura 5.49), por comparação com a mistura de referência produzida a quente.

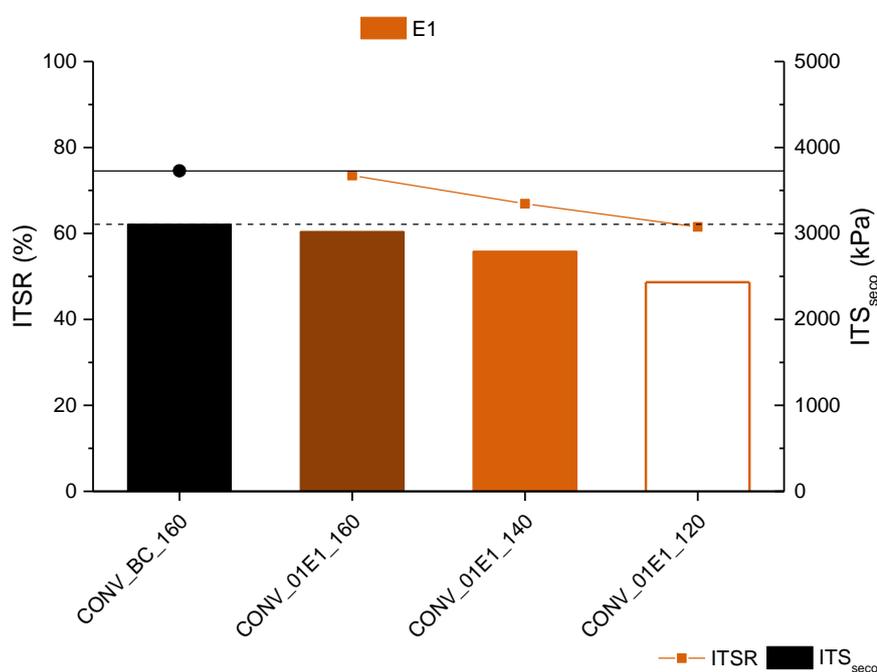


Figura 5.49 – Variação da sensibilidade à água das misturas sem material fresado com a temperatura (linha contínua: referência de ITSR; linha descontinua: referência de ITS_{seco}).

Verifica-se que a redução da temperatura de produção das misturas com betume-espuma acaba por prejudicar ligeiramente o desempenho destas misturas sem material fresado, quer em termos

de ITSR, quer em termos de ITS_{seco} . Consta-se ainda que existe uma relação direta entre este comportamento e o aumento do volume de vazios.

Analisando os diversos resultados obtidos, e tendo por base o objetivo de reduzir a temperatura de produção da mistura sem MF e com betume-espuma, optou-se por reduzir a temperatura dos agregados em apenas 20 °C. Assim, a mistura sem MF e com betume-espuma a estudar no Capítulo 6 deverá ser produzida com os agregados aquecidos a 140 °C.

5.6.2. Mistura com 30% de Material Fresado

Para as misturas com 30% de MF optou por se considerar a temperatura de referência usada para essa mistura a quente no Capítulo 4 (sem betume-espuma). Assim, na mistura de referência com 30% de MF considerou-se a temperatura de 210 °C (30MF_BC_210) para aquecimento dos agregados e da fração grossa do MF. Nas misturas com betume-espuma reduziu-se gradualmente essa temperatura em intervalos de 20 °C até aos 150 °C (Quadro 5.24), aplicando os dois aditivos mais adequados para estabilização de espuma: 0,1% do aditivo E1 (30MF_01E1) e 0,4% do aditivo E4 (30MF_04E4).

Quadro 5.24 – Temperaturas utilizadas para produção das misturas com 30% de material fresado.

Mistura	Temperatura (°C)				
	Agregados novos	Fração Grossa	Fração Fina	Produção	Compactação
30MF_BC_210	212,8	213,7	23,7	154,8	141,9
30MF_01E1_210	205,9	204,6	19,7	151,6	142,7
30MF_01E1_190	185,3	190,1	20,4	138,0	131,6
30MF_01E1_170	166,3	168,7	22,8	130,0	118,2
30MF_01E1_150	150,6	149,2	18,8	116,8	107,1
30MF_04E4_210	206,0	208,1	18,9	152,0	143,2
30MF_04E4_190	189,8	190,4	20,4	145,2	130,8
30MF_04E4_170	165,0	163,0	22,6	126,8	120,2
30MF_04E4_150	149,8	150,2	20,0	116,2	108,4

Analisando as diversas temperaturas obtidas durante a produção das misturas com 30% de MF é possível verificar que existe uma tendência no que concerne à variação das temperaturas de produção e compactação, a qual é resumida no Quadro 5.25. De facto, nota-se que ao variar a temperatura dos agregados em intervalos de 20 °C, isso vai originar variações da temperatura de produção e compactação de aproximadamente 10 °C.

Quadro 5.25 – Temperaturas aproximadas de produção das misturas com 30% de material fresado.

Temperatura (°C)		
Aquecimento	Produção	Compactação
210	150	140
190	140	130
170	130	120
150	120	110

Os resultados dos ensaios de compactabilidade destas misturas com 30% de material fresado são apresentados na Figura 5.50 e na Figura 5.51, respetivamente para as misturas com os aditivos E1 e E4 (dado que a compactação destas misturas pode depender do aditivo usado).

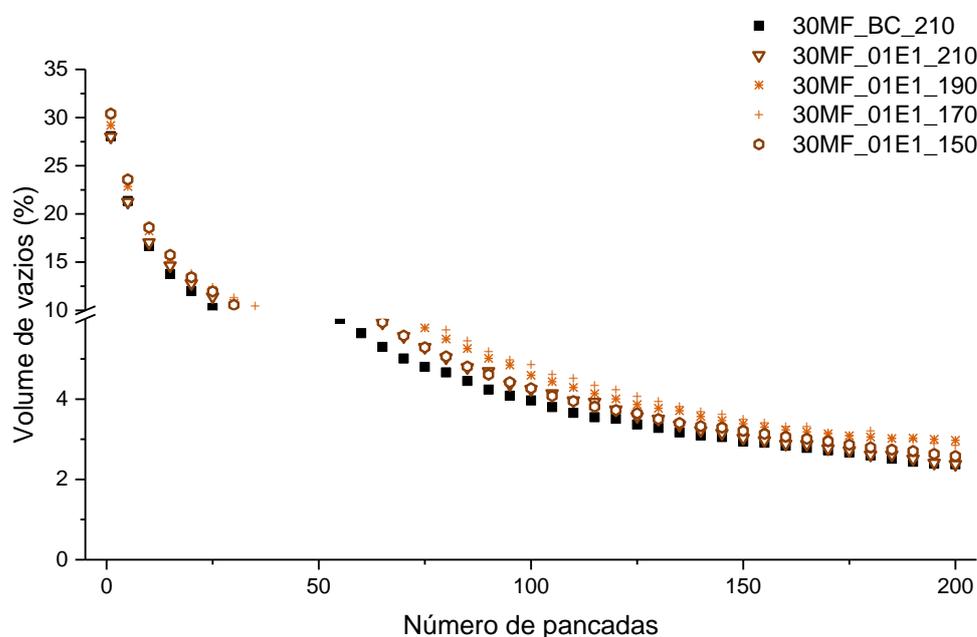


Figura 5.50 – Resultados de compactabilidade das misturas com 30% de material fresado e com o aditivo E1.

De facto, é possível verificar que ao utilizar o aditivo E4, por comparação com o aditivo E1, acentua-se a diferença nas curvas de compactação (e respetivos volumes de vazios) causada pela redução da temperatura de produção das misturas com betume-espuma e com 30% de MF. Ao utilizar o aditivo E1 verifica-se uma quase sobreposição das curvas de compactação obtidas para as várias temperaturas, e destas com a mistura de referência. Por outro lado, ao utilizar o aditivo E4 houve uma grande variação das curvas de compactação, que não ocorreu apenas ao reduzir a temperatura de produção. O pior resultado com este aditivo aconteceu a 150 °C, o que pode indicar que esta temperatura já não permite obter uma boa compactação.

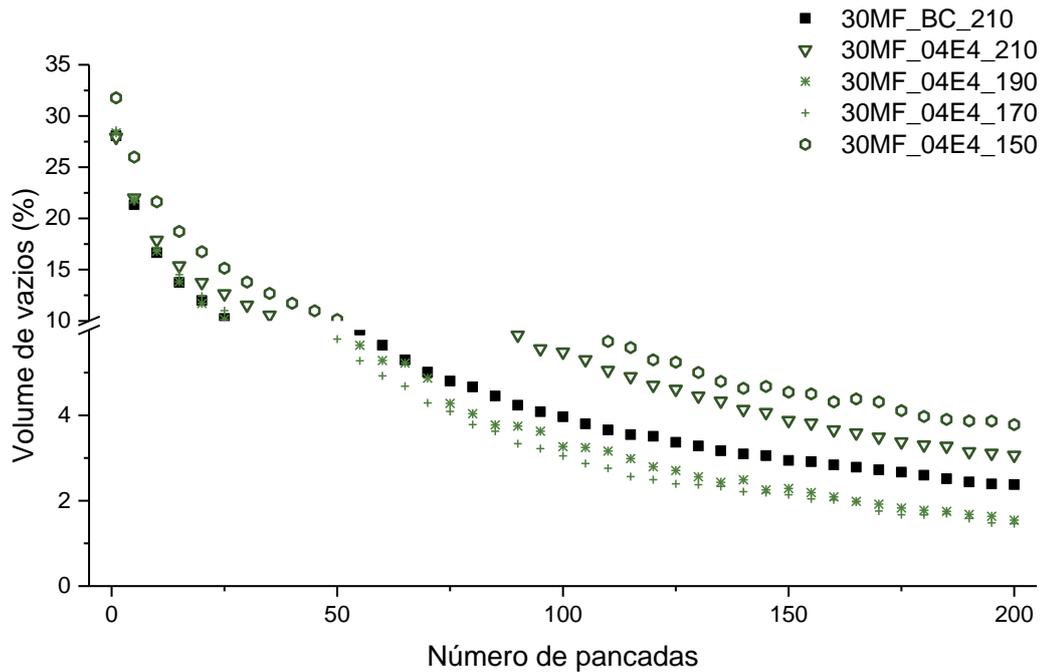


Figura 5.51 – Resultados de compactabilidade das misturas com 30% de material fresado e com o aditivo E4.

Ao analisar o volume de vazios no ensaio de compactabilidade às 150 pancadas (Quadro 5.26) confirma-se a maior variação do volume de vazios com o aditivo E4. No entanto, todas as condições estudadas cumprem com o valor máximo especificado (5%) para o volume de vazios da mistura AC 14 (BB), independentemente do aditivo utilizado. Aliás, os volumes de vazios são até demasiado baixos, mas isso também acontece para a mistura de referência a quente.

Quadro 5.26 – Volume de vazios às 150 pancadas das misturas com 30% de material fresado no ensaio de compactabilidade.

Mistura	Temperatura (°C)			
	210	190	170	150
30MF_BC	2,91%	-	-	-
30MF_01E1	2,99%	3,35%	3,45%	3,16%
30MF_04E4	3,73%	2,15%	2,05%	4,44%

Por fim avaliou-se o efeito que a redução da temperatura de produção das misturas com 30% de material fresado e com betume-espuma tem em termos de sensibilidade à água (Figura 5.52), por comparação com a mistura de referência produzida a quente. Logo à partida verifica-se que as misturas com menores volumes de vazios conduzem a melhores resultados em termos de sensibilidade à água (ITSR).

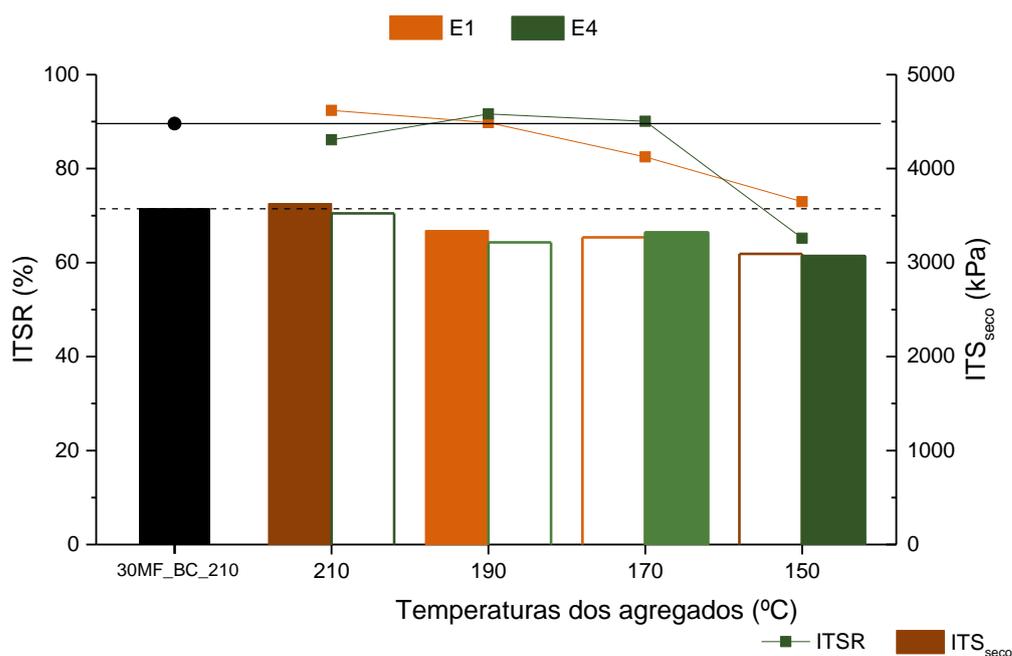


Figura 5.52 – Variação da sensibilidade à água das misturas com 30% de material fresado com a temperatura (linha contínua: referência de ITSR; linha descontinua: referência de ITS_{seco}).

Verifica-se que os valores de ITSR das misturas com betume-espuma são muito próximos dos obtidos para a mistura de referência a quente, mesmo após reduzir a temperatura dos agregados em 40 °C. Assim, fica patente que a conjugação da tecnologia de betume-espuma com a reciclagem de misturas betuminosas a menores temperaturas pode ser uma excelente solução.

Os valores de ITS_{seco} foram tanto maiores quanto mais alta foi a temperatura de aquecimento dos agregados, o que demonstra que a redução da temperatura de aquecimento das misturas recicladas com betume-espuma pode limitar de forma efetiva o envelhecimento do betume.

Nos ensaios de compactabilidade e de sensibilidade à água foi possível verificar que os melhores resultados surgiram a 170 °C. Assim, a mistura com betume-espuma e com 30% de MF a estudar no Capítulo 6 deve ser produzida com os agregados e o FG aquecidos a 170 °C.

5.6.3. Mistura com 50% de Material Fresado

Para as misturas com 50% de material fresado foi seguido o mesmo procedimento aplicado às misturas com 30% de MF, sendo assim definidas as temperaturas de aquecimento dos agregados novos e da fração grossa do MF apresentadas no Quadro 5.27. Neste caso, a temperatura de referência para a mistura a quente foi 230 °C (50MF_BC_230). As misturas com betume-espuma também foram produzidas com os mesmos aditivos E1 e E4.

Quadro 5.27 – Temperaturas utilizadas para produção das misturas com 50% de material fresado.

Mistura	Temperatura (°C)				
	Agregados novos	Fração Grossa	Fração Fina	Produção	Compactação
50MF_BC_230	225,2	230,7	22,7	151,7	143,4
50MF_01E1_230	229,0	229,6	25,3	143,9	133,0
50MF_01E1_210	208,9	207,7	22,3	131,9	128,5
50MF_01E1_190	188,7	187,9	22,4	121,0	118,3
50MF_01E1_170	168,5	166,3	19,3	109,9	103,7
50MF_04E4_230	229,0	231,0	27,8	145,7	131,2
50MF_04E4_210	208,9	209,1	22,1	132,0	128,9
50MF_04E4_190	187,2	190,2	24,2	127,5	125,6
50MF_04E4_170	168,3	167,6	20,0	118,6	104,5

Tal como aconteceu nas misturas com 30% de MF, também aqui é possível definir uma tendência aproximada para a variação das temperaturas de produção e compactação das misturas com 50% de MF (Quadro 5.28).

Quadro 5.28 – Temperaturas aproximadas de produção das misturas com 50% de material fresado.

Temperatura (°C)		
Aquecimento	Produção	Compactação
230	150	140
210	140	130
190	130	120
170	120	110

Verifica-se que as temperaturas de produção e compactação são idênticas para as misturas com 30 ou 50% de MF, apesar de as temperaturas de aquecimento serem superiores para as misturas com maior quantidade de material fresado.

De referir que a necessidade de aquecer os agregados a temperaturas mais altas para se obter a mesma temperatura de produção na mistura com 50% de MF se prende com a incorporação duma maior percentagem da fração fina do MF (30%), a qual é introduzida na mistura final à temperatura ambiente.

Os resultados dos ensaios de compactabilidade destas misturas com 50% de material fresado são apresentados na Figura 5.53 e Figura 5.54, respetivamente para as misturas com os aditivos E1 e E4.

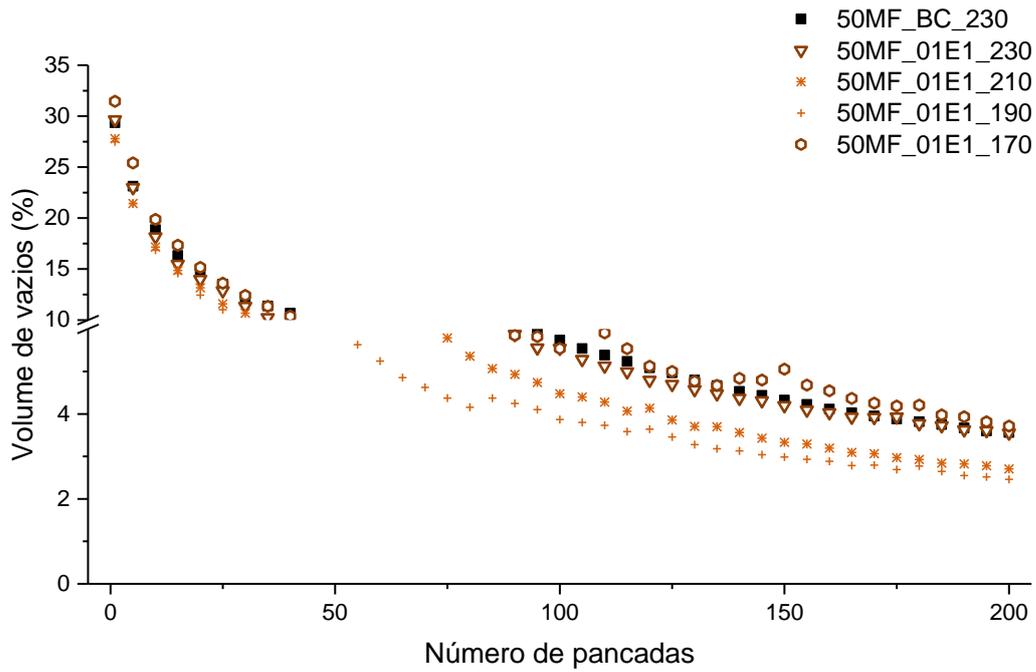


Figura 5.53 – Resultados de compactabilidade das misturas com 50% de material fresado e com o aditivo E1.

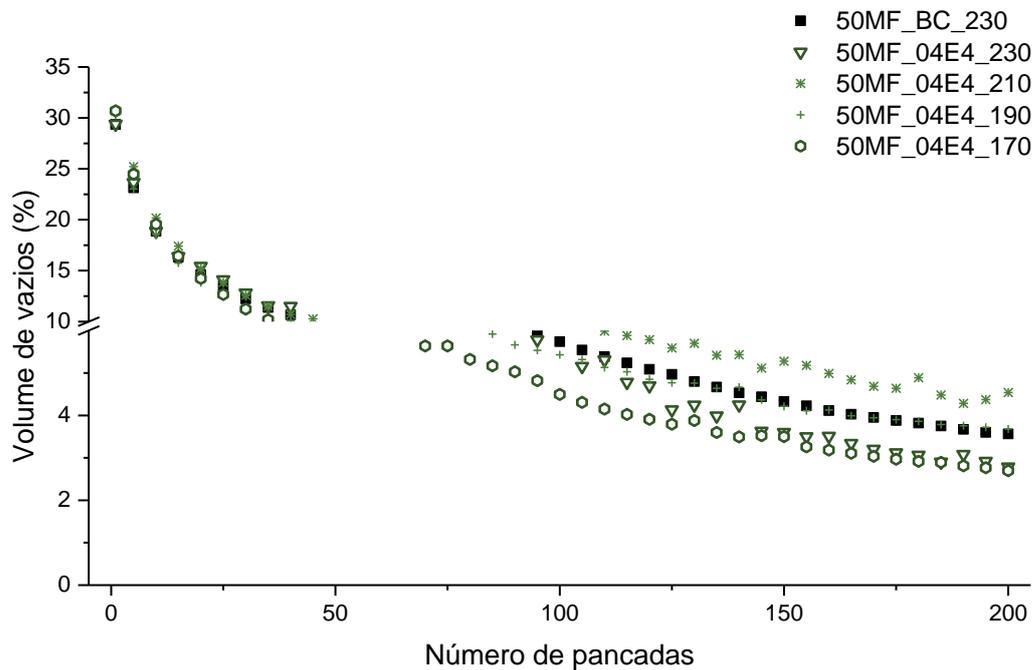


Figura 5.54 – Resultados de compactabilidade das misturas com 50% de material fresado e com o aditivo E4.

Ao utilizar uma maior percentagem de MF verifica-se que a forma das curvas de compactação é mais variável, e que os volumes de vazios obtidos são mais elevados (o que em parte também acontece na mistura de referência a quente). Este comportamento pode estar associado a alguma

variabilidade na qualidade do MF, que tem maior influência nas propriedades destas misturas, e a uma maior resistência à compactação causada por esse material fresado.

A variação da temperatura de produção das misturas com betume-espuma tem alguma influência nas curvas de compactabilidade, mas de uma forma geral os resultados com betume-espuma são melhores do que os da mistura de referência a quente.

Os aditivos E1 e E4 voltaram a mostrar um efeito diferente ao serem utilizados nestas misturas com 50% de MF. O aditivo E1 já não apresenta a mesma sobreposição de resultados com a temperatura, mas a variação dos mesmos continua a ser inferior à do aditivo E4. O pior resultado com esse aditivo E1 aconteceu a 170 °C, o que pode indicar que esta temperatura já não permite obter uma boa compactação.

Ao analisar o volume de vazios no ensaio de compactabilidade às 150 pancadas nas misturas com 50% de MF (Quadro 5.29), desde logo é possível verificar que este é superior ao obtido para a mistura com 30% de MF. Assim, confirma-se que a incorporação de uma maior percentagem de MF origina uma dificuldade acrescida na compactação destas misturas.

Quadro 5.29 – Volume de vazios às 150 pancadas das misturas com 50% de material fresado no ensaio de compactabilidade.

Mistura	Temperatura (°C)			
	230	210	190	170
50MF_BC	4,30%	-	-	-
50MF_01E1	4,11%	3,47%	3,10%	4,90%
50MF_04E4	3,48%	5,14%	4,07%	3,32%

No entanto, todas as condições estudadas cumprem com o valor máximo especificado (5%) para o volume de vazios da mistura AC 14 (BB), apesar de se observar um valor que se aproxima muito desse limite à temperatura de 170 °C na mistura com o aditivo E1.

Por fim avaliou-se o efeito que a redução da temperatura de produção das misturas com 50% de material fresado e com betume-espuma tem em termos de sensibilidade à água (Figura 5.55), por comparação com a mistura de referência produzida a quente.

Verifica-se que as misturas com o aditivo E4 apresentam piores resultados de ITSR para as temperaturas mais altas, mas para temperaturas mais baixas esta tendência inverte-se. Assim, os resultados obtidos para o aditivo E1 seguem uma tendência mais lógica.

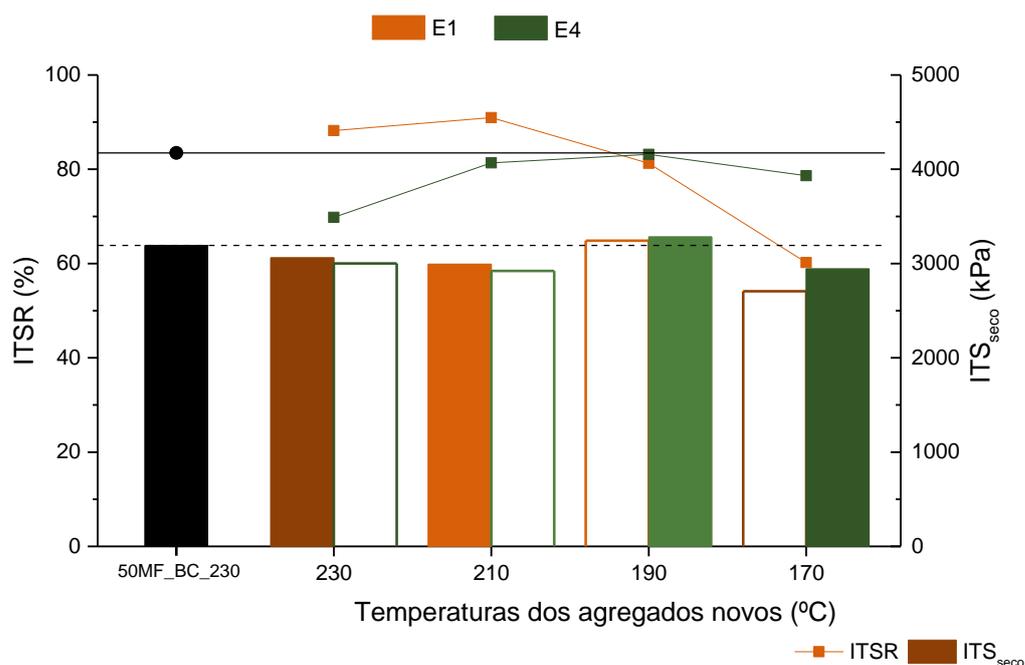


Figura 5.55 – Variação da sensibilidade à água das misturas com 50% de material fresado com a temperatura (linha contínua: referência de ITSR; linha descontinua: referência de ITS_{seco}).

Para estas misturas com 50% de MF verifica-se de novo que ao utilizar betume-espuma é possível reduzir a temperatura dos agregados em 40 °C, mantendo valores de ITSR semelhantes aos obtidos para a mistura de referência a quente. Este resultado confirma a análise anterior sobre o sucesso desta solução.

Os valores de ITS_{seco} das várias misturas apresentaram a mesma ordem de grandeza, inclusive a mistura de referência a quente. De facto, só se notou uma redução de resistência para a temperatura mais baixas de aquecimento do material fresado.

Em resumo, nos ensaios de compactabilidade e de sensibilidade à água foi possível verificar que os melhores resultados surgiram à temperatura de 190 °C, sendo bastantes idênticos aos da mistura com 50% de MF produzida a quente. Desse modo, a mistura com 50% de material fresado e com betume-espuma e a estudar no Capítulo 6 deve ser produzida com os agregados novos e a fração grossa do MF aquecidos a 190 °C.

Depois de se terem definido as condições ideais de produção do betume-espuma e das diversas misturas com esse betume-espuma (sem material fresado e com 30 ou 50% de MF), no próximo capítulo vai avaliar-se o seu desempenho para confirmar o sucesso desta tecnologia.

CAPÍTULO 6

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS COM BETUME-ESPUMA

As misturas betuminosas recicladas temperadas (MBRT) têm vindo a ser consideradas como uma alternativa às misturas betuminosas recicladas a quente (MBRQ). Estas misturas têm como vantagem principal a redução das temperaturas de fabrico, com a conseqüente redução das emissões de gases com efeito de estufa, bem como permitem aos trabalhadores ter uma melhoria significativa das condições de trabalho. No entanto, tratando-se de uma tecnologia ainda pouco comum, principalmente quando se trata da utilização de betume-espuma, existe a necessidade de avaliar o desempenho das misturas produzidas com esta técnica. Nesse sentido, no presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de sensibilidade à água, resistência à deformação permanente, módulo de rigidez e resistência ao fendilhamento por fadiga. Adicionalmente apresenta-se também um estudo da aplicabilidade das misturas avaliadas em contexto real.

6.1. Sensibilidade à Água

6.1.1. Mistura sem Material Fresado

No que respeita à sensibilidade à água das misturas sem MF optou-se por produzir uma mistura de controlo com betume convencional não expandido, à temperatura usualmente utilizada para o tipo de betume escolhido. Na sequência do estudo apresentado no Capítulo 5, para as misturas com betume-espuma foi avaliada a sensibilidade à água das misturas produzidas com os dois aditivos estabilizadores de espuma, com um aditivo promotor de adesividade e, por último, com o betume-espuma sem qualquer tipo de aditivo. Tal como é visível no Quadro 6.1 as temperaturas de fabrico e compactação das misturas são essencialmente controladas pela

temperatura de aquecimento dos agregados, tendo-se verificado que todas as misturas produzidas com betume-espuma apresentam temperaturas idênticas entre si.

Quadro 6.1 – Temperaturas das misturas sem MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.

Mistura	Temperatura (°C)		
	Agregados novos	Mistura	Compactação
Conv_BC_160	160,6	150,8	139,7
Conv_BE_140	140,4	137,5	124,5
Conv_01E1_140	140,6	133,3	124,3
Conv_04E4_140	140,8	134,3	121,4
Conv_04E2_140	141,2	132,0	121,3

No que respeita às características das misturas (Quadro 6.2) é possível verificar que estas apresentam teores em betume muito próximos, permitindo concluir que o uso da velocidade de injeção mais baixa assegura um melhor controlo da quantidade de betume-espuma injetada. Quanto aos valores de BMT estes encontram-se dentro da mesma gama de valores, o que seria de esperar uma vez que se trata de misturas com idêntica composição. No entanto, é visível que as misturas com os aditivos E1 e E2 são as que apresentam valores maiores de volume de vazios.

Quadro 6.2 – Características das misturas sem incorporação de MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.

Mistura	Percentagem de betume (%)	BMT (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
Conv_BC_160	4,80	2443,73	3,10
Conv_BE_140	4,80	2427,57	3,25
Conv_01E1_140	4,80	2437,79	4,24
Conv_04E4_140	4,80	2433,85	3,29
Conv_04E2_140	4,80	2446,73	4,47

No que respeita aos resultados de sensibilidade à água (Figura 6.1) é possível verificar que os valores de ITSR obtidos para as misturas avaliadas não diferem de forma significativa, apesar de se observar um valor ligeiramente inferior para a mistura produzida com betume-espuma sem qualquer aditivo. Também é possível verificar que a incorporação de aditivos nas misturas com betume-espuma permite melhorar ligeiramente os resultados em termos de ITSR, apesar de estes valores poderem ter sido influenciados pela diminuição do valor de ITS_{seco} , nomeadamente com a utilização dos aditivos E2 e E4, conduzindo a valores mais altos de ITSR.

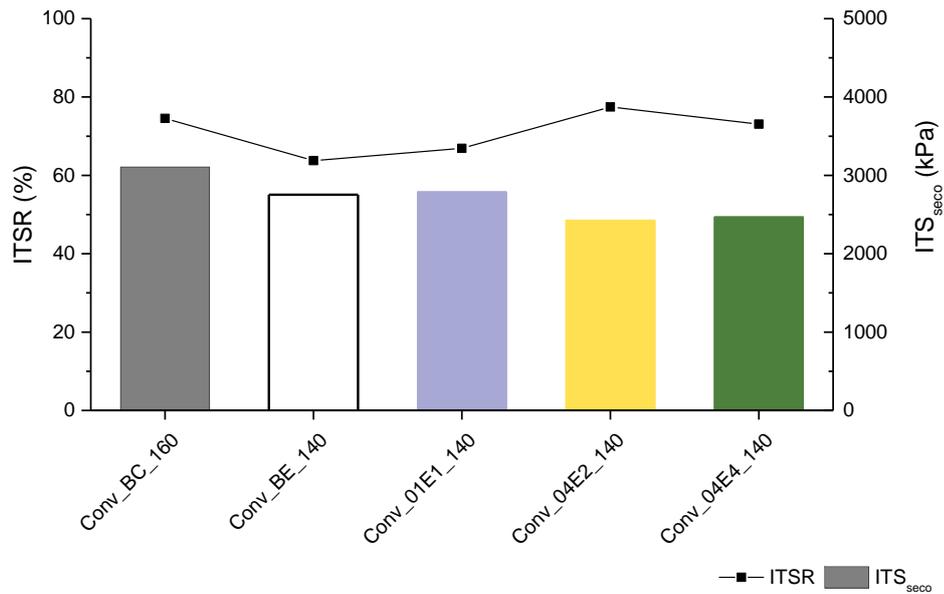


Figura 6.1 – Resultados de sensibilidade à água das misturas sem incorporação de MF.

De referir que apesar de se ter avaliado a sensibilidade à água da mistura produzida com o aditivo E2, uma vez que este é um promotor de adesividade, é necessário ter em atenção que este aditivo não apresenta qualquer tipo de vantagem em termos de expansibilidade.

Relativamente aos valores de ITSR normalmente esperados para misturas betuminosas produzidas a quente, verifica-se que nenhuma das misturas atingiu o valor de 80%, incluindo a mistura convencional, produzida a quente sem betume-espuma, o que poderá indicar que a interação entre o betume e os agregados utilizados não é a melhor, ajudando a justificar os valores relativamente reduzidos que se obteve.

6.1.2. Mistura com 30% de Material Fresado

As misturas com 30% de material fresado com betume-espuma foram produzidas tendo por base o estudo apresentado no Capítulo 5. Assim, utilizou-se a temperatura de 170 °C para o aquecimento dos agregados novos e da fração grossa do material fresado, tendo a fração fina sido adicionada à mistura à temperatura ambiente. No caso da mistura produzida a quente, a temperatura de aquecimento dos agregados e da fração grossa do MF foi da ordem dos 210 °C. No Quadro 6.3 apresenta-se as temperaturas efetivamente observadas na produção das diferentes misturas. Nesta parte do trabalho não se utilizou o aditivo E2, uma vez que, como se vai ver na Figura 6.2, as misturas com MF não indiciam ter problemas de adesividade.

Quadro 6.3 – Temperaturas das misturas com incorporação de 30% de MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.

Mistura	Temperatura (°C)				
	Agregados novos	Fração Grossa	Fração Fina	Produção	Compactação
30MF_BC_210	212,8	213,7	23,7	154,8	141,9
30MF_BE_170	169,0	168,0	16,0	126,8	118,8
30MF_01E1_170	166,3	168,7	22,8	130,0	118,2
30MF_04E4_170	165,0	163,0	22,6	126,8	120,2

Analisando as características das misturas estudadas (Quadro 6.4) é possível verificar que a percentagem de betume não é muito variável, confirmando a eficácia do uso do bico injetor mais pequeno (com menor velocidade de injeção) no controlo das quantidades de betume injetado. Quanto ao volume de vazios, é possível verificar que todas as misturas cumprem o estipulado no Caderno de Encargos, apesar de a mistura com o aditivo E1 ser aquela que apresenta o maior volume de vazios.

Quadro 6.4 – Características das misturas com incorporação de 30% de MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.

Mistura	Percentagem de betume ² (%)	BMT (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
30MF_BC_210	5,00	2450,40	2,58
30MF_BE_170	5,10	2429,88	2,68
30MF_01E1_170	5,00	2448,00	3,57
30MF_04E4_170	5,00	2431,58	1,91

Os resultados de sensibilidade à água das misturas com incorporação de 30% de MF apresentam-se na Figura 6.2. Como se pode observar nessa figura, as misturas produzidas a temperaturas mais baixas apresentam valores mais baixos de ITS_{seco} , o que pode ser justificado pelo menor aquecimento do material fresado e, conseqüentemente, menor envelhecimento do betume que este contém. Quanto aos valores de ITSR todos eles se encontram acima dos 80%, valor usado normalmente como referência, apesar de o aditivo E4 apresentar resultados ligeiramente melhores, que podem ser justificados pelo valor inferior de volume de vazios.

² Valor previsível da percentagem de betume, tendo por base a quantidade de betume adicionado e a previsível quantidade de betume presente no material fresado utilizado na mistura.

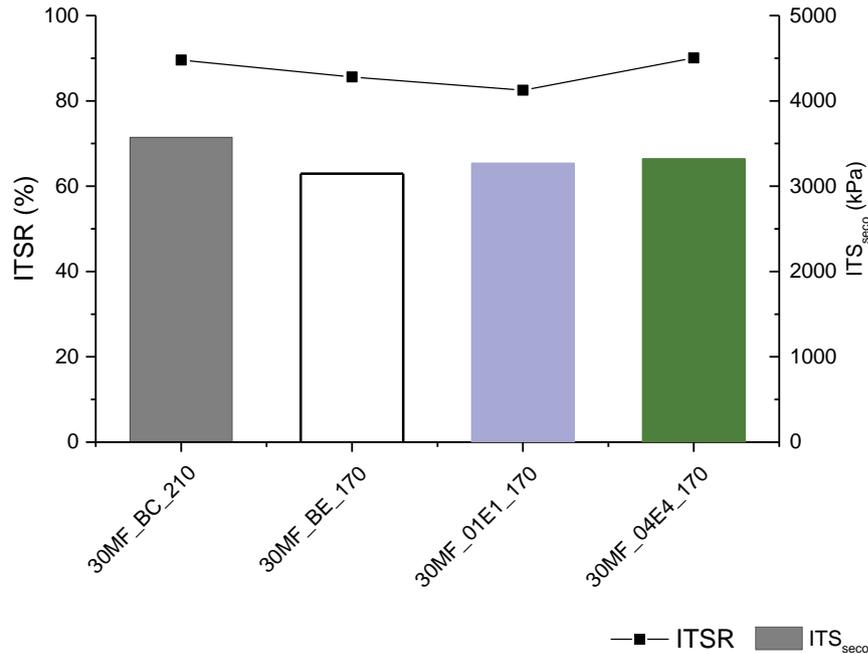


Figura 6.2 – Resultados de sensibilidade à água das misturas com incorporação de 30% de MF.

6.1.3. Mistura com 50% de Material Fresado

A temperatura de aquecimento dos agregados novos e da fração grossa do MF utilizada na produção das misturas com 50% de MF foi de 190 °C, conforme se apresentou no Capítulo 5. Tal como se pode verificar pela análise do Quadro 6.5, esta temperatura foi globalmente respeitada para todas as misturas.

Quadro 6.5 – Temperaturas das misturas com incorporação de 50% de MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.

Mistura	Temperatura (°C)				
	Agregados novos	Fração Grossa	Fração Fina	Produção	Compactação
50MF_BC_230	225,2	230,7	22,7	151,7	143,4
50MF_BE_190	190,5	186,0	15,5	131,6	119,5
50MF_01E1_190	188,7	187,9	22,4	121,0	118,3
50MF_04E4_190	187,2	190,2	24,2	127,5	125,6

Analisando a composição das misturas (Quadro 6.6) verifica-se que é possível produzir misturas com 50% de MF a temperaturas mais baixas utilizando betume-espuma, obtendo-se mesmo assim volumes de vazios equivalentes ou até inferiores aos obtidos para a mistura produzida a quente (à temperatura de referência).

Quadro 6.6 – Características das misturas com incorporação de 50% de MF produzidas para o estudo de sensibilidade à água.

Mistura	Percentagem de betume ³ (%)	BMT (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
50MF_BC_230	5,20	2433,26	3,90
50MF_BE_190	5,10	2424,71	2,77
50MF_01E1_190	5,00	2438,68	2,86
50MF_04E4_190	5,10	2452,16	3,38

Os resultados de sensibilidade à água das misturas com incorporação de 50% de MF apresentam-se na Figura 6.3, onde é possível verificar que todas as misturas produzidas apresentam valores de ITSR próximos de 80%, que podem ser considerados resultados bastante positivos. Comparativamente às misturas sem MF devem ser salientados os valores elevados de ITS_{seco} (acima de 3200 kPa) obtidos para as misturas com 30% e 50% de MF, o que poderá indicar um comportamento mais rígido e frágil destas misturas.

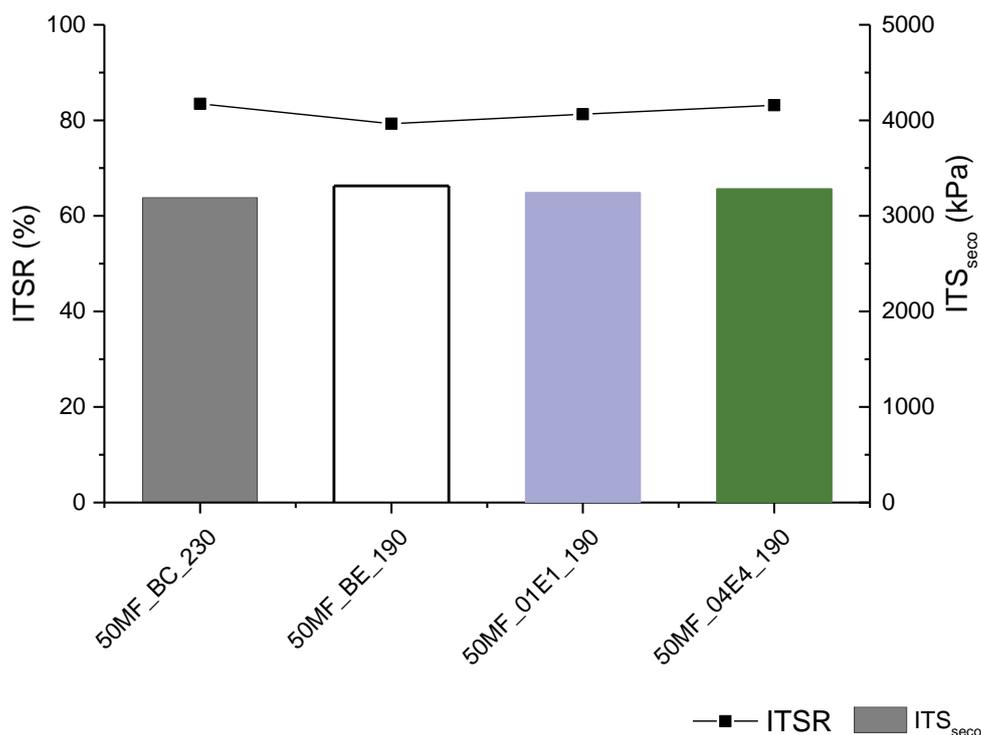


Figura 6.3 – Resultados de sensibilidade à água das misturas com incorporação de 50% de MF.

³ Valor previsível da percentagem de betume, tendo por base a quantidade de betume adicionado e a previsível quantidade de betume presente no material fresado utilizado na mistura.

6.2. Resistência à Deformação Permanente

6.2.1. Misturas sem Material Fresado

Para avaliar a resistência à deformação permanente das misturas sem incorporação de MF (através do ensaio de pista (WTT)) optou-se pela produção de uma mistura de controlo a quente a 160 °C. O comportamento desta mistura foi depois comparado com o de duas misturas temperadas com betume-espuma produzidas a 140 C. De modo a perceber o efeito que a utilização de um aditivo estabilizador de espuma tem nesta propriedade optou-se por escolher apenas o aditivo que apresentava a melhor relação custo-benefício do estudo anterior de sensibilidade à água, uma vez que a quantidade de misturas em análise inviabilizava a repetição de todas as variáveis nos estudos mais avançados. Assim, na avaliação da resistência à deformação permanente selecionou-se o aditivo E1, o qual apresentava resultados de sensibilidade à água semelhantes aos do aditivo E4, com apenas 0,1% de aditivo (por comparação com os 0,4% do aditivo E4).

A evolução da deformação permanente, em função do número de aplicações de carga, das lajetas utilizadas no ensaio apresenta-se na Figura 6.4.

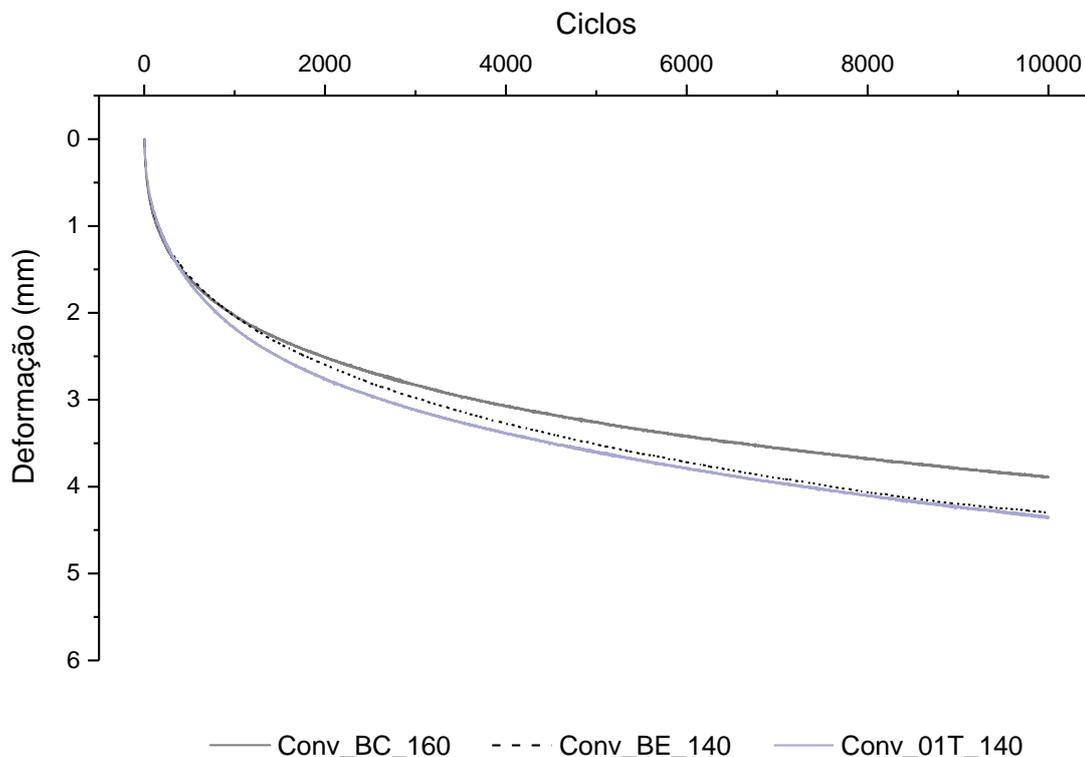


Figura 6.4 – Evolução da deformação para as misturas sem material fresado.

A análise da Figura 6.4 permite concluir que para temperaturas mais baixas de produção os resultados são ligeiramente inferiores aos da mistura de controlo a quente. Esses resultados podem estar relacionados com um menor envelhecimento do betume durante a fase de produção, pela utilização de temperaturas mais baixas, o que pode resultar em misturas menos rígidas e por isso ligeiramente mais propícias a sofrer maior deformação permanente.

Analisando as características principais que resultam do ensaio de pista (Quadro 6.7) é ainda possível verificar que a utilização de aditivos estabilizadores na produção do BE não traz qualquer vantagem para as misturas em termos de deformação permanente.

Quadro 6.7 – Resumo dos resultados do ensaio de pista para as misturas sem MF.

Mistura	WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	PRD _{AIR} (%)	PR _{AIR} (mm)
Conv_BC_160	0,13	9,63	3,89
Conv_BE_140	0,16	10,52	4,30
Conv_01T_140	0,15	10,70	4,35

6.2.2. Misturas com 30% de Material Fresado

Para avaliar a resistência à deformação permanente das misturas com 30% de MF foram também preparadas três misturas, à semelhança do que se apresentou para as misturas sem MF. Assim, produziu-se uma mistura a quente, com um betume não espumado, aquecendo os agregados e o MF grosso à temperatura de 210 °C, que serviu de referência para avaliar o comportamento das duas outras misturas produzidas com betume-espuma. Estas últimas foram produzidas aquecendo os agregados e o MF grosso a 170 °C, tendo uma delas sido produzida sem recurso a nenhum aditivo estabilizador de espuma e a outra com incorporação de 0,1% do aditivo E1, para aferir o efeito que o aditivo tem no desempenho da mistura à deformação permanente.

Analisando os resultados obtidos para as misturas com 30% de MF (Figura 6.5) é possível verificar que a mistura produzida a quente apresenta um desempenho inferior ao das misturas produzidas com betume-espuma. Também é possível verificar que o aditivo tem um efeito negativo no desempenho da mistura, uma vez que a deformação permanente observada para essa mistura é superior ao da mistura com betume-espuma sem aditivos.

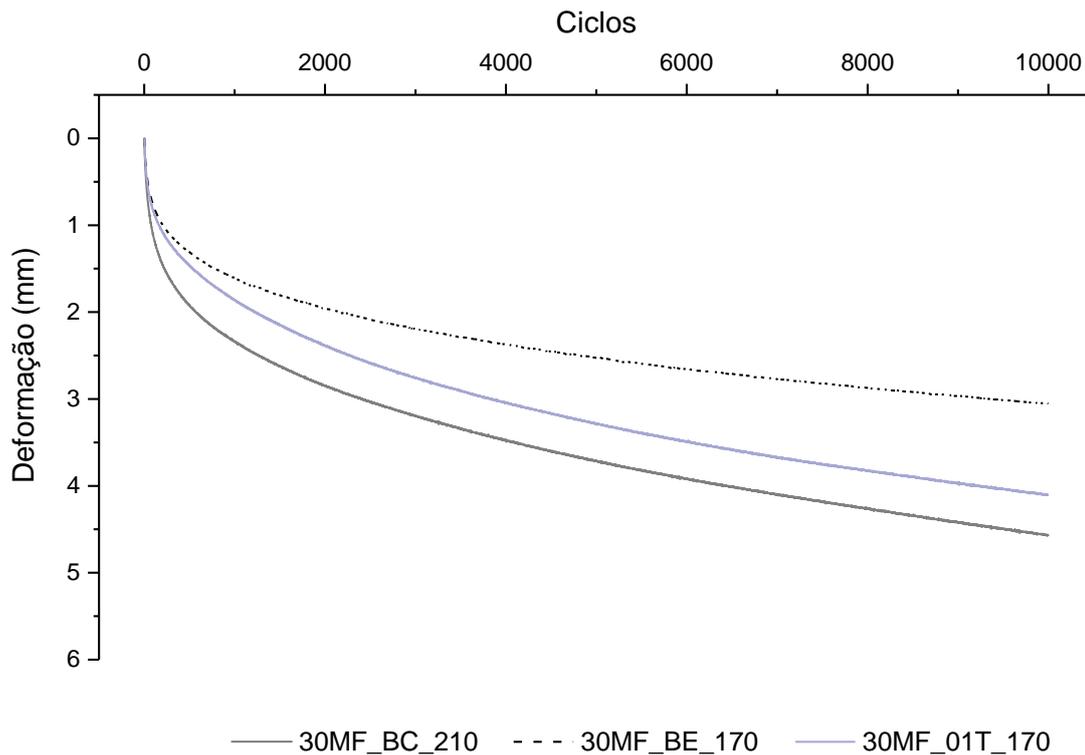


Figura 6.5 – Evolução da deformação para as misturas com 30% de material fresado.

Analisando as características principais que resultam do ensaio de pista (Quadro 6.8), a mistura produzida com betume-espuma, sem nenhum aditivo, apresenta um desempenho significativamente melhor que as outras duas misturas.

Quadro 6.8 – Resumo dos resultados do ensaio de pista das misturas com 30% de material fresado.

Mistura	WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	PRD _{AIR} (%)	PR _{AIR} (mm)
30MF_BC_210	0,17	11,16	4,56
30MF_BE_170	0,10	7,52	3,05
30MF_01T_170	0,16	10,3	4,10

6.2.3. Misturas com 50% de Material Fresado

Quanto às misturas com 50% de MF (Figura 6.6), o pior resultado é obtido para a mistura produzida com betume-espuma, utilizando o aditivo E1. As outras duas misturas (mistura de referência produzida a quente e mistura produzida com betume-espuma sem aditivos) apresentaram um comportamento semelhante entre si.

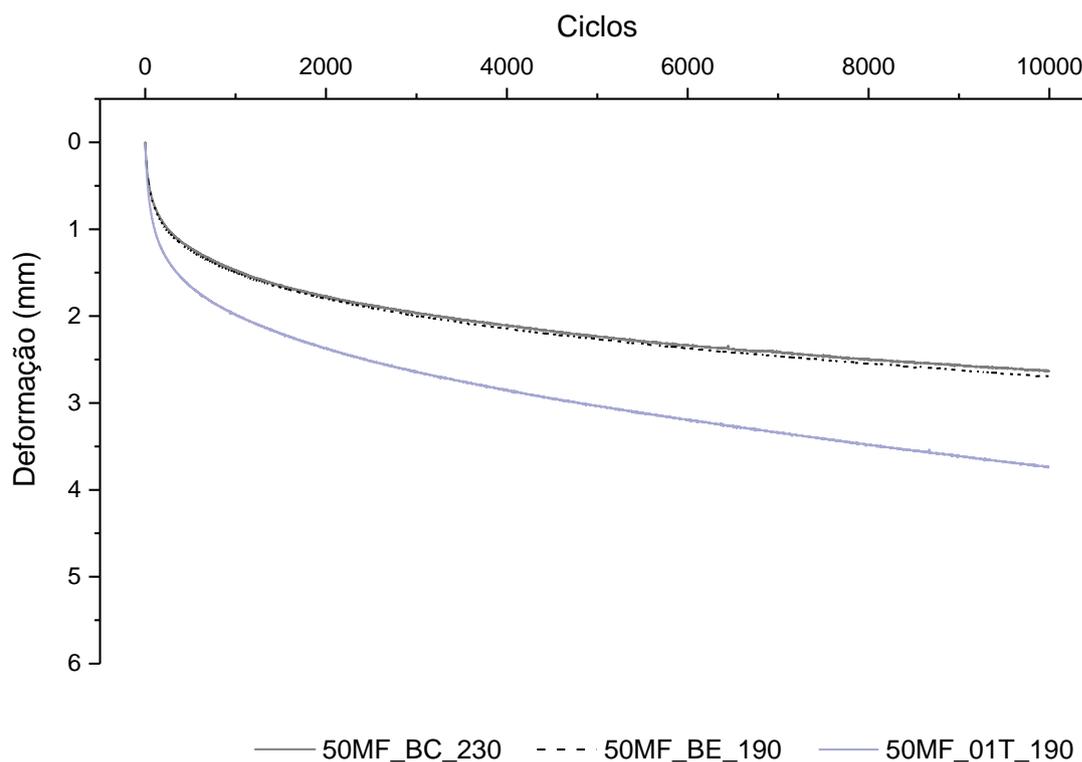


Figura 6.6 – Evolução da deformação para as misturas com 50% de material fresado.

Analisando os resultados do ensaio de pista (Quadro 6.9) é possível verificar que, por comparação com as misturas apresentadas nas secções anteriores, as misturas com maior percentagem de MF apresentam melhores características em termos de resistência à deformação permanente. No entanto esta maior resistência a deformação permanente poderá ser comprometida pela utilização do aditivo estabilizador de espuma.

Quadro 6.9 – Resumo dos resultados do ensaio de pista das misturas com 50% de material fresado.

Mistura	WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	PRD _{AIR} (%)	PR _{AIR} (mm)
50MF_BC_230	0,08	6,40	2,63
50MF_BE_190	0,09	6,67	2,69
50MF_01T_190	0,14	9,19	3,73

De forma geral, analisando o desempenho das misturas com BE, é possível verificar que a utilização do aditivo estabilizador (E1) não representa melhorias significativas na resistência à deformação permanente das misturas, tendo-se optado por continuar o estudo (com a avaliação do módulo de rigidez e da resistência à fadiga) utilizando apenas misturas com BE sem qualquer tipo de aditivo.

6.3. Módulo de Rigidez

6.3.1. Mistura sem Material Fresado

Conforme referido, a avaliação do módulo de rigidez das misturas sem incorporação de MF (Figura 6.7) foi realizada apenas para a mistura convencional a quente (Conv_BC_160) e para a mistura temperada produzida com betume-espuma (Conv_BE_140). Não se considerou a possibilidade de utilizar um aditivo estabilizador de espuma, uma vez que o processo produtivo (que foi revisto conforme se apresentou na Secção 5.5.5) permitiu obter um envolvimento adequado dos agregados sem a necessidade desse tipo de aditivos. Para além disso, os resultados apresentados nas secções anteriores demonstraram que esse tipo de aditivos não traz vantagens a nível do desempenho das misturas.

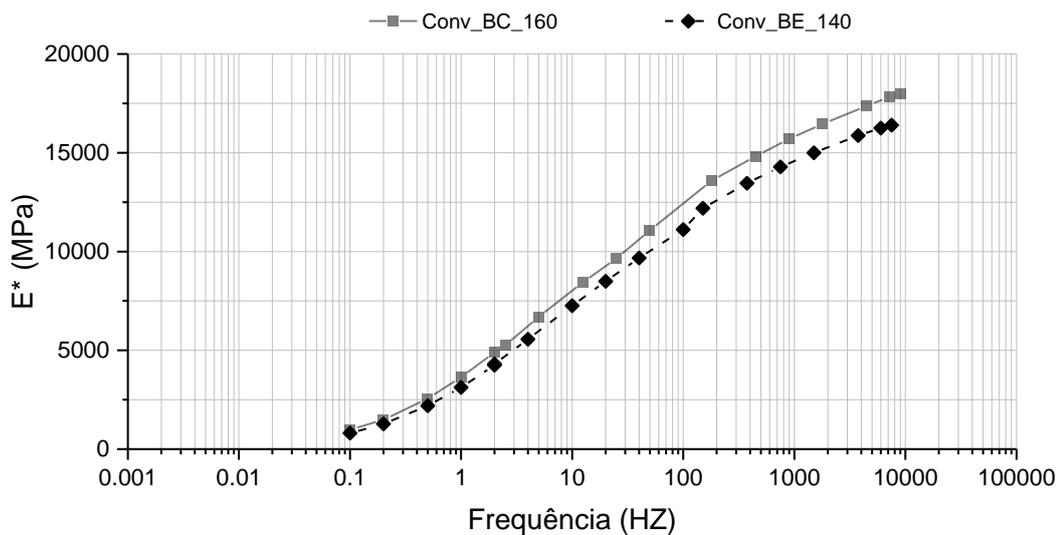


Figura 6.7 – Curvas mestras do módulo complexo para as misturas produzidas sem MF ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Analisando os resultados apresentados na Figura 6.7, verifica-se que a mistura produzida a quente apresenta maior módulo complexo, o que confirma os resultados apresentados nas secções anteriores, nomeadamente, no que diz respeito aos valores de ITS_{seco} e de resistência à deformação permanente.

Analisando o ângulo de fase (Figura 6.8), é possível verificar que as duas misturas apresentam resultados praticamente idênticos, o que demonstra que o betume-espuma não altera significativamente o comportamento viscoelástico das misturas.

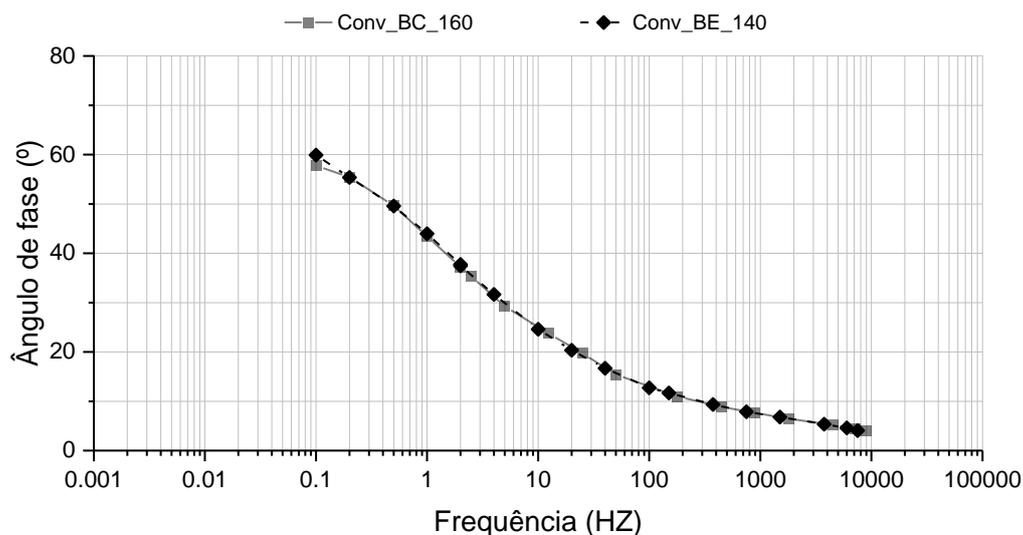


Figura 6.8 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas produzidas sem MF ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Quanto ao módulo viscoso (Figura 6.9) é possível verificar que a mistura produzida a quente apresenta valores mais elevados, uma vez que essa mistura é ligeiramente mais rígida, como se verificou através do módulo complexo. Apesar disso, é possível verificar que o valor de pico do módulo complexo de ambas as misturas acontece na mesma gama de frequências, o que significa que o comportamento das duas misturas à aplicação repetida de cargas é semelhante.

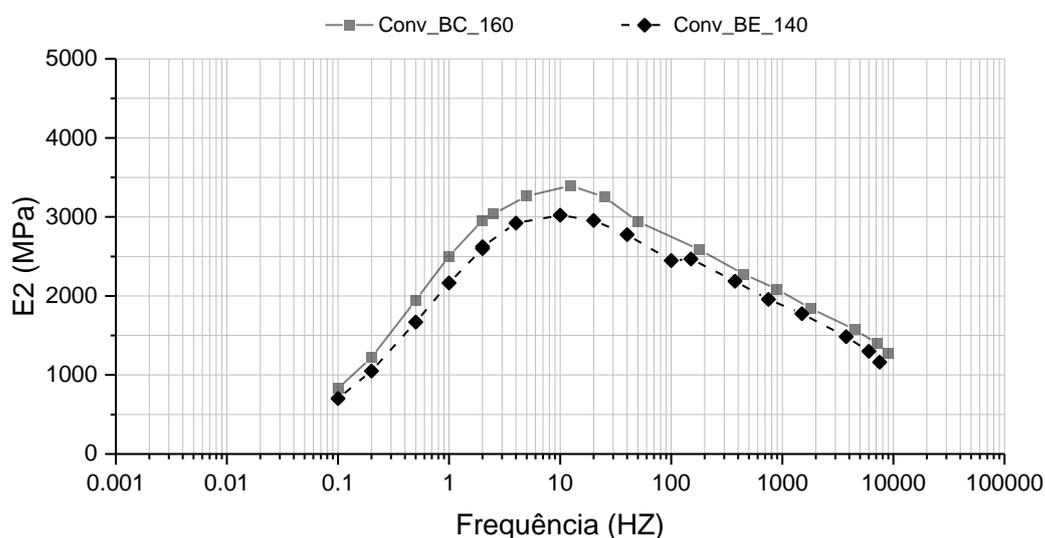


Figura 6.9 – Curvas mestras do módulo viscoso para as misturas produzidas sem MF ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Na Figura 6.10 apresenta-se os resultados do módulo elástico, onde se observa um comportamento idêntico das duas misturas, ou seja, a mistura produzida a quente apresenta módulos superiores aos da mistura temperada, como já se apresentou para o módulo complexo.

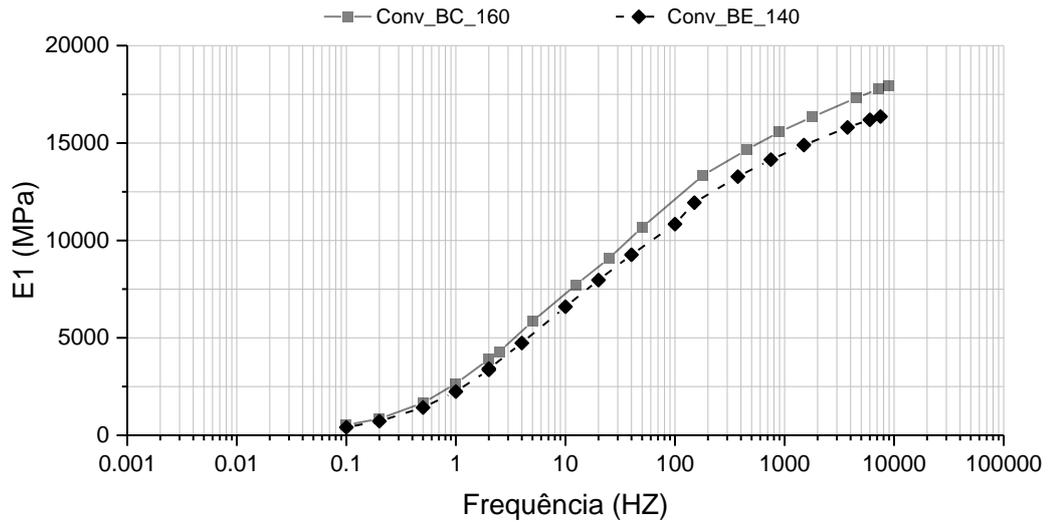


Figura 6.10 – Curvas mestras do módulo elástico para as misturas produzidas sem MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).

6.3.2. Mistura com 30% de Material Fresado

Os resultados do módulo complexo das misturas produzidas com 30% de material fresado são apresentados na Figura 6.11.

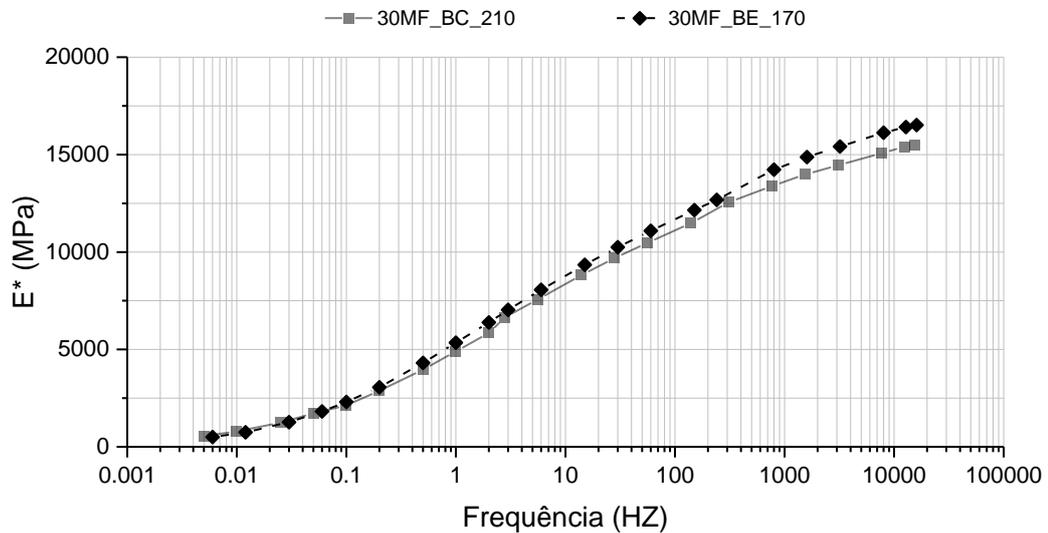


Figura 6.11 – Curvas mestras do módulo complexo para as misturas produzidas com 30% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).

Analisando os resultados de módulo complexo das misturas com 30% de MF é possível verificar que a mistura temperada (produzida com BE) apresenta um comportamento próximo do da mistura produzida com betume não expandido. Apesar disso, verifica-se uma suscetibilidade à temperatura (ou à frequência de aplicação de cargas) ligeiramente superior

para a mistura temperada, como se pode concluir pela maior inclinação da curva apresentada na Figura 6.11. Este comportamento é confirmado pelos valores superiores de ângulo de fase (principalmente às frequências mais baixas) apresentados na Figura 6.12 e de módulo viscoso (Figura 6.13) obtidos para a mistura temperada.

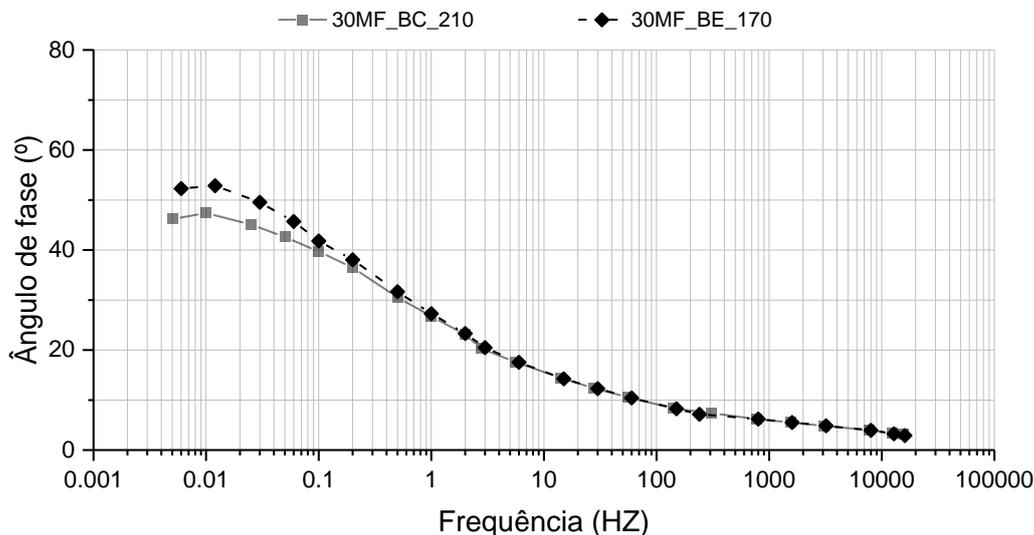


Figura 6.12 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas produzidas com 30% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

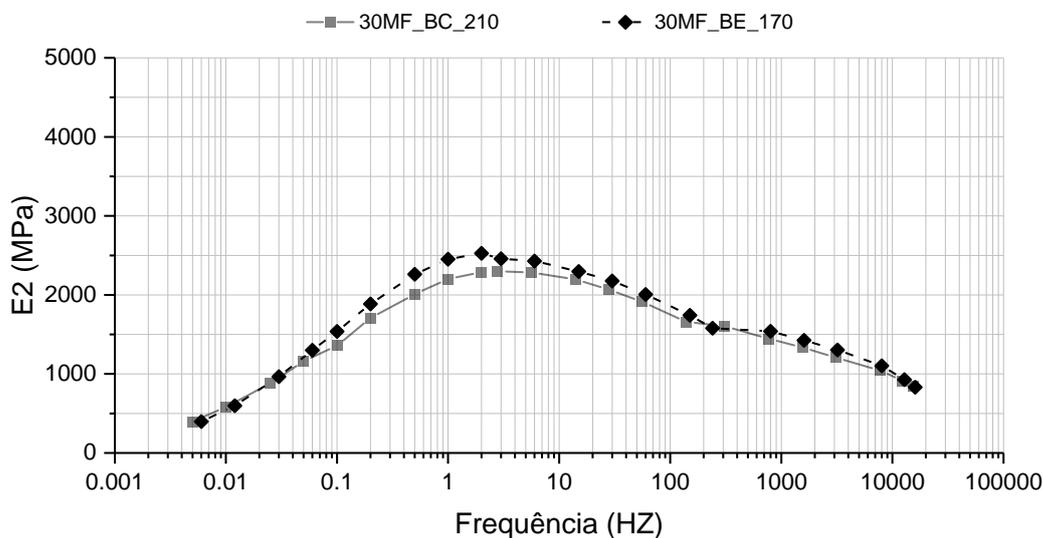


Figura 6.13 – Curvas mestras do módulo viscoso para as misturas produzidas com 30% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Quanto ao módulo elástico (Figura 6.14) é possível verificar que a mistura temperada apresenta valores mais altos para frequências mais altas, invertendo o comportamento a frequências

baixas. Isso significa que estas misturas são mais sensíveis às condições de carregamento e à temperatura.

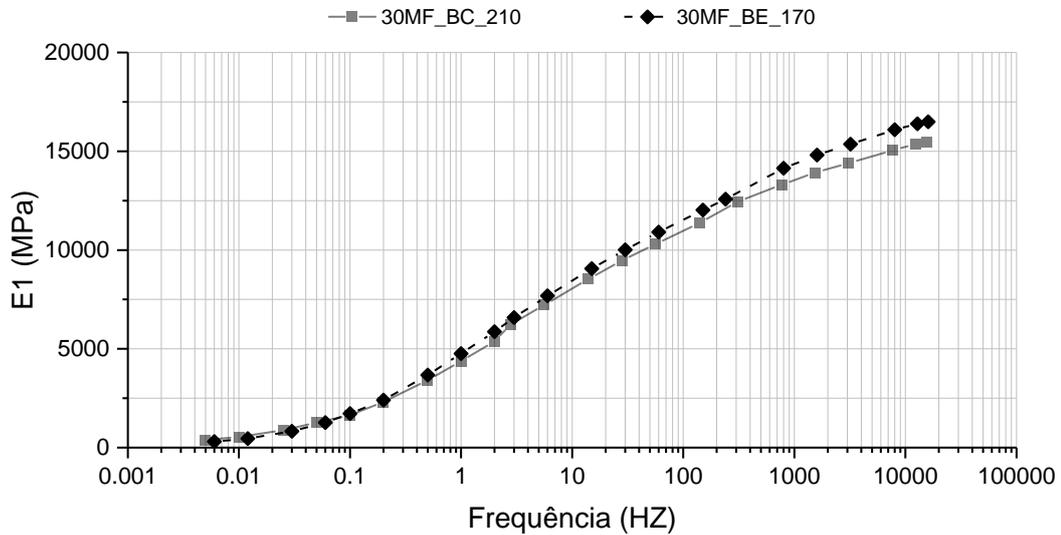


Figura 6.14 – Curvas mestras do módulo elástico para as misturas produzidas com 30% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

6.3.3. Mistura com 50% de Material Fresado

No que respeita ao módulo complexo das misturas com 50% de material fresado (Figura 6.15) é possível verificar que as duas misturas apresentam resultados semelhantes.

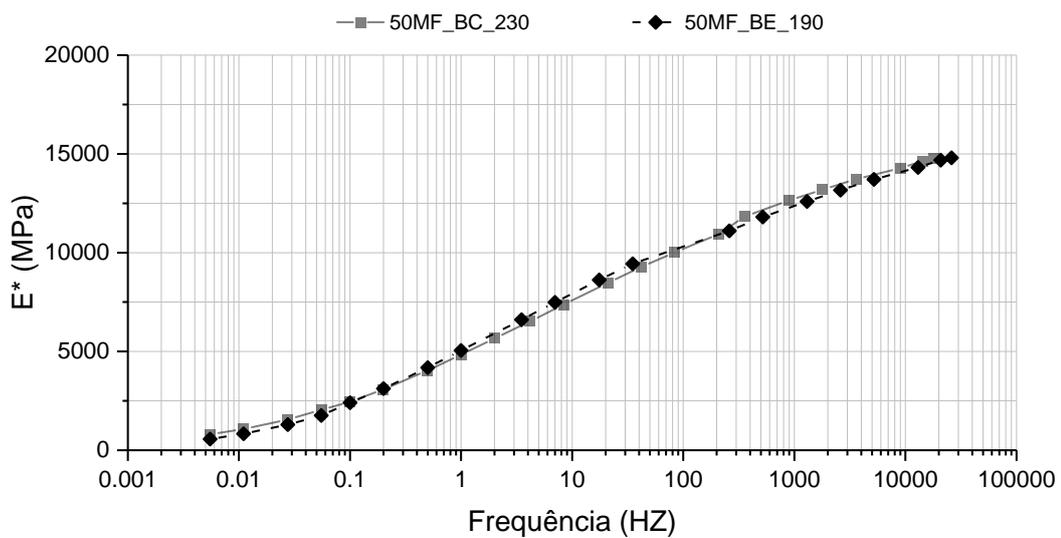


Figura 6.15 – Curvas mestras do módulo complexo para as misturas produzidas com 50% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Quanto ao ângulo de fase (Figura 6.16), é possível verificar que para as frequências mais baixas, equivalentes a temperaturas mais altas, a mistura produzida a quente apresenta menores valores, o que vai ao encontro dos resultados obtidos no ensaio de deformação permanente.

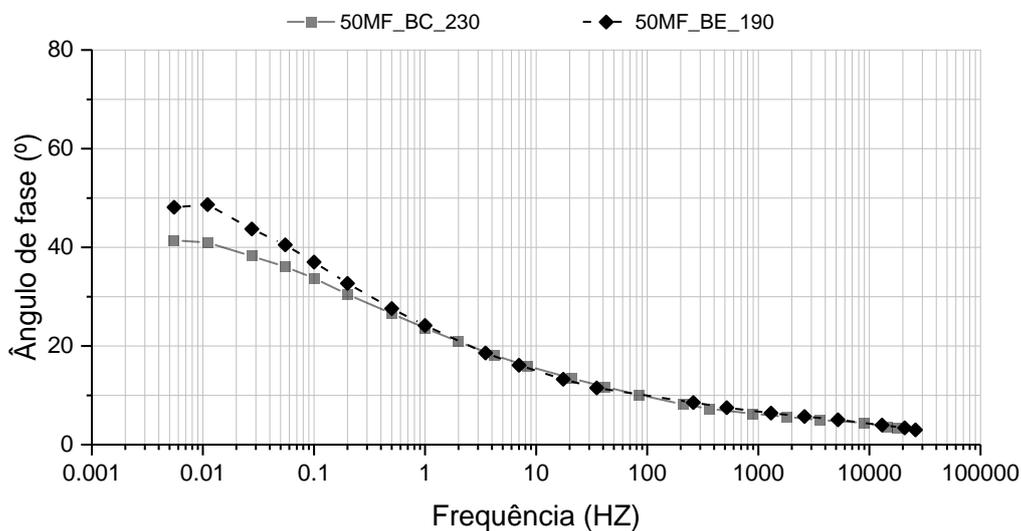


Figura 6.16 – Curvas mestras do ângulo de fase para as misturas produzidas com 50% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).

Quanto ao módulo viscoso (Figura 6.17) é possível verificar que não existem diferenças significativas no comportamento das duas misturas.

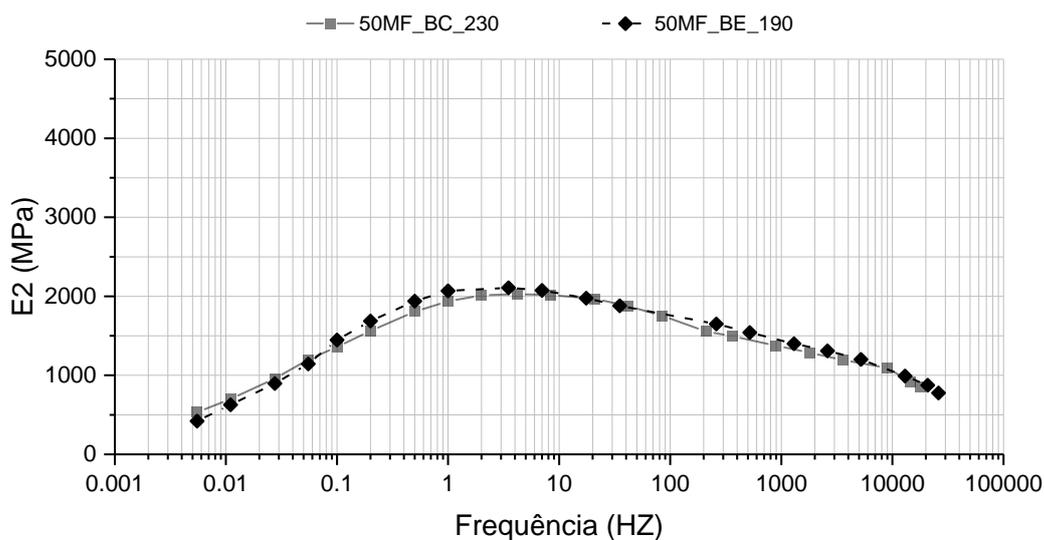


Figura 6.17 – Curvas mestras do módulo viscoso para as misturas produzidas com 50% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).

À semelhança do que se apresentou para o módulo complexo, os resultados de módulo elástico (Figura 6.18) de ambas as misturas são semelhantes, o que comprova a possibilidade de produzir misturas temperadas com 50% de MF que apresentam um comportamento idêntico a misturas produzidas a quente com a mesma quantidade de material fresado.

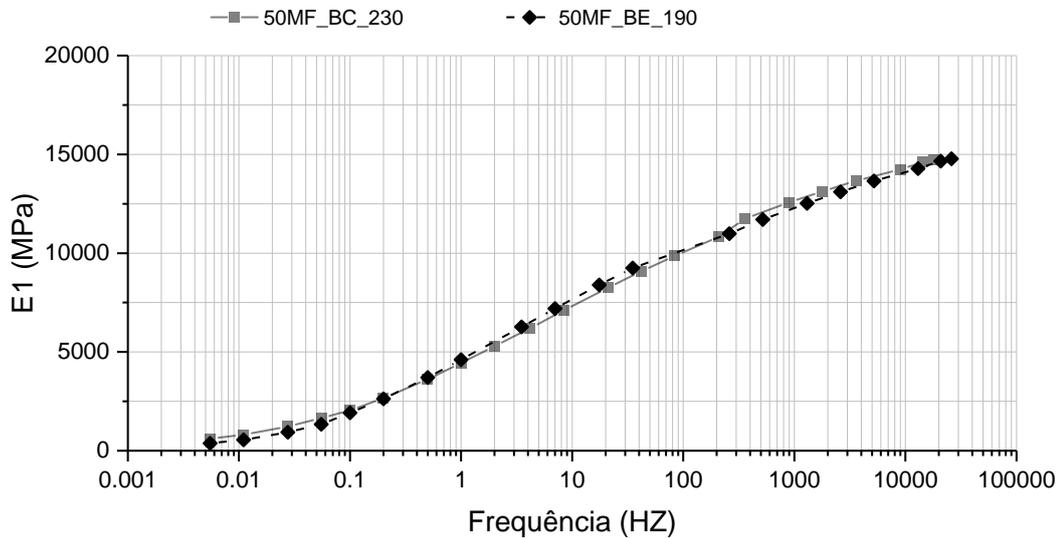


Figura 6.18 – Curvas mestras do módulo elástico para as misturas produzidas com 50% de MF ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).

Analisando os módulos obtidos para todas as misturas avaliadas é possível verificar que, apesar de se tratarem de misturas com e sem incorporação de MF, os módulos obtidos são semelhantes, o que permite concluir que a utilização de betumes com graus de penetração distintos nos diferentes tipos de mistura estudados foi eficaz, tendo-se obtido misturas com idêntica rigidez.

6.4. Resistência ao Fendilhamento por Fadiga

6.4.1. Mistura sem Material Fresado

Analisando os resultados da lei de fadiga para as misturas sem MF (Figura 6.19) é possível verificar que a utilização do betume-espuma para a produção de misturas a temperaturas mais baixas não condiciona o comportamento à fadiga das misturas convencionais. Tal como é visível pelos parâmetros da lei de fadiga (Quadro 6.10) a mistura convencional com betume não espumado produzida à temperatura mais alta apresenta parâmetros idênticos aos da mistura produzida com BE a uma temperatura mais baixa.

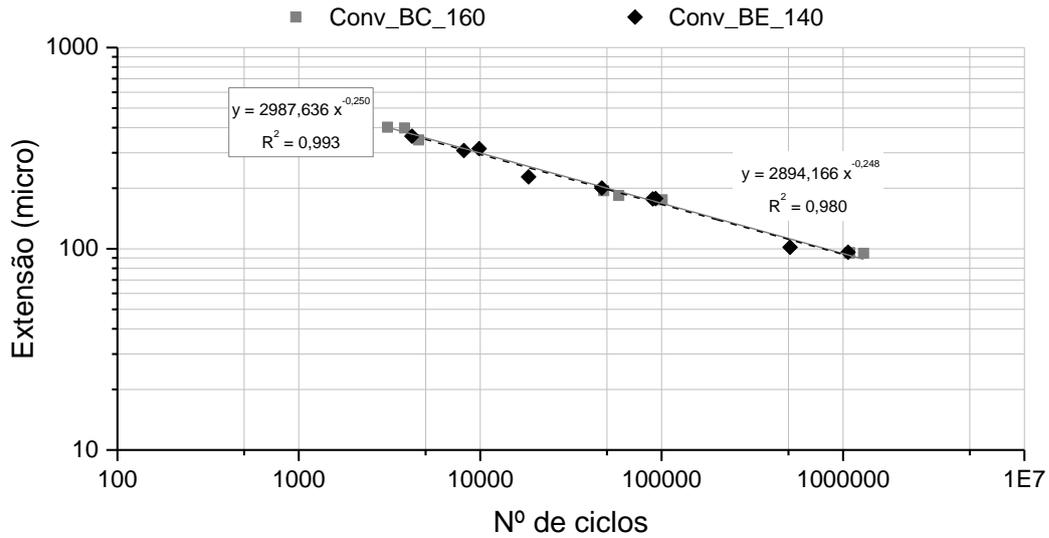


Figura 6.19 – Leis de fadiga das misturas sem incorporação de Material Fresado.

Quadro 6.10 – Propriedades das leis de fadiga das misturas sem incorporação de Material Fresado.

Mistura	Parâmetros da lei de fadiga			$N_{100} (\times 10^6)$	$\epsilon_6 (\times 10^{-6})$
	a	b	R^2		
Conv_BC_160	2987,636	-0,250	0,993	0,803	95
Conv_BE_140	2894,166	-0,248	0,980	0,770	94

6.4.2. Mistura com 30% de Material Fresado

No que respeita à resistência à fadiga das misturas com 30% de MF (Figura 6.20) é possível verificar que a mistura com betume-espuma é menos suscetível ao nível de extensão aplicado.

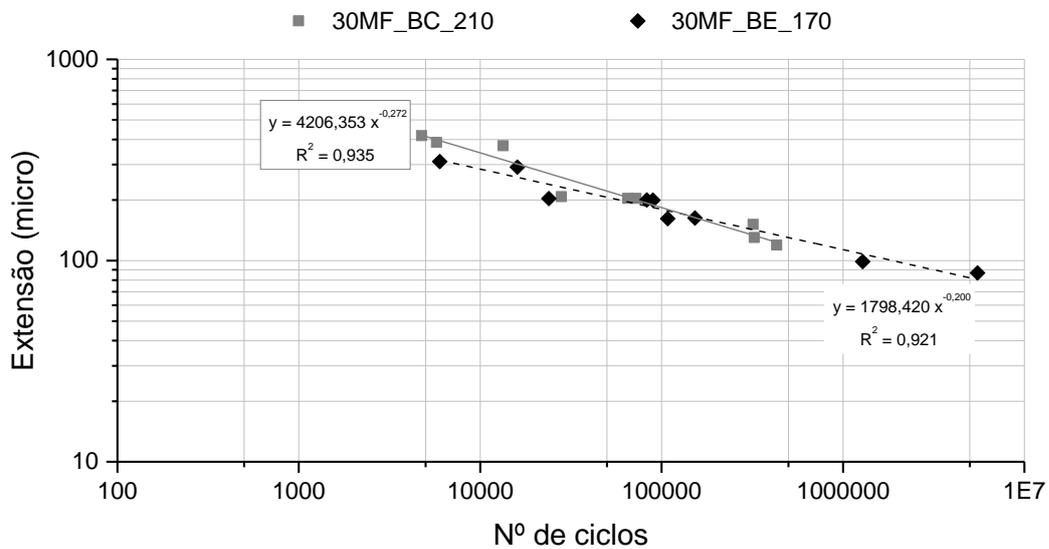


Figura 6.20 – Leis de fadiga das misturas com incorporação de 30% de MF.

Com base nos resultados apresentados na Figura 6.20, pode dizer-se que a mistura temperada apresenta um melhor comportamento à fadiga, por comparação com a mistura produzida a quente, o que é confirmado pelos valores mais altos de N_{100} e ϵ_6 apresentados no Quadro 6.11.

Quadro 6.11 – Propriedades das leis de fadiga das misturas com 30% de MF.

Mistura	Parâmetros da lei de fadiga			$N_{100} (\times 10^6)$	$\epsilon_6 (\times 10^{-6})$
	a	b	R^2		
30MF_BC_210	4206,353	-0,272	0,935	0,929	98
30MF_BE_170	1798,420	-0,200	0,921	1,915	113

6.4.3. Mistura com 50% de Material Fresado

No que respeita à resistência à fadiga das misturas com 50% de material fresado (Figura 6.21) pode dizer-se que o comportamento de ambas as misturas é equivalente, como se pode verificar pela proximidade das linhas apresentadas, apesar de poder dizer-se que a mistura temperada tem um desempenho superior pela inclinação ligeiramente inferior da sua lei de fadiga, o que se confirma pelo valor mais elevado de N_{100} apresentado no Quadro 6.12.

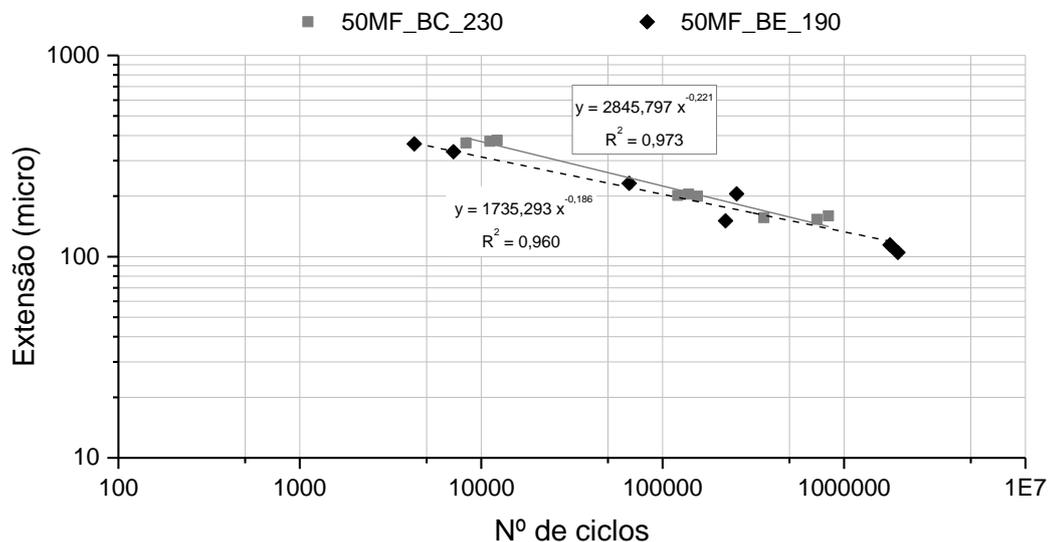


Figura 6.21 – Leis de fadiga das misturas com incorporação de 50% de MF.

Quadro 6.12 – Propriedades das leis de fadiga das misturas com 50% de MF.

Mistura	Parâmetros da lei de fadiga			$N_{100} (\times 10^6)$	$\epsilon_6 (\times 10^{-6})$
	a	b	R^2		
50MF_BC_230	2845,797	-0,221	0,973	3,913	135
50MF_BE_190	1735,293	-0,186	0,960	4,636	133

6.5. Comparação entre as Misturas Betuminosas a Quente e Temperadas

Neste subcapítulo faz-se uma análise comparativa entre os diferentes tipos de misturas estudadas ao longo do presente trabalho. No entanto, dado o número elevado de variáveis avaliadas, escolheu-se apenas uma mistura de cada tipo, com base no melhor desempenho observado em cada fase.

Assim, optou-se por usar como referência a mistura convencional produzida a quente, com o betume 35/50 (apresentada no Capítulo 4), que é também a mistura usualmente produzida pela empresa associada ao trabalho. Quanto às misturas recicladas a quente, salienta-se que o betume utilizado nas duas soluções avaliadas (com 30% e 50% de MF) é o mesmo (70/100), apesar de a mistura com 50% de MF ter sido produzida com recurso a um aditivo rejuvenescedor (para esta avaliação comparativa selecionou-se a mistura produzida com o aditivo (R4) de origem vegetal). Quanto às misturas betuminosas recicladas temperadas (MBRT), a mistura com 30% de MF foi produzida com um betume 70/100 e a mistura com 50% de MF foi produzida com um betume 160/220. Tendo em consideração os resultados anteriormente apresentados para as MBRT, não se identificaram vantagens significativas pela utilização de aditivos estabilizadores de espuma. Assim, as misturas aqui comparadas não possuem qualquer tipo de aditivo estabilizador. De seguida apresentam-se os resultados comparativos para os principais parâmetros utilizados para avaliar o comportamento de misturas betuminosas.

Analisando a sensibilidade à água (Figura 6.22) é possível verificar que as misturas com 30 e 50% de MF apresentam resultados idênticos ou superiores aos da mistura convencional, independentemente do tipo de técnica utilizada, nomeadamente em termos de ITSR. Quanto às MBRTs é possível verificar que estas apresentam valores de ITSR ligeiramente inferiores aos das MBRQs. Estes resultados podem estar relacionados com os valores ligeiramente superiores observados para as MBRTs. Apesar de não ser expectável que tal acontecesse (uma vez que as misturas foram produzidas a temperaturas mais baixas e portanto deveriam envelhecer menos o betume presente na mistura), a variabilidade do material fresado (que é impossível eliminar, mesmo com a separação do MF em duas frações e com um rigoroso controlo de qualidade) poderá explicar parcialmente esses resultados. Adicionalmente, convém referir que, no caso da mistura com 50% de MF, o rejuvenescedor utilizado na mistura produzida a quente poderá ter diminuído a rigidez da mistura de tal forma que o valor de ITS_{seco} também seja reduzido e, consequentemente, o mesmo valor de $ITS_{molhado}$ conduzirá a resultados de ITSR superiores.

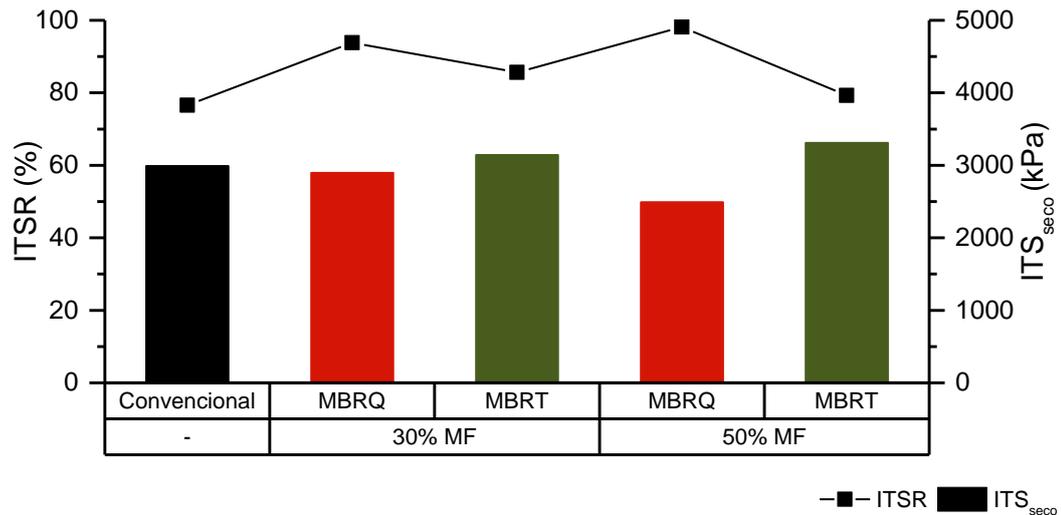


Figura 6.22 – Comparação dos resultados de sensibilidade à água das principais misturas estudadas.

Quanto à deformação permanente (Figura 6.23), como seria expectável, as misturas com incorporação de MF apresentam valores de deformação inferiores aos da mistura convencional produzida com materiais novos, o que se pode justificar pela presença de uma parte significativa de betume envelhecido no MF. Assim, as misturas com maiores percentagens de MF apresentam os melhores resultados de resistência à deformação permanente.

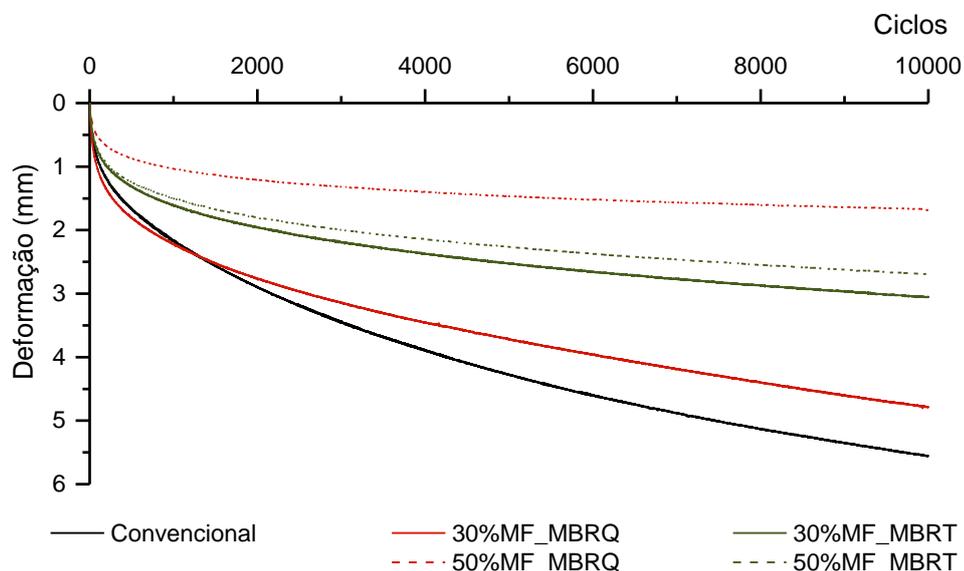


Figura 6.23 – Comparação dos resultados de resistência à deformação permanente das principais misturas estudadas.

Dentro das misturas com incorporação de MF pode dizer-se que, apesar das diferenças aparentes observadas, o comportamento é muito satisfatório para todas as misturas. As

diferenças observadas poderão estar relacionadas com um conjunto de fatores que ao serem combinados poderão originar um comportamento distinto quando se produz as misturas a quente (com betume convencional) ou temperadas (com betume-espuma) com diferentes percentagens de material fresado que, por sua vez condicionam a temperatura de aquecimento dos agregados e da fração grossa do MF. Assim, a variabilidade do material fresado, associada a um menor envelhecimento do betume novo (quando as misturas são produzidas a temperaturas mais baixas) e a uma maior trabalhabilidade das misturas produzidas com betume-espuma (que pode resultar numa menor porosidade e, portanto, num menor adensamento da mistura durante o ensaio de pista) poderão explicar as diferenças observadas. As mesmas conclusões podem ser retiradas da observação dos resultados apresentados no Quadro 6.13.

Quadro 6.13 – Comparação dos resultados do ensaio de pista das principais misturas estudadas.

Mistura	WTS _{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	PRD _{AIR} (%)	PR _{AIR} (mm)
Convencional	0,25	13,83	5,54
30% MF_MBRQ	0,21	11,85	4,78
30% MF_MBRT	0,10	7,52	3,05
50% MF_MBRQ	0,04	4,11	1,67
50% MF_MBRT	0,09	6,67	2,69

Os resultados de módulo de rigidez e ângulo de fase apresentam-se de seguida. A Figura 6.24 contém os resultados de módulo complexo para as cinco misturas em análise.

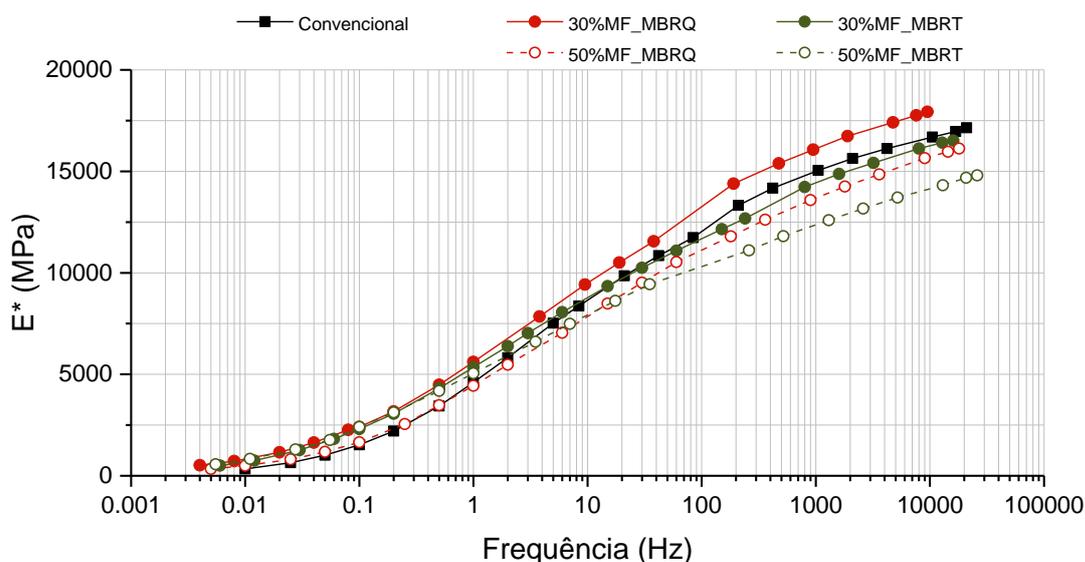


Figura 6.24 – Curvas mestras do módulo complexo das principais misturas estudadas ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

De uma forma geral pode dizer-se que as misturas com incorporação de MF são menos suscetíveis à frequência de aplicação da carga (e à variação de temperatura) do que a mistura convencional. Na gama de frequências mais elevada (correspondendo às temperaturas mais baixas), as MBRTs apresentam valores de módulos mais baixos do que as MBRQs, o que poderá em alguma medida estar relacionado com um menor envelhecimento do MF pelo uso de temperaturas mais baixas.

Na Figura 6.25 apresenta-se os valores de ângulo de fase obtidos nos ensaios de flexão repetida a quatro pontos.

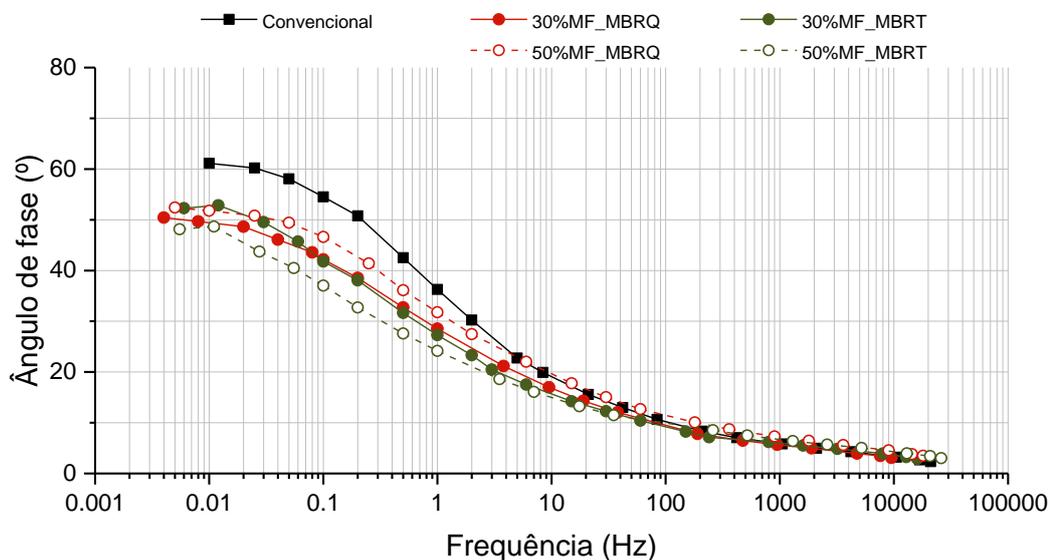


Figura 6.25 – Curvas mestras do ângulo de fase das principais misturas estudadas ($T_{Ref} = 20\text{ °C}$).

Conforme se pode observar pelos resultados de ângulo de fase, a principal diferença que se pode assinalar diz respeito aos valores superiores de ângulo de fase da mistura convencional às frequências mais baixas (temperaturas mais altas), que está relacionado com o comportamento do betume novo presente nessa mistura. Os resultados das misturas com incorporação de MF são genericamente idênticos entre si, o que demonstra a influência do betume envelhecido do MF no comportamento das misturas.

Os valores de módulo viscoso e elástico apresentam-se na Figura 6.26 e na Figura 6.27. Nestas figuras confirma-se a menor suscetibilidade à frequência de aplicação de carga (ou à temperatura) das misturas com incorporação de MF pela menor amplitude dos valores observados.

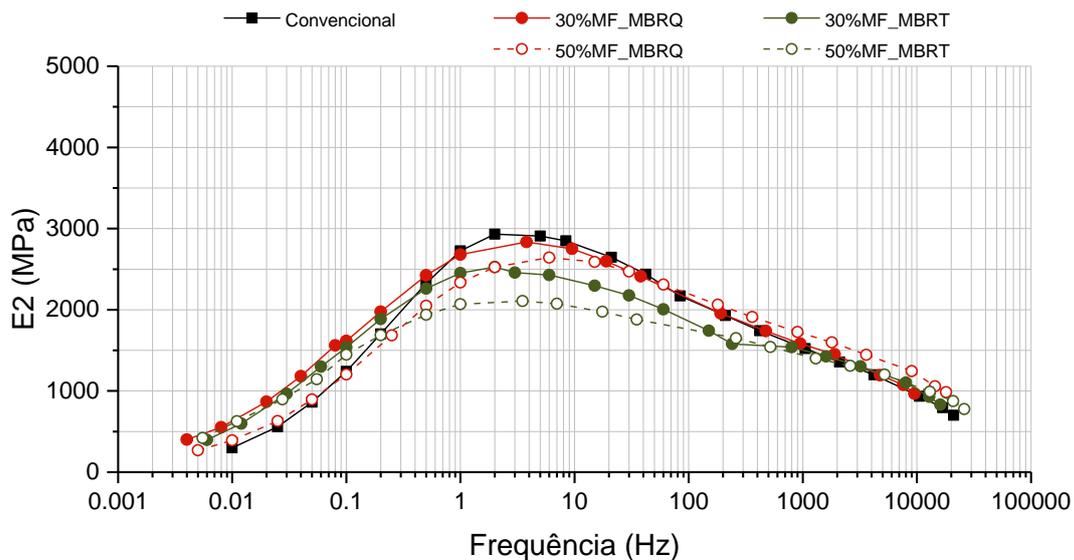


Figura 6.26 – Curvas mestras do módulo viscoso das principais misturas estudadas ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

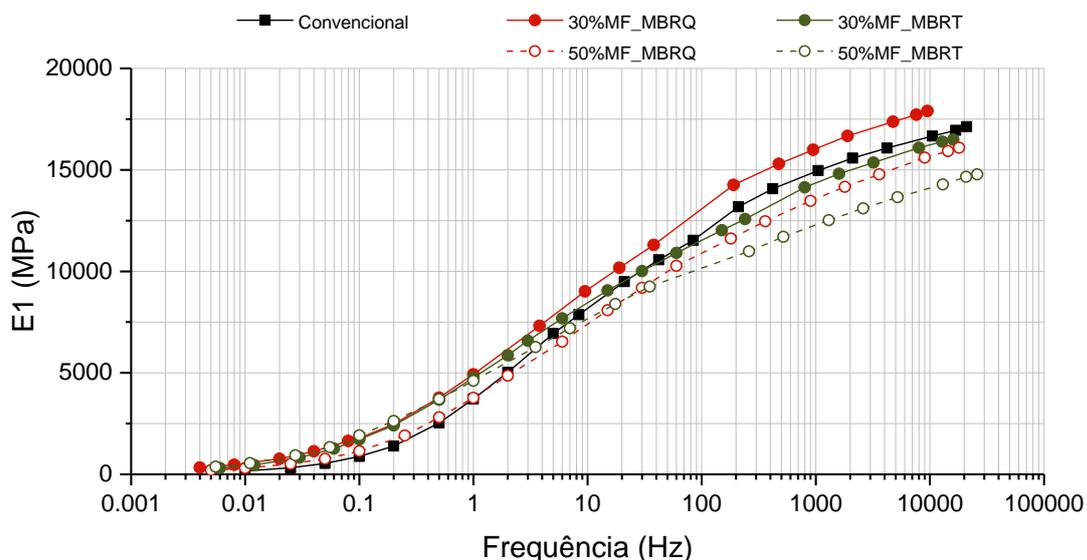


Figura 6.27 – Curvas mestras do módulo elástico das principais misturas estudadas ($T_{Ref} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Quanto à resistência ao fendilhamento por fadiga (Figura 6.28 e Quadro 6.14) é possível verificar que o comportamento das misturas com MF é superior ao da mistura convencional, apresentando valores de N_{100} 4 a 12 vezes superiores e valores de ϵ_6 1,4 a 1,8 vezes superiores aos da mistura convencional. Também se verifica que as misturas com maiores percentagens de MF apresentam os melhores resultados de fadiga, o que já foi observado em estudos anteriores, conforme referido no Capítulo 4. É ainda visível que as MBRT apresentam resultados ligeiramente inferiores às misturas equivalentes produzidas a quente, apesar das diferenças não serem significativas.

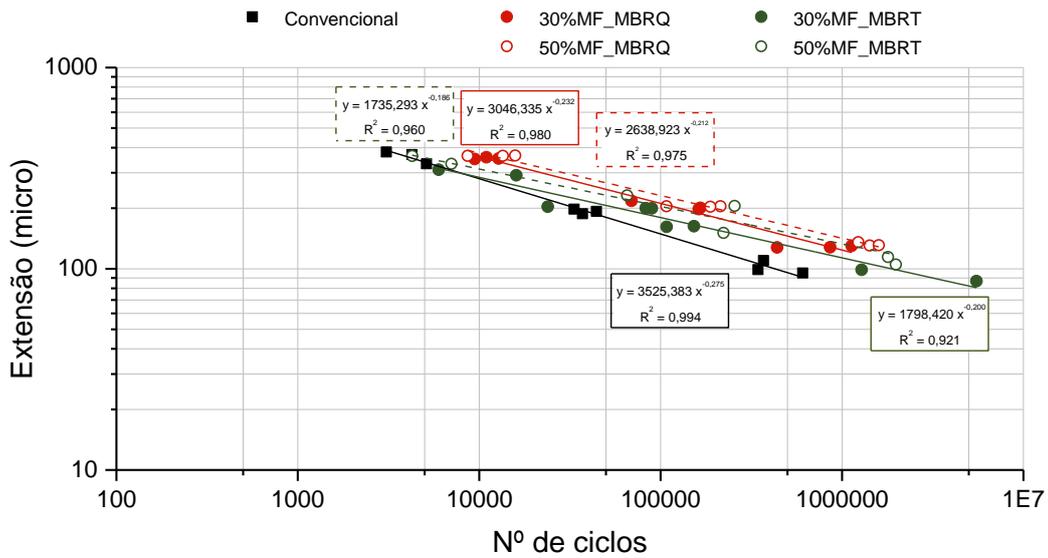


Figura 6.28 – Comparação da evolução da resistência ao fendilhamento por fadiga para as principais misturas estudadas.

Quadro 6.14 – Comparação das propriedades das leis de fadiga.

Mistura	Parâmetros da lei de fadiga			$N_{100} (\times 10^6)$	$\epsilon_6 (\times 10^{-6})$
	a	b	R^2		
Convencional	3525,383	-0,275	0,994	0,426	79
30% MF_MBRQ	3046,335	-0,232	0,980	2,524	124
30% MF_MBRT	1798,420	-0,200	0,921	1,915	113
50% MF_MBRQ	2638,923	-0,212	0,975	5,228	142
50% MF_MBRT	1735,293	-0,186	0,960	4,636	133

As temperaturas que foram usadas para a produção das misturas aqui analisadas são apresentadas no Quadro 6.15.

Quadro 6.15 – Comparação das temperaturas aproximadas de aquecimento, produção e compactação das MBs.

Mistura	Temperatura (°C)				
	Agregados novos	Fração Grossa	Fração Fina	Produção	Compactação
Convencional	175	-	-	160	145
30% MF_MBRQ	210	210	20	145	135
30% MF_MBRT	170	170	20	135	125
50% MF_MBRQ	230	230	25	155	130
50% MF_MBRT	190	190	25	125	120

Analisando os resultados apresentados ao longo deste capítulo e tendo em atenção as temperaturas que foram usadas para a produção das misturas é possível concluir que a aplicação do betume-espuma poderá ser uma solução mais económica e viável para a produção de misturas com incorporação de altas taxas de reciclagem.

De facto, as MBRTs apresentam várias vantagens quando comparadas com as misturas produzidas a quente. Desde logo o facto de se conseguir uma redução da temperatura de aquecimento dos agregados da ordem dos 40 °C, o que resulta num decréscimo do consumo de energia necessário para a produção das misturas e, consequentemente, reduz os custos de produção. Se não for utilizado qualquer tipo de aditivo estabilizador de espuma, as MBRTs aqui estudadas tornam-se ainda mais vantajosas a nível económico, nomeadamente, se comparadas com a MBRQ com 50% de material fresado, na qual é necessário usar um aditivo rejuvenescedor e que pode encarecer a produção dessa mistura.

6.6. Aplicabilidade das Misturas em Contexto Real

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito de um projeto de investigação, realizado em conjunto com uma empresa de construção rodoviária, com objetivos semelhantes, conforme se apresentou no Capítulo 1. Durante a realização desse projeto, a empresa em causa adquiriu uma central de produção (apresentada na Figura 6.29) com capacidade para produzir misturas betuminosas com até 50% de material fresado e para utilizar a tecnologia de betume-espuma. Assim, desde o início dos trabalhos que se pretendeu realizar a aplicação das misturas aqui estudadas num trecho experimental, de forma a validar os resultados obtidos em contexto de obra. Dessa forma seriam avaliadas as questões relacionadas com a transposição do estudo laboratorial para a central de produção, bem como com as temperaturas de produção, aplicação e compactação e a sua influência nas características finais das misturas, de modo a poder propor um conjunto de recomendações a ter em conta em sede de Caderno de Encargos.

A transposição de um estudo de formulação de uma mistura betuminosa do laboratório para a central de produção é um processo complexo, uma vez que existem inúmeras variáveis que são facilmente controláveis em laboratório, mas que poderão ser difíceis de controlar quando se passa para a central. No caso de misturas com incorporação de elevadas percentagens de material fresado e/ou com utilização de betume-espuma, esta transposição assume uma importância ainda maior para se obter um adequado comportamento das misturas em serviço.



Figura 6.29 – Central usada para a transposição.

Devido à conjuntura económica menos favorável verificada nos últimos, a que não é alheia a redução do número de obras de pavimentação, não foi possível à empresa realizar o trecho experimental atrás referido, apesar da insistência para que tal se realizasse por parte dos membros da Universidade do Minho envolvidos no projeto. Perto da fase final do projeto, a central de produção de misturas betuminosas teve de ser mobilizada para um local onde a empresa esperava vir a ter maior possibilidade de rentabilizar o investimento realizado na sua aquisição. No entanto, a distância a que a central se encontra do local onde foi armazenado o material fresado no início do projeto impossibilitou o transporte do mesmo pois os custos envolvidos inviabilizariam a sua incorporação nas misturas a produzir, do ponto de vista económico. Assim, na ausência de material fresado, apenas se conseguiu realizar um estudo preliminar das condições de produção em central para uma mistura temperada com utilização de betume-espuma, por comparação com uma mistura convencional.

O estudo de avaliação das condições de produção em contexto real incluíram a produção de uma amassadura (de aproximadamente 1 tonelada) de mistura convencional e de uma amassadura (de idêntica quantidade) de mistura temperada com betume-espuma. A quantidade limitada de mistura produzida (à escala industrial) originou uma dificuldade acrescida com o controlo de temperaturas, como se descreve mais adiante. Para além disso, as condições de recolha de amostras para caracterização laboratorial das misturas também não eram as ideais pelo que foi necessário proceder à compactação manual de um conjunto de provetes para avaliar a sensibilidade à água das duas misturas. Assim, para se pré-aquecer os moldes de Marshall utilizou-se uma forma mais artesanal (Figura 6.30), envolvendo-os numa quantidade de mistura acabada de produzir. A forma como foram compactados os provetes, ainda que se tenha mantido

a energia de compactação (75 pancadas de cada lado do provete), também não é exatamente igual àquela que se obtém em laboratório, onde se utiliza um compactador mecânico e automatizado, enquanto na central essa compactação foi realizada por um operador de forma manual.



Figura 6.30 – Aquecimento dos moldes onde foram compactados os provetes recolhidos na central para os ensaios de sensibilidade à água.

Durante este estudo apenas foi possível realizar o controlo da temperatura (Figura 6.31) das duas misturas após as mesmas terem sido descarregadas da misturadora, ou seja, no momento imediatamente anterior à compactação dos provetes. Este controlo de temperatura foi realizado através de um termómetro digital (pistola de temperatura), que permitia medir a temperatura superficial, através de infravermelhos, ou internamente na mistura, com a utilização de uma sonda de temperatura.



Figura 6.31 – Controlo da temperatura da mistura.

Convém ainda referir que, dada a localização da central no momento desta validação de procedimentos houve a necessidade de utilizar um agregado de uma origem diferente, uma vez

que a distância entre a central e o local de proveniência dos primeiros agregados faria com que o custo de produção aumentasse significativamente. Assim sendo os agregados utilizados continuam a ser de origem granítica, mas com classificação granulométrica distinta (Figura 6.32), mantendo-se o tipo de filer utilizado. Apesar disso, fez-se um ajuste das percentagens de cada fração utilizada para que a curva granulométrica se aproximasse do estudo inicial. De qualquer forma, os agregados foram os mesmos para ambas as misturas avaliadas, fazendo-se variar apenas a forma como o betume foi introduzido em cada mistura.



Figura 6.32 – Agregados utilizados no estudo realizado em central.

Assim, de forma a tentar perceber-se de que forma a utilização de betume-espuma influencia o desempenho das misturas, no que diz respeito à sensibilidade à água, produziram-se duas misturas equiparáveis, uma com um betume convencional a quente e a outra com betume-espuma a uma temperatura inferior.

No Quadro 6.16 apresenta-se a composição volumétrica dos provetes compactados na central, bem como a temperatura de compactação registada no momento. Adicionalmente, apresenta-se ainda a percentagem de betume, determinada pelo método de ignição, a qual foi realizada posteriormente em laboratório aquando do estudo de sensibilidade à água das misturas.

Quadro 6.16 – Características das misturas produzidas em central.

Mistura	Temperatura de Compactação (°C)	BMT (kg/m ³)	Volume de vazios (%)	Percentagem de betume (%)
Betume Convencional	147,67	2481,45	3,01	5,00
Betume-Espuma	109,38	2475,93	3,66	5,40

Analisando a percentagem de betume é possível verificar que a mistura com betume-espuma apresenta um valor mais alto do que a mistura convencional, sendo que ambas se encontram acima do valor especificado de 4,8%. Estas variações estão relacionadas com as quantidades reduzidas de material produzido (apenas uma amassadura de cada mistura), especialmente no caso da mistura com betume-espuma, onde não existe experiência suficiente para se obter um resultado melhor, sem que se proceda a uma calibração da própria central aquando da produção de maiores quantidades.

O estudo foi concluído com a realização dos ensaios de sensibilidade à água, cujos resultados se apresentam no Quadro 6.17. Com base nesses resultados é possível verificar que a mistura convencional apresenta um comportamento superior ao da mistura temperada, a qual foi produzida a uma temperatura significativamente mais baixa (perto de 40 °C abaixo). No entanto, tendo em atenção a redução de temperatura conseguida, pode considerar-se que a diferença no comportamento das misturas não é significativa.

Quadro 6.17 – Resultados de sensibilidade à água das misturas produzidas em central.

Mistura	ITS_{seco} (kPa)	ITSR (%)
Betume Convencional	2018,28	85,23
Betume-Espuma	1835,75	67,11

Apesar desta primeira experiência não permitir tirar grandes conclusões, uma vez que a quantidade de mistura produzida é muito pequena, de uma forma geral foi possível verificar quais as dificuldades que se poderão ter aquando da execução de um trecho experimental. De referir que a primeira aplicação de mistura com betume-espuma (desejavelmente num trecho experimental) acarretará uma dificuldade acrescida uma vez que se trata de uma tecnologia sobre a qual não existe experiência prática, o que levará os intervenientes terem uma atenção redobrada aquando da sua aplicação e compactação.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

7.1. Principais Conclusões

Neste trabalho foi efetuado um estudo detalhado sobre a reciclagem de misturas betuminosas, para taxas de incorporação de material fresado até 50 %, com grande enfoque na utilização da tecnologia de betume-espuma como solução para minimizar a temperatura de produção das misturas recicladas. Além disso, também se avaliou a utilização de rejuvenescedores em misturas recicladas produzidas a quente, como solução que pode ser utilizada de forma mais generalizada em centrais que não disponham da tecnologia de betume-espuma.

Ao longo desta tese, que resume os principais trabalhos efetuados durante o doutoramento, foi possível identificar vários aspetos de grande interesse relativos ao tema em estudo, que deram resposta aos objetivos inicialmente propostos. Assim, é importante sintetizar as principais conclusões desta tese de doutoramento, as quais são apresentadas nos seguintes parágrafos.

Ao descrever de forma geral este trabalho, começou por efetuar-se uma análise completa do material fresado, o que permitiu a sua incorporação em novas misturas betuminosas recicladas de uma forma mais eficaz. Em seguida estudou-se a utilização de rejuvenescedores para produção e melhoria do desempenho de misturas recicladas a quente, sendo possível concluir que esses aditivos demonstraram resultados bastante positivos (de entre os quais se salienta um aditivo de origem vegetal proposto neste trabalho). Por último, estudou-se pormenorizadamente a tecnologia de betume-espuma de forma a contribuir para um aumento do conhecimento na sua aplicação, em especial em misturas recicladas. De facto, a aplicação desta técnica implicou um estudo muito complexo para se conseguir determinar as melhores condições de produção, o que no final permitiu obter misturas betuminosas produzidas a temperaturas significativamente mais baixas, mas com um desempenho idêntico às mesmas misturas produzidas a quente.

Em seguida descreve-se de forma mais pormenorizada as conclusões obtidas em cada uma das partes deste trabalho. No que respeita ao material fresado, é possível verificar que uma correta análise do mesmo permite que a sua incorporação em misturas recicladas se processe de forma mais controlada. A necessidade de separar o MF em frações surge associada ao processo de incorporação do mesmo em algumas centrais, de modo a aumentar as taxas de reciclagem, o que explica o interesse no seu estudo. O fracionamento do MF com o classificador industrial permitiu uma separação efetiva do mesmo, apresentando a sua fração grossa menor quantidade de betume com uma penetração mais baixa, e a sua fração fina uma maior quantidade de betume um pouco menos envelhecido. No entanto, a utilização de elevadas taxas de MF aumenta a complexidade na produção das misturas recicladas, obrigando ao estudo do betume novo a incorporar e à avaliação da necessidade de adicionar rejuvenescedores.

Ao avaliar a incorporação de rejuvenescedores nas misturas recicladas foi possível verificar que não há necessidade de utilizar estes aditivos para taxas de reciclagem até 30%. No entanto, ao incorporar 50% de MF aconselha-se a aplicação de 2 a 3% de um rejuvenescedor. Ao estudar o envelhecimento destes betumes aditivados, verificou-se que a presença de rejuvenescedores não implica um envelhecimento mais acelerado do betume, que assim demonstra ser uma opção viável para aplicação em misturas betuminosas recicladas a quente.

Ao produzir misturas recicladas a quente com incorporação de 30 ou 50% de material fresado é evidente que a incorporação de MF provoca um aumento da rigidez das misturas, o que poderá diminuir a sua flexibilidade. Quando se incorpora rejuvenescedores nestas misturas é possível verificar que a rigidez das misturas decresce, melhorando a resistência ao fendilhamento por fadiga sem comprometer a resistência à deformação permanente. Os vários aditivos rejuvenescedores utilizados apresentaram resultados muito positivos, com destaque para o óleo de rícino, um aditivo de origem vegetal proposto neste trabalho e que teve uma eficácia semelhante aos aditivos comerciais.

Relativamente às misturas betuminosas com betume-espuma, dado que a aplicação desta tecnologia em misturas betuminosas temperadas ainda não foi muito estudada, houve necessidade de contribuir numa forma mais significativa para o aumento do conhecimento na sua aplicação. De facto, a tecnologia associada à produção de betume-espuma, por si só, já tem uma complexidade muito elevada e que envolve a análise de diversos parâmetros relativos às propriedades de expansão do betume, o que implica a necessidade de estudar estas variáveis de uma forma cuidada.

De uma forma geral é possível verificar que os betumes mais moles apresentam melhores características de expansibilidade, enquanto a utilização de temperaturas de injeção mais altas nem sempre se traduziu em melhores resultados. Pelo contrário, em vários casos verificou-se que as temperaturas mais baixas em estudo originaram betumes-espuma de melhor qualidade. Quanto à percentagem de água de injeção, e para os betumes mais duros (50/70), é possível verificar que se obtêm melhores resultados para percentagens de água mais altas. Nos betumes mais moles (70/100 e 160/220) não há uma dependência tão grande da percentagem de água. Em geral, aconselha-se a utilização de 3% de água para produção de betume-espuma.

Podem ser usados aditivos estabilizadores de espuma para melhorar a expansibilidade do betume, em especial para betumes menos expansivos. No entanto, é essencial o uso de aditivos especificamente desenvolvidos para esse fim, ou seja, o Tego (E1) e o Iterfoam (E4), que foram os únicos que demonstraram ser eficientes. Além disso, observou-se que esses dois aditivos apresentaram características de expansão distintas (o Tego origina tempos de meia vida muito superiores). Verifica-se que é possível obter resultados de expansão adequados com percentagens de aditivo reduzidas (0,1% no caso de Tego, e 0,4% no Iterfoam). Quando se utilizam estes aditivos é possível obter betume-espuma de melhor qualidade para percentagens de água mais elevadas, embora se continue a aconselhar o uso de 3% de água (dado que a água é um elemento prejudicial para as misturas betuminosas).

A utilização de curvas de decaimento do betume-espuma é bastante útil para perceber a forma como os betumes se vão comportar, mas a sua obtenção é bastante complexa (quer na fase experimental pela dificuldade na leitura da expansão do betume ao longo do tempo, quer na fase de tratamento e análise dos resultados). Dos resultados obtidos é possível verificar que o betume menos viscoso (160/220) e os betumes com aditivos apresentam curvas de decaimento semelhantes, e que são mais adequadas para a aplicação em misturas betuminosas. Já os betumes mais viscosos (50/70 e 70/100) apresentam uma curva de decaimento com uma forma distinta, que é considerada inadequada para a produção de misturas betuminosas. De referir que mesmo os dois aditivos estabilizadores acabam por apresentar curvas de decaimento distintas, sendo que o Tego apresenta um decaimento muito mais lento que o Iterfoam.

O índice de espuma, utilizado para análise da expansibilidade dos betumes, demonstrou ter um ajuste bastante próximo à área que é medida abaixo das curvas de decaimento experimental, demonstrando a elevada fiabilidade do modelo teórico que lhe dá origem.

As condições de produção das misturas betuminosas com betume-espuma em laboratório foram analisadas de forma cuidada, devido às características particulares do betume-espuma e do equipamento utilizado para sua injeção, que podem influenciar o desempenho destas misturas. Nesse estudo verificou-se que não é necessário proceder à cura destas misturas, o que é uma vantagem em relação ao uso de emulsão betuminosa. O uso de cal ou cimento em vez de filler comercial demonstrou ter vantagens técnicas, mas não é aconselhada economicamente. Ao alterar a percentagem de betume-espuma usada nas misturas, verificou-se que esta técnica não permite reduzir a percentagem de betume ótima a utilizar nas misturas betuminosas. Durante o estudo foi muito importante perceber que a produção de misturas betuminosas em laboratório com betume-espuma obriga a um cuidado especial. De facto, a perda de alguns segundos entre a injeção do betume-espuma e o início da amassadura pode alterar bastante a forma como o betume envolve os agregados, condicionando o comportamento das misturas.

Ao avaliar as temperaturas de produção das misturas com betume-espuma verificou-se que as misturas sem material fresado podem reduzir a temperatura de aquecimento dos agregados em 20 °C, e as misturas com 30 ou 50% de material fresado conseguem uma redução dessa temperatura igual a 40 °C. Posteriormente avaliou-se o desempenho das misturas com betume-espuma produzidas a temperaturas mais baixas, verificando-se que esta tecnologia pode ser utilizada com sucesso nas diferentes misturas betuminosas em estudo. Apesar disso, os melhores resultados foram obtidos quando se utilizou betume-espuma em misturas com incorporação de material fresado.

Ao comparar os resultados das misturas recicladas produzidas a quente ou produzidas a menores temperaturas com betume-espuma é possível verificar que a aplicação deste tipo de tecnologia é uma solução bastante viável, dado que o desempenho mecânico é equivalente nas duas situações. No entanto, a poupança a nível energético é bastante significativa, uma vez que existe uma redução de cerca de 40 °C no aquecimento dos materiais, havendo também uma redução significativa da emissão de gases com efeito de estufa. Pelo mesmo motivo, as misturas vão ser sujeitas a um menor envelhecimento, o que pode prolongar a sua durabilidade. Ainda se garante a compactação destas misturas com betume-espuma a temperaturas mais baixas, o que vai melhorar as condições de trabalho dos trabalhadores na fase de pavimentação.

Quanto à transposição para central, e tratando-se ainda de um estudo muito incipiente, este demonstrou que esta tecnologia poderá ser eficientemente aplicada, numa fase seguinte, em

trechos experimentais. No entanto, é fundamental que se verifique em central as condições de produção definidas em laboratório, para se ajustar o método a uma escala industrial.

Mesmo atendendo a todo o estudo que foi realizado, existe uma série de outros trabalhos e ideias que podem servir de base para o desenvolvimento de trabalhos futuros neste domínio, como se propõe em seguida. Haveria todo o interesse em desenvolver esses trabalhos ainda durante este projeto de doutoramento, mas foi necessário tomar opções sobre as principais linhas de ação a prosseguir no tempo disponível para sua conclusão.

7.2. Propostas para Desenvolvimentos Futuros

Com base no que se apresentou na secção anterior é possível concluir que o presente estudo representa um avanço significativo no avanço do conhecimento sobre o comportamento de misturas betuminosas recicladas a quente e temperadas, nomeadamente, com recurso à técnica do betume-espuma. Tendo em conta o desempenho interessante que as MBRT apresentaram é possível estimar que as mesmas comecem a ser aceites como uma alternativa viável à produção e aplicação de misturas betuminosas a quente. No entanto, por limitações temporais, técnicas e económicas, alguns aspetos não puderam ser totalmente avaliados no decorrer deste trabalho, dando origem a desenvolvimentos que poderão ser tidos em conta em estudos futuros.

No que respeita ao betume-espuma, o estudo de algumas das variáveis que foram sendo avaliadas poderiam ter sido mais aprofundadas, mas por falta de tempo tal não foi possível. Assim, de seguida enumeram-se algumas das variáveis que seria interessante avaliar de forma mais aprofundada em trabalhos futuros. A influência das condições de fronteira (nomeadamente da temperatura a que se encontra o recipiente onde é injetado o betume) e da composição química dos betumes na expansibilidade do betume poderão ser melhor estudadas. Para além disso, o uso de rejuvenescedores e aditivos redutores de temperatura (por exemplo ceras) em misturas produzidas com betume-espuma e a sua influência no processo de expansão deve ser melhor avaliados.

Quanto à produção de MBTs, ainda persiste a necessidade de analisar de forma mais aprofundada a influência da injeção do betume-espuma na mistura (por exemplo utilizando o bico injetor de maior capacidade), ou a forma como o tempo de cura afeta as características das misturas produzidas com esta tecnologia.

Por fim, seria importante realizar o estudo das condições de produção em central de misturas betuminosas com incorporação de material fresado, uma vez que não foi possível estudar essas misturas na parte final deste trabalho (aquando da avaliação da aplicabilidade das misturas em contexto real). Adicionalmente, seria importante realizar a construção de trechos experimentais onde as misturas aqui estudadas seriam aplicadas e avaliadas do ponto de vista técnico, económico e ambiental. Na construção desses trechos seria interessante quantificar os custos reais de produção das diferentes misturas, nomeadamente, pela inclusão de aditivos rejuvenescedores e de materiais fresados, que podem influenciar os custos de produção das mesmas. Para além disso, a avaliação das emissões resultantes da produção de cada mistura, em conjunto com uma avaliação económica de cada solução, permitiriam aferir a sustentabilidade de cada alternativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu, L.P.F. (2012). Estudo de misturas betuminosas recicladas com incorporação de resíduos plásticos, Universidade do Minho, Guimarães.
- Abreu, L.P.F., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Fonseca, P.V. (2015). Recycled asphalt mixtures produced with high percentage of different waste materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 84 (0), pp. 230-238.
- Abreu, L.P.F., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Palha, D., Fonseca, P.V. (2017). Suitability of different foamed bitumens for warm mix asphalts with increasing recycling rates, *Construction and Building Materials*, Vol. 142, pp. 342-353.
- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., Shafigh, P. (2011). Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt, *Materials & Design*, Vol. 32 (10), pp. 4844-4849.
- Akeroyd, F., Hicks, B.J. (1988). Foamed bitumen road recycling, *Highways*, Vol. 56 (1933), pp. 42-3,45.
- AkzoNobel (2015). Rediset^R LQ, Superior warm-mix additive for exceptional compaction, coating and moisture resistance, AkzoNobel Surface Chemistry.
- Al-Qadi, I.L., Elseifi, M.A., Carpenter, S.H. (2007). Reclaimed Asphalt Pavement – A Literature Review, Illinois Center for Transportation, Springfield.
- Al-Qadi, I.L., Wang, H., Baek, J., Leng, Z., Doyen, M., Gillen, S. (2012). Effects of curing time and reheating on performance of warm stone-matrix asphalt, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24 (11), pp. 1422-1428.
- Ali, A., Abbas, A., Nazzal, M., Alhasan, A., Roy, A., Powers, D. (2013). Effect of temperature reduction, foaming water content, and aggregate moisture content on performance of foamed warm mix asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 48 (0), pp. 1058-1066.
- Almeida-Costa, A., Benta, A. (2016). Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, Part 4, pp. 2308-2317.
- Antunes, V.F.S. (2013). Influência do fíler no comportamento de mastiques betuminosos, Tese de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Aravind, K., Das, A. (2007). Pavement design with central plant hot-mix recycled asphalt mixes, *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (5), pp. 928-936.
- Arkema Group Social Media Hub (2016). Cecabase® 200; Acedido em 19/08/2016.
- Asli, H., Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R. (2012). Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder, *Construction and Building Materials*, Vol. 37 (0), pp. 398-405.

- Aspha-min GmbH (2009). aspha-min® - The high performance additive; <http://www.aspha-min.com/asphamin-en.html>; Acedido em 29-01-2014.
- ASTECC (2014). The Double Barrel - Combination Aggregate Dryer/Drum Mixer, Chattanooga, USA.
- Bailey, H.K., Zoorob, S.E. (2012). The Use of Vegetable Oil as a Rejuvenator for Asphalt Mixtures, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul.
- Barinov, E.N. (1990). Formation and properties of bituminous foams, Chemistry and Technology of Fuels and Oils, Vol. 26 (10), pp. 544-548.
- Bieder, A., Probst, S., Biedermann, A., Demarmels, A. (2012). Foaming of bitumen - A key process for different low temperature asphalts, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul.
- Bijleveld, F., Miller, S., Dorée, A. (2012). Warm mix asphalt - Too cold to handle? Learning to deal with the operational consequences of warm mix asphalt, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul.
- Bower, N., Wen, H., Willoughby, K., Weston, J., DeVol, J. (2012). Evaluation of the Performance of Warm Mix Asphalt in Washington State, Washington State Department of Transportation, Olympia.
- Bowering, R.H., Martin, C.L. (1976). Foamed bitumen production and application of mixtures evaluation and performance of pavements, Association of Asphalt Paving Technologists Proc, p. p. 453-477, New Orleans, Louisiana.
- Branco, F., Pereira, P., Santos, L.P. (2005). Pavimentos Rodoviários, Almedina, Coimbra.
- Brennen, M., Tia, M., Altschaeffl, A.G., Wood, L.E. (1983). Laboratory investigation of the use of foamed asphalt for recycled bituminous pavements, Transportation Research Record (911), pp. p. 80-87.
- Brownridge, J. (2010). The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation, First International Conference on Pavement Preservation, Newport Beach, California, pp. 351 - 364.
- Capitão, S.D., Picado-Santos, L.G., Martinho, F. (2012). Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt, Construction and Building Materials, Vol. 36 (0), pp. 1016-1024.
- Caro, S., Beltrán, D.P., Alvarez, A.E., Estakhri, C. (2012). Analysis of moisture damage susceptibility of warm mix asphalt (WMA) mixtures based on Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) testing and a fracture mechanics model, Construction and Building Materials, Vol. 35 (0), pp. 460-467.
- Celauro, C., Bernardo, C., Gabriele, B. (2010). Production of innovative, recycled and high-performance asphalt for road pavements, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 54 (6), pp. 337-347.
- CEN (2001). EN 12697-10:2001 - Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Compactibility, European Committee for Standardization, Brussels.

- CEN (2003). EN 12697-22:2003 - Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2006). EN 13108-20:2006 - Bituminous mixtures. Material specifications. Type testing., European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2007a). EN 1426:2007 - Bitumen and bituminous binders. Determination of needle penetration, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2007b). EN 1427:2007 - Bitumen and bituminous binders. Determination of the softening point. Ring and Ball method, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2007c). EN 12607-1:2007 - Bitumen and bituminous binders. Determination of the resistance to hardening under influence of heat and air. RTFOT method., European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2008). EN 12697-12:2008 - Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. - Determination of the water sensitivity of bituminous specimens, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2009). EN 12697-5:2009 - Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Determination of the maximum density., European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2010). EN 13302:2010 - Bitumen and bituminous binders. Determination of dynamic viscosity of bituminous binder using a rotating spindle apparatus, European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2012a). EN 933-1:2012 - Tests for geometrical properties of aggregates. Determination of particle size distribution. Sieving method., European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2012b). EN 12697-6:2012 - Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Determination of bulk density of bituminous specimens., European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2012c). EN 12697-26:2012 - Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Stiffness., European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN (2012d). EN 12697-39:2012 - Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Binder content by ignition., European Committee for Standardization, Brussels.
- Chandra, R., Veeraragavan, A., Krishnan, J.M. (2013). Evaluation of Mix Design Methods for Reclaimed Asphalt Pavement Mixes with Foamed Bitumen, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 104 (0), pp. 2-11.
- Chen, J.S., Chu, P.Y., Lin, Y.Y., Lin, K.Y. (2007). Characterization of binder and mix properties to detect reclaimed asphalt pavement content in bituminous mixtures, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 34 (5), pp. 581-588.
- Chen, M., Leng, B., Wu, S., Sang, Y. (2014a). Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders, *Construction and Building Materials*, Vol. 66, pp. 286-298.

- Chen, M., Xiao, F., Putman, B., Leng, B., Wu, S. (2014b). High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils, *Construction and Building Materials*, Vol. 59, pp. 10-16.
- Choi, Y. (2008). Review of Foamed Bitumen Sealing in Australia, Austroads Inc, Sydney, Australia.
- Chomicz-Kowalska, A., Gardziejczyk, W., Iwański, M.M. (2016). Moisture resistance and compactibility of asphalt concrete produced in half-warm mix asphalt technology with foamed bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 126, pp. 108-118.
- Copeland, A. (2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice, Office of Infrastructure Research and Development; Federal Highway Administration, Georgetown Pike.
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B. (2008). *Warm-Mix Asphalt: European Practice*, Alexandria.
- De Lira, R.R., Cortes, D.D., Pasten, C. (2015). Reclaimed asphalt binder aging and its implications in the management of RAP stockpiles, *Construction and Building Materials*, Vol. 101, Part 1, pp. 611-616.
- EAPA (2005). Industry Statement on the recycling of asphalt mixes and use of waste of asphalt pavements, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EAPA (2007). Environmental Guidelines on Best Available Technology for the Production of Asphalt Paving Mixes, European Asphalt Pavement Association, Brussels.
- EAPA (2010a). Asphalt in figures 2009, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EAPA (2010b). The use of Warm Mix Asphalt, European Asphalt Pavement Association.
- EAPA (2011). Asphalt in figures 2010, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EAPA (2012). Asphalt in figures 2011, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EAPA (2013). Asphalt in figures 2012, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EAPA (2014). Asphalt in figures 2013, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EAPA (2015). Asphalt in figures 2014, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- EP, E.d.P., S.A. (2014). *Caderno de Encargos Tipo Obra*.
- Evonik Industries AG (2012). TEGO Addibit FS 725 A, Technical Information.
- Fernandes, S.R.M. (2013). Desenvolvimento de betumes inovadores modificados com resíduos, Universidade do Minho, Guimarães.

- Fernández-Gómez, W.D., Rondón Quintana, H., Reyes Lizcano, F. (2013). A review of asphalt and asphalt mixture aging: Una revisión, *Ingeniería e Investigación*, Vol. 33, pp. 5-12.
- Ferreira, C.I.G. (2009). *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*, Universidade do Minho, Guimarães.
- Fonseca, P. (2004). *Reciclagem de Pavimentos Rodoviários*, RECIPAV-Engenharia e Pavimentos, Lda, Disponível em: <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>.
- Fonseca, P., Guimarães, C., Gomes, V., Palha, D., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Abreu, L.P.F. (2013). Estudo de Material Fresado para Incorporação em Misturas Betuminosas a Quente com Altas Taxas de Reciclagem, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.
- Fu, P., Harvey, J.T. (2007). Temperature sensitivity of foamed asphalt mix stiffness: field and lab study, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 8 (2), pp. 137-145.
- Fu, P., Jones, D., Harvey, J.T. (2011). The effects of asphalt binder and granular material characteristics on foamed asphalt mix strength, *Construction and Building Materials*, Vol. 25 (2), pp. 1093-1101.
- Gawel, I., Czechowski, F., Kosno, J. (2016). An environmental friendly anti-ageing additive to bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 110, pp. 42-47.
- Gencor Industries, I. (2014). A greener future is in the mix, The Ultrafoam GX2™ Process; <http://www.gencorgreenmachine.com/index.php?page=the-ultrafoam-gx2-process>; Acedido em 14-03-2014.
- Goh, S.W., You, Z., Dam, T.J.V. (2007). Laboratory evaluation and pavement design for Warm Mix Asphalt, 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium, Ames, Iowa.
- Gonzales, A. (2011). *Review of Structural Design Procedures for Foamed Bitumen Pavements*, Austroads Ltd, Sydney, Australia.
- Hailesilassie, B.W., Hugener, M., Partl, M.N. (2015). Influence of foaming water content on foam asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 85 (0), pp. 65-77.
- Hamzah, M.O., Jamshidi, A., Shahadan, Z. (2010). Evaluation of the potential of Sasobit® to reduce required heat energy and CO2 emission in the asphalt industry, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 18 (18), pp. 1859-1865.
- Hamzah, M.O., Omranian, S.R., Golchin, B. (2015). A review on the effects of aging on properties of asphalt binders and mixtures *CJASR*, Vol. 4 (6), pp. 15-34.
- Hansen, K.R., Copeland, A. (2015). *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2014*.
- Harder, G.A. (2007). *LEA HalfWarm Mix Paving Report*, McConnaughay Technologies, Cortland NY.
- He, G., Wong, W. (2006). Decay properties of the foamed bitumens, *Construction and Building Materials*, Vol. 20 (10), pp. 866-877.
- He, G., Wong, W. (2007). Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (8), pp. 1809-1819.

- He, Z., Lu, W. (2004). Research on the properties of road building materials treated with foamed bitumen in China, 8th Conference on Asphalt Pavement for Southern Africa (CAPSA'04), Sun City, South Africa.
- Huang, B., Li, G., Vukosavljevic, D., Shu, X., Egan, B. (2005). Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1929, pp. 37-45.
- Im, S., Karki, P., Zhou, F. (2016). Development of new mix design method for asphalt mixtures containing RAP and rejuvenators, Construction and Building Materials, Vol. 115, pp. 727-734.
- Iterchimica (2010). Iterlene ACF 1000, Bitumen regenerator.
- Iterchimica (2011). Iterfoam B, Additive for the production of bitumen with high foaming index.
- Iwański, M., Chomicz-Kowalska, A., Maciejewski, K. (2015). Application of synthetic wax for improvement of foamed bitumen parameters, Construction and Building Materials, Vol. 83 (0), pp. 62-69.
- Jain, P.K., Lapalu, L., Juery, C., Zucco, S., Jullien, A., Tamagny, P. (2013). Environmental and Field Performance of the Warm Asphalt Mixes Technology with a “ready to use” Bitumen, Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 104 (0), pp. 178-187.
- Jameson, G. (2013). Design and Performance of Foamed Bitumen Stabilised Pavements: Progress Report One, Austroads Ltd, Sydney, Australia.
- Jameson, G. (2014). Design and Performance of Foamed Bitumen Stabilised Pavements: Progress Report 2, Austroads Ltd., Sydney, Australia.
- Jameson, G. (2015). Design and Performance of Foamed Bitumen Stabilised Pavements: Progress Report 3, Austroads Ltd., Sydney, Australia.
- Jamshidi, A., Hamzah, M.O., You, Z. (2013). Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobit®: State-of-the-art, Construction and Building Materials, Vol. 38 (0), pp. 530-553.
- Jenkins, K.J. (2000). Mix Design Considerations for Cold and Half-warm Bitumen Mixes with Emphasis on Foamed Bitumen, University of Stellenbosch, Faculty of Engineering.
- Kandhal, P.S., Mallick, R.B. (1998). Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments Participant's Reference Book.
- Karak, N., Rana, S., Cho, J.W. (2009). Synthesis and characterization of castor-oil-modified hyperbranched polyurethanes, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 112 (2), pp. 736-743.
- Kavussi, A., Hashemian, L. (2012). Laboratory evaluation of moisture damage and rutting potential of WMA foam mixes, International Journal of Pavement Engineering, Vol. 13 (5), pp. 415-423.
- Kerkhof, E.V.d. (2012). Warm waste asphalt recycling in Belgium - 30 years of experience and full confidence in the future, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul.

- Koshi, K., Moriyasu, H., Saito, K., Shimizu, Y. (2014). Study on the improved recycled asphalt mixtures by microbubble-foamed asphalt, *Asphalt Pavements*, p. 709-720, CRC Press.
- Kristjansdottir, O. (2006). *Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving*, University of Washington, Olympia, Washington.
- Larsen, O.R., Moen, Ø., Robertus, C., Koenders, B.G. (2004). WAM foam asphalt production at lower operating temperatures as an environmental friendly alternative to HMA, 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vienna.
- Lecomte, M., Deygout, F., Menetti, A. (2007). Emission and occupational exposure at lower asphalt production and laying temperatures.
- Lee, J., Denneman, E., Choi, Y. (2015). Maximising the Re-use of Reclaimed Asphalt Pavement - Outcomes of Year Two: RAP Mix Design, Austroads Ltd., Sydney, Australia.
- Lesueur, D., Clech, H., Brosseaud, A., Such, C., Cazacliu, B., Koenders, B., Cérino, P.-J., Bonvallet, J. (2004). Foamability and Foam Stability, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 5 (3), pp. 277-302.
- Locander, R. (2009). Analysis of using reclaimed asphalt pavement (RAP) as a base course material Colorado Department of Transportation - Materials/Geotechnical Branch, Denver.
- Malladi, H. (2012). Laboratory Evaluation of Warm Mix Asphalt Technologies for Moisture and Rutting Susceptibility, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Martinez-Arguelles, G., Giustozzi, F., Crispino, M., Flintsch, G.W. (2014). Investigating physical and rheological properties of foamed bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 72 (0), pp. 423-433.
- Martinho, F., Santos, L.d.P., Capitão, S. (2010). Reabilitação de Pavimentos - Misturas betuminosas temperadas com resíduos em camada de base como possibilidade de reforço estrutura, *Construção Magazine, Engenharia e Média, Lda*, p. 22 - 26.
- Martinho, F.d.C.G. (2004). Reciclagem de pavimentos : estado da arte, situação portuguesa e seleção do processo construtivo, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- MAXAM Equipment, I. (2012). Introducing AQUABlack® Warm Mix Asphalt; <http://maxamequipment.com/AQUABlackWMA.htm>; Acedido em 29-01-2014.
- McDaniel, R., Anderson, R.M. (2001). Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual, NCHRP - National Cooperative Highway Research Program Washington, D.C.
- Middleton, B., Forfylyow, B. (2008). An evaluation of warm mix asphalt produced with the Double Barrel Green process
- 7th International Conference on Managing Pavements and Other Roadway Assets (ICP7), Calgary, Alberta, Canada.
- Mo, L., Li, X., Fang, X., Huurman, M., Wu, S. (2012). Laboratory investigation of compaction characteristics and performance of warm mix asphalt containing chemical additives, *Construction and Building Materials*, Vol. 37 (0), pp. 239-247.

- Mogawer, W., Austerman, A., Bahia, H. (2011). Evaluating the Effect of Warm-Mix Asphalt Technologies on Moisture Characteristics of Asphalt Binders and Mixtures, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2209, pp. 52-60.
- Morea, F., Marcozzi, R., Castaño, G. (2012). Rheological properties of asphalt binders with chemical tensoactive additives used in Warm Mix Asphalts (WMAs), *Construction and Building Materials*, Vol. 29 (0), pp. 135-141.
- Motta, R.d.S. (2011). Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos Para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Muthen, K.M. (1998). Foamed Asphalt Mixes - Mix Design Procedure, SABITA Ltd & CSIR Transportek, South Africa.
- Mutlu, H., Meier, M.A.R. (2010). Castor oil as a renewable resource for the chemical industry, *European Journal of Lipid Science and Technology*, Vol. 112 (1), pp. 10-30.
- Nayak, P., Sahoo, U.C. (2015). A rheological study on aged binder rejuvenated with Pongamia oil and Composite castor oil, *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 1-13.
- Nazzal, M.D., Mogawer, W., Austerman, A., Qtaish, L.A., Kaya, S. (2015). Multi-scale evaluation of the effect of rejuvenators on the performance of high RAP content mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 101, Part 1, pp. 50-56.
- Newcomb, D.E., Arambula, E., Yin, F., Zhang, J., Bhasin, A., Li, W., Arega, Z. (2015). Properties of foamed asphalt for warm mix asphalt applications.
- Olard, F., Gaudefroy, V. (2012). Laboratory assessment of mechanical performance and fume emissions of LEA half-warm mix asphalt versus traditional hot mix asphalt, 2nd International warm-mix conference, France.
- Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Abreu, L.P.F., Gonzalez-Leon, J.A. (2012a). The role of a surfactant based additive on the production of recycled warm mix asphalts – Less is more, *Construction and Building Materials*, Vol. 35 (0), pp. 693-700.
- Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Abreu, L.P.F., Pereira, P.A.A. (2012b). Effect of Different Production Conditions on the Quality of Hot Recycled Asphalt Mixtures, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 53 (0), pp. 266-275.
- Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D., Jesus, C.M.G., Abreu, L.P.F., Fernandes, S.R.M. (2013). Pushing the asphalt recycling technology to the limit, *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 6 (2), pp. 109-116.
- Ongel, A., Hugener, M. (2015). Impact of rejuvenators on aging properties of bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 94, pp. 467-474.
- Palha, D., Fonseca, P., Guimarães, C., Abreu, L., Silva, H., Oliveira, J., Pereira, P. (2014). Avaliação do desempenho de misturas betuminosas recicladas com elevadas taxas de material fresado, 7º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Inhambane/Moçambique.

- Pereira, R.X.L. (2011). *Misturas Betuminosas Temperadas: Estudo da Interação Aditivo-Ligante*, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- PQ Corporation (2011). *Advera WMA - The Most Versatile Workability Additive*.
- Prowell, B.D. (2007). *Warm mix asphalt*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, American Association of State Highway and Transportation Officials, National Cooperative Highway Research Program.
- Putman, B.J., Xiao, F. (2012). *Investigation of Warm Mix Asphalt (WMA) Technologies and Increased Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Asphalt Mixtures*, South Carolina Department of Transportation, Columbia, South Carolina.
- Queensland DTMR (2012). *Pavement rehabilitation manual*, Queensland Department of Transport and Main Roads - Pavement, Materials, Geotechnical Branch - Queensland Government, Brisbane.
- Reddy, M.A., Reddy, K.S., Pandey, B.B. (2014). *Evaluation of rehabilitated urban recycled asphalt pavement*, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 15 (2), pp. 434-445.
- Roberts, F.L., Kandhal, P.S., Brown, E.R., Lee, D.-Y., Kennedy, T.W. (1996). *Hot mix asphalt materials, mixture design and construction*.
- Rodríguez-Alloza, A.M., Gallego, J., Pérez, I. (2013). *Study of the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15% crumb rubber*, *Construction and Building Materials*, Vol. 43 (0), pp. 300-308.
- Rubio, M.C., Martínez, G., Baena, L., Moreno, F. (2012). *Warm mix asphalt: an overview*, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 24 (0), pp. 76-84.
- Ruckel, P.J., Acott, S.M., Bowering, R.H. (1983). *Foamed-asphalt paving mixtures: preparation of design mixes and treatment of test specimens*, *Transportation Research Record (Number 911)*, pp. p. 88-95.
- Ruenkairergsa, T., Phromsorn, C., Silarom, P., Ketnoot, W. (2004). *Engineering properties of foamed bitumen mixtures in Thailand*, 8th Conference on Asphalt Pavement for Southern Africa (CAPSA'04), Sun City, South Africa.
- Saleh, M.F. (2007). *Effect of rheology on the bitumen foamability and mechanical properties of foam bitumen stabilised mixes*, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 8 (2), pp. 99-110.
- Santos, S., Partl, M.N., Poulidakos, L.D. (2015). *From virgin to recycled bitumen: A microstructural view*, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 80, pp. 177-185.
- Saunders, J.H. (1991). *Fundamentals of foam formation*, *Handbook of polymeric foams and foam technology*, p. 5-15, Hanser Munich etc.
- Schimmoller, V.E., Holtz, K., Eighmy, T.T., Wiles, C., Smith, M., Malasheskie, G., Rohrbach, G.J., Schaftlein, S., Helms, G., Campbell, R.D., Deusen, C.H.V., Ford, B., Almborg, J.A. (2000). *Recycled materials in European highway environments uses, technologies, and policies*, American Trade Initiatives.
- Schramm, L.L., Wassmuth, F. (1994). *Foams: Basic Principles, Foams: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry*, p. 3-45, American Chemical Society.

- Sengoz, B., Oylumluoglu, J. (2013). Utilization of recycled asphalt concrete with different warm mix asphalt additives prepared with different penetration grades bitumen, *Construction and Building Materials*, Vol. 45 (0), pp. 173-183.
- Sengoz, B., Topal, A., Gorkem, C. (2013). Evaluation of natural zeolite as warm mix asphalt additive and its comparison with other warm mix additives, *Construction and Building Materials*, Vol. 43 (0), pp. 242-252.
- Shell Bitumen (2014). Shell WAM foam process.
- Shen, J., Amirkhanian, S., Tang, B. (2007). Effects of rejuvenator on performance-based properties of rejuvenated asphalt binder and mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (5), pp. 958-964.
- Shu, X., Huang, B., Shrum, E.D., Jia, X. (2012). Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high percentages of RAP, *Construction and Building Materials*, Vol. 35 (0), pp. 125-130.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Jesus, C.M.G. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 60 (0), pp. 38-48.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Peralta, E.J., Ferreira, C.I.G. (2009). Evaluation of the rheological behaviour of Warm Mix Asphalt (WMA) modified binders, 7th Int RILEM Symp Advanced Testing and Characterisation of Bituminous Materials, Rhodes, Greece, pp. 661-673.
- Soenen, H., Lu, X., Laukkanen, O.-V. (2016). Oxidation of bitumen: molecular characterization and influence on rheological properties, *Rheologica Acta*, Vol. 55 (4), pp. 315-326.
- Su, K., Hachiya, Y., Maekawa, R. (2009). Study on recycled asphalt concrete for use in surface course in airport pavement, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 54 (1), pp. 37-44.
- Sunarjono, S. (2008). The influence of foamed bitumen characteristics on cold-mix asphalt properties, University of Nottingham.
- Tabaković, A., McNally, C., Fallon, E. (2016). Specification development for cold in-situ recycling of asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 102, Part 1, pp. 318-328.
- Tanghe, T., Lemoine, G., Nösler, I., Kloet, B. (2012). Influence of rejuvenating additives on recycled asphalt (RAP) properties, 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul.
- Terex Roadbuilding (2011). Warm Mix Asphalt System, Warm Mix Asphalt.
- Torres, H.P. (2014). Utilização de Betumes Modificados na Regeneração de Misturas Betuminosas com Elevadas Percentagens de Reciclagem, Universidade do Minho, Guimarães.
- Vaitkus, A., Kilas, M., Tuminienė, F., Perveneckas, Z. (2011). Experience of use of Warm Mix Asphalt in Lithuania, The 8th International Conference, Vilnius, Lithuania.
- Vasudevan, R., Ramalinga Chandra Sekar, A., Sundarakannan, B., Velkennedy, R. (2012). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements, *Construction and Building Materials*, Vol. 28 (1), pp. 311-320.

- Vidal, R., Moliner, E., Martínez, G., Rubio, M.C. (2013). Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 74 (0), pp. 101-114.
- Voskuilen, J.L.M., Mangnus, S., van de Ven, M.F.C., van Wieringen, J.B.M., Bolk, H.J.N.A. (2004). Experiences with half-warm foamed bitumen treatment process in the Netherlands, 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Sun City, South Africa.
- Wang, A., Cheng, H., Wang, J. (2009). Research on Foamed Asphalt Technology and Equipment, *Energy and Environment Technology*, 2009 ICEET '09 International Conference on, p. 287-291.
- West, R.C. (2015). Best Practices for RAP And RAS Management, National Asphalt Pavement Association, Lanham.
- West, R.C., Copeland, A. (2015). High RAP Asphalt Pavements: Japan Practice — Lessons Learned, National Asphalt Pavement Association.
- Wijk, A.v., Wood, L.E. (1983). Use of Foamed Asphalt in Recycling of an Asphalt Pavement, *Transportation Research Record* (911), pp. p. 96-103.
- Wirtgen (2008). Suitability test procedures of foam bitumen using Wirtgen WLB 10 S, Wirtgen, GmbH, Germany.
- Wirtgen (2012). Tecnologia de Reciclagem a Frio Wirtgen, Alemanha.
- Xiao, F., Punith, V.S., Amirkhani, S.N. (2012). Effects of non-foaming WMA additives on asphalt binders at high performance temperatures, *Fuel*, Vol. 94 (0), pp. 144-155.
- Xu, J.-Z., Hao, P.-W. (2012). Study of aggregate gradations in foamed bitumen mixes, *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 13 (4), pp. 660-677.
- Yang, S.-H., Lee, L.-C. (2016). Characterizing the chemical and rheological properties of severely aged reclaimed asphalt pavement materials with high recycling rate, *Construction and Building Materials*, Vol. 111, pp. 139-146.
- Yu, X., Wang, Y., Luo, Y. (2013). Impacts of water content on rheological properties and performance-related behaviors of foamed warm-mix asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 48 (0), pp. 203-209.
- Zargar, M., Ahmadiania, E., Asli, H., Karim, M.R. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 233–234 (0), pp. 254-258.
- Zaumanis, M., Haritonovs, V., Brencis, G., Smirnovs, J. (2012a). Assessing the Potential and Possibilities for the Use of Warm Mix Asphalt in Latvia, *Construction Science*, Vol. 13, pp. pp. 6-59.
- Zaumanis, M., Mallick, R., Frank, R. (2013). Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2370), pp. 17-25.

- Zaumanis, M., Mallick, R.B., Poulikakos, L., Frank, R. (2014). Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 71 (0), pp. 538-550.
- Zaumanis, M., Smirnovs, J., Haritonovs, V., Jansen, J. (2012b). Calculation of asphalt production energy flow to compare warm and hot mix asphalt 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Istanbul.
- Zhang, J., Arambula, E., Newcomb, D., Bhasin, A., Little, D. (2015). Effects of Asphalt Source, Asphalt Grade, and Inclusion of Additives on Asphalt Foaming Characteristics, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2505), pp. 76-83.
- Zhao, S., Huang, B., Shu, X., Woods, M. (2013). Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement, *Construction and Building Materials*, Vol. 44 (0), pp. 92-100.