



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

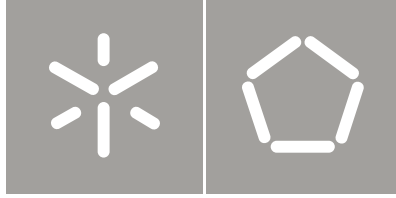
David Tiago Felgueiras Branco

Estudo de Misturas Betuminosas
Semi-temperadas por Injeção de Água

David Tiago Felgueiras Branco
Estudo de Misturas Betuminosas
Semi-temperadas por Injeção de Água

UMinho | 2013

dezembro de 2013



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

David Tiago Felgueiras Branco

Estudo de Misturas Betuminosas
Semi-temperadas por Injeção de Água

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

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

“Pedras no caminho?
Guardo todas, um dia vou construir um castelo...”

Desconhecido

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho resulta de um caminho com muito esforço, empenho e dedicação, e nada seria possível sem o aconchego, paciência e atenção das pessoas que estiveram presentes no desenvolvimento do mesmo. Dedico todos os meus agradecimentos àqueles que contribuíram com vontade e amizade. Em especial, tenho a agradecer às pessoas que, até aqui, me apoiaram neste percurso académico e na realização da dissertação.

À instituição Universidade do Minho, em especial ao Grupo de Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil, expresso o meu agradecimento pelas condições fornecidas, pelos meios colocados à disposição e pelos excelentes docentes que proporciona.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Hugo Silva e Professor Doutor Joel Oliveira, o meu agradecimento pela colaboração, orientação e formação que prestaram. A partilha de todo o conhecimento científico e da experiência profissional possibilitou-me a elaboração deste trabalho, bem como as horas despendidas com as minhas dúvidas nas suas vidas, quer pessoal quer profissional.

Aos técnicos de laboratório, Engenheiro Carlos Palha e Hélder Torres, como ao resto do pessoal de laboratório, pela disponibilidade e paciência que demonstraram. A concretização dos ensaios que tive de realizar em laboratório só foram possíveis devido ao conhecimento e empenho que tiveram para comigo. Em especial, quero agradecer ao Eng.º Palha pela dedicação, incentivo e conselhos de profissional, em relação à matéria da dissertação, como também aos conselhos de amigo, em questões da vida pessoal. É com enorme agrado que levo as suas palavras para estes anos vindouros, numa futura profissão e na vida.

Aos meus amigos e colegas de curso, que direta ou indiretamente, influenciaram o desenrolar da minha vida académica e o meu percurso pela universidade, como ao longo da minha vida e dos meus estudos. Ao Peixoto, pela amizade que levo de anos e pelas, poucas mas longas, conversas sobre o decorrer do tempo e das lembranças das nossas brincadeiras e aventuras enquanto frequentamos as mesmas escolas. À Tânia, pela ternura e carinho maternal que sempre me foi dando, pela paciência e por me mostrar que é possível sentir-me em casa mesmo estando longe dela. Ao “Ninas” e “Coia”, por serem pessoas que souberam dar conselhos sobre o que fosse, que apesar de não terem a experiência da idade souberam dar aquele “estalo” quando era preciso e com isso porem-me com os pés assentes na Terra, pelas brincadeiras nos momentos certos e por me tirarem os “livros” da frente quando na cabeça nada fazia sentido. À Belinha, Patrícia, “Suu”, “Juu”, “Risinhos”, Diana, Carolina, Márcia, e Teresinha, pela amizade e carinho que me deram, por me estenderam a mão e me acolherem quando precisei e estive mais

em baixo, pelos sorrisos e brincadeiras que me fizeram aproveitar melhor o dia, pela ajuda e dedicação que mostraram para comigo durante o último ano letivo e, sobretudo, por darem aquele conselho e achega quando era preciso. À Joana por me proporcionar um bem-estar e pacificidade essenciais nesta reta final do meu percurso académico bem como pela serenidade e ajuda que me facultou, pelo carinho que me foi demonstrando e pela cumplicidade que teve para comigo. Ao Rui, “Lipe”, Escadas, Mário, “Messias”, Ruben, “Fibi”, Carla, “Dó-Ré-Mi” e “Tocha”, que para além de me incentivarem frequentemente a estudar, também me proporcionaram momentos inesquecíveis, que me fizeram ver que a vida é feita com pilares chamados de Amizade, pelas brincadeiras e conselhos que me fizeram sorrir mas também me fizeram pensar. À Cláudia, “Feliz” e “Formiga”, pelos conhecimentos que me foram passando, pela praxe saudável e agradável que me deram, e acima de tudo, pela amizade. À Veronique, pela grande amizade e afinidade que sempre demonstrou comigo, pelas longas conversas ao telemóvel ou pelo computador, fosse perto ou longe, pelas brincadeiras e desabafos que fomos tendo, pelo ombro-amigo e de suporte que sempre manifestou em momentos menos bons, agradeço de uma forma inquestionável a sua amizade e carinho. Quer estejam espalhados por Portugal ou pelo resto do mundo, sempre me mostraram carinho e preocupação, podendo garantir que a minha pessoa é feita por um “pedaço” de todos vós.

Ao meu irmão, que não sendo do mesmo sangue, viveu as minhas lutas e batalhas, que me soube “puxar para cima” em certos momentos, que perto ou longe passou comigo horas a falar ou a aturar as minhas pressões e desvaneios durante o decorrer do tempo. Brito levarei a tua amizade e estima para o resto da vida, tenho-te das maiores considerações pela pessoa que sempre demonstras-te ser comigo e espero que a amizade que nos une à muitos e muitos anos se prolongue por muitos mais.

À minha família, tenho a agradecer o apoio que me deram, de uma ou outra forma. Tenho a agradecer, em especial, ao meu padrinho que, quer como tio quer como engenheiro, sempre me indicou o caminho que deveria seguir, dando-me conselhos do mundo do trabalho, como também “das pedras” que a vida nos põe no caminho.

Por último, mas certamente o mais importante, à mulher da minha vida. Obrigado por seres a pessoa que és, pela guerreira que não desiste nas adversidades da vida, pelo carinho e amor mostrados de forma incondicional, pela educação e dedicação que me soubeste instruir, pela personalidade forte que tens, pelos “nãos” certos que me soubeste impor, pela vida que me proporcionaste mesmo tendo que te afetar em obséquio de eu nunca passar mal, por teres sido minha amiga e pelos conselhos maternos infundáveis. Obrigado Mãe, és a pessoa que terá sempre o meu amor da forma mais pura e única possíveis.

Estudo de misturas betuminosas semi-temperadas por injeção de água

RESUMO

A crescente preocupação com a redução do consumo energético e com o aumento progressivo que o buraco da camada de ozono vai atingindo tem levado ao desenvolvimento de novas tecnologias que sejam menos prejudiciais ao ambiente, bem como mais benéficas e rentáveis economicamente. Com esta ideia presente são realizados estudos a misturas betuminosas que levem a uma diminuição das temperaturas de produção e compactação, apelidando-as de Misturas Betuminosas Temperadas (MBT) e Semi-temperadas (MBST). Assim, o impacto ambiental e económico provocado por estes tipos de misturas é mais reduzido, em comparação com as Misturas Betuminosas convencionais produzidas a Quente (MBQ).

Visto que este tipo de tecnologias ainda suscitam algumas dúvidas, será necessário comprovar que o seu comportamento e desempenho são idênticos às MBQ. Nesta dissertação é feita uma análise comparativa das características de uma mistura convencional (AC 14 desgaste 50/70 BB) com uma mistura betuminosa semi-temperada. Esta mistura será realizada a baixas temperaturas, por injeção de água e ar pressurizados, formando uma espuma betuminosa que faz o recobrimento dos agregados.

De forma convencional, foram realizados os ensaios e procedimentos segundo as normas europeias das series EN 12697 e da EN 13108, ou seja, foram caracterizadas as misturas betuminosas ao nível do seu desempenho e comportamento. Os betumes foram submetidos a ensaios de “Anel & Bola”, viscosidade dinâmica, penetração a 25°C e reologia, fazendo uma caracterização completa e essencial destes materiais. Quanto às misturas betuminosas, foram ensaiadas para medir as baridades máxima teórica e aparente, a estabilidade e deformação Marshall, a resistência à tração indireta por sensibilidade à água e por compactabilidade, a resistência à deformação permanente, o módulo de rigidez, a resistência à fadiga e à adesividade entre betume e agregado, resultando num estudo detalhado do comportamento e do desempenho expectável para as misturas betuminosas *in situ*.

Os resultados obtidos com este trabalho tornam possível concluir que o desempenho e comportamento da mistura com betume-espuma, em especial se esta for devidamente formulada, podem ser semelhantes aos da mistura convencional a quente, viabilizando a sua aplicação em pavimentos rodoviários.

Palavras-Chave: Misturas betuminosas, betume-espuma, baixas temperaturas, desempenho, pavimentos rodoviários.

Study of half-warm mix asphalt produced by addition of water

ABSTRACT

The increasing concern with reducing the energy consumption and with the gradual increasing of the ozone layer hole, have been leading to the development of new technologies that are less harmful to the environment as well as economically more beneficial and profitable. Bearing in mind this idea, several studies of bituminous mixtures that lead to a decrease in the production and compaction temperatures are being carried out, and these mixtures were called Warm Mix Asphalt (WMA) and Half-Warm Mix Asphalt (HWMA). Therefore, the environmental and economic impact caused by these new types of mixtures would be lower when compared to the conventional Hot Mix Asphalt (HMA).

Considering that these types of technologies are still raising some doubts, it should be proved that their behavior and performance are identical to the HMA. In this thesis, a comparative analysis of the characteristics a conventional HMA mix (AC 14 surface 50/70 BB) and a new HWMA mix is carried out. This mixture will be performed at low temperatures, by injecting pressurized water and air in the bitumen, thus originating asphalt foam that coats the aggregates.

Conventionally, several tests and procedures were performed according to the European EN 12697 and EN 13108 series of standards, i.e., the bituminous mixtures were characterized through their performance and behavior. The bitumens were subjected to the “Ring & Ball” test, dynamic viscosity test, penetration at 25° C test and rheology test, in order to have a complete and crucial characterization of this material. The bituminous mixtures were tested in order to evaluate the maximum theoretical and bulk densities, the Marshall Stability and deformation, the indirect tensile strength in the water sensitivity test and the compactability test, the rutting resistance, stiffness, fatigue resistance and the affinity between aggregates and bitumen, thus resulting in a detailed study of the expected behavior and performance of the mixtures *in situ*.

The results obtained with this work make it possible to conclude that the performance and behavior of the mixture with foamed bitumen, in particular when properly designed, can be similar to that of a conventional HMA mixture, thus validating its use in road pavements.

Keywords: Bituminous mixtures, foamed bitumen, low temperatures, performance, road pavements.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento temático	1
1.2	Objetivos e fases do trabalho.....	4
1.3	Organização da dissertação	4
2	REVISÃO DO ESTADO DE ARTE	7
2.1	Introdução.....	7
2.2	Misturas betuminosas produzidas a quente e a frio.....	7
2.2.1	Misturas betuminosas produzidas a quente	7
2.2.2	Misturas betuminosas produzidas a frio	9
2.3	Técnicas de produção de misturas betuminosas a temperaturas temperadas e semi-temperadas	11
2.3.1	Betume-espuma	11
2.3.2	Aditivos orgânicos	13
2.3.3	Aditivos sintéticos	13
2.4	Benefícios e limitações das misturas betuminosas temperadas e semi-temperadas 14	
2.4.1	Benefícios	14
2.4.2	Limitações e obstáculos.....	19
2.5	Misturas betuminosas temperadas.....	21
2.5.1	Características gerais	21
2.5.2	Tecnologia Double Barrel® Green.....	22
2.5.3	Tecnologia WAM-Foam®	23
2.5.4	Tecnologia WMA Terex®	23
2.6	Misturas betuminosas semi-temperadas.....	24
2.6.1	Características gerais	24
2.6.2	Tecnologia LEA®	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS	27
3.1	Materiais utilizados	27

3.1.1	Ligante	28
3.1.2	Agregados	28
3.1.3	Filer	29
3.1.4	Aditivo	31
3.2	Métodos experimentais de caracterização do betume.....	33
3.2.1	Ensaio “Anel & Bola”	33
3.2.2	Ensaio de Viscosidade Dinâmica.....	33
3.2.3	Ensaio de penetração a 25°C	35
3.2.4	Ensaio de reologia	35
3.3	Estudo inicial, produção das misturas betuminosas, preparação dos provetes e determinação das baridades e porosidade	36
3.3.1	Estudo granulométrico da mistura de agregados	36
3.3.2	Produção das misturas betuminosas.....	37
3.3.3	Baridade máxima teórica	39
3.3.4	Preparação de provetes para ensaios com o compactador Marshall	40
3.3.5	Baridade aparente.....	42
3.3.6	Porosidade	45
3.4	Métodos experimentais de caracterização mecânica das misturas betuminosas	45
3.4.1	Ensaio de Marshall.....	45
3.4.2	Percentagem “ótima” de betume.....	47
3.4.3	Sensibilidade à água.....	49
3.4.4	Compactabilidade.....	52
3.4.5	Ensaio de pista para determinação da resistência à deformação.....	54
3.4.6	Flexão em quatro pontos para determinar o módulo de rigidez.....	57
3.4.7	Flexão em quatro pontos para determinar a resistência à fadiga	58
3.4.8	Adesividade do betume aos agregados	60
3.4.9	Determinação da percentagem de betume da mistura por ignição.....	61
3.5	Caracterização específica do betume-espuma e da mistura correspondente	61
3.5.1	Equipamento utilizado para produção de betume-espuma	62
3.5.2	Utensílios de apoio ao estudo.....	62
3.5.3	Parâmetros fundamentais a avaliar	62

3.5.4	Teor residual de água da mistura com betume-espuma.....	63
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	65
4.1	Ligantes betuminosos	65
4.2	Fuso granulométrico AC 14 desgaste (BB).....	68
4.3	Determinação da percentagem “ótima” de betume	69
4.4	Solução para betume-espuma.....	71
4.4.1	Ensaio iniciais	71
4.4.2	Ensaio ao betume com aditivo	71
4.5	Resistência à tração indireta	74
4.5.1	Resistência à tração indireta por sensibilidade à água.....	74
4.5.2	Resistência à tração indireta nos provetes de compactabilidade	77
4.6	Resultados de compactabilidade	78
4.7	Resistência à deformação permanente	80
4.8	Módulo de rigidez	81
4.9	Resistência à fadiga	85
4.10	Adesividade entre betume-agregado	87
4.11	Determinação da percentagem real de betume.....	88
4.12	Determinação do teor residual de água	88
5	CONCLUSÕES.....	91
5.1	Considerações finais.....	91
5.2	Trabalhos futuros.....	93
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 – Alguns dos materiais utilizados na realização da mistura betuminosa convencional e na mistura betuminosa com betume-espuma	27
Figura 3.2 – Colheita do betume CEPESA 50/70 usado na realização das misturas.....	28
Figura 3.3 – Silos para armazenamento de agregados em laboratório e tabuleiros com amostra.....	29
Figura 3.4 – Agregado britado granítico	29
Figura 3.5 – Peneiração dos agregados para estudo da granulometria.....	30
Figura 3.6 – Exemplares dos peneiros utilizados na peneiração dos agregados	30
Figura 3.7 – Filer utilizado na realização das misturas betuminosas em laboratório	31
Figura 3.8 – Aditivo <i>TEGO® Addibit FS 725 A</i> da <i>Evonik Industries AG</i>	32
Figura 3.9 – Tubagem por onde escoo o betume nas centrais betuminosas	33
Figura 3.10 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio de Anel & Bola	34
Figura 3.11 – Equipamento e utensílios utilizados na determinação da viscosidade	34
Figura 3.12 – Equipamento e instrumentos para a realização do ensaio de penetração..	35
Figura 3.13 – Equipamento utilizado no ensaio de reologia ao betume.....	36
Figura 3.14 – Fases da realização da mistura betuminosa.....	38
Figura 3.15 – Utilização do equipamento que produz betume-espuma na realização de misturas betuminosas	38
Figura 3.16 – Picnómetro, com mistura betuminosa dentro, na mesa vibratória e submetido a vácuo.....	39
Figura 3.17 – Picnómetro, com mistura betuminosa dentro, em banho de água.....	39
Figura 3.18 – Amostra de mistura realizadas com betume espuma e 2% de água.....	40
Figura 3.19 – Amostra de mistura realizadas com betume espuma e 3% de água.....	40
Figura 3.20 – Moldes, recipientes e espátula que servem de auxílio para realização de provetes	41
Figura 3.21 – Compactador de provetes Marshall.....	41
Figura 3.22 – Conjunto de 3 provetes por cada mistura realizada (5 percentagens diferentes de betume).....	41

Figura 3.23 – Moldes com mistura betuminosa realizada com betume-espuma	42
Figura 3.24 – Pesagem de provetes (fora de água)	43
Figura 3.25 – Provetes cobertos com <i>parafilm</i>	43
Figura 3.26 – Medição da altura e diâmetro dos provetes	44
Figura 3.27 – Prensa Marshall e estabilómetro	46
Figura 3.28 – Estabilómetro e provetes Marshall em banho de água	46
Figura 3.29 - Proвете Marshall preparado a ser ensaiado	46
Figura 3.30 – Gráficos auxiliares para determinação da percentagem “ótima” de betume	48
Figura 3.31 – Provetes de sensibilidade à água	50
Figura 3.32 – Provetes divididos em conjuntos a serem submetidos à água e ar	50
Figura 3.33 – Conjuntos de provetes que serão submetidos ao ar e à água	51
Figura 3.34 – Câmaras de temperatura controlada usadas neste ensaio	51
Figura 3.35 – Prensa Marshall, dotada de um sistema de aplicação de carga com bandas de carga, para ensaio à resistência conservada em tração indireta	52
Figura 3.36 – Compactador de impacto	53
Figura 3.37 – LVDT utilizado para analisar a compactação dos provetes consoante o número de pancadas	53
Figura 3.38 – Provetes de mistura convencional submetidos a ensaio de compactabilidade	54
Figura 3.39 – Provetes de betume-espuma submetidos a ensaio de compactabilidade ..	54
Figura 3.40 – Proвете de compactabilidade a ser submetido ao ensaio de resistência à tração indireta	55
Figura 3.41 – Equipamento que executa o ensaio de pista	55
Figura 3.42 – Lajeta e plataforma de ensaio	56
Figura 3.43 – Equipamento que executa ensaio de flexão em quatro pontos	57
Figura 3.44 - Vigas submetidas a ensaio.....	58
Figura 3.45 – Viga pronta a ser submetida ao ensaio de flexão a quatro pontos	59
Figura 3.46 – Peneiração dos agregados, realização da mistura e separação das partículas de agregado para submissão a ensaio	60

Figura 3.47 – Frascos de ensaio de adesividade e rolamento dos mesmo no início e fim do ensaio	61
Figura 3.48 – Tabuleiros com a mistura betuminosa antes e depois de ensaio	61
Figura 3.49 – Equipamento que executa a espuma de betume	62
Figura 3.50 – Balde e escala de medição da expansão do betume-espuma.....	63
Figura 3.51 – Amostras das misturas com betume-espuma	64
Figura 4.1 – Ensaio de “Anel & Bola”	65
Figura 4.2 – Betume quando atinge temperatura de amolecimento	65
Figura 4.3 – Ensaio de viscosidade	66
Figura 4.4 – Ensaio de reologia	66
Figura 4.5 – Ensaio de penetração ao betume 50/70	67
Figura 4.6 – Amostra de betume com aditivo para submissão a ensaio de penetração...67	
Figura 4.7 – Estudo da granulometria de cada agregado em uso	68
Figura 4.8 – Resultados obtidos após 6 horas	87
Figura 4.9 – Resultados obtidos após 24 horas	88

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 – Curvas granulométricas dos agregados usados	31
Gráfico 3.2 – Representação dos limites do fuso impostos pelo <i>Caderno de Encargos da Estradas de Portugal</i>	37
Gráfico 4.1 – Viscosidade do betume estudado a várias temperaturas	66
Gráfico 4.2 – Fuso granulométrico calculado para mistura AC 14 desgaste (BB)	69
Gráfico 4.3 – Resultados obtidos para uma temperatura de produção de 160°C	71
Gráfico 4.4 – Resultados obtidos para uma temperatura de produção de 170°C	72
Gráfico 4.5 – Resultados obtidos para uma temperatura de produção de 180°C	72
Gráfico 4.6 – Resultados obtidos para uma temperatura de produção de 170°C com betume aditivado	73
Gráfico 4.7 – Comparação da medição da expansão, visualmente e através de cálculo	73
Gráfico 4.8 – Média do assentamento obtido dos provetes ensaiados	79
Gráfico 4.9 – Média da porosidade obtida dos provetes ensaiados	79
Gráfico 4.10 – Resultados da média dos módulos de rigidez das vigas com mistura convencional às temperaturas em estudo	81
Gráfico 4.11 – Resultados da média dos ângulos de fase das vigas com mistura convencional às temperaturas em estudo	82
Gráfico 4.12 – Resultados da média dos módulos de rigidez das vigas com mistura de betume-espuma às temperaturas em estudo	82
Gráfico 4.13 – Resultados da média dos ângulos de fase das vigas com mistura de betume-espuma às temperaturas em estudo	83
Gráfico 4.14 – Resultados da média dos módulos de rigidez das misturas	84
Gráfico 4.15 – Resultados da média dos ângulos de fase das misturas	85
Gráfico 4.16 – Resultados obtidos com ensaio à flexão em quatro pontos com linha de fadiga para cada tipo de mistura	86
Gráfico A.1 – Evolução da baridade aparente no estudo de formulação Marshall	115
Gráfico A.2 – Evolução da porosidade no estudo de formulação Marshall	115

Gráfico A.3 – Evolução da estabilidade Marshall no estudo de formulação Marshall.	116
Gráfico A.4 – Evolução dos vazios na mistura de agregados no estudo de formulação Marshall.....	116
Gráfico A.5 – Evolução da deformação Marshall no estudo de formulação Marshall.	117
Gráfico A.6 – Evolução do grau de saturação em betume no estudo de formulação Marshall.....	117
Gráfico A.7 – Evolução do quociente Marshall no estudo de formulação Marshall	118
Gráfico A.8 – Evolução da baridade máxima teórica no estudo de formulação Marshall.....	118
Gráfico A.9 – Evolução do assentamento dos provetes com mistura convencional a quente no ensaio de compactabilidade.....	141
Gráfico A.10 – Evolução do assentamento dos provetes com mistura semi-temperada com betume-espuma no ensaio de compactabilidade	141
Gráfico A. 11 – Evolução da porosidade dos provetes com mistura convencional a quente no ensaio de compactabilidade.....	145
Gráfico A.12 – Evolução da porosidade dos provetes com mistura semi-temperada com betume-espuma no ensaio de compactabilidade	145
Gráfico A.13 – Profundidade de rodeira dos provetes de mistura convecional a quente com 4,5% de betume	149
Gráfico A.14 – Profundidade de rodeira dos provetes de mistura convecional a quente com 5,0% de betume	149
Gráfico A.15 – Profundidade de rodeira dos provetes de mistura convecional a quente com 5,5% de betume	150
Gráfico A. 16 – Profundidade de rodeira dos provetes de mistura semi-temperada produzida com betume-espuma (utilizando 2% de água)	150

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tecnologias de misturas betuminosas temperadas (Vaitkus <i>et al.</i> , 2009) ..15	15
Tabela 3.1 – Análise granulométrica dos agregados usados nas misturas betuminosas .30	30
Tabela 3.2 – Granulometria do filer utilizado no laboratório.....31	31
Tabela 3.3 – Requisitos dos fusos granulométricos para a mistura AC 14 desgaste (BB).....37	37
Tabela 3.4 – Requisitos impostos no caderno de encargos da EP para a mistura AC 14 desgaste (BB)49	49
Tabela 4.1 – Resultados obtidos através do ensaio de “Anel & Bola”65	65
Tabela 4.2 – Resultados obtidos através do ensaio de Penetração a 25°C67	67
Tabela 4.3 – Fuso granulométrico da mistura AC 14 desgaste (BB)68	68
Tabela 4.4 – Resultados da porosidade por mistura e por método.....70	70
Tabela 4.5 – Resultados da porosidade e das baridades aparente e máxima teórica dos provetes, para sensibilidade à água, realizados com mistura convencional75	75
Tabela 4.6 – Resultados da porosidade e das baridades aparente e máxima teórica dos provetes, para sensibilidade à água, realizados com betume-espuma e 2% de água75	75
Tabela 4.7 – Resultados da porosidade e das baridades aparente e máxima teórica dos provetes, para sensibilidade à água, realizados com betume-espuma e 3% de água75	75
Tabela 4.8 – Resultados da resistência conservada em tração indireta, com grupos de provetes secos (d) e saturados (w), para mistura convencional76	76
Tabela 4.9 – Resultados da resistência conservada em tração indireta, com grupos de provetes secos (d) e saturados (w), para betume-espuma77	77
Tabela 4.10 – Resultados da resistência à tração indireta, por compactação, para provetes da mistura convencional78	78
Tabela 4.11 – Resultados da resistência à tração indireta, por compactação, para provetes de betume-espuma78	78
Tabela 4.12 – Resultados obtidos da análise de dados do ensaio de pista80	80

Tabela 4.13 – Resultados das médias dos módulos de rigidez e ângulos de fase obtidos em 9 vigas a 20°C, com os respetivo desvios-padrão para as vigas de mistura convencional.....	83
Tabela 4.14 – Resultados das médias dos módulos de rigidez e ângulos de fase obtidos em 9 vigas a 20°C, com os respetivo desvios-padrão para as vigas de mistura com betume-espuma.....	84
Tabela 4.15 – Resultados, do ensaio à flexão em quatro pontos, da vida à fadiga para as vigas da mistura convencional	85
Tabela 4.16 – Resultados, do ensaio à flexão em quatro pontos, da vida à fadiga para as vigas da mistura com betume-espuma.....	86
Tabela 4.17 – Parametros da resistência ao fendilhamento por fadiga.....	87
Tabela 4.18 – Determinação da percentagem real de betume.....	88
Tabela 4.19 – Resultados obtidos na mistura betuminosa com 2% água	89
Tabela 4.20 – Resultados obtidos na mistura betuminosa com 3% água	89
Tabela A.1 – Determinação da baridade máxima teórica das misturas para ensaios Marshall.....	107
Tabela A.2 – Baridade aparente através do método A das misturas para ensaios Marshall.....	107
Tabela A.3 – Baridade aparente através do método C das misturas para ensaios Marshall.....	108
Tabela A.4 – Baridade aparente através do método D das misturas para ensaios Marshall.....	108
Tabela A.5 – Resultados do ensaio Marshall	111
Tabela A.6 – Resultados obtidos ao produzir betume-espuma com betume convencional a 160 °C	121
Tabela A.7 – Resultados obtidos ao produzir betume-espuma com betume convencional a 170 °C	121
Tabela A.8 – Resultados obtidos ao produzir betume-espuma com betume convencional a 180 °C	121
Tabela A.9 – Resultados obtidos ao produzir betume-espuma com betume aditivado a 170 °C.....	125

Tabela A.10 – Resultados obtidos através de cálculo com junção dos dados da Tabela A.9	125
Tabela A.11 – Determinação da baridade máxima teórica para provetes de mistura convencional a quente usados no ensaio de sensibilidade à água.....	129
Tabela A.12 – Baridade aparente através do método A para provetes de mistura convencional a quente usados no ensaio de sensibilidade à água.....	129
Tabela A.13 – Baridade aparente através do método C da norma EN 12697-6 para provetes de mistura convencional a quente usados no ensaio de sensibilidade à água	130
Tabela A.14 – Baridade aparente através do método D da norma EN 12697-6 para provetes de mistura convencional a quente usados no ensaio de sensibilidade à água	130
Tabela A.15 – Determinação da baridade máxima teórica para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma	133
Tabela A.16 – Baridade aparente através do método A para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 2% de água.....	133
Tabela A.17 – Baridade aparente através do método C para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 2% de água.....	133
Tabela A.18 – Baridade aparente através do método D para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 2% de água.....	134
Tabela A.19 – Baridade aparente através do método A para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 3% de água.....	134
Tabela A.20 – Baridade aparente através do método C para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 3% de água.....	134
Tabela A.21 – Baridade aparente através do método C para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 3% de água.....	134
Tabela A.22 – Divisão dos provetes de mistura convencional a quente em conjuntos de baridades e alturas idênticas, a condicionar no ar ou em água	137
Tabela A.23 – Divisão dos provetes de mistura semi-temperada com betume-espuma em conjuntos de baridades e alturas idênticas, a condicionar no ar ou em água	137

Tabela A.24 – Resultados da média dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das vigas com mistura convencional a quente às temperaturas de 0 °C e 10 °C.....	153
Tabela A.25 – Resultados da média dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das vigas com mistura convencional a quente às temperaturas de 20 °C e 30 °C	153
Tabela A.26 – Resultados da média dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das vigas com mistura semi-temperada com betume-espuma às temperaturas de 0 °C e 10 °C.....	154
Tabela A.27 – Resultados da média dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das vigas com mistura semi-temperada com betume-espuma às temperaturas de 20 °C e 30 °C.....	154

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento temático

Hoje em dia, e cada vez mais, existe a preocupação com o impacto das construções realizadas no meio ambiente. Devido a este fator torna-se bastante importante a realização de estudos que sejam sucessiva e progressivamente vantajosos para a diminuição deste fenómeno prejudicial à natureza.

Ultimamente tem-se vindo a sensibilizar a população, a nível global, para certos problemas do meio ambiente. A título de exemplo, as alterações climáticas que se fazem sentir fazem prever um futuro não desejável para as gerações vindouras (Alconada, 2011).

Na produção de misturas betuminosas a quente têm-se desenvolvido novas tecnologias de forma a serem usadas temperaturas mais baixas, quer na produção como na aplicação. Isto remete para uma diminuição do consumo de combustíveis e, por sua vez, uma redução na emissão de gases de efeito de estufa (GEE) (Ferreira, 2009).

Estes gases poluentes têm sido causa de muitos problemas, um dos quais é o dióxido de carbono (CO₂), produzido sempre que tem lugar uma combustão. Por exemplo, são consumidas grandes quantidades de combustível quando se utilizam os queimadores dos tambores-secadores dos agregados nas centrais betuminosas (Alconada, 2011, Smart, 2009).

Como é conhecido, tem-se abordado esta problemática com maior cuidado e estímulo, o que resulta no interesse em novas tecnologias que diminuam os consumos de energia na produção, aplicação, manutenção e reciclagem. No campo das infraestruturas de transporte, as misturas betuminosas semi-temperadas e temperadas têm ganho um papel fundamental, pois estão a ser, cada vez mais, alvo de estudo como solução às misturas betuminosas quentes.

Com o dilema do aquecimento global “em mãos”, foi implementado o Protocolo de Quioto em 1997. Este protocolo foi homologado por vários países a nível mundial e tem sido um grande impulsionador para atividades que contribuem para a redução da emissão de gases. Assim, nestes últimos anos a preocupação com o meio ambiente tem sido cada vez mais evidente (Motta, 2011).

No caso de se verificarem reduções nas emissões, deverá ser possível que centrais de produção de misturas betuminosas se possam situar em áreas urbanas sem haver restrições a nível ambiental, ou então com a adoção de apenas algumas limitações.

Como referido em Vaitkus *et al.* (2009) e Vaitkus *et al.* (2010), podem-se enumerar os vários tipos de misturas betuminosas da seguinte forma:

- Misturas Betuminosas Frias: produzidas à temperatura ambiente utilizando emulsões betuminosas e betumes-espuma;
- Misturas Betuminosas Semi-Temperadas: produzidas a temperaturas que se situam abaixo de da temperatura de vaporização da água, ou seja, abaixo dos 100°C;
- Misturas Betuminosas Temperadas: produzidas a temperaturas entre os 120°C e os 140°C;
- Misturas Betuminosas Quentes: produzidas a temperaturas entre os 150°C e os 200°C, dependendo do ligante a usar.

Em Ferreira (2009) é mencionado que a produção de misturas betuminosas temperadas trouxe alguns benefícios, comparativamente com as misturas betuminosas a quente. Daqui diz-se que foi possibilitado o transporte de misturas com uma distância maior, um alargamento da época de pavimentação, permitindo a sua aplicação a temperaturas atmosféricas mais baixas e uma redução do tempo de construção que, conseqüentemente, leva a uma diminuição do congestionamento de tráfego. Adicionalmente, existem casos relatados que apontam para um aumento da produtividade no momento da colocação destas misturas em obra face às misturas convencionais a quente, pois existe menos emissão de gases tóxicos enquanto os trabalhadores executam este momento de obra (D'Angelo *et al.*, 2008, Ferreira, 2009).

Os primeiros pavimentos com misturas betuminosas temperadas, de que há conhecimento, foram construídos na Europa. Este “arranque” foi realizado pela Alemanha e Noruega, a partir de 1995, onde foram usadas tecnologias diferentes. Posteriormente, em 2002, nos Estados Unidos da América, também foi aplicado este conceito de misturas produzidas a temperaturas mais baixas (Prowel e Hurley, 2007).

Em 2007, através da FHWA (*Federal Highway Administration*), em conjunto com a AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) e a NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*), os Estados Unidos realizaram uma *Scanning Tour* à Europa. Esta pesquisa teve como finalidade obter informações adicionais (e mais rigorosas) sobre as tecnologias de misturas temperadas, de forma a auxiliar a sua implementação no país. Os principais objetivos eram estudar o desempenho e comportamento a longo prazo destas misturas (D'Angelo *et al.*, 2008, Motta, 2011, Prowel e Hurley, 2007).

Genericamente, estas tecnologias referem-se à produção de misturas betuminosas temperadas, que poderão ser desenvolvidas para todos os tipos de misturas betuminosas, sendo elas densas, semidensas, contínuas ou descontínuas, aplicadas em diferentes tipos de espessuras, em zonas climáticas distintas e para vários níveis de tráfego (Ferreira, 2009).

Globalmente, existem quatro tecnologias de misturas temperadas. A partir de Vaitkus *et al.* (2009) e EAPA (2010), estas tecnologias são enumeradas da seguinte forma:

- Formação de betume-espuma através de aspersão de água no betume (ainda quente) ou através de agregados molhados misturando-os no betume.
- Formação de betume-espuma provocada pela injeção de zeólitos (artificiais ou naturais) durante o processo de mistura.
- Injeção de aditivos orgânicos juntamente com os agregados (redução da viscosidade do betume).
- Injeção de aditivos químicos no ligante (surfactante ou redução da viscosidade do betume).

Atrás destas tendências, foi na França que se desenvolveu outro tipo de tecnologia onde a redução de temperatura era ainda maior, da ordem de 50°C ou mais, isto é, com as misturas preparadas e aplicadas abaixo de 100°C. Neste caso foram obtidas as chamadas misturas betuminosas semi-temperadas (em inglês, *Half-Warm Mixes Asphalt*) (Motta, 2011).

Com estes estímulos tornou-se interessante e motivador avançar com estudos que induzissem a produção de misturas betuminosas ainda mais “ecológicas” e económicas. Os países desenvolvidos cada vez mais investigam os benefícios da produção de misturas betuminosas a temperaturas mais baixas, pois estas têm mostrado bons resultados a nível de desempenho. Contudo, para estes resultados serem viabilizados, têm de ser sempre comprovados em laboratório. Hoje em dia existem no mercado diversas soluções técnicas muito completas e ao alcance de todos que permitem atingir este objetivo (Ferreira, 2009).

A temperatura é o parâmetro mais importante que se tem de regular no fabrico de misturas para pavimentos. É perceptível que quanto maior for o consumo de combustível (para atingir a temperatura desejada), as emissões de gases para a atmosfera também vão ser maiores. Como consequência deste consumo, analisa-se a redução das temperaturas, das novas misturas em estudo, na produção e colocação (momento da compactação) (Alconada, 2011).

Ferreira (2009) refere que a fase que mais energia consome é a “produção” dos materiais constituintes dos pavimentos rodoviários, isto é, os seus agregados, betumes e fileres, como também a própria produção das misturas betuminosas. Isto vai de acordo com Park e Seo (2003), que referem que a carga ambiental das várias fases de uma construção rodoviária (produção, construção, manutenção/reabilitação e demolição/reciclagem) pode ser estimada com base no consumo de energia despendido em cada uma delas.

Um outro argumento de grande relevância é usado a favor das misturas betuminosas temperadas: a redução do combustível gasto no aquecimento dos agregados nos queimadores poderá chegar aos 35%. No que respeita às condições em obra, este tipo de misturas permite

uma trabalhabilidade adequada durante a aplicação e compactação. Isto acontece se for possível garantir as densidades desejadas mesmo que sejam utilizadas temperaturas mais baixas (Ferreira, 2009).

Tal como mencionado antes (Ferreira, 2009), é um requisito essencial comprovar que o desempenho mecânico das misturas betuminosas temperadas é idêntico ao mesmo provado nas misturas betuminosas fabricadas de forma convencional a quente. Isto prende-se com a necessidade destas misturas serem aceites nos mercados nacional e internacional, mas para que isso aconteça, e respeitando os requisitos pedidos, não deverão ocorrer custos adicionais significativos.

1.2 Objetivos e fases do trabalho

Neste estudo será focado na formação de betume-espuma por injeção de água, visto ser objeto de interesse o uso desta tecnologia. Contudo, o que se pretende é a redução da temperatura de produção com esta tecnologia, ou seja, a mistura betuminosa deve ser produzida a temperaturas que não devem ser muito superiores a 100°C, para que se perspetive que a curto prazo seja possível produzir uma mistura betuminosa semi-temperada.

Conforme anteriormente dito, é essencial caracterizar a mistura de forma a comprovar a sua viabilidade. Este trabalho propõe a análise comparativa do desempenho mecânico de uma mistura betuminosa produzida a temperaturas mais baixas (mistura betuminosa semi-temperada) com uma outra produzida a temperaturas convencionais (mistura betuminosa a quente), em termos das suas propriedades volumétricas, coesão (sensibilidade à água), resistência à deformação permanente, módulo de rigidez e vida à fadiga.

De modo geral, este estudo pretende contribuir para um entendimento mais esclarecedor deste novo tipo de tecnologias de pavimentação. Particularmente deve ser alvo de estudo uma técnica praticada com betume-espuma, apresentando algumas das suas características e potenciais benefícios ambientais e económicos.

1.3 Organização da dissertação

Em seguida será descrita a organização do trabalho efetuado, tendo em conta a realização dos objetivos propostos. Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos com a seguinte descrição em cada um.

Neste primeiro capítulo é feita uma introdução à dissertação, onde se refere enquadramento do tema escolhido e objeto de tratamento e estudo, os objetivos que se pretendem alcançar com a

investigação a realizar, bem como as fases de trabalho a efetuar para alcançá-los. Por último, neste capítulo é descrita a forma como a dissertação se encontra organizada.

No segundo capítulo é referida a influência do uso das temperaturas elevadas nos pavimentos e as preocupações que outrora foram tomadas na realização e compactação das misturas no pavimento. Também são referidos, sumariamente, estudos realizados por outros autores e algumas conclusões a que estes chegaram, dados importantes que foram tomados em consideração para a realização dos trabalhos posteriores desta dissertação. Ainda neste capítulo são referidas algumas das vantagens e limitações que foram verificadas em misturas semi-temperadas, tal como em misturas que utilizam betume-espuma.

O terceiro capítulo explicita os materiais usados na realização das misturas, tal como os métodos a que se recorreu para isso. No subcapítulo de materiais é descrito em sumário as características de cada um deles e no subcapítulo de métodos aplicou-se a mesma lógica, isto é, uma curta descrição dos ensaios e metodologias usadas em laboratório visto serem normalizados e muito conhecidos na área.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos nos ensaios e experiências realizadas em laboratório. São apontadas as características dos materiais tendo em conta os resultados obtidos através dos ensaios referidos no capítulo anterior.

No quinto, e último capítulo, apresentam-se as conclusões finais onde é feito um apanhado geral sobre o trabalho realizado, bem como são comentados os resultados que foram obtidos comparando as misturas entre si. Neste capítulo são também referidas as considerações a ter em atenção para trabalhos futuros a serem desenvolvidos, tornando este trabalho um ponto de partida para novas experiências.

2 REVISÃO DO ESTADO DE ARTE

2.1 Introdução

Conforme as temperaturas utilizadas na produção das misturas betuminosas, estas podem-se classificar da seguinte forma: misturas a quente, temperadas, semi-temperadas e a frio. Estes quatro grupos têm sido referidos por vários autores, de forma que ficaram assim estabelecidas as suas denominações (GE, 2007, Motta, 2011, Vaitkus *et al.*, 2009).

As misturas a quente são preparadas a partir do aquecimento dos agregados e do betume, sendo a produção executada em níveis elevados de temperatura, da ordem de 150 a 180°C (Bernucci *et al.*, 2008).

As misturas a quente são o tipo mais utilizado na pavimentação, garantindo boa resistência e durabilidade. Estas podem ser produzidas com diversos tipos de granulometria e de betume, para os diferentes níveis de tráfego (Bernucci *et al.*, 2008, Motta, 2011).

As misturas semi-temperadas e temperadas são preparadas com temperaturas mais reduzidas (comparando com as misturas a quente). Esta utilização de temperaturas mais baixas dá-se através do aquecimento parcial dos agregados e do uso de betume-espuma ou aditivos, dependendo do tipo de tecnologia que se deseja. A diferença entre as misturas temperadas e semi-temperadas está na sua temperatura final após a produção, onde abaixo de 100°C (temperatura de vaporização da água) a mistura é considerada semi-temperada e acima é dita temperada (D'Angelo *et al.*, 2008, Jenkins *et al.*, 2007, Prowel e Hurley, 2007).

Finalizando, Bernucci *et al.* (2008) dizem que as misturas a frio são produzidas a temperaturas ambiente com emulsões betuminosas, sem aquecimento dos agregados. Estas misturas são habitualmente aplicadas como revestimentos de pavimentos de baixo ou médio volume de tráfego, pois admite-se que não são estruturalmente tão resistentes quanto as misturas a quente, para poderem ser utilizadas em camadas de revestimento de vias de tráfego elevado (Bernucci *et al.*, 2008, Newcomb, 2006).

2.2 Misturas betuminosas produzidas a quente e a frio

2.2.1 Misturas betuminosas produzidas a quente

Em Portugal, o termo mistura betuminosa a quente aplica-se a grande parte das misturas betuminosas utilizadas em obras de pavimentação, desde as argamassas betuminosas,

fabricadas apenas com agregados finos, filer e betume, até aos macadames betuminosos, nos quais os agregados grossos têm um papel preponderante no comportamento da mistura (Jiménez, 2010).

Misturas betuminosas do grupo do betão betuminoso

A grande maioria das misturas betuminosas a quente aplicadas atualmente em Portugal é englobada na designação Betão Betuminoso (*Asphalt Concrete*) (Jiménez, 2010).

- Macadame Betuminoso (MB) – Base e Regularização;
 - Fabricado com agregados relativamente grossos de granulometria contínua.
- Mistura Betuminosa de Alto Módulo (MAM) – Base, Regularização e Reperfilamento;
 - Devem ser fabricadas com conteúdos de ligante relativamente elevados para evitar problemas de fragilidade. Quanto à porosidade, podem-se admitir valores inferiores ao limite mínimo admissível para as misturas tradicionais, uma vez que não é expectável que a mistura tenha problemas de estabilidade.
- Semi-penetração Betuminosa – Base e Regularização
- Mistura Betuminosa Densa (MBD) – Regularização
- Argamassa Betuminosa (AB) – Regularização e Desgaste
- Betão Betuminoso (BB) – Regularização e Desgaste
 - Mistura betuminosa a quente de elevada qualidade e perfeitamente controlada, constituída por betume asfáltico e agregados de boa qualidade bem graduados, que se compacta perfeitamente até obter um material uniforme e com a baridade pretendida.
- Betão Betuminoso Rugoso (BBR) – Regularização e Desgaste
- Microbetão Betuminoso Rugoso (MBBR) – Regularização e Desgaste
 - Os betões betuminosos rugosos proporcionam camadas de desgaste com uma excelente macrotextura, melhorando a segurança da circulação com chuva e com pavimento molhado, reduzindo também o ruído.

Misturas betuminosas do grupo do betão betuminoso drenante

Estas misturas são aconselhadas para estradas em zonas onde a ocorrência de chuva e a formação de neve sejam praticamente inexistentes, com acessos pavimentados e destinados a tráfegos elevados. Deve ainda verificar-se um regime de pluviosidade constante, facilidade na limpeza das estradas e prever-se sistemas específicos de captação e eliminação de águas infiltradas através do pavimento. Daí não se poder aplicar este tipo de misturas sobre tabuleiros de obras de artes que não estejam devidamente preparados (Jiménez, 2010).

Com isto, conclui-se que este tipo de misturas é indicado para eliminar ou reduzir os problemas de aquaplanagem dos veículos que circulam em tempo de chuva, e de igual forma possibilitam

a redução do ruído de rolamento. Em contrapartida, estas misturas apresentam uma menor resistência aos efeitos abrasivos do tráfego, e podem colmatar-se quando aplicadas em zonas onde não chove com frequência e se acumule sujidade (Jiménez, 2010).

A nível nacional, estas misturas são vulgarmente aplicadas numa espessura constante de 4 cm, na camada de desgaste (Jiménez, 2010).

Misturas betuminosas com betume modificado com borracha

A partir da trituração de pneus usados, ou fora de uso, obtém-se borracha moída, que com a sua adição ao betume modifica o comportamento deste. Resultam deste processo betumes modificados melhorados e de alta viscosidade, cujas propriedades podem ainda ser otimizadas por meio da utilização de aditivos (Jiménez, 2010).

Estes tipos de betumes aplicam-se em misturas betuminosas a quente, conduzindo a que estas fiquem com características reológicas e funcionais melhoradas, com maior resistência ao envelhecimento, às deformações permanentes e ao fendilhamento por fadiga, e ainda permitem uma redução do ruído de rolamento. Em Portugal, as misturas com betumes modificados com borracha têm sido aplicadas em camadas de desgaste e, em alguns casos, em camadas subjacentes a estas (Jiménez, 2010).

Segundo Jiménez (2010), existem três famílias de betumes modificados com borracha: os betumes de alta percentagem de borracha, os de média percentagem de borracha, e os betumes denominados como de baixa percentagem de borracha.

2.2.2 Misturas betuminosas produzidas a frio

Estas misturas resultam da combinação de um agregado com uma emulsão betuminosa, permitindo, à temperatura ambiente, o seu manuseamento, aplicação e respetiva compactação, sendo armazenáveis na maioria dos casos (Jiménez, 2010).

Os materiais de pavimentos de misturas a frio são definidos utilizando agregados frios e ligante. Ao eliminar a necessidade de aquecer os grandes volumes de agregados criam-se poupanças substanciais, quer a nível financeiro quer a nível ambiental, comparativamente com o que é conseguido nas tradicionais misturas a quente. Além disso, como o funcionamento do material não está relacionado com a temperatura da mistura, as misturas a frio são facilmente transportáveis e são ideais para uso na construção e manutenção de estradas rurais, eliminando a necessidade de centrais portáteis de misturas a quente (Doyle *et al.*, 2013).

A reciclagem a frio tem vindo a ganhar popularidade na manutenção, reabilitação e reforço dos pavimentos. Três tipos de materiais, incluindo emulsão betuminosa, betume-espuma e cimento, são geralmente escolhidos como ligantes para reciclagem a frio nas redes rodoviárias. Dos pontos de vista económico e ecológico, a reciclagem a frio é considerada como benéfica para a preservação de pavimentos. Contudo, o desenvolvimento da resistência à fadiga e das leis associadas ao deslocamento e à fissuração dos materiais não tem sido bem documentada devido à complexidade das várias fases dos materiais compósitos, o que inclui asfalto, ligante, água, material reciclado (*Reclaimed Asphalt Pavement*), agregado virgem (no caso de ser necessário) e pó mineral (Jenkins *et al.*, 2007, Yan *et al.*, 2010).

Agregado britado de granulometria extensa tratado com emulsão

Uma emulsão betuminosa é uma dispersão do betume em água, na qual a fase contínua é a água e a descontínua é constituída por pequenas partículas de betume (Jiménez, 2010).

As partículas de betume estão envolvidas por uma película de emulsionante, que baixa a tensão interfacial entre os constituintes do betume (asfaltenos, saturados, aromáticos e resinas) e as moléculas da água, tornando a dispersão estável e melhorando a adesividade ao agregado mineral (Probigalp, 2013).

As moléculas de emulsionante têm uma parte apolar que se fixa às partículas de betume, ficando a parte polar das mesmas em contacto com a água, ionizando-se e carregando eletricamente a superfície das partículas de betume. Estas, por serem do mesmo sinal, originam forças electrostáticas de repulsão que as mantêm dispersas, impedindo a sua aglomeração (Probigalp, 2013).

O Agregado Britado de Granulometria Extensa Tratado com Emulsão (ABGETE) é uma mistura homogénea de agregados, emulsão betuminosa, água e, ocasionalmente, aditivos, cujo fabrico e colocação em obra são realizados à temperatura ambiente (Jiménez, 2010).

Esta mistura além de constituir uma solução para camada de base e ligação de pavimentos novos, pode funcionar como camada de retardamento de propagação de fissuras em situações de reabilitação/conservação de pavimentos (EP, 2011).

Mistura betuminosa aberta a frio

A mistura betuminosa aberta a frio é uma mistura constituída por agregados predominantemente grossos (cuja granulometria varia em função da espessura da camada a executar), emulsão betuminosa e eventuais aditivos (Jiménez, 2010).

Esta mistura poderá ser utilizada em camadas de desgaste de estradas com valores de tráfego reduzidos. Pode ser armazenada durante algum tempo antes do seu espalhamento e compactação à temperatura ambiente. Esta mistura permite uma melhor trabalhabilidade, mesmo em condições mais desfavoráveis, e bons desempenhos quanto à adaptabilidade a comportamentos diferenciais da plataforma de apoio (EP, 2011).

2.3 Técnicas de produção de misturas betuminosas a temperaturas temperadas e semi-temperadas

Hoje em dia, a produção de misturas betuminosas temperadas e semi-temperadas é realizada através de espuma de betume ou da introdução e aditivos orgânicos ou sintéticos, quer durante o processo de mistura quer diretamente no betume. Geralmente, de forma combinada, com estes elementos diminui-se a temperatura dos agregados para que resulte numa produção a temperaturas reduzidas, sendo que os agregados são o constituinte da mistura com maior percentagem (cerca de 95%). É de verificar que a diminuição da temperatura do betume também é de interesse, pois contribui para o menor envelhecimento/endurecimento do mesmo (Motta, 2011).

Mais à frente serão detalhadas uma série de técnicas e produtos usados nos últimos anos na produção de misturas temperadas e semi-temperadas (Motta, 2011).

2.3.1 Betume-espuma

A adição de uma pequena quantidade de água ao betume quente é suficiente para a formação de espuma de betume, fazendo com que exista um grupo de tecnologias de misturas temperadas e semi-temperadas que recorrem a esta técnica. Segundo Chowdhury e Button (2008), a primeira tentativa de realização de betume-espuma ocorreu em 1956 na *Iowa State University*, Estados Unidos. O objetivo desta técnica seria incitar a utilização de betume-espuma como ligante, injetando água através de vaporização, sendo que a partir desse momento, esta técnica, passou a ser utilizada em muitos países. Em 1968, de modo a ficar um processo mais prático, a *Mobil Oil Australia* modificou a técnica original, passando a injetar água fria ao invés de vapor. Posteriormente, em 1977, foi publicado um manual sobre metodologias de pavimentos de misturas betuminosas produzidas com emulsão betuminosa, estas desenvolvidas pela *Chevron* no início da década de 70 (Motta, 2011, Zaumanis, 2010).

De forma simplificada, a quantidade de água usada (cerca de 2% sobre a massa do betume) na presença de betume quente transforma-se em vapor. Conforme se dá uma rápida expansão da água (de líquido em vapor) são criadas umas bolhas de filme de betume, que se encontram

preenchidas com vapor de água, designadas de betume-espuma. Posto isto, a viscosidade do betume é reduzida, possibilitando o recobrimento dos agregados a temperatura mais baixas (Bower *et al.*, 2012, Croteau e Tessier, 2008, Ferreira, 2009).

Na década de 90, começaram a surgir tecnologias de misturas temperadas que se valiam da realização de betume-espuma de forma a realizar misturas com temperaturas baixas. Neste processo, o betume quente em contato com a água (à temperatura ambiente) faz com que se torne vapor e expanda significativamente (Prowel e Hurley, 2007).

Devido a este facto, limitou-se a temperatura de 100°C para a designação entre as misturas temperadas e semi-temperadas, sendo este o ponto de vaporização da água (Motta, 2011, PS e NAPA, 2013).

As tecnologias que se fazem valer deste processo realizam a introdução da água, no momento da produção, por injeção direta, usando agregados húmidos ou zeólitos. Com isto, dá-se a expansão do betume resultando numa diminuição da viscosidade da mistura, como referido anteriormente (Motta, 2011, Prowel e Hurley, 2007).

Para viabilizar a utilização das técnicas que produzem misturas temperadas e semi-temperadas por betume-espuma pode ser necessário realizar alterações nas instalações das centrais, por exemplo com a instalação de equipamentos para a injeção de água e câmaras de expansão, levando assim a um certo investimento inicial.

Em função do tipo de tecnologia utilizada, torna-se possível reduzir a temperatura de produção das misturas em cerca de 40 a 50°C (Motta, 2011).

De forma a caracterizar o betume-espuma, apresentam-se os seguintes parâmetros: o coeficiente de expansão e o tempo de meia-vida.

O coeficiente de expansão é calculado a partir da relação entre o volume máximo da espuma e o volume inicial do betume que lhe deu origem. Daqui podem-se retirar algumas conclusões acerca da viscosidade que é apresentada pela espuma. O tempo de meia-vida corresponde ao intervalo de tempo que ocorre a partir do instante em que a espuma atinge o seu volume máximo até ao momento em que atinge metade desse volume. É, também, um indicador do tempo disponível para proceder à mistura dos agregados com a espuma (Teixeira, 2006).

Estes dois parâmetros estão diretamente relacionado com a percentagem de água usada na produção da espuma. Isto é, quanto maior a percentagem de água, maior o valor do coeficiente de expansão e menor o tempo de meia-vida do betume-espuma. Pode-se concluir que estes dois

parâmetros estão inversamente relacionados (considerando a percentagem de água como variável independente) (Teixeira, 2006).

Com isto, Teixeira (2006) concluiu que não é fácil obter a otimização de ambos os parâmetros, pois para obter um coeficiente de expansão maior a percentagem de água é uma, mas para ter uma espuma com maior tempo de meia-vida a percentagem de água é inferior. Tendo em vista maximizar ambos os parâmetros, encontra-se aqui uma dificuldade, pois é necessário dar maior importância a um deles (necessidade de otimizar a quantidade de água, mas com alguma subjetividade no procedimento).

Entre alguns exemplos de técnicas que recorrem ao betume-espuma, descritas posteriormente, têm-se: *LEA*[®] e *LT Asphalt*[®] para misturas semi-temperadas; *Advera*[®] *WMA*, *AQUABlack*[®] *Warm Mix Asphalt*, *Aspha-Min*[®], *Double Barrel*[®] *Green*, *LEA B*[®], *Ultrafoam GX2*[®], *WAM-Foam*[®] e *WMA Terex*[®] para misturas temperadas (Motta, 2011, Vaitkus *et al.*, 2009).

2.3.2 Aditivos orgânicos

Um outro grupo de tecnologias de misturas temperadas conta com a introdução de aditivos orgânicos/ceras para que haja redução da viscosidade do betume. Ao serem submetidos a temperaturas acima de seu ponto de amolecimento, estes aditivos interferem nas propriedades do ligante, fazendo a diminuição da viscosidade. A escolha do tipo e da taxa de aditivo orgânico para se produzir uma mistura temperada deve ser feita de modo cuidadoso, com vista à temperatura na qual ocorre o ponto de amolecimento destes produtos e à temperatura esperada na vida de serviço do pavimento, a fim de reduzir o risco de deformação permanente e também minimizar o potencial de fendilhamento por baixas temperaturas (Motta, 2011, Prowel e Hurley, 2007).

Estes aditivos podem ser aplicados antecipadamente no betume ou em simultâneo com este durante o momento da produção, dando origem a uma redução de temperaturas na ordem dos 30 a 40°C. Com o arrefecimento da mistura betuminosa, estes elementos cristalizam-se de modo disperso no betume, aumentando a rigidez deste e, por consequência, da mistura como um todo (Motta, 2011).

Entre alguns exemplos de tecnologias de aditivos orgânicos têm-se: *Asphaltan B*[®], *Licomont BS 100*[®] e *Sasobit*[®] para misturas temperadas (Motta, 2011, Vaitkus *et al.*, 2009).

2.3.3 Aditivos sintéticos

Para a produção de misturas temperadas e semi-temperadas existe, também, um outro grupo de tecnologias. Este recorre à introdução de aditivos sintéticos no betume ou numa emulsão com

elevado teor de betume. Estes aditivos atuam na ligação do agregado com o betume, auxiliam no processo de recobrimento e, ainda, podem ser otimizadores de adesividade (Motta, 2011, Prowel e Hurley, 2007, PS e NAPA, 2013).

As propriedades do betume não se alteram na presença destes aditivos, ou seja, não existem variações na consistência do betume nem em resultados de ensaios de viscosidades, penetração e ponto de amolecimentos (anel e bola). Com isto, foram realizados ensaios de viscosidade a betumes com e sem aditivos (no caso, *Revix*[®]) e verificou-se que não existiram mudanças no módulo de corte, mesmo com diferentes níveis de temperatura (Motta, 2011).

Em geral, não se têm investimentos iniciais devido à simplicidade na produção de misturas com estas técnicas, pois podem ser viabilizadas muitas vezes sem a necessidade de alterações nas máquinas da central. Contudo deve-se considerar que haverá gastos contínuos com a compra dos aditivos (Motta, 2011).

Entre alguns exemplos de tecnologias com aditivos sintéticos têm-se: *Cecabase RT*[®], *Evotherm*[®], *QPR*[®] *QualiTherm*, *Rediset*[™] *WMX*, *Revix*[™] para misturas temperadas (Motta, 2011, Vaitkus *et al.*, 2009).

Resumindo, em Vaitkus *et al.* (2009) é descrito que globalmente, existem 4 tecnologias de misturas betuminosas temperadas e semi-temperadas existentes e em uso. De seguida, na Tabela 2.1 estão apresentadas essas tecnologias, com o que já existe em mercado seguido da Empresa proprietária da patente.

2.4 Benefícios e limitações das misturas betuminosas temperadas e semi-temperadas

2.4.1 Benefícios

A redução das temperaturas de produção e aplicação das misturas betuminosas proporciona benefícios de sustentabilidade evidentes a curto, médio e longo prazo. São referidos de seguida os principais benefícios registados (Ferreira, 2009).

Menor quantidade de emissões de poluentes atmosféricos

A produção de misturas temperadas e semi-temperadas utiliza temperaturas mais baixas, logo geram menores quantidades de poluentes lançados para o ar. Isto deve-se à menor quantidade de combustível que seria utilizado na produção, como também a diminuição do nível de vapores e fumos gerados durante a mistura nas centrais e na aplicação em campo (Button *et al.*, 2007, Motta, 2011, Prowel e Hurley, 2007).

Tabela 2.1 – Tecnologias de misturas betuminosas temperadas (Vaitkus *et al.*, 2009)

Tecnologia		Marcas	Empresa
Aditivos Orgânicos		Sasobit [®]	Sasol Wax GmbH, Alemanha
		Asphaltan B [®]	Romonta GmbH, Alemanha
		Licomont BS 100 [®]	Clariant, Suíça
Aditivos Químicos		Rediset [®]	Akzo Nobel, Holanda
		Cecabase RT [®]	CECA, França
		Interlow T [®]	Interchimica SRL, Itália
		Evotherm [®]	MeadWestvaco, EUA
		Revix [®] ou Evotherm 3G [®]	MeadWestvaco Mathy-Ergon, EUA
Betume-Espuma	por Injeção de Zeólitos	Aspha-Min [®] (Zeólito sintético)	Aspha-Min GmbH, Alemanha
		Advera WMA Zeolite [®] (Zeólito sintético)	PQ Corporation, EUA
		Zeólito Natural	Vários
	por Injeção de Água	WAM Foam [®]	Shell, UK e Kolo-Veidekke, Noruega
		Terex WMA System [®]	Terex, EUA
		Double-Barrel [®]	Astec Industries, EUA
		LEA [®]	McConnaughay Technologies, USA
		EBE [®]	LEA-CO, França (Mercado Europeu)
		EBT [®]	Fairco, Espanha
		LT Asphalt [®]	EiffageTP, USA
		LEAB [®]	Nynas, Suécia
		Ultrafoam GX [®]	Royal BAM Group, Holanda
			Gencor Industries, EUA

Alguns autores referem que existem resultados obtidos em estudos na Europa que verificam uma queda substancial na emissão de gases poluentes. Os valores descritos são aproximados, mas julgam-se dentro da ordem dos 30 a 40% de CO₂ (relacionado aos GEE) e dióxido de enxofre (SO₂ - chuvas ácidas), 50% de compostos orgânicos voláteis (COVs e associados aos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA's)), 10 a 30% de monóxido de carbono (CO - indicadores de eficácia de queima) e 60 a 70% de óxidos de nitrogénio (NO_x) (D'Angelo *et al.*, 2008, EAPA, 2010, Motta, 2011).

Rühl e Lindemeier (2006) referem que dados do “*Fórum Bitumen*” relacionam as emissões com a temperatura. Aos 180°C são registadas emissões bastante significativas. No entanto, temperaturas abaixo dos 80°C não causam emissões. Mesmo a um limite de 150°C as emissões são de apenas 1 mg/h de poluentes tóxicos.

Existe um leque alargado de gases que são considerados GEE. Contudo para que as reduções dos diferentes gases possam ser contabilizadas e os seus efeitos comparados, foi definida uma equivalência com o CO₂, que permite comentar as emissões de qualquer GEE em termos de toneladas de dióxido de carbono equivalente. Os principais GEE considerados são o CO₂, metano (CH₄), protóxido de azoto (vulgarmente conhecido como óxido nitroso, N₂O), hidrofluorcarbonetos (HFC's), perfluorcarbonetos (PFC's) e hexafluoreto de enxofre (SF₆) (Button *et al.*, 2007, CGEE, 2008, Motta, 2011).

Na França observou-se uma redução de, aproximadamente, 23% de CO₂, 18% de dióxido de azoto (NO₂) e SO₂, e 19% de COVs. Estes dados referem-se às emissões de uma mistura temperada, produzida em central a cerca de 130°C, comparando com uma mistura a quente, produzida a cerca de 160°C (Devivere *et al.*, 2007, Motta, 2011).

Nos EUA foram reportadas grandes emissões de poluentes, particularmente CO e COVs. Estas quantidades elevadas devem-se fundamentalmente à má combustão do queimador, ao contrário do que é visto na Europa onde estes problemas não são mencionados. Isto associa-se à existência de centrais mais pequenas, a que se associa queimadores de menores dimensões e mais fáceis de controlar (Ferreira, 2009, FHWA, 2012, GE, 2007).

Melhoria do ambiente de trabalho na colocação/pavimentação

Como consequência do uso de misturas produzidas a baixas temperaturas (temperadas e semi-temperadas) tem-se benefícios para os trabalhadores da área de pavimentação. Inequivocamente, com esta nova técnica os operários ficam menos expostos às emissões asfálticas. Isto torna-se um fator positivo para a saúde dos trabalhadores como também um “bem-estar” no local de trabalho (Hassan, 2009, Newcomb, 2006, Prowel e Hurley, 2007).

Em Ferreira (2009) é mencionada a existência de informações obtidas na Europa que mostram reduções significativas da exposição aos fumos dos trabalhadores da pavimentação, quando se recorre ao uso de misturas betuminosas temperadas. Estas reduções situam-se entre os 30% e 50% comparativamente às misturas betuminosas a quente. Como resultado desta prática são melhoradas as condições de trabalho dos operários e as condições ambientais a nível global para a sociedade (D'Angelo *et al.*, 2008, EAPA, 2010).

Admite-se que a melhoria do ambiente de trabalho pode ser uma das causas responsáveis por um aumento de produtividade em obra, quando executadas misturas betuminosas de baixa temperatura. Neste sentido, torna-se importante para a indústria criar boas condições de ambiente de trabalho na produção e na aplicação de misturas betuminosas, pois estas favorecem não só os trabalhadores, mas também a qualidade e rentabilidade do trabalho (Ferreira, 2009, Motta, 2011, Newcomb, 2006, Prowel e Hurley, 2007).

Diminuição do consumo energético

Facto já visto anteriormente, a redução da temperatura de produção em central tem como consequência uma redução significativa do consumo de combustíveis (APAO, 2003).

Não só tendo a questão ambiental em vista, pretende-se também obter uma melhor otimização dos recursos naturais. Devido à instabilidade dos preços do petróleo, o sector rodoviário tem sido obrigado a procurar tecnologias inovadoras que possam melhorar a eficiência energética nas operações de pavimentação (Hassan, 2009, Motta, 2011).

Neste contexto, a diminuição do consumo de energia associado às misturas temperadas e semi-temperadas em relação às misturas a quente convencionais, é um aspeto interessante. Devido a uma redução da quantidade de combustível necessário no processo de mistura, a temperatura necessária na produção é mais baixa (Motta, 2011, Newcomb, 2006, Prowel e Hurley, 2007)

Medições efetuadas permitem concluir que aumentos de 1% no teor em água dos agregados aumentam o consumo de combustível em 10%. Os níveis de poupança de combustível dependem de vários fatores, tais como as reduções de temperatura efetivamente praticadas para produzir as misturas, o teor em água dos agregados e as condições de funcionamento da central (Ferreira, 2009, Prowel e Hurley, 2007).

Visto o petróleo, atualmente, ser a principal fonte de energia, existe uma constante busca e receio do esgotamento desta reserva de combustível fóssil (GE, 2007, Hassan, 2009).

A economia de energia na produção de misturas betuminosas semi-temperadas pode ser da ordem dos 35% a 60%, dependendo do processo, do tipo de central e dos materiais utilizados (Motta, 2011).

Menor envelhecimento do betume

Sabe-se que as altas temperaturas têm efeitos negativos sobre os betumes e são capazes de causar alterações reológicas substanciais no ligante (Motta, 2011).

Segundo Motta (2011), como as misturas temperadas e semi-temperadas compõem um tipo de tecnologia de pavimentação ainda recente, as pesquisas relativas ao aumento da resistência à fadiga que ocorreria por diminuição do envelhecimento ainda estão em curso.

Em Ferreira (2009) pode-se verificar um estudo em laboratório com dois tipos de misturas temperadas com aditivos, em comparação com misturas convencionais, tendo observado que a vida de fadiga de ambas, em laboratório, se mostrou igual à da mistura a quente de referência.

Equitativamente, em Silva *et al.* (2009) foram avaliadas três tipos de misturas betuminosas com a inserção de aditivos orgânicos, utilizando ligantes com diferentes penetrações. Em comparação com misturas convencionais verificou-se que o comportamento à fadiga foi semelhante.

Aproveitamento de maiores quantidades de material fresado

Com o uso mais habitual de pavimentos reciclados nos últimos anos, o impacto causado nos recursos naturais na obtenção de agregados virgens tem sido minimizado, tal como o destino dos resíduos provenientes da fresagem de pavimentos (EAPA, 2010, Motta, 2011).

Nos EUA, os pavimentos betuminosos são o produto mais reciclado em todo o país. A reciclagem destes materiais tornou-se num procedimento comum devido ao desenvolvimento de novos métodos de reciclagem, à melhoria dos equipamentos de fresagem e às novas tecnologias de incorporação dos fresados nas misturas betuminosas (Prowel e Hurley, 2007).

Além disso, os aumentos significativos dos preços do asfalto que ocorreram em 2006 e 2008, somados à diminuição das fontes de agregados com qualidade aceitável, também têm sido grandes incentivadores de tal prática (Motta, 2011).

Assim, de forma a favorecer a adição de maiores quantidades de materiais fresados na produção de misturas recicladas é aconselhada a utilização de misturas temperadas e semi-temperadas. Na produção destas misturas, a incorporação do novo ligante, menos envelhecido, pode ajudar no rejuvenescimento do betume contido nos fresados, aumentando a vida de serviço do pavimento (Motta, 2011, Prowel e Hurley, 2007).

No caso de utilização de maiores taxas de material reciclado, diminui-se a quantidade de agregados virgens utilizados, bem como a necessidade de deposição deste material em vazadouros autorizados. Isto traduz poupanças significativas em termos de custos (Ferreira, 2009).

Menor dificuldade de aplicação em épocas ou locais com menores temperaturas

Newcomb (2006) comenta que a utilização de misturas temperadas e semi-temperadas pode ser favorável quando são executadas obras de pavimentação em épocas ou locais de clima muito frio. Já Prowel e Hurley (2007) dizem que existe uma grande preocupação com a compactação devido às consideráveis perdas de temperatura.

Alguns autores mencionaram que, na Alemanha, sob temperaturas ambiente entre -3°C a 4°C, experiências com diferentes tecnologias de misturas temperadas mostraram melhor densidade

do que misturas a quente. Estas experiências de pavimentação foram submetidas ao mesmo número passagens do cilindro compactador (D'Angelo *et al.*, 2008, Motta, 2011).

Maior aptidão para serem transportadas em grandes distâncias

Conforme as misturas temperadas e semi-temperadas são produzidas a temperaturas mais baixas, a sua taxa de arrefecimento é bastante menor em relação a uma mistura a quente. A taxa de arrefecimento é dada pela diferença de temperatura entre a mistura betuminosa e o meio ambiente, logo as misturas temperadas e semi-temperadas possuem menor gradiente térmico. Neste caso consegue-se verificar que estas misturas são mais favoráveis que as aplicações de misturas a quente (Motta, 2011, Newcomb, 2006, Prowel e Hurley, 2007).

Além disso, é proporcionado um panorama social bastante agradável, a possibilidade de abertura ao tráfego mais rápida. Isto devido à boa trabalhabilidade (assegurando que existe capacidade de transporte e aplicação mesmo em distâncias superiores às habitualmente praticadas) e à compactação com menor esforço (Ferreira, 2009, FHWA, 2012).

Motta (2011) menciona um exemplo de aplicação de uma mistura temperada com longo tempo de espera entre a produção e a colocação em campo. Nesta experiência a mistura temperada permaneceu armazenada por 17 horas após a sua produção e ainda pôde ser aplicada e compactada adequadamente a 96°C.

2.4.2 Limitações e obstáculos

Cuidados em Central

Existem alguns cuidados que podem estar associados às misturas temperadas e semi-temperadas, como a humidade restante que possa ficar na mistura, seja esta por secagem parcial dos agregados ou pela introdução de água (como requerem algumas tecnologias), podendo vir a causar um problema de descolamento da película betuminosa (Hassan, 2009, Prowel e Hurley, 2007).

Neste contexto, é necessário determinar o dano por humidade induzida destes materiais, além das propriedades mecânicas, em estudos realizados para misturas temperadas e semi-temperadas (Motta, 2011, Newcomb, 2006).

No caso das técnicas que exigem a injeção de água, geralmente a percentagem necessária não é muito significativa. Como exemplo, Motta (2011) refere que na técnica *WMA Terex*[®] a quantidade de água requerida é de 2% em massa de ligante, o que corresponderia a cerca de 0,1% de água incorporada a uma mistura betuminosa com 5% de betume. Contudo, é importante

que os agregados (de secagem parcial) estejam com o menor teor de humidade possível antes da produção, o que pode ser obtido pela cobertura dos silos, caso haja armazenamento do material. Deste modo, aumenta-se a hipótese dos agregados estarem secos quando forem recobertos pelo betume, pois foi reduzido o teor de humidade dos agregados antes da produção (Prowel e Hurley, 2007).

Compactação

Em pesquisas efetuadas anteriormente, é demonstrado que nas misturas com betume-espuma existe melhoria de várias propriedades do pavimento. Contudo, verifica-se que a estabilidade e a rigidez destas misturas têm obrigado a aumentar os níveis de compactação. Como também tem sido demonstrado que, consoante o aumento da temperatura da compactação da mistura, aumenta a sua densidade, resultando numa alteração das propriedades dos materiais (Jenkins *et al.*, 1999).

Custos

Todas as técnicas com base em misturas temperadas e semi-temperadas envolvem algum custo para serem implementadas, pois os gastos para se produzirem dependem muito do tipo de tecnologia escolhida. Porém, algumas tecnologias exigem gastos contínuos com a compra de aditivos, outras não requerem tais investimentos, pois exigem gastos iniciais mais altos. Este investimento deve ser contrabalançado com a redução do consumo energético que o método proporciona em central, para que se possa adotar uma determinada técnica (Motta, 2011, PS e NAPA, 2013).

Em relação aos custos, como as misturas temperadas e semi-temperadas ainda são um tema relativamente recente, têm-se desenvolvido muitas pesquisas. Newcomb (2006) e Prowel e Hurley (2007) referem que estas pesquisas devem focar-se mais nos seguintes tópicos:

- Características fundamentais, projeto e produção das misturas.
- Quantificação dos benefícios das tecnologias.
- Desempenho a longo prazo.
- Comportamento de misturas recicladas.

Normas

Atualmente ainda não existem normas que regulem estas novas técnicas, o que muitas vezes pode ser um fator inibidor para a sua utilização. No entanto, já se têm orientações de aplicação (publicadas), fornecimento de certificados ou mesmo formação de grupos de pesquisa sobre o assunto, que devem contribuir para o desenvolvimento de normas específicas relacionadas às misturas temperadas e semi-temperadas a curto-prazo (Motta, 2011).

Em 2006, na Alemanha, foi divulgado um boletim sobre a aplicação de algumas técnicas de misturas temperadas, com base em experiências de campo. Neste boletim constam informações como as temperaturas de produção e de compactação em função do tipo de betume usado (D'Angelo *et al.*, 2008, Motta, 2011).

Na França, o Departamento de Estudos Técnicos de Vias e Rodovias, em conjunto com indústrias rodoviárias, passou a emitir certificações às tecnologias de misturas temperadas. Estas certidões eram emitidas após as misturas produzidas serem avaliadas em laboratório e em campo, recomendando aos empreiteiros que utilizassem apenas produtos certificados (D'Angelo *et al.*, 2008).

Em Motta (2011), lê-se que nos EUA, foi instituído um grupo de pesquisas sobre misturas temperadas, designado *Warm Mix Asphalt Technical Working Group*, com a participação de diversas partes envolvidas no setor rodoviário do país. Este grupo teve como objetivos:

- Desenvolver um guia nacional de investigação e implementação das tecnologias de misturas temperadas no país.
- Identificar, rever, validar e desenvolver um manual técnico de misturas temperadas, capaz de fornecer um produto de qualidade, custo e desempenho no mínimo equiparáveis às misturas convencionais.
- Discutir os problemas que envolvem as tecnologias de misturas temperadas e desenvolver soluções.

Neste contexto, e ainda em Motta (2011), o *National Cooperative Highway Research Program* finalizou um projeto denominado *Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt*, com o objetivo de desenvolver uma metodologia de dosagem de misturas temperadas. Este documento é uma espécie de rascunho do que deverá ser adicionado às normas da *American Association of State Highway and Transportation Officials*, sob a denominação de *Special Mixture Design Considerations and Methods for Warm Mix Asphalt*.

2.5 Misturas betuminosas temperadas

2.5.1 Características gerais

As misturas betuminosas temperadas são um tipo de misturas produzidas e aplicadas em obra a temperatura mais baixa que as misturas quentes convencionais e podem utilizar-se em camadas de pavimentos rodoviários com a mesma função das misturas a quente (Alconada, 2011).

Tal como referido antes, segundo Chowdhury e Button (2008), já em 1956 o Professor Ladis Csanyi, da *Iowa State University*, avaliou o potencial do betume-espuma como um ligante para solos, e daí a produção de misturas betuminosas a temperaturas mais baixas não ser um conceito recente. A partir desse momento, as tecnologias de betume-espuma, que permitem a redução das temperaturas de fabrico das misturas betuminosas, têm sido bastante usadas com sucesso em vários países (Ferreira, 2009).

Ainda dentro da história, no início dos anos 70 foram desenvolvidos critérios de dimensionamento e formulação para pavimentos em misturas betuminosas estabilizadas com emulsões pela *Chevron*. Esta empresa publica, em 1977, o “*Bitumuls Mix Manual*”, um manual com informações importantes sobre a metodologia de dimensionamento, formulação e produção de misturas temperadas (Ferreira, 2009).

É na Europa que surgem as primeiras estradas construídas com misturas betuminosas temperadas. Estas datam-se em 1995 na Alemanha, seguindo-se a aplicação deste tipo de tecnologia na Noruega e na Dinamarca (Ferreira, 2009).

2.5.2 Tecnologia Double Barrel® Green

A tecnologia *Double Barrel*® Green aborda a produção de misturas temperadas por formação de betume-espuma, e não se trata de um aditivo, mas sim de um processo (Motta, 2011).

Trata-se de um processo onde uma pequena quantidade de água é adicionada à mistura usando um dispositivo capaz de espumar o betume. Permite reduções de temperaturas de produção na ordem dos 10°C a 30°C, o que será objetivo na produção de misturas betuminosas temperadas. Este processo foi desenvolvido pela *Astec Industries* e consiste na utilização de um dispositivo acoplado ao sistema *Double Barrel*® (Bower *et al.*, 2012, Ferreira, 2009).

As misturas que recorrem ao processo *Double Barrel*® Green têm sido realizadas do mesmo modo que os de misturas convencionais (a quente). Porém, para retratar as condições de campo é necessário que haja a instalação de um dispositivo de formação de espuma em laboratório. As temperaturas de produção devem ser da ordem dos 120°C a 135°C (Motta, 2011, Prowel e Hurley, 2007).

Nas centrais é necessário recorrer à instalação desse mesmo dispositivo, associado ao tambor-secador-misturador com um sistema de válvulas, câmaras de mistura e injetores capazes de aplicar essa pequena quantidade de água, e desta forma espumar o betume (Ferreira, 2009, Motta, 2011, Prowel e Hurley, 2007).

Geralmente não há necessidade de se proceder a alterações na formulação da mistura, mas Prowel e Hurley (2007) sugerem que seja utilizado um dispositivo de produção de espuma em laboratório. Assim serão simuladas, verificadas e validadas as condições duma produção em central (Ferreira, 2009).

2.5.3 Tecnologia WAM-Foam[®]

O processo *WMA-Foam*[®] (*Warm Mix Asphalt Foam*) de produção de misturas betuminosas temperadas, por formação de espuma, resultou de uma parceria entre a *Shell International Petroleum Company Ltd.*, Reino Unido, e a empresa norueguesa *Kolo-Veidekke* (Button *et al.*, 2007, D'Angelo *et al.*, 2008, Ferreira, 2009, Motta, 2011, ShellBitumen, 2011)

Esta técnica é um processo que considera a adição de dois tipos de ligantes betuminosos, sendo um betume de baixa e outro de alta viscosidade (este último, espumado), para produzir um ligante final com uma determinada consistência (D'Angelo *et al.*, 2008, Ferreira, 2009, FHWA, 2012, Prowel e Hurley, 2007).

Inicialmente, o *WAM-Foam*[®] consiste em secar os agregados grossos a temperaturas de cerca de 125°C a 130°C e depois envolve-los com o betume menos viscoso (mais mole). Posteriormente, o betume mais consistente (mais duro) é espumado com água, e entra na mistura juntamente com a fração de filer, fazendo com que a viscosidade deste caia e a produção ocorra a temperaturas entre os 100°C e 120°C. Desta forma, a compactação da mistura com *WAM-Foam*[®] poderá ocorrer em temperaturas na ordem dos 70°C a 110°C (Button *et al.*, 2007, Motta, 2011, ShellBitumen, 2011).

A realização de misturas com a tecnologia *WAM-Foam*[®] exigem a instalação de equipamento adequado para a formação de betume-espuma em laboratório. Contudo, existe a necessidade de se realizarem várias tentativas para se descobrir a temperatura “ótima” para qual o betume de maior viscosidade pode ser espumado de maneira satisfatória e para qual os agregados devem ser aquecidos (temperatura requerida pelo betume menos viscoso) (Motta, 2011, Prowel e Hurley, 2007).

2.5.4 Tecnologia WMA Terex[®]

Dando continuidade às técnicas apresentadas antes, a tecnologia *WMA Terex*[®] trata-se também de produção de misturas temperadas recorrendo à formação de betume-espuma, sendo esta desenvolvida pela empresa norte-americana *Terex* (Motta, 2011).

Com indicação para centrais contínuas, esta técnica requer a instalação de um tanque e uma bomba de água nos equipamentos, e ainda de um compartimento de expansão, ligado a uma

barra pulverizadora de injeção, localizado no interior do tambor-secador. No caso de ser necessário, este sistema permite que a produção da mistura betuminosa passe para o processo convencional através de uma válvula seletora (Bower *et al.*, 2012, Motta, 2011).

Em proporções controladas por um painel de controlo (instalado junto ao tanque de água), a produção de misturas temperadas por esta tecnologia é iniciada pelo bombeamento de água e betume para o compartimento de expansão. É neste compartimento que se dá a expansão do betume, formando o betume-espuma (Motta, 2011).

2.6 Misturas betuminosas semi-temperadas

2.6.1 Características gerais

Uma das principais particularidades deste tipo de misturas é que a sua produção e colocação realiza-se a uma temperatura até 100°C. Em misturas convencionais, são estes os momentos onde se consome mais energia. O menor gasto de energia advém do facto dos agregados grossos não estarem totalmente secos (Alconada, 2011).

Em Jenkins *et al.* (1999) é referido um novo processo na produção de misturas betuminosas semi-temperadas com recurso ao betume-espuma. Este conceito avaliou quais seriam os benefícios de aquecer os agregados a temperaturas similares à temperatura ambiente, mas nunca passando os 100°C, antes de se proceder à mistura com o betume-espuma. Com o betume-espuma é potencializado o recobrimento das partículas, a resistência à tração, a coesão e a resistência à compactação, mostrando-se bastante benéfico nas misturas com material reciclado (Ferreira, 2009).

A humidade que permanece nos agregados grossos é aproveitada para melhorar o modo como se procede à mistura. Fazendo aumentar o volume quando ocorre o aquecimento da mistura, a água facilita o recobrimento dos agregados pelo betume (Alconada, 2011, Voskuilen *et al.*, 2004).

Quando se obtém o betume-espuma, a viscosidade deste fica bastante reduzida permitindo, por sua vez, a facilidade em se proceder ao revestimento dos agregados, mesmo com temperaturas de mistura mais baixas (Ferreira, 2009).

Neste caso, quando se recorre ao auxílio de aditivos, estes são constituídos por ceras parafínicas sintéticas, resinas de hidrocarbonetos, polímeros termoplásticos e inibidores de oxidação químicos. Com isto, a viscosidade do betume fica alterada, baixando mais a temperatura quando se compara com misturas temperadas (Alconada, 2011).

Considerando a manutenção da temperatura abaixo dos 100°C pode-se verificar benefícios ambientais consideráveis, tais como a redução de vapores de betume, compostos orgânicos voláteis e de emissões de GEE (Croteau *et al.*, 2009, Voskuilen *et al.*, 2004).

Para o caso que se pretende estudar, as misturas betuminosas semi-temperadas devem ser produzidas entre os 60°C e os 100°C, através de injeção de água, de forma a obter-se o betume-espuma (Alconada, 2011).

2.6.2 Tecnologia LEA®

Uma das técnicas mais conhecidas chama-se *LEA*® - *Low Energy Asphalt*. O seu método de fabrico tem iniciativa na formação de betume-espuma e pode seguir vários processos (Alconada, 2011, Button *et al.*, 2007):

- São levados para a secagem os agregados grossos e areia e, posteriormente misturados, com toda a quantidade de betume. De seguida, juntam-se os agregados finos (sem secagem), que estando com humidade geram uma espuma. Esta permite que a mistura se dê por volta dos 100°C.
- Apenas são secos os agregados grossos. Segue-se a adição das areias e do betume, gerando uma espuma. Este processo assemelha-se ao anterior.
- Por último, o betume é misturado com todo o agregado (finos e grossos), em que este esteja por secar. Devido à humidade presente, verifica-se a formação da espuma no betume.

No momento da realização da mistura betuminosa deste tipo *LEA*®, em laboratório, é recomendado que os agregados se encontrem a temperaturas de, aproximadamente, 20°C mais baixo do que é sucedido em misturas com temperaturas convencionais (Motta, 2011, Prowel e Hurley, 2007).

Estas misturas podem ser fabricadas nas mesmas centrais de produção que são usadas para as misturas convencionais a quente. Contudo, é necessário que as centrais estejam equipadas com dispositivos para dosagem de água, gestão de humidade e controlo de aquecimento de betume (Alconada, 2011).

A tecnologia *LEA*®, também conhecida como *EBE*® (*Enrobé à Basse Énergie*) ou *EBT*® (*Enrobé à Basse Température*), é utilizada em misturas semi-temperadas e foi desenvolvida na França. Atualmente é comercializada pela empresa francesa *LEA-CO* e pela norte-americana *McConnaughay Technologies* (Button *et al.*, 2007, Motta, 2011).

Em Motta (2011) são referidas algumas particularidades verificadas em experiências de aplicação de *LEA*[®] na França:

- Os equipamentos utilizados na compactação foram os mesmos que são utilizados numa mistura convencional a quente. Porém, verificou-se que a energia despendida na compactação teve de ser ligeiramente maior para obter o nível de compactação pretendido;
- A mistura com o método *LEA*[®] não teve tanta aderência ao camião basculante, revertendo numa necessidade mais baixa em relação ao uso de dissolventes para a limpeza do mesmo;
- Devido a ser uma mistura aplicada em temperaturas abaixo dos 100°C, as propriedades exigidas para a entrega do serviço eram alcançadas mais rápido;
- A aparência superficial, as medidas dos níveis de macrotextura e de resistência à derrapagem da camada realizada eram idênticas à de uma mistura a quente e mostraram-se dentro dos limites exigidos.

A técnica de produção das misturas *LEA*[®] diferencia-se bastante das misturas betuminosas a quente, isto é, existe secagem parcial do agregado e aproveita-se a aptidão do betume formar uma espuma quando se dá o contacto com a água, fazendo com que se expanda e melhore o recobrimento dos agregados. É estimada uma temperatura de 95°C, onde a quantidade de água utilizada tem o efeito de reduzir a viscosidade do betume, dando-lhe uma boa trabalhabilidade. Destaca-se que o betume utilizado é aditivado com agentes que ajudem na formação da espuma, adesividade betume-agregado e trabalhabilidade (Ferreira, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 Materiais utilizados

No caso de pavimentos flexíveis destacam-se como matérias-primas essenciais os solos, os agregados e o betume. Para o caso em estudo, sendo uma mistura para pavimento a nível da camada de desgaste, aplicam-se apenas os agregados e o betume.

De modo a estudar a aplicabilidade de misturas executadas com betume-espuma, realizaram-se ensaios de laboratório para a sua caracterização física e do seu comportamento mecânico. Quanto à mistura de referência (realizada de forma convencional), foi caracterizada segundo as normas habituais.

A mistura betuminosa com betume-espuma será constituída por materiais similares aos da mistura de referência, sendo motivo para uma comparação mais adequada das duas. Ambas têm como objetivo serem utilizadas como camada de desgaste num pavimento rodoviário.

Com a realização dos trabalhos, verificou-se a incapacidade da formação de espuma de betume sem a junção de um aditivo, sendo as últimas experiências já executadas com o mesmo. Para ser formada essa espuma também foram adicionados ar e água pressurizados (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Alguns dos materiais utilizados na realização da mistura betuminosa convencional e na mistura betuminosa com betume-espuma

3.1.1 Ligante

Para a realização das misturas betuminosas, quer a convencional quer a de betume-espuma, foi utilizado um betume, cuja referência é CEPSA 50/70 (Figura 3.2). A sua caracterização foi efetuada através de vários ensaios, tais como a viscosidade dinâmica pelo viscosímetro de *Brookfield*, a penetração a 25°C, a determinação do ponto de amolecimento pelo ensaio de “Anel & Bola” e a determinação do desempenho mecânico através do ensaio de reologia.

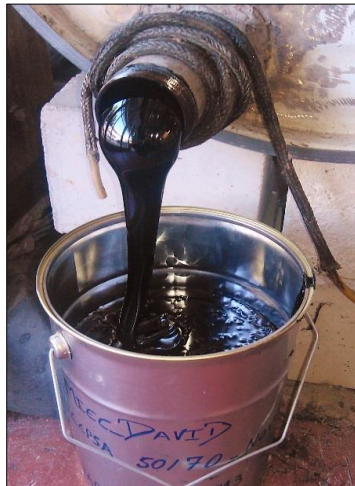


Figura 3.2 – Colheita do betume CEPSA 50/70 usado na realização das misturas

3.1.2 Agregados

De acordo com Silva (2005) e Pereira e Santos (2002), a utilização de agregados é fundamental, tanto nas camadas não ligada como também pela necessidade de integrá-los nas camadas das misturas betuminosas, sendo que ocupam entre 80% a 90% do volume.

Segundo o mesmo autor, os agregados tem como principais objetivos a criação de um esqueleto pétreo que resista aos estragos causadas pelo tráfego, assegurar uma rugosidade superficial suficiente para a circulação dos veículos e um aumento da resistência mecânica da mistura betuminosa, como também, garantir a sua estabilidade e compacidade (Branco *et al.*, 2006, Silva, 2005).

Sobre os agregados utilizados no estudo (Figura 3.3), a sua extração é realizada pela Pedreira Bezerras Lda, com instalações em Airão S. João Baptista no concelho de Guimarães. O agregado é do tipo granodiorítico e é classificado como agregado britado granítico (Figura 3.4) de granulometria média a fina. Apresenta cor cinzenta como também tons azulados, tem textura granular, de grão fino a médio, porfiroide, com alguns megacristais de feldspato. É constituído por plagioclase e quartzo, sendo o feldspato potássico subordinado.



Figura 3.3 – Silos para armazenamento de agregados em laboratório e tabuleiros com amostra



Figura 3.4 – Agregado britado granítico

As frações usadas para as misturas betuminosas em estudo foram AB 0/4, AB 4/6 e AB 6/14, sendo que estão todas em conformidade com a norma NP EN 13043 - Agregados para misturas betuminosas. Essa avaliação foi realizada através de peneiração no equipamento apresentado na Figura 3.5, recorrendo a vários peneiros da série europeia (Figura 3.6).

De seguida, apresenta-se na Tabela 3.1, os dados da granulometria dos agregados utilizados. Os peneiros selecionados são da Série Base + Série 2 e estão em conformidade com o Anexo Nacional da NP EN 13108-1.

De forma a facilitar a comparação das granulometrias dos agregados, o Gráfico 3.1 apresenta as curvas granulométricas das várias frações de agregados.

3.1.3 Filer

A utilização de filer em misturas betuminosas tem como principal objetivo aumentar a compactidade e impermeabilidade da mistura. No caso em estudo, foi utilizado um filer calcário de modo a melhorar a ligação entre o agregado e o betume.



Figura 3.5 – Peneiração dos agregados para estudo da granulometria



Figura 3.6 – Exemplos dos peneiros utilizados na peneiração dos agregados

Tabela 3.1 – Análise granulométrica dos agregados usados nas misturas betuminosas

Peneiros Abertura [mm]	Percentagem Acumulada de Material Passado		
	AB 6/14	AB 4/6	AB 0/4
40,0	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0
20,0	100,0	100,0	100,0
16,0	99,0	100,0	100,0
14,0	92,0	100,0	100,0
12,5	74,0	100,0	100,0
10,0	40,0	100,0	100,0
6,3	6,0	95,8	100,0
4,0	2,0	10,5	94,0
2,0	2,0	3,9	73,0
0,500	1,0	2,7	39,0
0,125	1,0	1,9	17,0
0,063	0,0	1,3	11,0
Resto	0,0	0,0	0,0

A quantidade de filer (Figura 3.7) a adicionar à mistura deve cumprir as especificações e este deve estar conforme a EN 13043, de acordo com a utilização prevista. A Tabela 3.2 apresenta a granulometria do filer usado em laboratório.

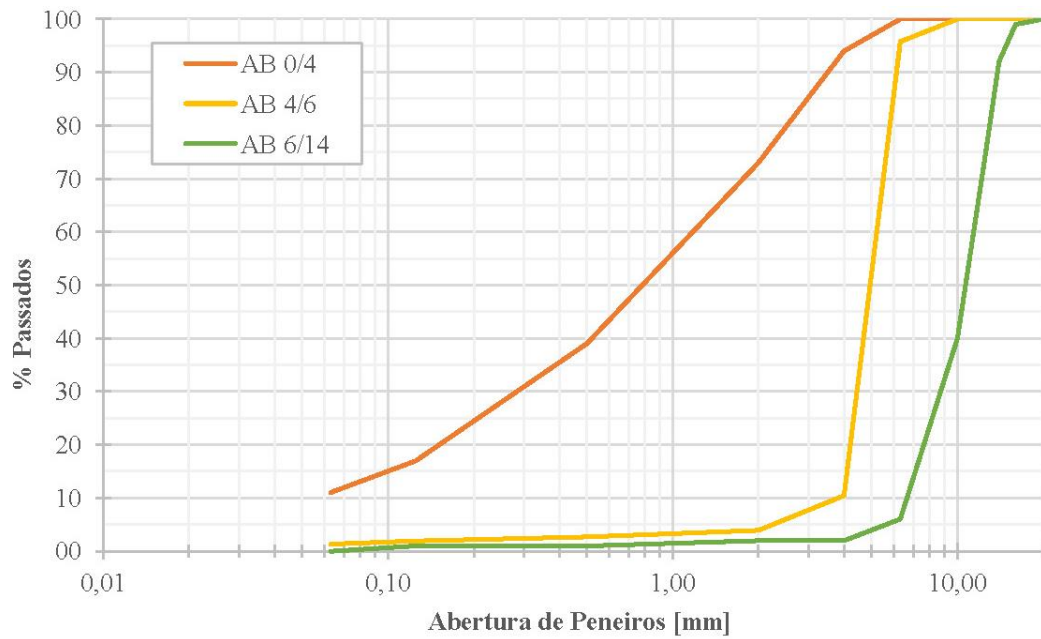


Gráfico 3.1 – Curvas granulométricas dos agregados usados

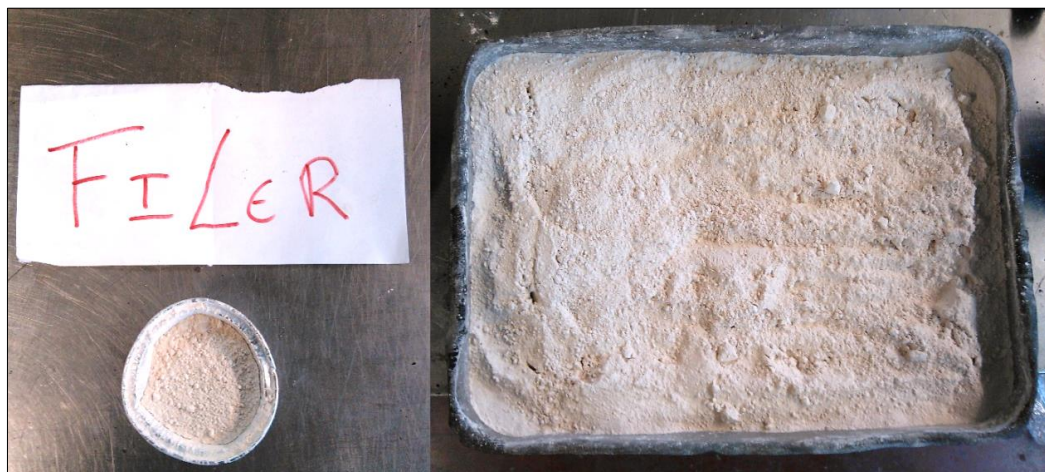


Figura 3.7 – Filer utilizado na realização das misturas betuminosas em laboratório

Tabela 3.2 – Granulometria do filer utilizado no laboratório

Peneiro	Abertura [mm]	40,0	31,5	20,0	16,0	14,0	12,5	10,0
	% Passados de Filer	100	100	100	100	100	100	100
Peneiro	Abertura [mm]	6,3	4,0	2,0	0,500	0,125	0,063	Resto
	% Passados de Filer	100	100	100	100	100	99,9	0

3.1.4 Aditivo

A utilização de um aditivo para a realização de betume-espuma mostrou-se essencial. Com a falta de informação, de documentos publicados, acerca da realização de betume-espuma com

recurso à adição de aditivo, este processo tornou-se mais moroso. Na descoberta desta “alternativa” surgiu o aditivo em causa, *TEGO® Addibit FS 725 A* (Figura 3.8). Este aditivo apresenta características de estabilização da espuma de betume na altura da sua realização, o que torna fundamental a sua utilização na produção de betume-espuma. Segundo a ficha técnica deste material, este aditivo permite um aumento da taxa de expansão do betume, maior tempo de meia-vida (estabilizando a espuma de betume na sua expansão máxima) e não altera as características do betume nem da adesividade entre o betume e o agregado.

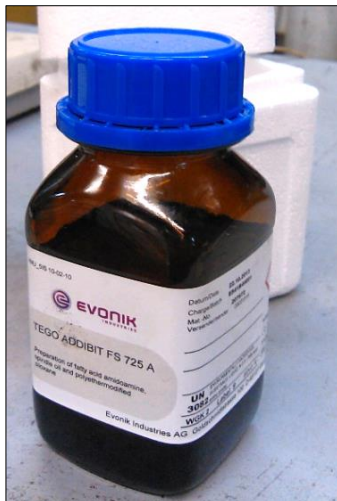


Figura 3.8 – Aditivo *TEGO® Addibit FS 725 A* da *Evonik Industries AG*

Como consequência disto, este aditivo torna-se substancial para betumes com fracas características para a realização de espuma, tal como se veio a comprovar neste caso de estudo. Contudo, a percentagem a usar deste tipo de aditivo depende sempre do tipo de betume e da quantidade de espuma que se pretenda obter.

Em relação às características do aditivo, apenas se pode referir o que é publicitado pela empresa fornecedora, *Evonik Industries AG*. Este aditivo apresenta uma cor amarelada e limpa, a sua densidade (a 25°C) é de aproximadamente, 0,9g/cm³, a viscosidade (a 25°C) apresenta valores a rondar os 130mPa.s e o seu ponto de inflamação dá-se a temperaturas acima dos 100°C.

Alguns dados sobre resultados, obtidos com experiências executadas com este aditivo, são apresentados no Anexo I. Essas experiências foram executadas pela empresa fornecedora e numa máquina de produção de betume-espuma igual à adquirida pelo laboratório de Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Assim, através das referências publicadas, foi possível executar estudos primários e iniciais, no laboratório, com este tipo de aditivo.

3.2 Métodos experimentais de caracterização do betume

A caracterização do betume é feita através de vários ensaios, abaixo descritos, e deve respeitar a norma EN 12591 para garantir o seu uso nas centrais betuminosas (Figura 3.9). Nessa norma figuram os limites impostos para que o betume usado, CEPSA 50/70, seja validado. A nível nacional são impostos valores a respeitar no *Capítulo 14.03 – Pavimentação do Caderno de Encargos Tipo Obra da Estradas de Portugal, S. A.*, que variam pouco da norma europeia.



Figura 3.9 – Tubagem por onde escoo o betume nas centrais betuminosas

3.2.1 Ensaio “Anel & Bola”

Este ensaio permite avaliar o comportamento do betume a temperaturas elevadas, ou seja, permite ter uma ideia da temperatura à qual o betume reduz a sua estabilidade quando for o momento da sua utilização em pavimentação (ponto de amolecimento).

É um ensaio especificado pela norma EN 1427, consistindo em colocar uma amostra de betume num anel, colocar uma esfera metálica sobre o mesmo, estando tudo mergulhado em água com um suporte adequado, e vai-se aquecendo a água, gradualmente (5°C/min), até o betume tocar na parte inferior do suporte por ação do peso da esfera metálica (Figura 3.10). Para a caracterização do betume aditivado utilizou-se a mesma metodologia e procedimentos, para permitir a sua comparação.

3.2.2 Ensaio de Viscosidade Dinâmica

Este ensaio permite avaliar a resistência do betume à mobilidade das suas moléculas, quando solicitadas por uma deformação, quantificando a consistência do ligante a uma dada temperatura. Neste estudo, o ensaio foi repetido para várias temperaturas.

É utilizado o viscosímetro rotacional de *Brookfield* (Figura 3.11) e um recipiente cilíndrico onde vai estar colocada a amostra de betume. O viscosímetro vai fazer rodar um *spindle* dentro da amostra de betume e vai medindo, progressivamente, a força exercida entre o betume e a parede do recipiente, de acordo com a norma EN 13302.



Figura 3.10 – Equipamento utilizado para a realização do ensaio de Anel & Bola



Figura 3.11 – Equipamento e utensílios utilizados na determinação da viscosidade

Neste estudo, foram realizadas medições em temperaturas entre os 100°C e os 180°C, havendo um aumento gradual de temperatura de 10°C em períodos de 18min. Assim, torna-se possível conhecer o intervalo de temperaturas em que se pode manipular o ligante em boas condições de mistura ou compactação.

Para verificar a viscosidade do betume com aditivo, o processo usado foi o mesmo que para o do betume sem aditivo.

3.2.3 Ensaio de penetração a 25°C

Um dos principais ensaios de caracterização dos betumes é o ensaio de penetração a 25°C, visto que determina a medida indireta da viscosidade dos betumes puros. É realizado de acordo com a norma EN 1426.

Este ensaio consiste em medir a profundidade de penetração de uma agulha com 100 gramas, durante 5 segundos, numa amostra de betume à temperatura de 25°C (Figura 3.12). São realizadas 3 medições em pontos diferentes da amostra e o resultado é a média dessas medições, permitindo determinar a classe de penetração do betume. Este valor é o parâmetro utilizado na Europa para a classificação dos betumes de pavimentação.



Figura 3.12 – Equipamento e instrumentos para a realização do ensaio de penetração

Tal como nos ensaios anteriores, neste caso também se executou o ensaio da mesma forma para o betume com aditivo.

3.2.4 Ensaio de reologia

Através da norma EN 14770 verifica-se que são especificados uma série de métodos de ensaio realizados por um reómetro de corte dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer*) capaz de medir as propriedades reológicas de ligantes betuminosos. O procedimento descrito na norma envolve a determinação do módulo de corte complexo e ângulo de fase do betume, numa gama de temperaturas de ensaio para uma frequência de 10rad/s.

O ensaio de reologia foi realizado com dois tipos diferentes de amostras, uma com 25mm de diâmetro e 1 mm de espessura, e outra com 8mm de diâmetro e 2mm de espessura. Estas amostras são colocadas entre duas placas, onde uma estará fixa e outra produz um movimento rotacional repetido (Figura 3.13). Na amostra de 25mm as temperaturas de ensaio são: 46°C, 52°C, 58°C, 64°C, 70°C, 76°C e 82°C, realizadas nesta ordem. Para a amostra de 8mm as temperaturas são: 40°C, 37°C, 31°C, 25°C e 19°C, seguindo esta ordem.



Figura 3.13 – Equipamento utilizado no ensaio de reologia ao betume

3.3 Estudo inicial, produção das misturas betuminosas, preparação dos provetes e determinação das baridades e porosidade

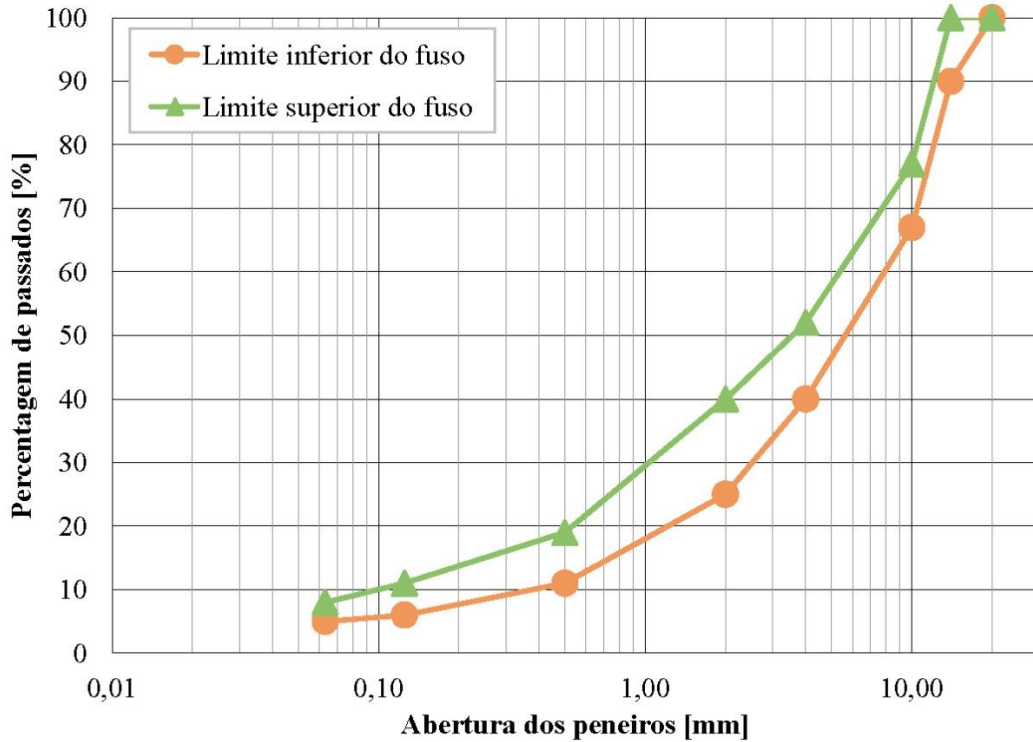
3.3.1 Estudo granulométrico da mistura de agregados

Através da norma EN 13108-1 verificam-se as especificações quanto ao material a ser utilizado nas misturas betuminosas em Portugal, no que corresponde a betão betuminoso (*asphalt concrete*). O método escolhido, e recomendado em Portugal, para a formulação da mistura é abordagem empírica, conforme o Anexo Nacional da NP EN 13108-1.

Após saber as curvas granulométricas dos agregados, são calculadas as percentagens de cada um de forma a obter um fuso que esteja dentro dos limites impostos na Tabela 3.3 (e apresentados visualmente no Gráfico 3.2), conforme descrito no *Capítulo 14.03 – Pavimentação*, do *Caderno de Encargos Tipo Obra, Estradas de Portugal, S. A.*

Tabela 3.3 – Requisitos dos fusos granulométricos para a mistura AC 14 desgaste (BB)

Abertura de peneiros [mm]	20,0	14,0	10,0	4,0	2,0	0,500	0,125	0,063
Material passado [%]	100	90-100	67-77	40-52	25-40	11-19	6-10	5-8

Gráfico 3.2 – Representação dos limites do fuso impostos pelo *Caderno de Encargos da Estradas de Portugal*

Segue-se então o cálculo das percentagens a usar de cada agregado, tentando otimizar o seu fuso dentro dos limites impostos. Sendo conhecidas as percentagens de agregados a usar e estando o betume caracterizado, parte-se para a realização da mistura betuminosa, juntando os agregados ao betume.

3.3.2 Produção das misturas betuminosas

Posteriormente à obtenção do fuso, procede-se à realização da mistura. Esta é fabricada a partir de uma variação de cinco percentagens de betume (incrementos de 0,5%) em torno do valor ótimo de betume expectável, conforme descrito no *Quadro 14.03.2n do Capítulo 14.03 – Pavimentação, do Caderno de Encargos tipo obra, da Estradas de Portugal S. A* e em concordância com o Anexo Nacional da NP EN 13108-1.

O betume utilizado foi o CEPSA 50/70. Assim, a mistura deve ser produzida (Figura 3.14) num intervalo de temperaturas entre os 140°C e 180°C, sendo que a temperatura de fabrico deverá

ser o limite superior e a temperatura de pavimentação (neste caso, em laboratório) não deverá estar abaixo do limite inferior, segundo o que é descrito na Tabela 11 da EN 13108-1.



Figura 3.14 – Fases da realização da mistura betuminosa

Posteriormente à realização da mistura, as amostras (diferenciadas pelas várias percentagens de betume) são submetidas a ensaios mecânicos, de forma a conseguir determinar qual será o valor “ótimo” da percentagem de betume.

Na realização da mistura betuminosa com betume-espuma, o processo teve de ser ligeiramente alterado. A injeção de água e ar no betume seriam efetuadas em simultâneo e com o auxílio de equipamento apropriado.

Na Figura 3.15 pode-se verificar o equipamento que executa a espuma de betume, denominado *Wirtgen WLB 10 S*. Dentro dos possíveis foi projetado o betume-espuma para junto da amassadura de agregados e, seguidamente, sujeita aos mesmo ensaios que a mistura convencional.



Figura 3.15 – Utilização do equipamento que produz betume-espuma na realização de misturas betuminosas

3.3.3 Baridade máxima teórica

Realizada a mistura, são retiradas cerca de 2000g de amostra para determinação da baridade máxima teórica, para cada percentagem de betume de mistura realizada.

Conforme a EN 12697-5, é utilizado um picnómetro (limpo), onde se colocada a amostra de mistura juntamente com água destilada, deixando por encher cerca de 3cm até ao topo. É colocado em cima de uma mesa vibratória e ligado a uma bomba de vácuo, durante 15min (Figura 3.16). Após este tempo, o picnómetro é cheio até ao topo e posto em banho de água entre 30min e 180min (Figura 3.17). Posteriormente é retirado o picnómetro da água, limpo e pesado de imediato.



Figura 3.16 – Picnómetro, com mistura betuminosa dentro, na mesa vibratória e submetido a vácuo



Figura 3.17 – Picnómetro, com mistura betuminosa dentro, em banho de água

Acabado o ensaio, e processados os dados, são obtidos os resultados da baridade máxima teórica das amostras das misturas em estudo, apresentados mais à frente no subcapítulo 4.3. As Equações 3.1 e 3.2 usadas para efeito de cálculo são apresentadas de seguida.

$$\rho_w = 1000,3 + 0,0076 \times t - 0,0053 \times t^2 \quad (3.1)$$

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w}} \quad (3.2)$$

Em que:

ρ_w massa volúmica da água, expressa em quilogramas por metro cúbico [kg/m³].

- t temperatura da água em graus Celsius [°C].
- ρ_{mv} baridade máxima teórica da mistura betuminosa, determinada pelo método volumétrico, em quilogramas por metro cúbico [kg/m³].
- m_1 massa do picnómetro mais a tampa, em gramas [g].
- m_2 massa do picnómetro mais a tampa e a amostra, em gramas [g].
- m_3 massa do picnómetro mais a tampa, a amostra e a água, em gramas [g].
- V_p volume do picnómetro, cheio até à marca de referência, em metros cúbicos [m³].

A realização deste ensaio nas misturas betuminosas com betume-espuma (Figuras 3.18 e 3.19) teve o mesmo enquadramento, visto não haver motivo aparente para se proceder de maneira diferente do processo da mistura convencional. Contudo, a amostra de mistura para ensaio da baridade máxima teórica foi submetida a um tempo de cura, como será referido no subcapítulo seguinte (3.3.4).



Figura 3.18 – Amostra de mistura realizadas com betume espuma e 2% de água



Figura 3.19 – Amostra de mistura realizadas com betume espuma e 3% de água

3.3.4 Preparação de provetes para ensaios com o compactador Marshall

Depois de realizada a mistura e retiradas as amostras para a BMT, são preparados os provetes para os restantes ensaios. Previamente são aquecidos os moldes onde será colocada a amostra da mistura, estando dotados de uns filtros antiaderentes no topo e na base (Figura 3.20). Estando a mistura pronta, é colocado o molde no compactador de impacto e a amostra dentro deste, seguindo-se o processo de compactação. São aplicadas 75 pancadas pelo martelo de compactação (Figura 3.21) e, após estas, são aplicadas mais 75 pancadas no lado inverso.



Figura 3.20 – Moldes, recipientes e espátula que servem de auxílio para realização de provetes



Figura 3.21 – Compactador de provetes Marshall

Para cada mistura são compactados 3 provetes, devidamente identificados (Figura 3.22), estando a preparação dos provetes conforme a norma EN 12697-30.



Figura 3.22 – Conjunto de 3 provetes por cada mistura realizada (5 percentagens diferentes de betume)

No caso da mistura betuminosa com espuma de betume foram realizados, diretamente, os provetes que seriam submetidos à sensibilidade à água e à compactabilidade, admitindo assim a percentagem de betume igual à da mistura convencional.

Dando ênfase aos documentos recebidos com o equipamento de realização de betume-espuma e visto ainda serem ensaios iniciais com experiências do género, é estipulado que os provetes (Figura 3.23) devem ter um tempo de cura de 12 horas à temperatura ambiente, antes de desmoldar, sendo seguidas de 72 horas a uma temperatura de 40°C num forno ventilado, antes de serem submetidos a qualquer tipo de ensaio.



Figura 3.23 – Moldes com mistura betuminosa realizada com betume-espuma

3.3.5 Baridade aparente

Para determinar a baridade aparente de cada grupo de provetes procedeu-se a três métodos de ensaio, conforme está normalizado na norma EN 12697-6. De seguida são apresentados esses métodos e as respetivas expressões de cálculo, em cada um, para a determinação da baridade aparente.

O processo utilizado para a determinação da baridade aparente nos provetes realizados com betume-espuma foi o mesmo que o da mistura convencional, não se verificando motivo para se realizar de maneira diferente.

Baridade aparente pelo Método A

Este método consiste em pesar os provetes secos (Figura 3.24) e, posteriormente, fazer uma nova pesagem com os mesmos estando submersos em água. Os cálculos efetuados recorrem à Equação 3.3 que é apresentada de seguida.

$$\rho_{bdry} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_w \quad (3.3)$$

Em que,

ρ_w Equação (3.1).

ρ_{bdry} baridade aparente do provete seco, determinada pelo método A, em quilogramas por metro cúbico [kg/m³].

m_1 massa do provete seco, em gramas [g].

m_2 massa do provete submerso em água, em gramas [g].



Figura 3.24 – Pesagem de provetes (fora de água)

Baridade aparente pelo Método C

Tal como anteriormente, neste método pesam-se os provetes secos. Posteriormente cobrem-se os provetes com películas de *parafilm* (Figura 3.25), para que estes estejam totalmente selados e sem nenhuma forma de penetração da água, fazendo-se uma pesagem de maneira a saber o peso de película usado. Novamente, faz-se uma pesagem dos provetes, selados, estando estes imersos em água. De forma a obter os resultados da baridade aparente por este método, a Equação 3.4 é representativa dos cálculos efetuados.



Figura 3.25 – Provetes cobertos com *parafilm*

$$\rho_{bsea} = \frac{m_1}{\left(\frac{m_2 - m_3}{\rho_w}\right) - \left(\frac{m_2 - m_1}{\rho_{sm}}\right)} \quad (3.4)$$

Em que,

ρ_w expressão (3.1).

- ρ_{bdry} baridade aparente do provete selado, determinada pelo método C, em quilogramas por metro cúbico [kg/m³].
- m_1 massa do provete seco, em gramas [g].
- m_2 massa do provete seco e selado, em gramas [g].
- m_3 massa do provete seco e selado submerso em água, em gramas [g].
- ρ_{sm} massa do *parafilm* à temperatura do ensaio, expressa em quilogramas por metro cúbico [kg/m³]. Considerado, igual a 922 kg/m³.

Baridade aparente pelo Método D

Este método é mais simples que os anteriores e deve estar, também, em conformidade com a EN 12697-29. Consiste em calcular a baridade aparente através das dimensões (Figura 3.26) e peso dos provetes secos. Visto os provetes serem de forma cilíndrica, a expressão de cálculo (Equação 3.5) a usar é a referenciada de seguida.



Figura 3.26 – Medição da altura e diâmetro dos provetes

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^3 \quad (3.5)$$

Em que,

- $\rho_{b,dim}$ baridade aparente do provete cilíndrico, determinada pelo método D, em quilogramas por metro cúbico [kg/m³].
- m_1 massa do provete seco, em gramas [g].
- h altura do provete, em centímetros [cm].
- d diâmetro do provete, em centímetros [cm].

3.3.6 Porosidade

Atendendo à norma EN 12697-8, é referido o cálculo do volume de vazios para os provetes estudados, para cada uma das misturas realizadas. Este parâmetro de avaliação da mistura recorre à Equação 3.6 apresentada abaixo. Visto o cálculo de ambas as baridades ter sido realizado da mesma forma para a mistura convencional e para a mistura com betume-espuma, o cálculo da porosidade seguirá a mesma regra.

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad (3.6)$$

Em que,

V_m porosidade da mistura, em percentagem [%].

ρ_m baridade máxima teórica da mistura, em quilograma por metro cúbico [kg/m³].

ρ_b baridade do provete, em quilograma por metro cúbico [kg/m³].

3.4 Métodos experimentais de caracterização mecânica das misturas betuminosas

3.4.1 Ensaio de Marshall

De acordo com a norma EN 12697-34 deve haver uma preparação inicial dos provetes, ou seja, estes devem ser colocados em banho de água com a temperatura da água a 60°C entre 40min a 60min (Figura 3.28). Pela mesma norma, o equipamento onde decorrerá o ensaio deve também ele ser preparado. Isto é, o estabilómetro usado na prensa de Marshall (Figura 3.27) é aquecido a 60°C durante, pelo menos, 30min.

Assim, depois do material preparado, retiram-se os provetes da água e são colocados, e centrados, no estabilómetro Marshall (Figura 3.29). Entra em funcionamento a prensa Marshall que irá aplicar uma carga que vai crescendo gradualmente, retirando-se assim resultados como a estabilidade e deformação de cada provete.

A estabilidade a ter em conta neste ensaio é a máxima registada, sofrendo na mesma uma correção através de um fator c (3.7). A deformação de pico será a que está associada ao momento de quando se deu a aplicação da carga máxima. Porém, também esta, passa por uma correção, sendo a mesma avaliada através de uma linha de tendência traçada no gráfico tensão-deformação (valor retirado através da prensa Marshall).



Figura 3.27 – Prensa Marshall e estabilómetro

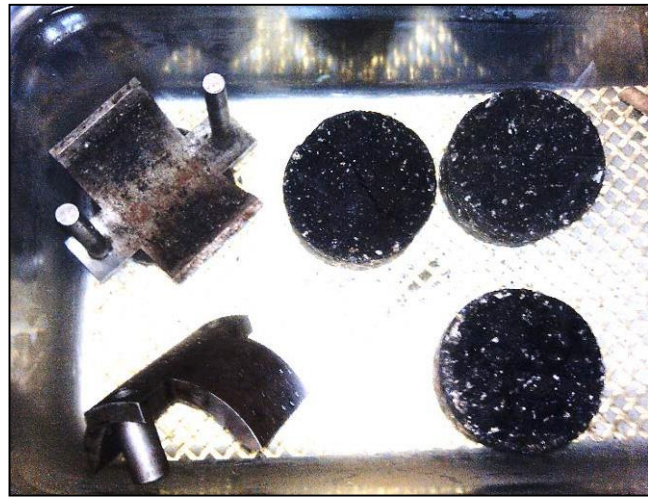


Figura 3.28 – Estabilómetro e provetes Marshall em banho de água



Figura 3.29 - Proвете Marshall preparado a ser ensaiado

$$c = 5,2 \times e^{-0,0258 \times h} \quad (3.7)$$

$$S = M \times c \quad (3.8)$$

Em que,

c fator de correção da estabilidade máxima.

h altura do provete, em milímetros [mm].

S estabilidade Marshall corrigida, em quilonewton [kN].

M estabilidade máxima, medida pela prensa de Marshall, em quilonewton [kN].

Com este ensaio obtemos características importantes, sobre as misturas, para que seja escolhida a percentagem “ótima” de betume.

3.4.2 Percentagem “ótima” de betume

Para determinar a percentagem “ótima” de betume devem-se ter em consideração as características das misturas betuminosas. Contudo, a percentagem “ótima” de betume resulta da média das percentagens de betume a que corresponde a máxima baridade aparente, o valor médio dos limites de porosidade para a mistura em causa e a máxima estabilidade Marshall, sem comprometer os valores especificados para os restantes parâmetros avaliados na formulação. Isto é, deve-se ter em atenção os valores de deformação, vazios na mistura de agregados, baridade máxima teórica, grau de saturação em betume e quociente Marshall.

Para isso é necessário recorrer a alguns cálculos, de forma a facilitar a perceção das características das misturas. Tendo isso em conta, as Equações 3.9 a 3.11 que se seguem devem ser utilizadas no cálculo dos vários parâmetros referidos anteriormente.

$$VMA = V_m + \frac{\rho_b}{\rho_B} \times B \quad (3.9)$$

$$VFB = \left(\frac{\rho_b}{\rho_B} \times B \right) / VMA \quad (3.10)$$

$$Q = S/F \quad (3.11)$$

Em que,

VMA vazios na mistura de agregados, em percentagem [%].

V_m porosidade da mistura, em percentagem [%].

ρ_b baridade do provete, em quilograma por metro cúbico [kg/m³].

ρ_B baridade do betume, em quilograma por metro cúbico [kg/m³]. Considerado, igual a 1035 kg/m³.

B quantidade de betume usado no provete, em percentagem [%].

VFB grau de saturação em betume, em percentagem [%].

- Q quociente Marshall, em quilonewton por milímetro [kN/mm].
- S estabilidade Marshall corrigida, em quilonewton [kN].
- F deformação Marshall corrigida, em milímetros [mm].

Obtendo estes resultados, torna-se viável traçar gráficos representativos das características das misturas em função da percentagem de betume (Figura 3.30).

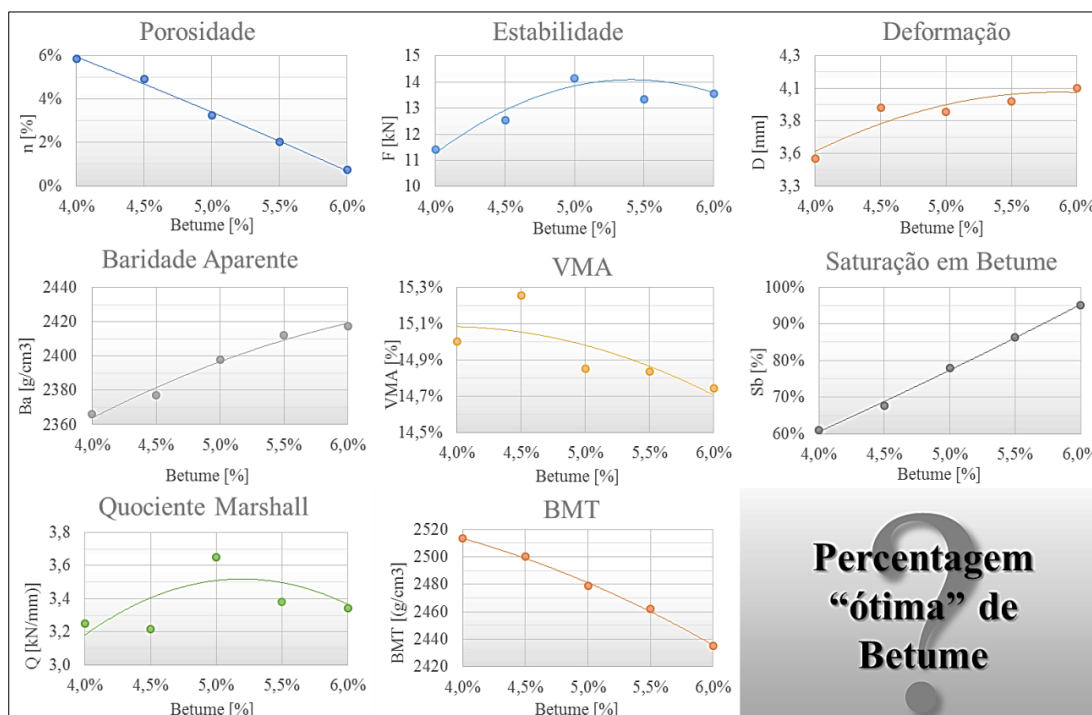


Figura 3.30 – Gráficos auxiliares para determinação da percentagem “ótima” de betume

Tendo em vista o *Quadro 14.03.2n* do *Capítulo 14.03 – Pavimentação*, do *Caderno de Encargos tipo obra*, da *Estradas de Portugal S. A.*, pode-se verificar os requisitos para a camada de misturas betuminosas a quente, neste caso, AC 14 desgaste (BB). De forma sumária, a Tabela 3.4 apresenta os requisitos que se encontram no quadro indicado pela EP.

De forma a complementar o estudo da mistura, e depois de obtida a percentagem “ótima” de betume pelo ensaio Marshall, recorre-se à realização de ensaios adicionais, sejam eles o ensaio de pista, sensibilidade à água e compactabilidade, por exemplo.

Desta feita, estes ensaios adicionais devem apenas ser realizados a três misturas: uma com a percentagem de betume “ótima“, determinada pelo método Marshall, uma com uma percentagem de betume com - 0,5% do valor “ótimo” e outra com uma percentagem de betume com + 0,5% do valor “ótimo”.

Tabela 3.4 – Requisitos impostos no caderno de encargos da EP para a mistura AC 14 desgaste (BB)

Quadro 14.03.2n: Camadas de misturas betuminosas a quente					
Camada de desgaste - Requisitos/Propriedades					
Propriedades			Norma	Unidades	Requisitos
Características Marshall	Estabilidade	Máxima	EN 12697-34	kN	S_{max} 15
		Mínima			S_{min} 7.5
	Deformação	Máxima		mm	F 4
		Mínima			F 2
	Quociente Marshall	Mínimo		kN/mm	Q_{min} 3
Vazios na mistura de agregados		Mínimo	EN 12697-8	%	VMA_{min} 14
Porosidade, V_m		Máxima			V_{max} 5
		Mínima			V_{min} 3

Na realização da mistura betuminosa com betume-espuma optou-se por usar a percentagem “ótima” de betume determinada para a mistura convencional. Assim, será mais facilitada a comparação de resultados entre ambas as misturas.

3.4.3 Sensibilidade à água

Realizadas três misturas betuminosas, uma com a percentagem “ótima” de betume e as outras duas com $\pm 0,5\%$ dessa percentagem, são compactados seis provetes Marshall por mistura (Figura 3.31). Estes são divididos em dois grupos (Figura 3.32), em que um grupo terá provetes secos e o outro terá provetes molhados, sendo que ambos os grupos devem ter uma média equivalente da baridade aparente dos provetes. Para se obter esses resultados, os provetes devem ser sujeitos a ensaios já referidos anteriormente.

Como referido antes, no caso da mistura com betume-espuma a percentagem de betume a usar encontrava-se já pré-determinada. Contudo, haveria uma variável ainda a determinar, sendo esta a percentagem de água adequada a injetar no betume-espuma. Posto isto, e nesta fase do estudo, optou-se por serem realizadas duas misturas com betume-espuma, sendo utilizados valores de 2% e 3% de água em relação à massa de betume.

Posteriormente, e já com a posse de mais dados acerca da mistura betuminosa com betume-espuma, optar-se-ia por uma das percentagens de água. Isto é, a mistura que apresentou melhores resultados foi a que prosseguiu com o estudo (no caso deste trabalho esse valor foi 2%).

Conforme referido na EN 12697-12, recomenda-se a determinação da resistência conservada em tração indireta (ITSR) para todas as misturas betuminosas.



Figura 3.31 – Provetes de sensibilidade à água



Figura 3.32 – Provetes divididos em conjuntos a serem submetidos à água e ar

Preparação dos provetes e ensaio

Como dito antes, são preparados 6 provetes para cada percentagem de betume em estudo, sendo que para o caso da mistura com betume-espuma são preparados 6 provetes para cada percentagem de água. Conforme referido na EN 12697-12, dividem-se em dois grupos com baridades similares e colocam-se 3 provetes em água (um dos grupos) a uma temperatura de 20°C, sujeitos a vácuo, durante 40min (Figura 3.33). Posteriormente deixar os provetes num banho de água durante 30min.

Passado esse período de tempo, devem-se pesar e retirar as dimensões dos provetes secos e molhados, conforme a EN 12697-29. Seguindo, passam-se os provetes molhados para um banho de água com água a 40°C durante um período de 68h a 72h.

Posteriormente condicionar os provetes a uma temperatura de 15°C durante 2h, sendo que os 3 provetes molhados devem estar num banho de água e os 3 provetes secos numa camara de temperatura controlada (Figura 3.34), para cada percentagem de betume (ou percentagem de água, no caso do betume-espuma).

A EN 12697-12 ainda visa determinar a resistência à tração indireta nos provetes, conforme o procedimento apresentado na EN 12697-23. A resistência à tração indireta deve ser efetuada cerca de 1min após o provete ter sido retirado do condicionamento da água ou do ar.

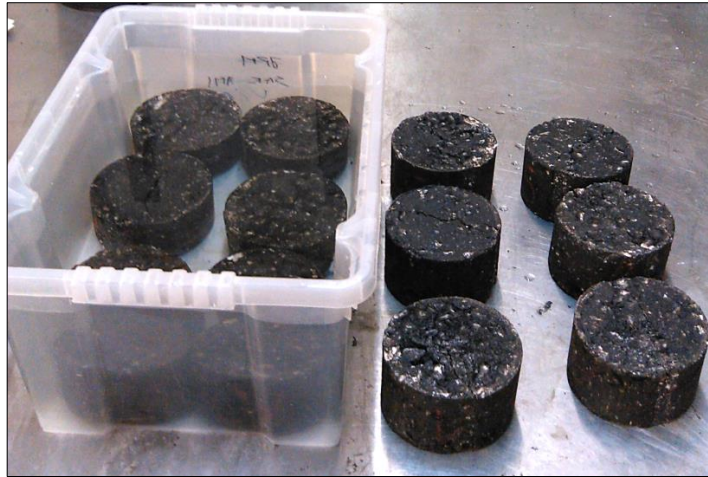


Figura 3.33 – Conjuntos de provetes que serão submetidos ao ar e à água



Figura 3.34 – Câmaras de temperatura controlada usadas neste ensaio

Resistência conservada em tração indireta

Após os requisitos impostos anteriormente, é agora determinada a resistência à tração indireta. Conforme referido na EN 12697-23, este procedimento deve-se auxiliar de uma máquina de compressão do tipo Marshall e de um sistema de aplicação de carga com bandas de carga (Figura 3.35).

Dando-se a rotura do provete, a máquina de compressão grava os resultados da carga aplicada nos provetes secos e saturados. Com estes dados torna-se exequível o cálculo da resistência à tração indireta com as Equações 3.12 e 3.13 indicadas já em seguida.

$$ITS = \frac{2 \times P}{\pi \times d \times h} \times 10^6 \quad (3.12)$$

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (3.13)$$

Em que,

ITS resistência à tração indireta, em quilopascal [kPa].

P carga máxima aplicada, em quilonewton [kN].

d diâmetro do provete, em milímetros [mm].

h altura do provete, em milímetros [mm].

$ITSR$ resistência conservada em tração indireta, em percentagem [%].

ITS_w média da resistência à tração indireta dos provetes saturados, em quilopascal [kPa].

ITS_d média da resistência à tração indireta dos provetes secos, em quilopascal [kPa].



Figura 3.35 – Prensa Marshall, dotada de um sistema de aplicação de carga com bandas de carga, para ensaio à resistência conservada em tração indireta

3.4.4 Compactabilidade

Conforme a EN 12697-10, realizam-se os provetes com a percentagem de betume que se considerou a ser o valor “ótimo”, neste caso 5% de betume. A mistura é colocada nos moldes do compactador de impacto (Figura 3.36) e é sujeita a 200 pancadas numa das suas faces para simulação mais credível do momento de compactação que acontece com misturas *in situ*.

Com o auxílio de um sensor de medição de deslocamentos, LVDT – *linear variable differential transformer* (Figura 3.37), é possível verificar qual a variação da altura que o provete tem conforme o número de pancadas a que é sujeito. Isto é, medir o adensamento da mistura em função da energia aplicada.



Figura 3.36 – Compactador de impacto



Figura 3.37 – LVDT utilizado para analisar a compactação dos provetes consoante o número de pancadas

Tal como no processo de sensibilidade à água, os provetes realizados com betume-espuma foram submetidos às mesmas condições de ensaio que os realizados com a mistura convencional. Contudo, neste caso de estudo foram apenas realizados 2 provetes para cada percentagem de água.

Preparação e ensaio

Depois de realizada a mistura com o teor “ótimo” de betume, segue-se a realização dos provetes com recurso ao compactador de impacto, sendo que até aqui em tudo se assemelha com o processo normal de realização de provetes. Contudo, neste ensaio os provetes são submetidos a uma carga diferente, ou seja, a um número de pancadas diferentes, sendo que estas são aplicadas apenas num dos lados do provete. Desta forma foi possível obter provetes de mistura convencional (Figura 3.38) e de mistura com betume-espuma (Figura 3.39).

Consoante as pancadas vão sendo dadas, o LVDT vai efetuando a medição do adensamento do provete, possibilitando a visualização do comportamento que o provete vai tendo ao longo do processo de compactação. Este processo permite calcular a evolução do volume de vazios durante esta parte do procedimento, caso seja necessário.



Figura 3.38 – Provetes de mistura convencional submetidos a ensaio de compactabilidade



Figura 3.39 – Provetes de betume-espuma submetidos a ensaio de compactabilidade

Ensaio adicionais de resistência à tração indireta

Estando os provetes compactados e desmoldados, segue-se a determinação das dimensões e baridades, mais uma vez pelos métodos já descritos em 3.3.3 e 3.3.5. Estas medições são realizadas para que se torne possível o cálculo de volume de vazios e, de forma a complementar o estudo, a determinação da resistência à tração indireta.

Também aqui se procede à determinação da resistência à tração indireta como complemento de estudo (Figura 3.40), desta vez com um outro condicionamento. Apesar disso, a fórmula de cálculo do ITS é igual à já apresentada, tal como o equipamento usado é o mesmo.

3.4.5 Ensaio de pista para determinação da resistência à deformação

Em português, denominado de ensaio de pista, é geralmente conhecido por WTT (Figura 3.41). Este ensaio permite simular a passagem de veículos numa estrada, obtendo a deformação permanente resultante da passagem de pneus numa certa zona. Assim, é possível medir a profundidade da rodeira formada pelo pneu utilizado no ensaio.



Figura 3.40 – Provete de compactabilidade a ser submetido ao ensaio de resistência à tração indireta



Figura 3.41 – Equipamento que executa o ensaio de pista

Para este objetivo ser alcançado, devem ser realizadas lajes que simulem o pavimento rodoviário (Figura 3.42), conforme mencionado na EN 12697-22. Os resultados pretendidos para análise, neste ensaio, são a deformação permanente em ar, a profundidade da rodeira e a variação da deformação entre o ciclo 5000 e 10000. Consoante descrito na norma EN 12697-22, será utilizado o Procedimento B em ar, onde é utilizado um equipamento pequeno e as lajes são acondicionadas ao ar e sujeitas a 10000 ciclos de carga.

Como fase inicial dá-se a medição das dimensões das duas lajes (como requerido na norma, um mínimo de duas amostras) e a sua pesagem. A medição da espessura em cada canto resulta numa espessura média, tal como a medição de cada lado resulta numa secção média. Obtendo estes dados, calcula-se a baridade pelo processo volumétrico, pelas Equações 3.14 e 3.15.



Figura 3.42 – Lajeta e plataforma de ensaio

O equipamento de ensaio faz a leitura da deformação obtida em cada ciclo de carga que, posteriormente, é analisada e tratada de forma a obter os resultados pretendidos mencionados anteriormente, de acordo com as Equações 3.16 e 3.17.

$$V = S_m \times e_m \times 10^{-3} \quad (3.14)$$

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1 \times 10^{-3}}{V \times 10^{-6}} \quad (3.15)$$

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (3.16)$$

$$PRD_{AIR} = \frac{RD_{AIR}}{e_m} \times 100 \quad (3.17)$$

Em que,

- V volume da laje, em milímetros cúbicos [cm^3].
- S_m secção média da laje, em milímetros quadrados [mm^2].
- e_m espessura média, em milímetros [mm].
- $\rho_{b,dim}$ baridade aparente, determinada pelo método volumétrico, em quilogramas por metro cúbico [kg/m^3].
- m_1 massa da laje seca, em gramas [g].
- WTS_{AIR} média da deformação permanente em ar dos provetes, em milímetros por 1000 ciclos [$\text{mm}/10^3$ ciclos].
- d_{5000} profundidade da rodeira ao fim de 5000 ciclos, em milímetros [mm].
- d_{10000} profundidade da rodeira ao fim de 10000 ciclos, em milímetros [mm].
- PRD_{AIR} média proporcional da profundidade da rodeira dos provetes, em percentagem [%].
- RD_{AIR} média da profundidade da rodeira ao fim de N ciclos dos provetes, em milímetros [mm].

No caso da mistura com betume-espuma, e atendendo aos resultados obtidos no ensaio de resistência conservada em tração indireta, foi escolhida apenas uma das percentagens de água para seguir em estudo (2% de água), tal como aconteceu nos ensaios de flexão em quatro pontos (apresentados de seguida). No entanto os ensaios foram realizados da mesma forma.

3.4.6 Flexão em quatro pontos para determinar o módulo de rigidez

O ensaio de flexão em quatro pontos (Figura 3.43) caracteriza-se por determinar o módulo de rigidez (e também a resistência à fadiga) das misturas betuminosas em estudo. Para isso foram realizadas 9 vigas com a percentagem “ótima” em betume, que consoante a característica a determinar tiveram um procedimento de ensaio diferente.

Como referido anteriormente, as vigas realizadas com betume-espuma e que foram submetidas a este ensaio, foram selecionada a partir de apenas uma percentagem de água das duas que estavam em estudo. No entanto, tanto para determinação do módulo de rigidez como para a resistência à fadiga foram executados os procedimentos de igual forma para a mistura convencional e para a mistura com betume-espuma.



Figura 3.43 – Equipamento que executa ensaio de flexão em quatro pontos

Para determinar o módulo de rigidez foram ensaiadas 2 vigas a temperaturas de 0°C, 10°C, 20°C e 30°C e 9 vigas (Figura 3.44) a uma temperatura de referência de 20°C. Assim, são estudados os parâmetros pedidos na norma EN 12697-26 e ainda se complementa um estudo mais aprofundado do módulo de rigidez nas misturas betuminosas, havendo um maior detalhe do

comportamento das misturas, quer a temperaturas diferentes com frequências diferentes, quer à mesma temperatura com frequência diferentes.



Figura 3.44 - Vigas submetidas a ensaio

Ainda na norma EN 12697-26 é sugerido o uso de uma sequência de frequências para o estudo do módulo de rigidez: 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 8, 10, 20, e 50 Hz, terminando novamente na em 0.1Hz. Contudo, neste trabalho não foram efetuadas as frequências de 20 e 50 Hz.

As vigas realizadas com betume-espuma foram sujeitas ao mesmo ensaio e com as mesmas condicionantes. Mais uma vez, com o objetivo de ter um termo de comparação onde as configurações de ensaio fossem as mesmas.

3.4.7 Flexão em quatro pontos para determinar a resistência à fadiga

A resistência à fadiga tem como principais agentes a ação do tráfego e ações de origem térmica, e é uma propriedade fundamental nas misturas betuminosas.

A determinação da resistência à fadiga é também preconizada pelo ensaio de flexão em quatro pontos (Figura 3.45) e segue-se pela norma EN 12697-24 (com as devidas adaptações da norma AASHTO TP8-94). Visto ser utilizado o mesmo tipo de ensaio, as vigas a serem ensaiadas serão aproveitadas do ensaio de determinação do módulo de rigidez, sendo isto possível devido ao ensaio de módulo não ser destrutivo e não danificar as vigas.

Neste ensaio é efetuado um carregamento sinusoidal, repetido constantemente, à temperatura de 20°C e a uma frequência de aplicação de carga de 10Hz, em 9 vigas. Como valor de referência para o módulo de rigidez inicial, considerou-se o valor correspondente ao ciclo 100. Para se determinar a vida à fadiga de cada viga ensaiada, registou-se o número de aplicações de carga no momento em que o módulo de rigidez diminui para 50% do seu valor inicial.

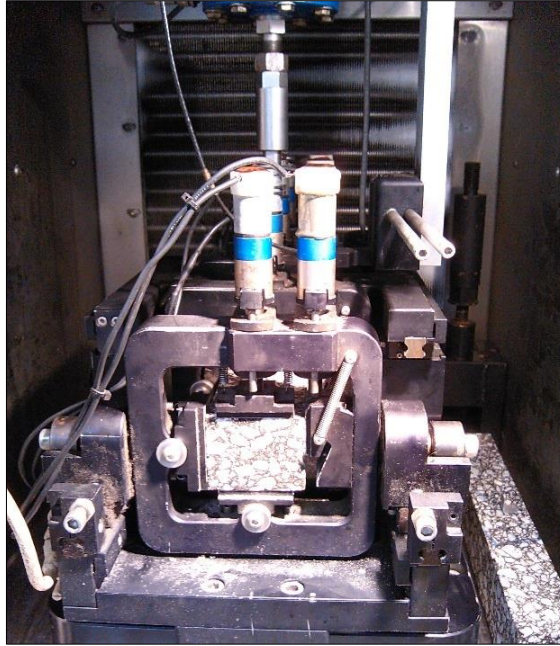


Figura 3.45 – Viga pronta a ser submetida ao ensaio de flexão a quatro pontos

O ensaio de resistência à fadiga tem como intenção apurar ao fim de quantos ciclos, a mistura atinge o fendilhamento. Neste caso, o fendilhamento é definido pelo número de ciclos correspondente a um valor de módulo de rigidez da viga igual a metade do valor inicial, uma vez que o ensaio é realizado em extensão controlada. Com a realização do ensaio em vários provetes, para diferentes níveis de extensão, é possível determinar a lei de fadiga do material.

Segundo a EN 12697-24, as leis de fadiga da mistura são obtidas a partir de linhas de tendência traçadas a partir dos resultados obtidos no ensaio. Essa linha de tendência é expressa por uma relação entre a extensão e o número de aplicações da carga para a qual atinge a ruína.

Utilizando a Equação (3.18) calcula-se os parâmetros das leis de fadiga, sendo N_{100} a resistência ao fendilhamento por fadiga para uma extensão de tração de 100×10^{-6} e ε_6 a extensão de tração que origina uma resistência ao fendilhamento por fadiga de 1×10^6 ciclos.

$$N = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^b \quad (3.18)$$

Em que,

N número de aplicação da carga, em ciclos [ciclos].

ε extensão de tração.

a, b coeficientes determinados experimentalmente.

3.4.8 Adesividade do betume aos agregados

Este procedimento tem como objetivo a determinação da adesividade/afinidade entre o betume e os agregados e segue-se pela norma EN 12697-11. Tem a intenção de ser útil para planejar a realização de uma mistura e de verificar o poder de ligação do ligante ao agregado, de uma forma indireta.

A adesividade entre betume e agregado é expressa pelo registo visual da percentagem de betume que fica aglutinado na mistura, não compactada, após ser submetida a uma agitação mecânica na presença de água. Conforme a norma referida, este ensaio é bastante subjetivo e deve ser realizado frequentemente de forma a dar alguma experiência a quem avalia o resultado final da experiência.

Neste estudo foi usado o método A, descrito na mesma norma. Este processo parte da peneiração de, aproximadamente, 600g de agregado compreendido entre os peneiros de abertura 6,3mm e 10mm (neste caso de estudo), posteriormente lavado, seco e misturado com o betume, obtendo-se uma cobertura uniforme e total. Esta mistura é colocada à temperatura ambiente sobre uma placa (não aderente), para que os agregados estejam separados uns dos outros, para que não ficassem colados, durante uma noite (Figura 3.46). Em seguida, a mistura é separada em três amostras, de 150g cada, para análise e, cada amostra, colocada dentro de um frasco com água destilada, partícula a partícula. Depois disto os frascos devem ser fechados e selados.



Figura 3.46 – Peneiração dos agregados, realização da mistura e separação das partículas de agregado para submissão a ensaio

Os frascos são rolados à temperatura ambiente e uma velocidade especificada (Figura 3.47). Em intervalos de tempo específicos, a percentagem de betume que cobre as partículas de agregado é avaliada visualmente, por dois técnicos experientes e de forma independente. As avaliações foram executadas nos intervalos, após início de ensaio, de 6h e 24h.



Figura 3.47 – Frascos de ensaio de adesividade e rolamento dos mesmos no início e fim do ensaio

3.4.9 Determinação da percentagem de betume da mistura por ignição

Este ensaio determina a percentagem de ligante de uma mistura betuminosa, por incineração da mistura numa mufla. Este método é uma alternativa ao método convencional de extração de ligante através de solventes. Este método de determinação da percentagem de betume é bastante fácil de ser executado e analisado, sendo o método mais adequado para análise de misturas que sejam realizadas com betumes modificados e não modificados.

Na norma EN 12697-39 são descritos dois métodos de ensaio: o método A utiliza uma mufla com balança interna, e o método B utiliza uma mufla e uma balança externa. Neste estudo foi executada a determinação da percentagem de betume pelo método A, onde a mufla atinge uma temperatura de 540°C, onde se introduzem os tabuleiros com a mistura (Figura 3.48).



Figura 3.48 – Tabuleiros com a mistura betuminosa antes e depois de ensaio

3.5 Caracterização específica do betume-espuma e da mistura correspondente

Visto o betume-espuma ainda ser uma matéria desconhecida no laboratório da Universidade do Minho, foram dados pequenos passos e registados todos acontecimentos e mudanças que se

foram realizando ao longo do seu estudo. Tal como referido até agora, as amostras e provetes que foram realizados com betume-espuma foram submetidos aos mesmos ensaios que as amostras e provetes realizados com a mistura convencional.

3.5.1 Equipamento utilizado para produção de betume-espuma

O equipamento para a realização de ensaios com betume-espuma foi a *Wirtgen WLB 10 S* (Figura 3.49). É uma máquina à escala laboratorial, que faz a produção de betume-espuma injetando, em simultâneo, os seus componentes, isto é, água, ar e betume. Todos eles estão num sistema pressurizado e aquecido, podendo regular-se tanto as pressões (e velocidades) como também as temperaturas das tubagens, recipientes e até do bico injetor.



Figura 3.49 – Equipamento que executa a espuma de betume

3.5.2 Utensílios de apoio ao estudo

O equipamento de realização de betume-espuma veio dotado com um balde e uma escala de medição de expansibilidade (Figura 3.50). O balde tem um diâmetro de aproximadamente 285 mm e uma altura irregular, pois o seu fundo não é plano, variando entre os 375mm e os 380mm. A escala de medição tem coeficientes de expansibilidade múltiplos de 6.

3.5.3 Parâmetros fundamentais a avaliar

O coeficiente de expansibilidade, ou coeficiente de expansão, é a relação entre o volume máximo da espuma que foi atingido e o volume inicial do betume que foi induzido, e é medido visualmente através da escala proporcionada com o equipamento. É um parâmetro dominado por alguma subjetividade dos operadores e também se pode retirar algumas conclusões acerca da viscosidade que é apresentada pela espuma.



Figura 3.50 – Balde e escala de medição da expansão do betume-espuma

O tempo de meia-vida, ou semivida, corresponde ao intervalo de tempo em que a espuma atinge o seu volume máximo (expansão máxima) até ao momento e que atinge metade desse volume, ou seja, meia-expansão ou expansão de meia-vida. Este parâmetro também é subjetivo, sendo que nas experiências realizadas optou-se por utilizar dois técnicos na medição do tempo e o resultado seria a média desses dois tempos, em segundos. Daqui, obtém-se um indicador do tempo disponível para proceder à mistura dos agregados com a espuma.

Estes dois parâmetros são importantes na caracterização do betume-espuma. Contudo são inversamente proporcionais, sendo que terá de se dar sempre preferência a um deles. Mais a frente são apresentados resultados de experiências feitas com betume aditivado e betume sem aditivo, sendo que para ambos foi usado como base o betume CEPSA 50/70.

3.5.4 Teor residual de água da mistura com betume-espuma

Este procedimento foi realizado com o objetivo de determinar a percentagem de água que se evaporou da mistura, para as duas misturas betuminosas realizadas com betume-espuma, que usaram 2% e 3% de água.

O procedimento passou por retirar uma amostra da mistura no final da produção da mesma. Seguindo os mesmos passos descritos em 3.3.4, as amostras (Figura 3.51) foram colocadas a uma temperatura ambiente durante 12 horas. Posteriormente foram colocadas num forno ventilado a uma temperatura de 40°C num período de tempo de 72 horas. Visto ser este o único ensaio a qual seriam submetidas, passou-se a esta fase inicial, colocou-se as misturas num forno ventilado a 110°C, possibilitando a evaporação da água restante na mistura. Em todas estas fases pesou-se a massa da mistura para avaliar a perda de água no processo.



Figura 3.51 – Amostras das misturas com betume-espuma

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Ligantes betuminosos

Com os ensaios indicados no Capítulo 3 obteve-se inicialmente os seguintes resultados (Tabela 4.1) relativos ao ensaio de “anel e bola” (Figuras 4.1 e 4.2).

Tabela 4.1 – Resultados obtidos através do ensaio de “Anel & Bola”

Anel & Bola (EN 1427)						
Referência da amostra	EN 12591		CEPSA 50/70		CEPSA 50/70 aditivado	
Provete	min	max	A	B	A	B
Temp. amolec. [°C]	46,0	54,0	50,5	50,8	51,7	52,2
Média [°C]	50,0		50,7		52,0	



Figura 4.1 – Ensaio de “Anel & Bola”



Figura 4.2 – Betume quando atinge temperatura de amolecimento

Os resultados obtidos com o ensaio de “Anel & Bola” demonstram que o betume em estudo respeita as indicações impostas na norma europeia. Quanto ao betume aditivado, apesar de ter sofrido uma ligeira alteração na temperatura de amolecimento, encontra-se dentro do intervalo de temperaturas estipulado. Sendo assim, é demonstrado que o aditivo influencia muito pouco quanto à temperatura de amolecimento do betume.

Em seguida, a partir dos resultados obtidos no ensaio de viscosidade dinâmica (Figura 4.3) e no ensaio de reologia (Figura 4.4) é possível traçar uma curva demonstrativa da consistência dos betumes em estudo para um leque de temperaturas alargado (Gráfico 4.1). Os valores de viscosidade podem ser utilizados para definir a temperatura adequada para a mistura dos

agregados com o betume, correspondente a uma viscosidade dinâmica de aproximadamente 0,2Pa.s (2 Poise). Para a compactação da mistura é sugerida a adoção de temperaturas que conduzam a viscosidades compreendidas entre 2Pa.s (20 Poise) e 20Pa.s (200 Poise).



Figura 4.3 – Ensaio de viscosidade



Figura 4.4 – Ensaio de reologia

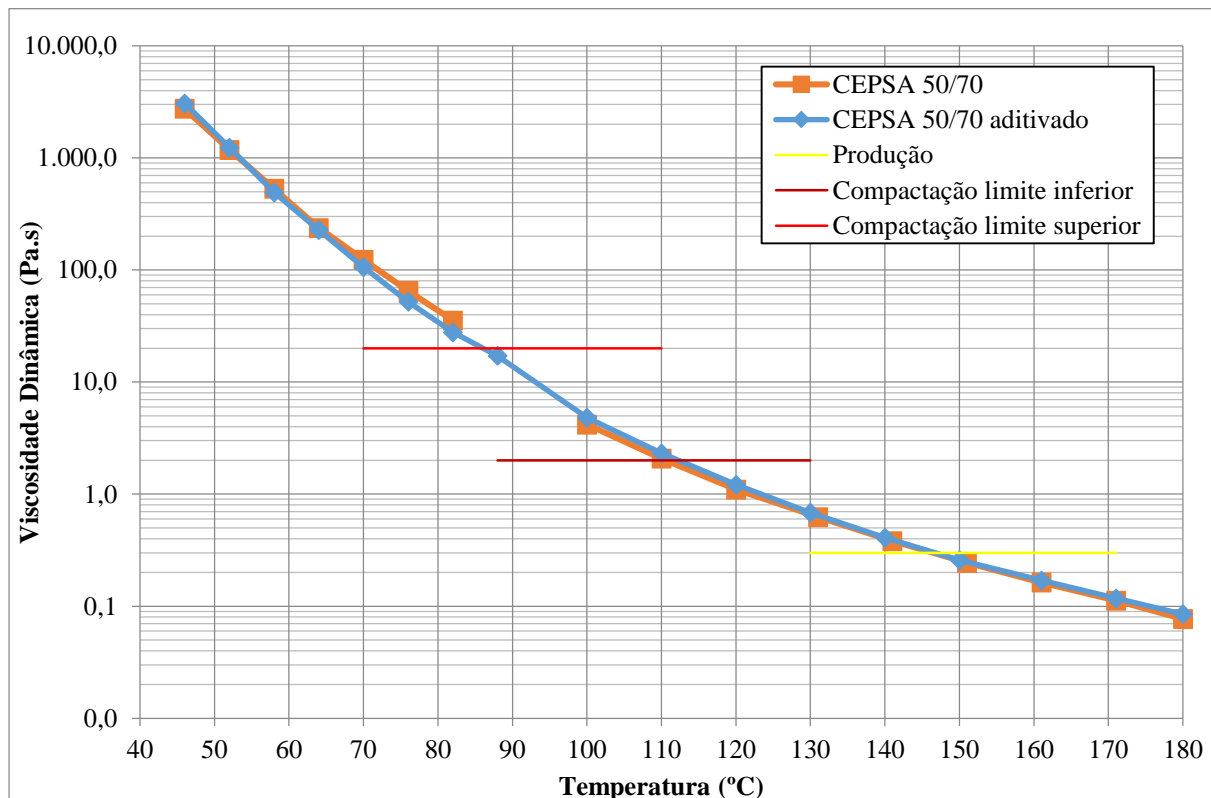


Gráfico 4.1 – Viscosidade do betume estudado a várias temperaturas

Analisando as curvas de viscosidade denota-se que o betume aditivado tem uma viscosidade bastante similar ao betume convencional, observando-se que o aditivo não altera a viscosidade

do betume em que é colocado. Pelos limites referidos anteriormente, os betumes têm uma temperatura de referência para a produção perto dos 145°C e de compactação será entre os 85°C e os 110°C, aproximadamente. Assim, a mistura convencional foi produzida a 145°C. Ao estudar as misturas com betume-espuma, concluiu-se que estas deviam ser produzidas a 115°C, visto que não se conseguiu bons resultados a temperaturas inferiores a 100°C.

Relativamente ao ensaio de penetração a 25°C (Figuras 4.5 e 4.6) obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos através do ensaio de Penetração a 25°C

		Penetração (EN 1426)		
Referência da amostra		EN 12591	CEPSA 50/70	CEPSA 50/70 aditivado
1ª Penetração	[0,1 mm]	min	56,5	41,5
2ª Penetração	[0,1 mm]	50	57,0	40,8
3ª Penetração	[0,1 mm]	max	57,5	41,6
Média	[0,1 mm]	70	57,0	41,3



Figura 4.5 – Ensaio de penetração ao betume 50/70

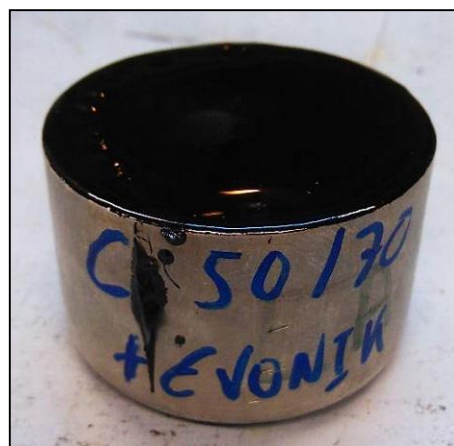


Figura 4.6 – Amostra de betume com aditivo para submissão a ensaio de penetração

As medições de penetração realizadas ao betume CEPSA 50/70 estão dentro dos limites estabelecidos para este tipo de betume. Quanto ao betume aditivado, encontra-se fora do intervalo de valores admissíveis para este betume. Contudo, não se pode afirmar que este betume não é válido, pois não há nada que indique que deva cumprir os valores especificados após aditivação. Ao contrário do esperado, o betume ficou mais duro (mais viscoso) depois de adicionado o aditivo, cujo objetivo é essencialmente facilitar a produção de espuma.

4.2 Fuso granulométrico AC 14 desgaste (BB)

Com base na Tabela 3.3, onde figuram os limites do fuso granulométrico para a mistura AC 14 desgaste (BB), e com os respetivas percentagens acumuladas de passados de cada agregado (Figura 4.7), torna-se possível traçar a fuso granulométrico pretendido. Assim, é possível saber conhecer quais serão as quantidades a usar dos agregados britados de cada fração e do filer (Tabela 4.3).

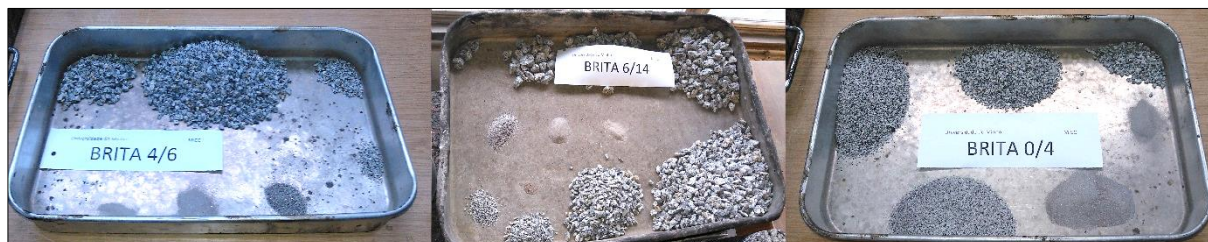


Figura 4.7 – Estudo da granulometria de cada agregado em uso

Tabela 4.3 – Fuso granulométrico da mistura AC 14 desgaste (BB)

Abertura [mm]	AB 6/14	AB 4/6	AB 0/4	Filer	AC 14 (BB)
	47,0%	10,0%	41,0%	2,0%	100,0%
20,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
16,0	99,1	100,0	100,0	100,0	99,6
14,0	93,8	100,0	100,0	100,0	97,1
12,5	80,5	100,0	100,0	100,0	90,8
10,0	53,2	100,0	100,0	100,0	78,0
6,3	9,7	87,3	100,0	100,0	56,3
4,0	2,0	5,8	93,7	100,0	41,9
2,0	1,0	2,6	71,3	100,0	32,0
0,500	0,8	2,0	39,3	100,0	18,7
0,125	0,5	1,5	16,8	100,0	9,3
0,063	0,4	1,0	10,5	99,9	6,6
Resto	0,0	0,0	0,8	0,0	0,3

De forma a facilitar a análise e comparação do fuso obtido com os limites impostos no *Caderno de Encargos da Estradas de Portugal*, o Gráfico 4.2 demonstra a curva com as percentagens acima indicadas, estando dentro dos limites admissíveis.

Tendo o fuso granulométrico calculado segue-se para a determinação da percentagem “ótima” de betume. É no próximo ponto que se determina a percentagem de betume a usar para a realização dos provetes para ensaios, sendo que esta será igual para a mistura betuminosa convencional e para a mistura betuminosa de betume-espuma.

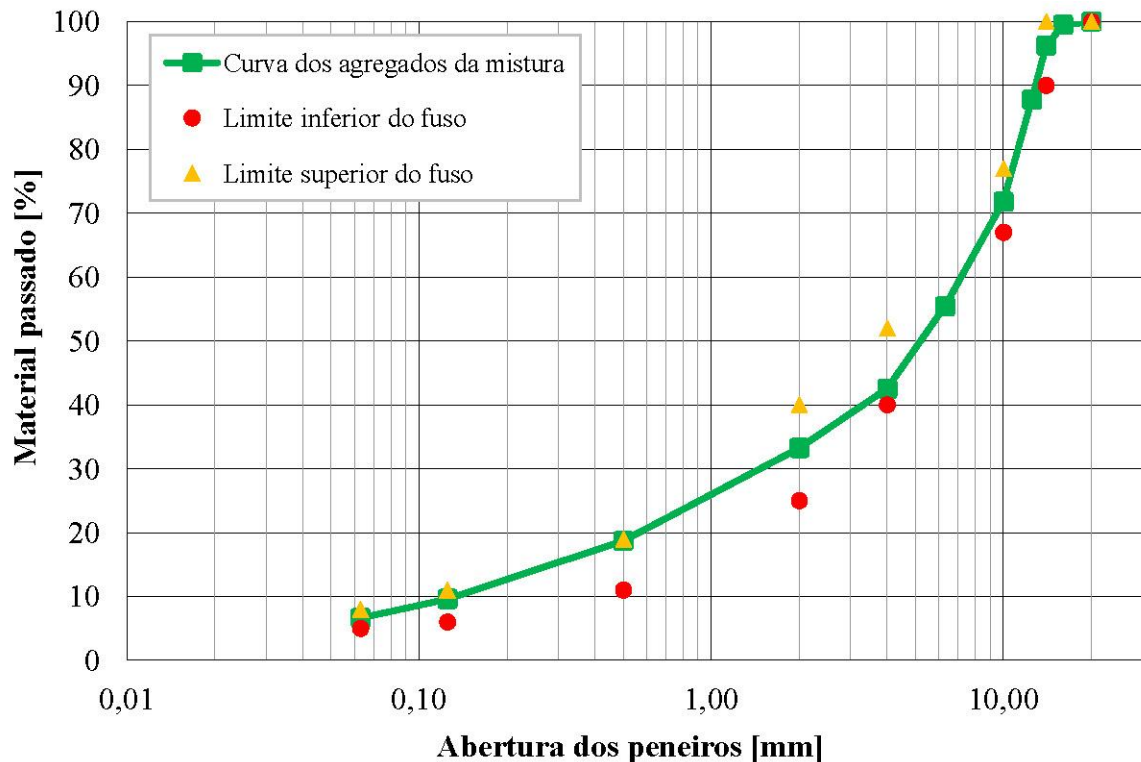


Gráfico 4.2 – Fuso granulométrico calculado para mistura AC 14 desgaste (BB)

O fuso granulométrico será igual na realização de ambas as misturas, sendo este o apresentado imediatamente antes. Contudo, e vendo-se mais à frente, certamente haverá outras condicionantes na realização da mistura betuminosa com betume-espuma.

4.3 Determinação da percentagem “ótima” de betume

Para a obtenção da percentagem “ótima” de betume recorreu-se a vários resultados obtidos nos ensaios referidos no capítulo 3.2, isto é, os resultados da baridade aparente e máxima teórica, porosidade, estabilidade e deformação Marshall, vazios na mistura de agregados, grau de saturação em betume e quociente Marshall.

No caso da baridade máxima teórica, os resultados do provetes Marshall são apresentados na Tabela A.1 no Anexo II, sendo os resultados resultantes das Equações (3.1) e (3.2).

Com os provetes de ensaio prontos, torna-se possível realizar os outros ensaios que permitem apurar a percentagem de betume ideal. No Anexo II apresentam-se os resultados obtidos de determinação da baridade aparente, pelos três métodos normalizados, em que as Equações usadas para a sua determinação estão apresentadas no subcapítulo 3.3.5.

De forma a processar os dados obtidos no cálculo das baridades, recorre-se à expressão (3.6) para determinar a porosidade de cada mistura (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Resultados da porosidade por mistura e por método

Provete	Baridade aparente [kg/cm ³]			BMT [kg/cm ³]	Porosidade [%]		
	Mtd_A	Mtd_C	Mtd_D		Mtd_A	Mtd_C	Mtd_D
4_A	2373,9	2249,9	2241,6		5,5%	10,5%	10,8%
4_B	2373,7	2253,7	2248,3	2513,2	5,6%	10,3%	10,5%
4_C	2350,3	2229,8	2213,5		6,5%	11,3%	11,9%
4.5_A	2378,8	2284,0	2258,0		4,8%	8,6%	9,7%
4.5_B	2378,4	2283,4	2278,9	2500,0	4,9%	8,7%	8,8%
4.5_C	2373,6	2276,1	2254,2		5,1%	9,0%	9,8%
5_A	2391,6	2324,7	2323,6		3,5%	6,2%	6,3%
5_B	2399,5	2330,6	2327,8	2478,8	3,2%	6,0%	6,1%
5_C	2402,5	2331,4	2309,5		3,1%	5,9%	6,8%
5.5R_A	2406,9	2343,0	2347,5		2,2%	4,8%	4,6%
5.5R_B	2411,9	2323,9	2331,8	2462,0	2,0%	5,6%	5,3%
5.5R_C	2418,3	2348,6	2360,6		1,8%	4,6%	4,1%
6_A	2416,1	2353,0	2350,5		0,8%	3,4%	3,5%
6_B	2420,8	2365,7	2335,4	2435,2	0,6%	2,9%	4,1%
6_C	2415,5	2351,3	2423,0		0,8%	3,4%	0,5%

A partir do ensaio Marshall, retiram-se os restantes parâmetros característicos das misturas em estudo, tal como a estabilidade e deformação Marshall. Dependente destes, obtém-se também os vazios na mistura de agregados, grau de saturação em betume e quociente Marshall, calculados a partir das expressões (3.9), (3.10) e (3.11), respetivamente.

Na Tabela A.5 do Anexo III estão representados os resultados obtidos das características estudadas das misturas. Com isto, traçam-se os gráficos representativos de forma a ser mais perceptível a análise da percentagem “ótima” de betume, respeitando os requisitos impostos na Tabela 3.4.

Como referido em 3.4.2, relativamente ao Gráfico A.1 foi selecionado o maior valor da baridade aparente das misturas, no Gráfico A.2 selecionou-se o valor que se encontrava entre a média dos limites de volume de vazios imposto, e no Gráfico A.3 foi escolhido o valor máximo de carga (estabilidade Marshall). A partir daí, foi calculada a média dos valores de betume correspondente a cada gráfico, optando por se considerar a percentagem “ótima” de betume igual a 5,0%.

Com este valor, foram verificados nos restantes gráficos (do Gráfico A.4 ao Gráfico A.8) se os requisitos pedidos eram respeitados. Os gráficos nomeados anteriormente encontram-se no Anexo IV. Depois desta etapa, foram realizados os ensaios adicionais referidos do subcapítulo 3.4.3 até ao 3.4.8.

4.4 Solução para betume-espuma

Como dito anteriormente, para o betume-espuma foi encontrada uma solução similar à determinação da percentagem “ótima” de betume. Por defeito, admitiu-se a quantidade de betume a utilizar igual à “ótima” que foi determinada. Adicionando a isso, a informação disponível na ficha técnica do aditivo (Anexo I), foram testadas duas quantidades de água, isto é, 2% e 3%, e um acréscimo de aditivo de 0,25%, ambos sobre a massa de betume.

4.4.1 Ensaios iniciais

Devido à inexperiência e falta de informação iniciais, foram realizados ensaios em que era espumado o betume apenas com água e ar pressurizados. Contudo, os resultados obtidos não eram coincidentes com a análise bibliográfica, previamente realizada.

De seguida, são apresentados os resultados destes ensaios iniciais, onde se verifica que o coeficiente de expansão e tempo de meia-vida não se comportam como seria esperado (por exemplo, o tempo de meia-vida segue uma tendência diferente da indicada nas referências bibliográficas). Estes ensaios foram realizados para temperaturas de mistura de 160°C, 170°C e 180°C, e são apresentados respetivamente nos Gráficos 4.3, 4.4 e 4.5. Os dados referentes a esses gráficos encontram-se no Anexo V.

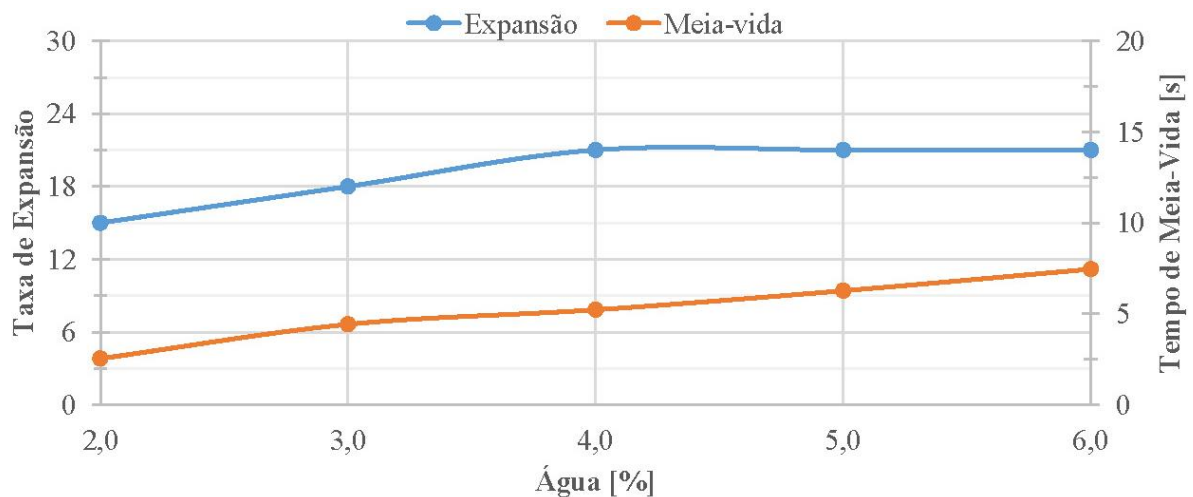


Gráfico 4.3 – Resultados obtidos para uma temperatura de produção de 160°C

4.4.2 Ensaios ao betume com aditivo

Conforme se foi verificando os maus resultados que o betume inicial ia tendo, teve-se de partir para uma pesquisa mais detalhada sobre esta matéria. Com isto, foram obtidas informações de grande relevo, tais como a possibilidade das refinarias adicionarem aditivos aos betumes (que

eram para distribuição) para não espumar durante as viagens, ou então, que betumes mais duros (de maior viscosidade) deviam ser aditivados de forma a obter-se características que permitissem a criação de espuma. Com a existência destas hipóteses estarem a acontecer com o betume utilizado e de forma a garantir que não se alterava essa variável (o betume), o estudo foi realizado com o mesmo tipo de betume base.

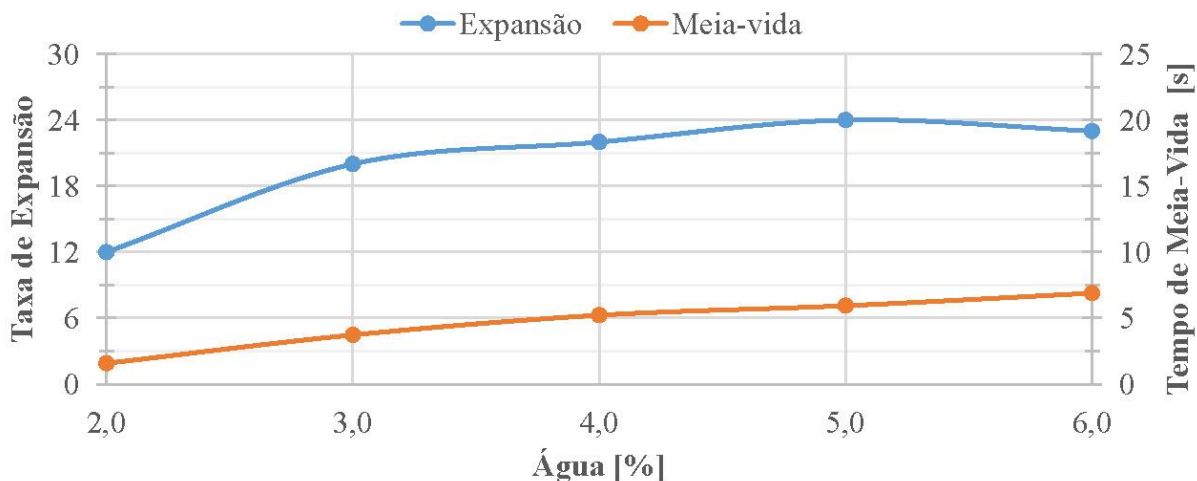


Gráfico 4.4 – Resultados obtidos para uma temperatura de produção de 170°C

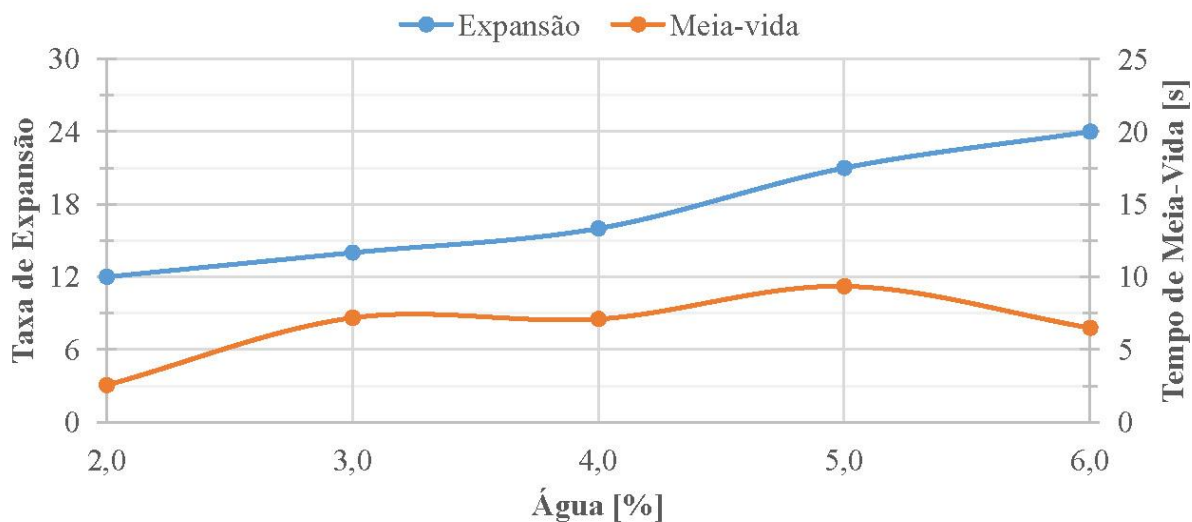


Gráfico 4.5 – Resultados obtidos para uma temperatura de produção de 180°C

Assim, foi necessário adquirir um aditivo que permitisse a realização de betume-espuma dentro dos contornos expectáveis. No Gráfico 4.6, obtido com o betume aditivado a 170°C, já se vê os parâmetros fundamentais de expansão e meia-vida com valores admissíveis para realização de misturas betuminosas. Para a curva de meia-vida foi traçada uma linha de tendência, de forma a ser possível prever o comportamento do betume aditivado para valores fora do intervalo estudado.

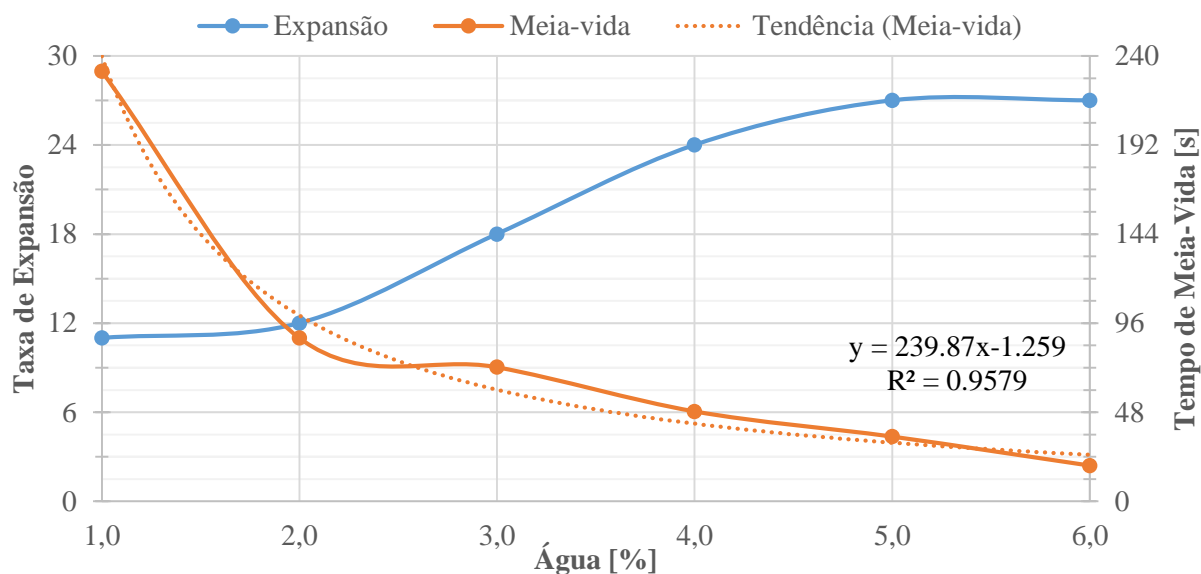


Gráfico 4.6 – Resultados obtidos para uma temperatura de produção de 170°C com betume aditivado

De modo a se tornar um estudo mais completo e viável, visto que a taxa de expansão é medida visualmente e através de uma escala, foram retiradas as dimensões dos utensílios usados como também efetuados cálculos de forma a obter essa mesma expansão analiticamente (Gráfico 4.7). Contudo, mesmo deste modo, é necessário recorrer ao apoio visual para a contagem do tempo de meia-vida, o que demonstra ser necessário recorrer a outros métodos para se conseguir ter mais rigor na medição dos parâmetros de caracterização do betume-espuma.

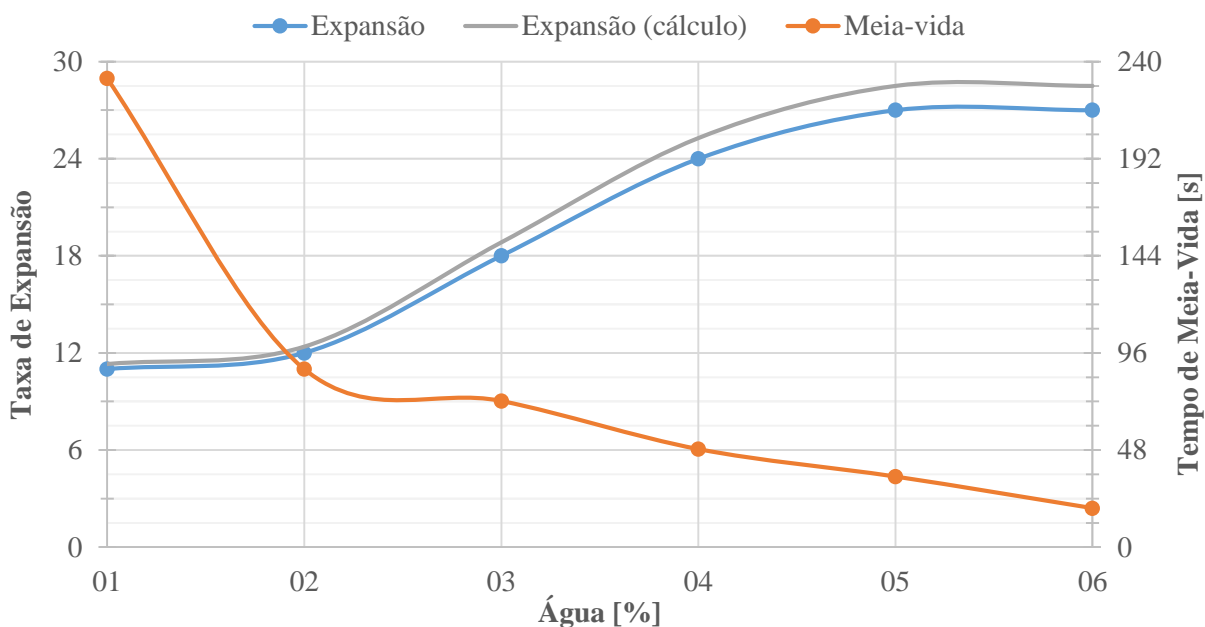


Gráfico 4.7 – Comparação da medição da expansão, visualmente e através de cálculo

Traduzindo os resultados obtidos, através de cálculo, para a taxa da escala pode-se verificar que a diferença obtida não é significativa, ou seja, chega-se a uma diferença entre a taxa de expansão

calculada e a taxa de expansão visual entre os 2,5mm e os 12mm, em altura. No Anexo V encontram-se as tabelas com os valores correspondentes a cada gráfico apresentado neste subcapítulo.

Finalmente pode verificar-se que o ponto de cruzamento entre a expansão e a meia-vida ocorreu para uma percentagem de água de 2%, que foi a percentagem utilizada para realização do estudo mais completo na fase de caracterização das misturas. Além disso, e porque subsistiram algumas dúvidas na análise destes resultados, numa fase inicial também se estudaram misturas com betume-espuma produzido com 3% de água.

4.5 Resistência à tração indireta

Como visto nos subcapítulos 3.4.3 e em 3.4.4, efetuou-se o cálculo da resistência à tração indireta através de dois procedimentos. Por sensibilidade à água de forma normalizada e com provetes obtidos no ensaio de compactabilidade (de forma complementar esse estudo, adaptando-se a norma usada no outro procedimento).

4.5.1 Resistência à tração indireta por sensibilidade à água

Ensaiaados os provetes Marshall, são agora realizados os provetes para sensibilidade à água com as percentagens de betume indicadas antes, como também os provetes realizados com as diferentes percentagens de água descritas.

Primeiramente, estes provetes são submetidos aos ensaios de baridade mencionados nos subcapítulos 3.3.3 e 3.3.5. Os resultados obtidos dos provetes com mistura convencional são apresentados nas tabelas do Anexo VII, e os resultados dos provetes da mistura realizada com betume-espuma encontram-se no Anexo VIII.

De seguida são apresentados os valores da baridade aparente, pelos três métodos de cálculo e a baridade máxima teórica para os provetes com mistura convencional (Tabela 4.5) e para os provetes da mistura realizada com betume-espuma, com 2% (Tabela 4.6) e 3% (Tabela 4.7) de água, completando-se essas Tabelas com os resultados da porosidade, obtidos através da Equação (3.6).

Numa primeira análise, verifica-se a disparidade que existe entre os valores das porosidades obtidas nos provetes da mistura convencional e nos provetes de betume-espuma. Porém, é de realçar que mesmo entre os provetes de betume-espuma, as diferentes percentagens de água originam valores de porosidade que divergem um pouco, e que demonstram que a percentagem de água ideal é 2% (a porosidade é elevada com 3% de água).

Tabela 4.5 – Resultados da porosidade e das baridades aparente e máxima teórica dos provetes, para sensibilidade à água, realizados com mistura convencional

Provete	Baridade aparente [kg/cm ³]			BMT [kg/cm ³]	Porosidade [%]		
	Mtd_A	Mtd_C	Mtd_D		Mtd_A	Mtd_C	Mtd_D
CD_4.5N_1	2375,4	2292,6	2265,3	2502,8	5,1%	8,4%	9,5%
CD_4.5N_2	2366,3	2290,2	2277,5		5,5%	8,5%	9,0%
CD_4.5N_3	2375,9	2289,7	2275,6		5,1%	8,5%	9,1%
CD_4.5N_4	2370,8	2268,7	2247,2		5,3%	9,4%	10,2%
CD_4.5N_5	2362,1	2285,0	2281,2		5,6%	8,7%	8,9%
CD_4.5N_6	2372,3	2277,3	2252,3		5,2%	9,0%	10,0%
CD_5N_1	2409,0	2348,3	2336,0	2493,1	3,4%	5,8%	6,3%
CD_5N_2	2394,3	2312,5	2317,1		4,0%	7,2%	7,1%
CD_5N_3	2405,2	2342,9	2332,4		3,5%	6,0%	6,4%
CD_5N_4	2386,4	2305,9	2292,9		4,3%	7,5%	8,0%
CD_5N_5	2384,8	2310,2	2305,0		4,3%	7,3%	7,5%
CD_5N_6	2391,1	2307,9	2289,5		4,1%	7,4%	8,2%
CD_5.5N_1	2425,9	2375,3	2401,4	2462,6	1,5%	3,5%	2,5%
CD_5.5N_2	2426,2	2369,7	2349,2		1,5%	3,8%	4,6%
CD_5.5N_3	2418,7	2359,8	2363,5		1,8%	4,2%	4,0%
CD_5.5N_4	2424,3	2368,2	2358,4		1,6%	3,8%	4,2%
CD_5.5N_5	2420,4	2366,1	2393,7		1,7%	3,9%	2,8%
CD_5.5N_6	2420,3	2354,1	2341,1		1,7%	4,4%	4,9%

Tabela 4.6 – Resultados da porosidade e das baridades aparente e máxima teórica dos provetes, para sensibilidade à água, realizados com betume-espuma e 2% de água

Provete	Baridade aparente [kg/cm ³]			BMT [kg/cm ³]	Porosidade [%]		
	Mtd_A	Mtd_C	Mtd_D		Mtd_A	Mtd_C	Mtd_D
DB_A2_1	2388,1	2332,9	2332,1	2457,5	2,8%	5,1%	5,1%
DB_A2_2	2389,5	2340,9	2317,9		2,8%	4,7%	5,7%
DB_A2_3	2392,6	2340,8	2291,6		2,6%	4,7%	6,7%
DB_A2_4	2396,4	2340,5	2319,9		2,5%	4,8%	5,6%
DB_A2_5	2386,0	2327,9	2301,7		2,9%	5,3%	6,3%
DB_A2_6	2389,6	2304,6	2322,7		2,8%	6,2%	5,5%

Tabela 4.7 – Resultados da porosidade e das baridades aparente e máxima teórica dos provetes, para sensibilidade à água, realizados com betume-espuma e 3% de água

Provete	Baridade aparente [kg/cm ³]			BMT [kg/cm ³]	Porosidade [%]		
	Mtd_A	Mtd_C	Mtd_D		Mtd_A	Mtd_C	Mtd_D
DB_A3_1	2381,0	2319,4	2305,4	2490,3	4,4%	6,9%	7,4%
DB_A3_2	2371,5	2308,7	2270,9		4,8%	7,3%	8,8%
DB_A3_3	2384,4	2313,3	2324,8		4,3%	7,1%	6,6%
DB_A3_4	2371,1	2302,2	2287,4		4,8%	7,6%	8,1%
DB_A3_5	2375,3	2307,6	2295,6		4,6%	7,3%	7,8%
DB_A3_6	2379,1	2318,7	2309,2		4,5%	6,9%	7,3%

A partir daqui são feitos 2 grupos de 3 provetes, de cada percentagem de betume, com baridades e alturas similares, de forma a ter amostras equivalentes para o ensaio de sensibilidade à água. Da mesma forma para os provetes realizados com a mistura com betume-espuma, foram divididos em 2 grupos de 3 provetes, para cada percentagem de água estudada. Estes dados encontram-se no Anexo IX.

Depois dos provetes serem submetidos aos condicionalismos indicados no ensaio de sensibilidade à água, os provetes são agora ensaiados à resistência em tração indireta. Recorrendo à prensa Marshall, devidamente adaptada com sistema de aplicação de carga com bandas de carga, verificou-se os valores de força máxima e deformação de pico.

Em seguida, com recurso às Equações (3.12) e (3.13) calcula-se a resistência conservada em tração indireta para as várias misturas em estudo. Nas Tabelas 4.8 e 4.9 são apresentados os dados e resultados obtidos nos ensaios de sensibilidade à água, respetivamente para as misturas convencionais a quente (para 3 percentagens de betume) e as misturas semi-temperadas produzidas com betume-espuma (2% e 3% de água).

Tabela 4.8 – Resultados da resistência conservada em tração indireta, com grupos de provetes secos (d) e saturados (w), para mistura convencional

Grupo	Provete	Força Máxima [kN]	Força Média [kN]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	ITS [kPa]	ITSR [%]
1_d	CD_4.5N_3	18,42	17,89	102	62,6	1783,71	52%
	CD_4.5N_5	18,61		102	62,5	1786,56	
	CD_4.5N_6	16,64		102	63,3	1763,98	
1_w	CD_4.5N_1	8,98	9,29	102	63,1	918,48	
	CD_4.5N_2	9,64		102	62,6	925,82	
	CD_4.5N_4	9,24		102	62,9	921,40	
2_d	CD_5N_2	19,46	19,63	102	61,9	1979,41	62%
	CD_5N_3	21,00		102	61,6	1989,05	
	CD_5N_4	18,44		102	62,5	1960,41	
2_w	CD_5N_5	11,67	12,21	102	61,8	1233,01	
	CD_5N_6	11,97		102	62,7	1215,31	
	CD_5N_1	12,99		102	61,4	1241,05	
3_d	CD_5.5N_6	20,79	20,93	102	61,7	2116,79	84%
	CD_5.5N_2	21,25		102	61,8	2113,37	
	CD_5.5N_5	20,73		102	61,1	2137,58	
3_w	CD_5.5N_4	17,79	17,41	102	61,9	1755,22	
	CD_5.5N_3	16,60		102	61,4	1769,51	
	CD_5.5N_1	17,84		102	60,6	1792,87	

Analisando os resultados obtidos nos provetes da mistura convencional, verifica-se que existe um melhor resultado para a percentagem de 5,5%. Contudo, a percentagem escolhida, os 5% de betume, estão dentro dos limites estipulados na EN 13108-1, sendo considerada que se encontra na categoria *ITSR*₆₀.

Tabela 4.9 – Resultados da resistência conservada em tração indireta, com grupos de provetes secos (d) e saturados (w), para betume-espuma

Grupo	Provete	Força Máxima [kN]	Força Média [kN]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	ITS [kPa]	ITSR [%]
2_d	DB_A2_2	18,53		102	62,2	1918,38	50%
	DB_A2_4	20,20	19,12	102	62,1	1921,47	
	DB_A2_5	18,62		102	61,8	1930,79	
2_w	DB_A2_1	10,39		102	62,4	965,87	
	DB_A2_3	11,91	9,66	102	62,7	961,25	
	DB_A2_6	6,68		102	62,1	970,53	
3_d	DB_A3_3	16,98		102	60,4	1801,20	27%
	DB_A3_4	17,88	17,43	102	62,2	1749,08	
	DB_A3_5	17,43		102	62,8	1732,37	
3_w	DB_A3_1	6,18		102	63,1	480,32	
	DB_A3_2	4,03	4,86	102	61,5	492,81	
	DB_A3_6	4,36		102	63,5	477,29	

Quanto aos resultados obtidos nos provetes realizados com betume-espuma, encontram-se abaixo desses limites. A partir destes dados optou-se por seguir o estudo apenas com a percentagem de 2% de água, porque as misturas com 3% de água apresentavam resultados muito pouco promissores de ITSR (apenas 27%). Este resultado confirma a pesquisa bibliográfica que salienta que a percentagem “ótima” de água no betume-espuma anda por volta dos 2%.

4.5.2 Resistência à tração indireta nos provetes de compactabilidade

Com recurso à Equação (3.12) calcula-se a resistência à tração indireta, sendo que este estudo é apenas complementar. Apesar disso, este momento de ensaio é similar ao já efetuado por sensibilidade à água. De seguida são apresentados os resultados obtidos pelos dados transmitidos da máquina de compressão do tipo Marshall e pela medição das dimensões dos provetes, conforme a norma EN 12697-29.

Para a mistura convencional foram efetuados quatro provetes com a percentagem “ótima” de betume (Tabela 4.10) e para a mistura com betume-espuma foram realizados dois provetes para cada percentagem de água (Tabela 4.11), resultando num conjunto de quatro provetes com betume-espuma.

Através das tabelas com os resultados obtidos pode-se verificar que os provetes realizados com a mistura convencional apresentam uma resistência à tração indireta semelhante aos da mistura com betume-espuma, pelo procedimento da compactabilidade.

Tabela 4.10 – Resultados da resistência à tração indireta, por compactação, para provetes da mistura convencional

Provete	Força Máxima [kN]	Deformação de Pico [mm]	Força Média [kN]	Deformação Média [mm]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	ITS [kPa]
CD_c1_qn_bn	19,85	4,01	20,56	3,16	102	63,0	2036,48
CD_c2_qn_bn	21,26	3,40			102	62,7	2046,22
CD_c3_qn_bn	18,19	2,58			102	64,1	2001,53
CD_c4_qn_bn	22,92	2,62			102	62,2	2062,67

Tabela 4.11 – Resultados da resistência à tração indireta, por compactação, para provetes de betume-espuma

Provete	Força Máxima [kN]	Deformação de Pico [mm]	Força Média [kN]	Deformação Média [mm]	Diâmetro [mm]	Altura [mm]	ITS [kPa]
DB_A2_7	21,03	3,42	21,82	3,06	102	62,7	2171,84
DB_A2_8	22,61	2,71			102	62,7	2171,84
DB_A3_7	18,63	2,46	19,44	2,72	102	63,4	1913,69
DB_A3_8	20,25	2,97			102	63,1	1922,79

Contudo, os provetes de betume-espuma com 2% de água apresentam valores maiores de ITS do que os provetes convencionais da mistura AC 14 desgaste 50/70 (BB). Isto indica que a mistura realizada com betume-espuma é viável e até tem melhores indicadores de ITS do que a mistura convencional nos provetes do método experimental da compactabilidade.

4.6 Resultados de compactabilidade

Após se ter realizado mistura com a percentagem “ótima” de betume e mistura com betume-espuma, foram compactados 8 provetes (anteriormente referido) com uma carga máxima de 200 pancadas, sendo que 4 provetes eram de mistura convencional e os outros 4 de betume-espuma (dois para cada percentagem de água). Com o auxílio de um LVDT, foi registado o assentamento da mistura consoante o impacto da carga. No Anexo X são apresentados os gráficos de assentamento dos provetes de cada mistura, sendo que o Gráfico 4.8 apresenta a média do assentamento dos provetes ensaiados em cada caso.

Com base neste gráfico pode-se visualizar que os provetes realizados com mistura convencional têm maior dificuldade em serem compactados do que os provetes realizados com betume-espuma. Em relação aos provetes de betume-espuma, aparentemente a percentagem de água afeta pouco a compactação, verificando-se que os provetes executados com 2% de água são um pouco mais difíceis de compactar que os provetes com 3% de água.

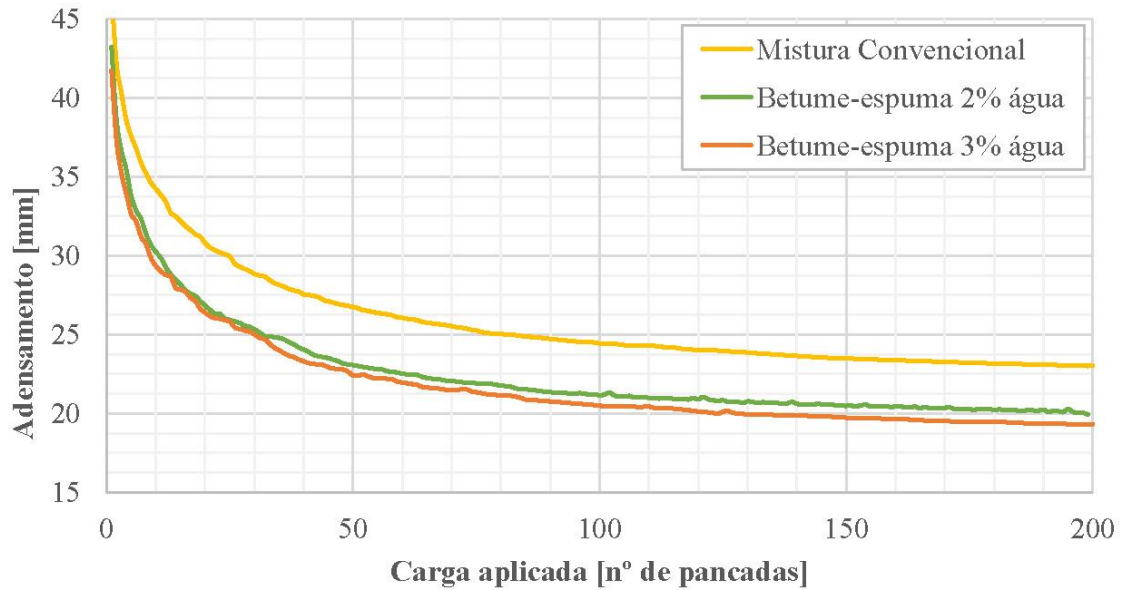


Gráfico 4.8 – Média do assentamento obtido dos provetes ensaiados

Com os dados dos assentamentos de cada provete é possível calcular a porosidade ao longo das pancadas a que são submetidos, sendo este resultados mais fiáveis do que os anteriores por terem uma relação com o desempenho das misturas. Assim, de seguida é apresentado o Gráfico 4.9 relativo à porosidade média dos provetes de mistura convencional e de betume-espuma (com 2 e 3% de água).

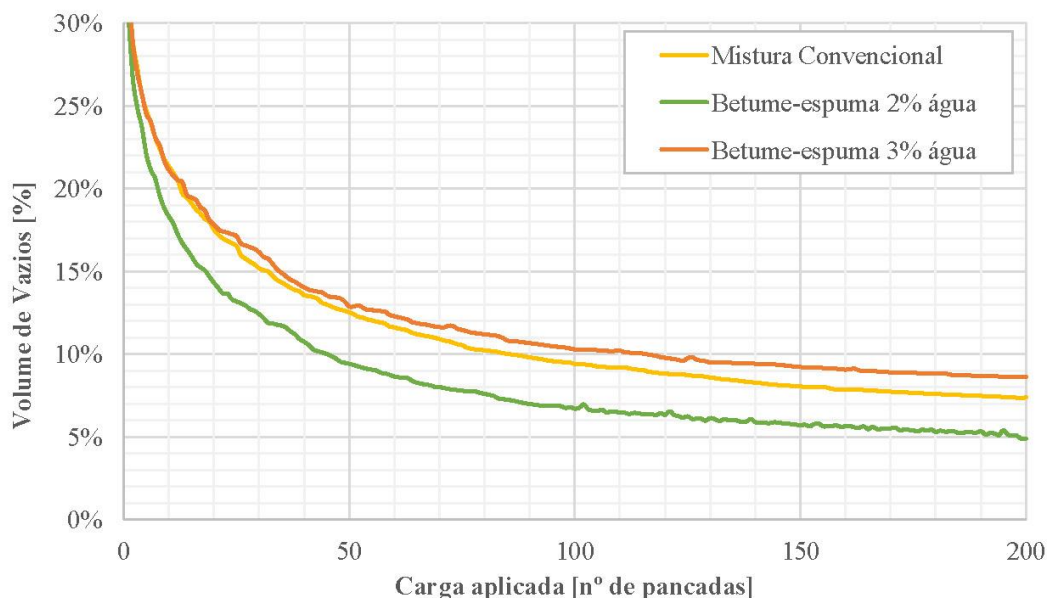


Gráfico 4.9 – Média da porosidade obtida dos provetes ensaiados

Com base nas curvas traçadas no gráfico pode-se verificar que os provetes das misturas realizadas com betume-espuma (a 115 °C) podem ter melhor trabalhabilidade e ser menos porosos do que a mistura convencional a quente (145 °C), mas apenas quando se utilizou 2%

de água no betume-espuma, visto que a porosidade da mistura com betume espuma aumentou bastante quando se utilizou 3% de água no betume espuma. Assim, verifica-se que a porosidade das misturas com betume espuma é relativamente sensível à quantidade de água utilizada para espumar o betume. No Anexo XI encontram-se os gráficos com as curvas da porosidade de cada provete.

4.7 Resistência à deformação permanente

Através do ensaio de pista pode-se determinar a deformação que uma mistura betuminosa poderá ter devido à passagem de tráfego. Como anteriormente referido, são obtidos vários resultados no ensaio de pista. Porém, dar-se-á mais ênfase a alguns valores indicados na norma de ensaio e que são determinados pelas expressões (3.16) e (3.17). De referir, que a temperatura média de ensaio foi 50°C e teve uma duração média de 6 horas por laje.

Para a mistura realizada com betume-espuma foram usados os mesmos critérios, de forma a simplificar a análise comparativa entre misturas. Neste ensaio foram ensaiadas duas lajetas para cada percentagem de betume na mistura convencional (4,5%, 5,0% e 5,5%) e apenas duas lajetas para a mistura com betume-espuma selecionada (com 2% de água).

Tabela 4.12 – Resultados obtidos da análise de dados do ensaio de pista

Ref. ^a Amostra	Profundidade de rodeira em N ciclos [mm]		Profundidade de rodeira máxima [mm]		Profundidade de rodeira máxima [%]		Taxa de deformação [mm/10 ³ ciclos]	
	<i>d</i> ₅₀₀₀	<i>d</i> ₁₀₀₀₀	<i>RD</i> _{AIR}	Média	<i>PRD</i> _{AIR}	Média	<i>WTS</i> _{AIR}	Média
4,5N_Laj1	3,2	3,7	3,74	3,77	9,3%	9,4%	0,11	0,12
4,5N_Laj2	3,1	3,8	3,80		9,4%		0,14	
5N_Laj1	4,0	4,8	4,81	5,22	11,9%	12,9%	0,17	0,18
5N_Laj2	4,7	5,6	5,63		14,0%		0,19	
5,5N_Laj1	5,7	7,1	7,06	6,12	17,6%	15,2%	0,27	0,24
5,5N_Laj2	4,1	5,2	5,17		12,9%		0,21	
A2_Laj1	5,0	6,0	5,98	5,69	14,4%	13,8%	0,19	0,20
A2_Laj2	4,4	5,4	5,39		13,1%		0,20	

No Anexo XII são apresentados todos os gráficos da profundidade da rodeira ao longo dos ciclos de carga que foram aplicados, com uma carga de 700N, para as misturas convencionais e para a mistura com betume-espuma.

Nos resultados obtidos pode-se verificar que as lajetas fabricadas com a mistura de betume-espuma encontram-se dentro dos mesmo valores que as lajetas executadas com mistura convencional (ao comparar misturas com o mesmo teor em betume). Para os três parâmetros

estudados, a mistura com betume-espuma tem valores que se encontram entre as percentagens de 5,0% e 5,5% da mistura convencional, verificando-se que tem um comportamento bastante semelhante a estas, como se pretendia.

4.8 Módulo de rigidez

Depois de submetidas as vigas ao equipamento de flexão em quatro pontos, foram registados e processados os dados relativos ao módulo de rigidez obtidos no mesmo. Com esses dados, calculam-se as médias dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das vigas ensaiadas a cada temperatura. O mesmo processo foi realizado para as vigas da mistura com betume-espuma com 2% de água. Convém referir que nesta fase apenas se produziram misturas convencionais com 5% de betume, considerada a percentagem ótima após análise dos resultados dos ensaios de sensibilidade à água e de pista.

No Anexo XIII encontram-se as tabelas com os resultados da média dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das vigas ensaiadas com a mistura convencional e com a mistura de betume-espuma. De forma a facilitar uma análise dessas tabelas, em seguida são traçados os gráficos representativos dos resultados obtidos para a mistura convencional a quente (145°C) em termos de rigidez (Gráfico 4.10) e ângulo de fase (Gráfico 4.11). O mesmo tipo de resultados representativos dos resultados obtidos neste ensaio para a mistura produzida com betume-espuma a temperaturas muito inferiores (115°C) são apresentadas no Gráfico 4.12 (módulo de rigidez) e no Gráfico 4.13 (ângulo de fase).

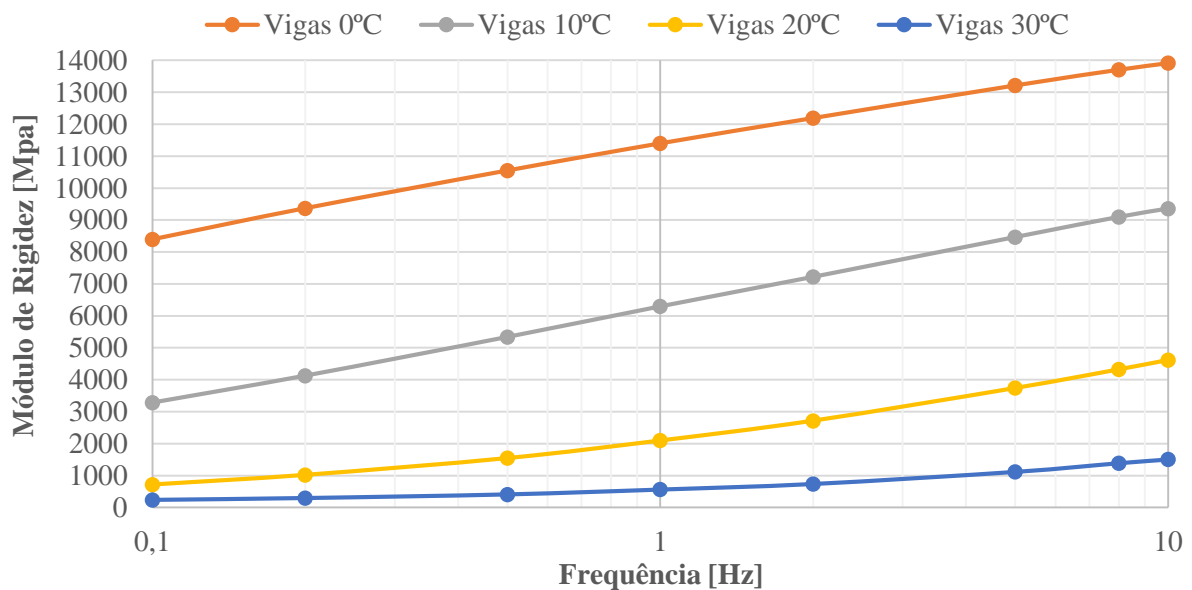


Gráfico 4.10 – Resultados da média dos módulos de rigidez das vigas com mistura convencional às temperaturas em estudo

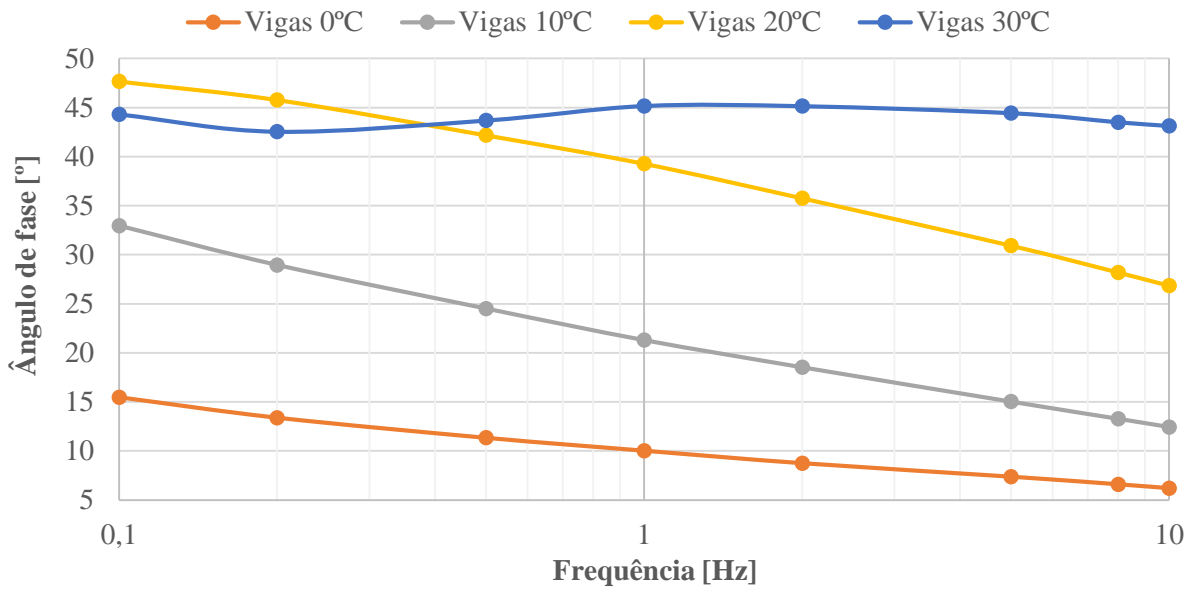


Gráfico 4.11 – Resultados da média dos ângulos de fase das vigas com mistura convencional às temperaturas em estudo

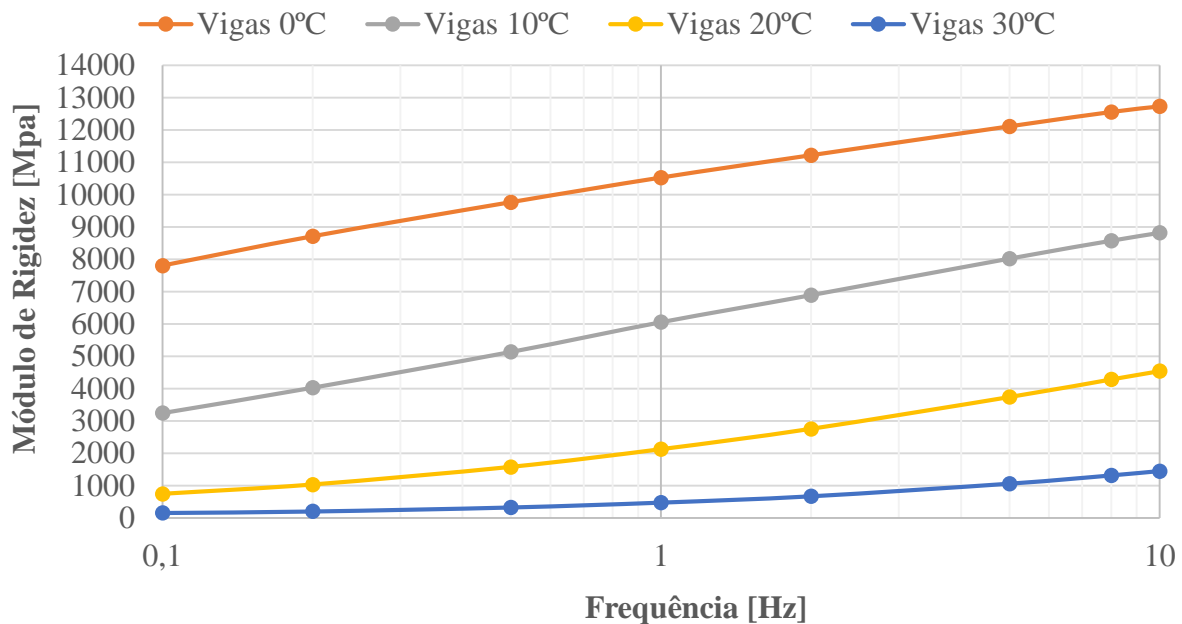


Gráfico 4.12 – Resultados da média dos módulos de rigidez das vigas com mistura de betume-espuma às temperaturas em estudo

Verifica-se que ambas as misturas têm comportamentos muito semelhantes. Atendendo aos Gráfico 4.10 e Gráfico 4.12 denota-se que o comportamento das misturas se manifesta de uma maneira muito similar sendo que a mistura convencional apenas se evidencia um pouco mais rígida com temperaturas mais baixas, onde o seu módulo é um pouco maior (o que até pode ser negativo, e um sinal de maior fragilidade nessa gama de temperaturas).

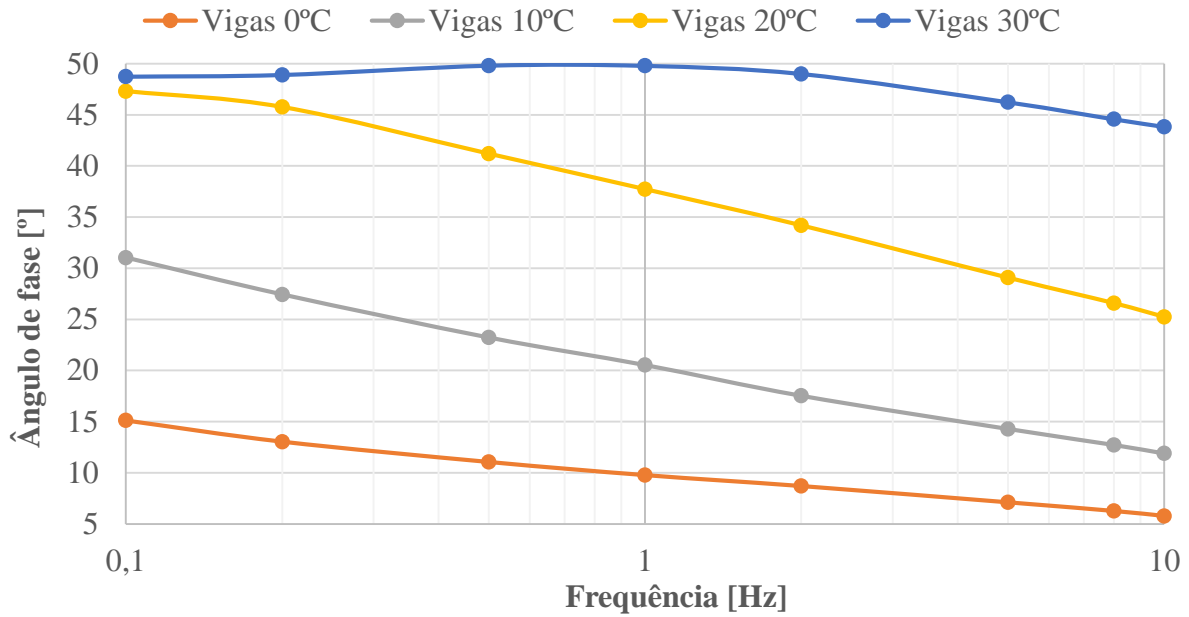


Gráfico 4.13 – Resultados da média dos ângulos de fase das vigas com mistura de betume-espuma às temperaturas em estudo

Quanto aos Gráfico 4.11 e Gráfico 4.13, os ângulos de fase da nova mistura com betume-espuma também é muito próximo do observado para a mistura convencional, o que confirma que já se está a conseguir ter um desempenho muito próximo do ideal para a nova mistura em desenvolvimento, que foi produzida a uma temperatura muito inferior.

Relativamente aos módulos de rigidez e ângulos de fase das vigas à temperatura de serviço de 20°C, para a mistura convencional e para a mistura com betume-espuma, obteve-se os resultados apresentados respetivamente na Tabela 4.13 e 4.14.

Tabela 4.13 – Resultados das médias dos módulos de rigidez e ângulos de fase obtidos em 9 vigas a 20°C, com os respetivo desvios-padrão para as vigas de mistura convencional

Frequência [Hz]	Valores Médios		Desvio-Padrão	
	Módulo [MPa]	Ângulo de fase [°]	Módulo [MPa]	Ângulo de fase [°]
0,1	793,98	47,1	57,56	1,3
0,2	1099,11	45,6	61,31	1,1
0,5	1672,10	41,9	97,74	0,6
1	2243,04	38,7	119,90	0,6
2	2896,82	35,1	152,57	0,6
5	3966,09	30,1	199,83	0,6
8	4561,57	27,3	219,95	0,6
10	4849,28	26,0	222,56	0,6
0,1	752,68	46,5	43,67	1,5

Tabela 4.14 – Resultados das médias dos módulos de rigidez e ângulos de fase obtidos em 9 vigas a 20°C, com os respectivo desvios-padrão para as vigas de mistura com betume-espuma

Frequência [Hz]	Valores Médios		Desvio-Padrão	
	Módulo [MPa]	Ângulo de fase [°]	Módulo [MPa]	Ângulo de fase [°]
0,1	651,46	48,6	28,23	1,6
0,2	933,71	47,1	31,17	0,7
0,5	1447,95	43,0	52,85	0,9
1	1970,84	39,7	62,85	0,8
2	2583,20	35,9	78,81	0,5
5	3570,35	30,7	117,43	0,4
8	4120,63	28,0	123,45	0,3
10	4390,08	26,7	133,94	0,2
0,1	645,96	48,4	36,92	1,9

Para facilitar a análise dos dados e ver melhor o comportamento das vigas, os mesmos resultados são representados graficamente, onde se pode verificar a média dos módulos de rigidez e ângulos de fase das nove vigas ensaiadas e 20°C para cada mistura betuminosa (Gráfico 4.14 para os módulos de rigidez das misturas e Gráfico 4.15 para os ângulos de fase das misturas).

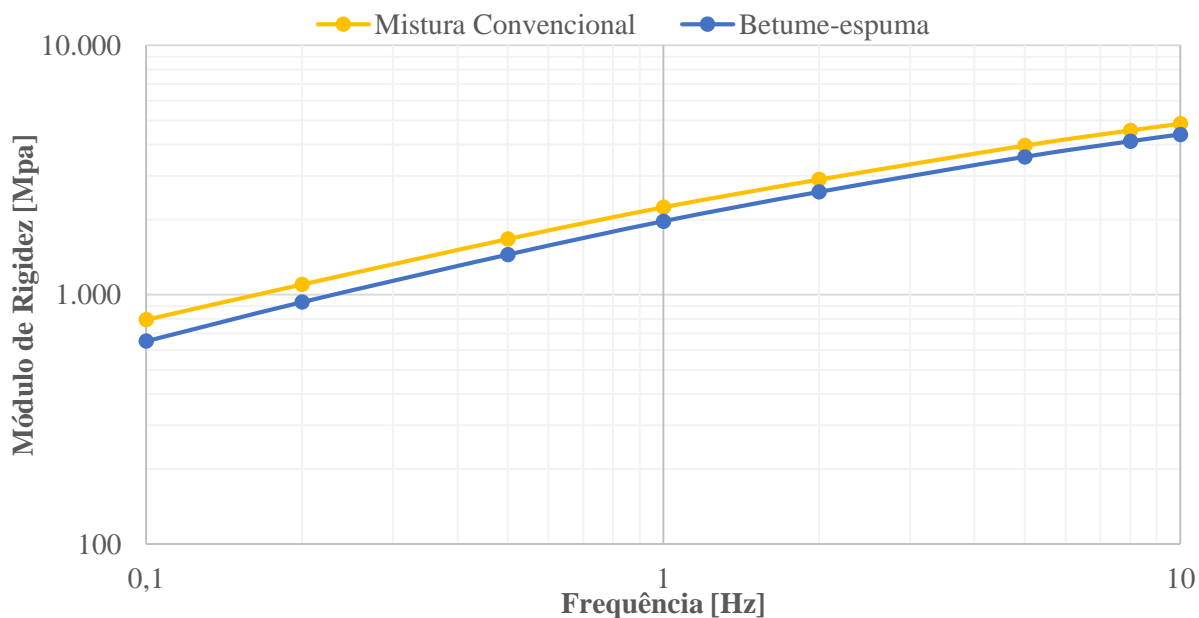


Gráfico 4.14 – Resultados da média dos módulos de rigidez das misturas

Tendo em atenção às tabelas e aos gráficos representados, verificam-se resultados de ângulos de fase praticamente iguais e os resultados de módulo de rigidez apresentam diferenças reduzidas mas variáveis com a frequência, na ordem de apenas 140MPa para a frequência mínima e 460MPa para a frequência mais alta (valores aproximados).

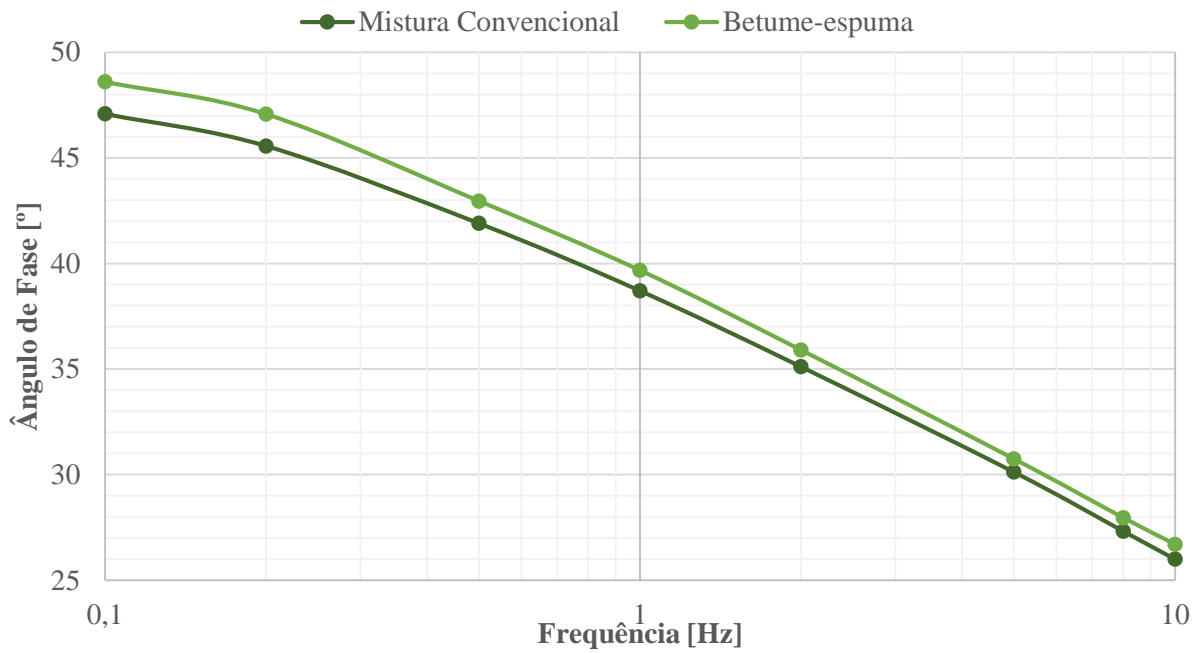


Gráfico 4.15 – Resultados da média dos ângulos de fase das misturas

4.9 Resistência à fadiga

Após o ensaio à fadiga das 9 vigas estudadas, em flexão em quatro pontos, os resultados obtidos foram os apresentados em seguida, sendo que a Tabela 4.15 apresenta os resultados de fadiga da mistura convencional e a Tabela 4.16 os resultados de fadiga da mistura com betume-espuma. Com os dados da extensão e da vida à fadiga traça-se uma linha de tendência com base na expressão (3.18).

Tabela 4.15 – Resultados, do ensaio à flexão em quatro pontos, da vida à fadiga para as vigas da mistura convencional

Viga	Módulo Inicial (MPa)	Extensão (E^{-6})	Vida à fadiga (ciclos)
CDN1	3703,40	822,074	6,944E+03
CDN2	4027,50	273,819	2,176E+05
CDN3	4623,17	446,398	1,382E+05
CDN4	4546,92	261,385	1,111E+06
CDN5	4424,17	474,006	9,949E+04
CDN6	4146,21	510,229	4,876E+04
CDN7	4699,49	287,653	6,538E+05
CDN8	3568,83	838,391	8,234E+03
CDN9	3393,21	826,062	7,604E+03

Em seguida, foi possível traçar um gráfico comparativo com as leis de fadiga das duas misturas estudadas e referentes aos dados das tabelas anteriores (Gráfico 4.16).

Tabela 4.16 – Resultados, do ensaio à flexão em quatro pontos, da vida à fadiga para as vigas da mistura com betume-espuma

Viga	Módulo Inicial (MPa)	Extensão (E ⁻⁶)	Vida à fadiga (ciclos)
DBA21	3440,06	730,463	1,723E+04
DBA22	3622,46	718,639	1,027E+04
DBA23	3980,69	294,303	3,138E+05
DBA24	4415,59	239,689	1,492E+06
DBA25	4070,02	437,061	2,138E+05
DBA26	4015,19	406,272	2,333E+05
DBA27	3605,94	717,162	1,381E+04
DBA28	4077,08	445,285	1,016E+05
DBA29	4042,21	238,756	2,138E+06

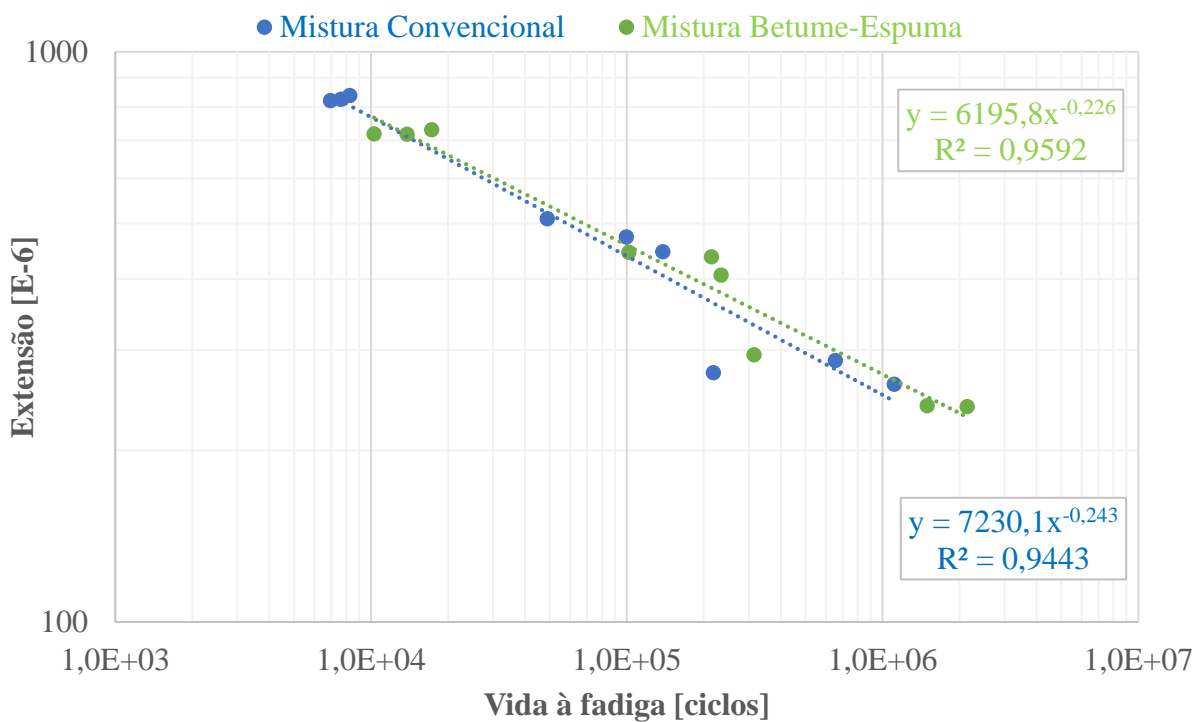


Gráfico 4.16 – Resultados obtidos com ensaio à flexão em quatro pontos com linha de fadiga para cada tipo de mistura

Com recurso aos dados das tabelas e do Gráfico 4.16, determinam-se os parâmetros da resistência ao fendilhamento por fadiga para uma extensão de tração de 100×10^{-6} (N₁₀₀) e extensão de tração que origina uma resistência ao fendilhamento por fadiga de 1×10^6 ciclos (ϵ_6), de forma a ter uma expressão do tipo da expressão (3.18). Esses parâmetros são apresentados na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Parametros da resistência ao fendilhamento por fadiga

Mistura betuminosa	Parâmetros da lei de fadiga			N ₁₀₀	ε ₆
	a	b	R ²		
Convencional	1,731E+15	3,879	0,9443	3,029E+07	241
Betume-espuma	1,929E+16	4,239	0,9592	6,405E+07	267

Relativamente aos resultados de fadiga, verifica-se que a mistura semi-temperada com betume-espuma conseguiu ter uma vida à fadiga muito semelhante à mistura convencional a quente, e até ligeiramente superior, o que é um aspeto muito positivo relativamente ao desempenho que já se conseguiu obter com este tipo de misturas que recorrem à injeção de ínfimas quantidades de água para sua produção a uma temperatura, no caso deste trabalho, 30°C inferior à mistura a quente.

4.10 Adesividade entre betume-agregado

Este ensaio tinha como objetivo a comparação entre os dois tipos de ligante (betume e betume-espuma, para o mesmo tipo de agregado). Contudo, devido aos resultados obtidos logo no primeiro ensaio com o betume base não se realizou essa comparação. Ainda assim, o betume e os agregados usados na mistura convencional foram submetidos a este ensaio e, com o auxílio de dois técnicos de laboratório experientes, foi avaliada a afinidade betume-agregado ao fim de 6 horas (Figura 4.8) e ao fim de 24 horas de ensaio (Figura 4.9).



Figura 4.8 – Resultados obtidos após 6 horas

Como se pode ver na Figura 4.8, o betume não teve a afinidade esperada com o agregado, sendo avaliada numa média de apenas 35% de adesividade, por os dois técnicos, no final de 6 horas. De seguida foi dada continuidade ao ensaio, sendo a próxima avaliação daí a 18 horas (perfazendo 24 horas). A avaliação efetuada indicou uma média de 5% de afinidade, também pelos dois técnicos. Estes maus resultados, em parte causados pelo tipo de agregados, ajuda a compreender os maus resultados de sensibilidade à água observados anteriormente.



Figura 4.9 – Resultados obtidos após 24 horas

4.11 Determinação da percentagem real de betume

Com objetivo de certificar o estudo com betume-espuma foi realizado o ensaio de determinação da percentagem de betume por ignição, através duma mufla com balança interna. O resultado deste ensaio é importante para se ter mais certeza das quantidades de betume realmente utilizado e assim tirar uma ou outra conclusão indireta. Os principais resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 – Determinação da percentagem real de betume

Amostra	DB_A2
Peso do Cesto [g]	4079,0
Peso do Cesto e Amostra [g]	6482,5
Peso da Amostra [g]	2403,5
Peso do Cesto e Agregados [g]	6353,5
Massa de agregados [g]	2274,5
Percentagem de betume [g]	5,22

Depois desta verificação pode-se concluir que a percentagem mínima de betume a usar na mistura foi respeitada. Este aspeto é importante porque se verificou alguma variabilidade no controlo da quantidade de betume injetado pela máquina que produz o betume-espuma durante a produção das misturas, a qual se procurou controlar (mas poderia estar a influenciar os resultados obtidos).

4.12 Determinação do teor residual de água

Este ensaio serviu para estimar qual a percentagem de água que evapora durante a produção, preparação e ensaio às misturas betuminosas com betume-espuma. Os resultados obtidos nas misturas com betume espuma com 2% de água e 3% de água são apresentados, respetivamente, nas Tabelas 4.19 e 4.20.

Tabela 4.19 – Resultados obtidos na mistura betuminosa com 2% água

Elemento	Estado	Tempo [h]	Temperatura [°C]	Peso [g]
Mistura 2% água	Produção	-	121.6	2667
		12	≈20	2666
	Cura	24	40	2666
		48	40	2665
		72	40	2665
		24	≈20	2665
	Ensaio	24	110	2663
		48	110	2662
		72	110	2662
		96	110	2662
		120	110	2662
	Água evaporada durante cura + ensaio			
8,1%		dos 2% da água injetada		
Água evaporada durante a produção da mistura				1,84%
91,9%		dos 2% da água injetada		

Tabela 4.20 – Resultados obtidos na mistura betuminosa com 3% água

Elemento	Estado	Tempo [h]	Temperatura [°C]	Peso [g]
Mistura 3% água	Produção	-	121.6	2537
		12	≈20	2537
	Cura	24	40	2536
		48	40	2536
		72	40	2535
		24	≈20	2535
	Ensaio	24	110	2533
		48	110	2533
		72	110	2533
		96	110	2533
		120	110	2533
	Água evaporada durante cura + ensaio			
5,0%		dos 3% da água injetada		
Água evaporada durante a produção da mistura				2,85%
95,0%		dos 3% da água injetada		

Através deste ensaio, e admitindo que a água evaporou na sua totalidade, verificou-se uma percentagem entre os 90% e 95% de evaporação de água durante a produção das misturas com 2% e 3% de água, respetivamente. Este acontecimento deve-se ao facto da produção ser realizada a uma temperatura de 115°C, aproximadamente.

Entre a produção e a pesagem final da mistura foram evaporadas percentagens de água na ordem dos 8% na mistura com 2% de água e 5% na mistura com 3% de água.

Assim, concluiu-se que a percentagem residual de água que resta na mistura após este processo de produção das misturas é muito baixa, o que ajuda a justificar os resultados promissores obtidos no comportamento mecânico destas novas misturas produzidas a temperaturas próximas de 100°C (embora ainda acima desta meta que se pretende atingir no futuro).

5 CONCLUSÕES

5.1 Considerações finais

Os estudos realizados sobre o betume CEPSA 50/70 demonstram que os seus valores estão dentro dos intervalos admissíveis, validando-o na realização dos ensaios. Ou seja, a sua temperatura de amolecimento encontra-se entre as entre os 46°C e os 54°C, firmando-se nos 50,7°C e a sua penetração deu um resultado de 57 décimos de milímetros estando dentro do intervalo de 50 e 70 décimos de milímetro.

Quanto ao betume aditivado pode-se concluir o mesmo, sendo a sua temperatura de amolecimento de 52°C e a penetração afasta-se um pouco dos limites propostos, sendo o seu resultado de 41 décimos de milímetro, aproximadamente.

Na viscosidade verificou-se um comportamento bastante semelhante entre os dois betumes, estando as curvas dos resultados da viscosidade a demonstrar que os betumes têm valores iguais para a sua produção e compactação.

Na realização da experiência para o fabrico de betume-espuma denotou-se alguma dificuldade, pois na fase inicial os ensaios que foram realizados não correram como o previsto. No subcapítulo 4.4 foram mencionados os primeiros ensaios e verificou-se que as curvas de expansão e tempo de meia-vida não se encontravam de acordo com o que foi pesquisado na bibliografia. Como justificação pode-se mencionar que a viscosidade do betume CEPSA 50/70 pode não ser a mais adequada, tal como a refinaria que o fornece pode aplicar aditivos antiespumantes para que o betume não sofra alterações durante a sua distribuição. A solução encontrada passou pela adição de um aditivo que promovesse a realização de espuma durante na fase de mistura de betume com agregados, onde é injetada água e ar pressurizados.

Visando a determinação da percentagem “ótima” de betume, os resultados obtidos pelo ensaio Marshall determinaram uma percentagem que apontavam para os 5% de betume, na mistura convencional. Por simplificação, e atendendo que a ficha técnica do aditivo referia que este não alterava as características do betume, optou-se por induzir os mesmos 5% de betume na mistura com betume-espuma.

Atendendo aos prazos limitados, não havendo muito intervalo de tempo, e consoante a pesquisa bibliográfica efetuada, decidiu-se que a realização de betume-espuma teria uma percentagem de água de 2% e 3%, sendo realizados ensaios para misturas com ambas as percentagens de água. Consoante o andamento dos ensaios, determinou-se que a mistura com 2% de água

apresentava melhores resultados de desempenho mecânico, sendo estes comentados mais abaixo.

Convém ainda referir que se concluiu que era inviável, nesta fase do estudo, produzir misturas a menos de 100°C, como se pretendia inicialmente (por não terem trabalhabilidade suficiente). No entanto, as misturas com betume-espuma foram produzidas apenas ligeiramente acima dessa barreira, a uma temperatura entre 110-115°C. Por outro lado, a mistura convencional foi produzida a 145°C, o que implica uma redução da temperatura de produção de 30 a 35 °C.

No estudo da resistência conservada em tração indireta (por sensibilidade à água), a mistura convencional apresentou melhores resultados comparando com a mistura de betume-espuma. A mistura convencional apresentou resultados na ordem dos 60% ($ITSR_{60}$) para uma percentagem de 5% de betume, enquanto a mistura com betume-espuma apenas se integrou nos 50%, na mistura com 2% de água. Contudo, a resistência à tração indireta dos provetes secos de ambas as misturas apresentam resultados semelhantes, sendo que os provetes molhados da mistura com betume-espuma são ligeiramente mais suscetíveis à rotura do que os provetes molhados da mistura convencional.

Ainda na resistência à tração indireta, foi realizado um ensaio adicional e experimental, calculando-se este parâmetro em provetes submetidos a uma compactação de 200 pancadas na mesma extremidade. Aqui os resultados são inversos aos da sensibilidade à água, ou seja, os provetes com mistura de betume-espuma, com 2% de água, foram mais resistentes à tração indireta apresentando valores na ordem dos 2171kPa, enquanto os provetes de mistura convencional apenas aguentaram uma carga de 2048kPa, aproximadamente. Também se verifica que a diferença na deformação média entre as misturas é pouco significativa, estando na ordem dos 0,1mm.

Passando para o ensaio de compactabilidade, propriamente dito, registaram-se os adensamentos das misturas. Pode concluir que, simulando a realidade da compactação *in situ*, a mistura com betume-espuma tem um a adensamento maior, estando esta mais compactada. Ainda através deste procedimento foi calculado o volume de vazios, apresentando-se a mistura com betume-espuma e 2% de água menos porosa que a mistura convencional.

Na realização do ensaio de deformação permanente obteve-se resultados coincidentes. Contudo, a deformação apresentada na mistura convencional (com 5% de betume) é menor que a deformação na mistura com betume-espuma (com 2% de água), sendo as profundidades de rodagem máximas de 5,22mm e 5,69mm, respetivamente. A diferença na ordem dos 0,5mm entre as duas misturas deve ser tomada em atenção, porém com um valor tão baixo de grandeza deve-se declarar que a mistura com betume-espuma é viável.

Como verificado até agora, na determinação do módulo de rigidez, os valores foram bastante semelhantes, tendo ambas as misturas comportamentos similares para as temperaturas de 0°C, 10°C, 20°C e 30°C. Quanto ao ensaio de determinação do módulo de rigidez para a temperatura de referência de 20°C em todas as vigas, verificou-se comportamentos também semelhantes. Contudo, a mistura de betume-espuma apresenta um módulo mais baixo para as várias frequências, refletindo-se isso numa maior deformação ao longo da aplicação das frequências.

Relativamente aos resultados de fadiga, verifica-se que a mistura semi-temperada com betume-espuma conseguiu ter uma vida à fadiga muito semelhante à mistura convencional a quente, e até ligeiramente superior, o que é um aspeto muito positivo relativamente ao desempenho que já se conseguiu obter com este tipo de misturas que recorrem à injeção de ínfimas quantidades de água para sua produção.

Com estas observações pode-se concluir que a realização de misturas com recurso a betume-espuma são viáveis, embora se deve fazer um estudo mais exaustivo da melhor fórmula para produção destas misturas (que são muito sensíveis a pequenas variações de composição, visto que o desempenho da mistura com 3% de água foi muito mais insatisfatória do que a observada na mistura com 2% de água). Assim, as características das misturas com betume-espuma podem ser bastante idênticas às da mistura convencional, de uma forma geral, e alguns parâmetros de desempenho até podem ser melhores.

Em termos de utilização, este tipo de misturas pode ser um grande passo para a indústria de pavimentos rodoviários, pois o seu fabrico é passível de ser realizado a temperaturas mais baixas, consequentemente existindo menores consumos de energia como também de emissão de gases, quer na produção quer na compactação.

5.2 Trabalhos futuros

Apesar de neste trabalho terem sido realizados bastantes estudos às misturas mencionadas, deve-se ter em consideração que existe muito mais a fazer no que diz respeito a misturas betuminosas realizadas com betume-espuma.

De forma a elaborar estudos mais completos deste tipo de misturas, deve-se testar betumes puros, ou seja, betumes que estejam livres de qualquer tipo de aditivo, seja ele antiespumante ou espumante. Desta forma será possível de verificar a viabilidade dos betumes à realização de espuma apenas com água e ar pressurizados. Contudo, a particularidade de aditivar os betumes também tem a sua importância, visto poder compensar aditivar os betumes com justificação de aumentar a taxa de expansão e/ou o tempo de meia-vida.

Neste estudo foi usado um betume 50/70, usual em Portugal. Contudo, em futuros estudos devem ser estudados betumes mais moles e mais duros, com vista a comparar o comportamento dos mesmos. A viscosidade é um parâmetro importante a ser tomado em consideração e verificar de que forma influencia a realização da espuma de betume.

Nesta dissertação não foi estudado qual a percentagem “ótima” de betume para a mistura de betume-espuma, considerando-se esta igual à percentagem obtida na mistura convencional. Assim, de futuro, deve ser considerado a realização de ensaios Marshall para a determinação da quantidade de betume a usar neste tipo de misturas, bem como deve ser estudado a percentagem ideal de água a ser injetada na mistura.

Também se pretende ir mais além na redução da temperatura de fabrico, atingindo se possível um bom desempenho para misturas produzidas abaixo da barreira dos 100°C (correspondente à evaporação da água).

Em relação ao equipamento utilizado, e visto ainda haver alguma inexperiência no uso do mesmo, deve realizar-se um estudo mais detalhado do seu funcionamento, quer ao nível das quantidades reais de ligante, ar e água pulverizadas pelo mesmo, quer ao nível de estudo das temperaturas reais nas tubagens, interna e externa. A viscosidade do betume, com e sem aditivo, também influenciou a realização da mistura, pois com isto, pensa-se, que o equipamento podia libertar mais ou menos quantidade de ligante. Com isto, deve ser feito um registo detalhado e partir daí realizar sempre as calibrações necessárias do equipamento antes da realização e produção de algum tipo de mistura.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alconada, I.B. (2011). Contribuição para o Estudo do Comportamento Mecânico de Misturas Betuminosas Mornas, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico.
- APAO (2003). Warm Mix Asphalt Shows Promise for Cost Reduction, Environmental Benefit, Centerline, Fall 2003 ed, Asphalt Pavement Association of Oregon, p. 4, Salem, Oregon.
- Bernucci, L.B., Motta, L.M.G.d., Ceratti, J.A.P., Soares, J.B. (2008). Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros, Petrobras Asfaltos e Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, Rio de Janeiro.
- Bower, N., Wen, H., Willoughby, K., Weston, J., DeVol, J. (2012). Evaluation of the Performance of Warm Mix Asphalt in Washington State, Washington State University.
- Branco, F.E.P., Pereira, P.A.A., Santos, L.G.d.P. (2006). Pavimentos Rodoviários, 2ª reimpressão ed, Almedina S.A., Coimbra.
- Button, J.W., Estakhri, C., Wimsatt, A. (2007). A Synthesis of Warm-Mix Asphalt, The Texas A&M University System, College Station, Texas.
- CGEE (2008). Manual de Capacitação sobre Mudança do Clima e Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, Brasília.
- Chowdhury, A., Button, J.W. (2008). A Review of Warm Mix Asphalt, Texas A&M University System, College Station, Texas.
- Croteau, J.-M., Chaignon, F., Strynadka, T. (2009). Sustainability: Carrier of Innovations in the Development of Pavement Materials, Transportation Association of Canada 2009 Annual Conference, pp. 12.
- Croteau, J.-M., Tessier, B. (2008). Warm Mix Asphalt Paving Technologies: a Road Builder's Perspective, Annual Conference of the Transportation Association of Canada, Canada, pp. 12.
- D'Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Mostafa Jamshidi, Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R., Yeaton, B. (2008).

Warm-Mix Asphalt: European Practice, US. Department of Transportation, Alexandria, VA.

Devivere, M.v., Barthel, W., Marchand, J.-P. (2007). Warm Asphalt Mixes by Adding Aspha-Min® a Synthetic Zeolite, p. 12.

Doyle, T.A., McNally, C., Gibney, A., Tabakovic, A. (2013). Developing maturity methods for the assessment of cold-mix bituminous materials, *Construction and Building Materials*, Vol. 38, pp. 524-529.

EAPA (2010). The Use of Warm Mix Asphalt, European Asphalt Pavement Association, p. 13, Belgium.

EP (2011). Caderno de Encargos Tipo Obra, Pavimentação - Características dos Materiais, Estradas de Portugal, S.A., p. 125.

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

FHWA (2012). Warm Mix Asphalt Technologies and Research, Warm-Mix Asphalt, Federal Highway Administration; <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/wma.cfm>; Acedido em 15 Fev 2013.

GE (2007). Warm Mix Asphalt Technologies and Research, Potential to reduce fuel consumption and emissions, Government Engineering, p. 4.

Hassan, M. (2009). Life-Cycle Assessment of Warm-Mix Asphalt, An Environmental and Economic Perspective, Louisiana State University, p. 27.

Jenkins, K.J., Groot, J.L.A.d., Ven, M.F.C.v.d., Molenaar, A.A.A. (1999). Half-Warm Foamed Bitumen Treatment, A New Process, 7th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, pp. 17.

Jenkins, K.J., Ven, M.F.C.V.d., Voskuilen, J.L.M., Beemt, R.V.d. (2007). Development of (half-) warm foamed bitumen mixes, *International Journal of Pavement Engineering*, pp. 163-175.

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

- Motta, R.S. (2011). Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Newcomb, D. (2006). An Introduction to Warm-Mix Asphalt, National Asphalt Pavement Association, p. 7.
- Park, J.-H., Seo, K.-K. (2003). Approximate Life Cycle Assessment of Product Concepts Using Multiple Regression Analysis and Artificial Neural Networks, KSME International Journal, Vol. 17 (12), pp. 1969-1976.
- Pereira, P.A.A., Santos, L.G.d.P. (2002). Pavimentos Rodoviários, Tip. Barbosa & Xavier, Braga.
- Probigalp (2013). Emulsões Betuminosas, Probigalp - Ligantes Betuminosos, S.A; http://www.probigalp.pt/prod_item1_frame.php; Acedido em 15 Fev 2013.
- Prowel, B.D., Hurley, G.C. (2007). Warm-Mix Asphalt: Best Practices, Quality Improvement Series, National Asphalt Pavement Association, p. 29.
- PS, NAPA (2013). Warm Mix Asphalt, Pavia Systems and National Asphalt Pavement Association; <http://www.paviasystems.com/warmmix/package/player.html>; Acedido em 02 Fev 2013.
- Rühl, R., Lindemeier, B. (2006). Progress Report 2006 - The German Bitumen Forum, 1600 ed, Heinrich Lauck GmbH, Germany.
- ShellBitumen (2011). Shell WAM Foam Process, Shell Group.
- Silva, H.M.R.D.d. (2005). Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique : contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas, Doutorado, Universidade do Minho, Escola de Engenharia.
- Silva, H.M.R.D.d., Oliveira, J.R.M., Ferreira, C. (2009). Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas, XV Congresso Ibero-LatinoAmericano do Asfalto, pp. 355-364.

- Smart, P. (2009). The Trials of Laying Half-Warm Foamed Asphalt Surfacing Materials in Shropshire, West Midlands.
- Teixeira, M.S.M.R.C. (2006). A Utilização de Espumas de Betume na Reciclagem de Pavimentos Fléxiveis, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto.
- Vaitkus, A., Kilas, M., Paliukaitė, M. (2010). Warm Mix Asphalts Research, Analysis and Evaluation, The 10th International Conference of Modern Materials, Structures and Techniques, Vilnius, Lithuania.
- Vaitkus, A., Vorobjovas, V., Žiliūtė, L. (2009). The Research on the Use of Warm Mix Asphalt for Asphalt Pavement Structures, Vilnius Gediminas Technical University, p. 5.
- Voskuilen, J.L.M., Mangnus, S., Ven, M.F.C.v.d., Wieringen, J.B.M.v., 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, pp. 19.
- Yan, J., Ni, F., Yang, M., Li, J. (2010). An Experimental Study on Fatigue Properties of Emulsion and Foam Cold Recycled Mixes, Construction and Building Materials, Vol. 24 (11), pp. 2151–2156.
- Zaumanis, M. (2010). Warm Mix Asphalt Investigation, Master Thesis, Technical University of Denmark and Riga Technical University, Kgs.Lyngby, Denmark.

ANEXOS

ANEXO I

Ficha técnica do aditivo *TEGO*[®] *Addibit FS 725 A* da *Evonik Industries AG*

Technical Information				
TEGO® Addibit FS 725 A				
Product description				
TEGO® Addibit FS 725 A is a bitumen additive based on organo-modified siloxanes.				
Physical properties				
Appearance	clear, yellow			
Active content	40 %			
Density (25 °C)	approx. 0.9 g/cm³			
Viscosity (25 °C)	approx. 180 mPas			
Flash point	> 100 °C			
Application				
TEGO® Addibit FS 725 A is used as a foam stabilizer in the production of foamed bitumen.				
Properties/Benefits				
<ul style="list-style-type: none"> • Increased initial foam height • Higher initial foam volume • Longer half-life time leads to strongly improved foam stability (much higher foam index) • No impact on specification of the bitumen • No impact on the adhesion properties of the bitumen • Temperature stable up to 170 °C for several days 				
As a result, even bitumen grades with poor foaming characteristics may be used for this application.				
Dosage and handling				
The dosage depends on the type of bitumen and the desired foam quality.				
For first trials we recommend 0.25 % referred to bitumen when working with a water content of 2.0 - 3.0 % in the total formulation. TEGO® Addibit FS 725 A is added to the bitumen phase.				
Typical performance data				
Test parameters				
Bitumen grade	Total B 70/100			
Test device	WLB 10 (Wirtgen)			
Bitumen temp.	150 °C			
Bitumen pressure	6.5 bar			
Air pressure	6.0 bar			
Water content	1.0 - 5.0 % (referred to bitumen)			
TEGO® Addibit FS 725 A	0.25 % (referred to bitumen)			
Foaming characteristics at different amounts of water added to the bitumen:				
Control - without Additive				
Water content	ERM	T _{1/2}		
1.0 %	9.8	9.0		
2.0 %	15.0	5.7		
with 0.25 % TEGO® Addibit FS 725 A				
Water content	ERM	T _{1/2}	ERa	FI
1.0 %	16	344	12.1	1861
2.0 %	20	291	16.2	2740
3.0 %	31	150	31.6	4210
4.0 %	37	96	37.2	3220
5.0 %	41	62	40.8	2680
ERM: determined foam volume in litre				
ERa: maximum foam volume in litre				
T _{1/2} : half-life time; time in sec, after which 50 % of the foam collapsed				
FI: Foam Index				
Registration status				
The ingredients of TEGO® Addibit FS 725 A are listed in the following chemical inventories: EINECS, TSCA, DSL, ENCS, PICCS, China. Further information is available on request.				
Storage stability				
TEGO® Addibit FS 725 A may be stored in closed containers for at least 12 months, provided moisture is excluded and storage temperature does not exceed 35 °C.				
Packaging				
Pallet à 720 kg (4 x 180 kg plastic drums)				
Hazardous goods classification				
Information concerning				
<ul style="list-style-type: none"> • classification and labelling according to regulations for transport and for dangerous substances • protective measures for storage and handling • measures in case of accidents and fire • toxicity and ecological effects 				
is given in our material safety data sheets.				
07/2012				

Figura A.I – Ficha técnica do aditivo TEGO® Addibit FS 725 A

ANEXO II

Estudo das baridades dos provetes da mistura convencional a quente

Tabela A.1 – Determinação da baridade máxima teórica das misturas para ensaios Marshall

Determinação da baridade máxima teórica em misturas betuminosas					
EN 12697-5 – Procedimento A (Volumétrico)					
Amostra [% betume]	4,0	4,5	5,0	5,5_R	6,0
Temperatura da água usada no ensaio [°C]	24,7	24,5	24,7	24,7	24,8
Peso do picnómetro vazio [g]	2067	2067	2067	2067	2067
Peso do picnómetro com amostra [g]	4067	4067	4067	4067	4067
Peso do pic. com amostra cheio de água [g]	7901,0	7897	7890	7884,5	7875,5
Volume do picnómetro [m ³]	0,00464	0,00464	0,00464	0,00464	0,00464
Baridade máxima teórica, ρ_{mv} [kg/m³]	2513,18	2499,97	2478,83	2462,00	2435,24

Tabela A.2 – Baridade aparente através do método A das misturas para ensaios Marshall

Determinação da baridade aparente em provetes de misturas betuminosas				
EN 12697-6 (Método A)				
Provete	Peso do provete seco [g]	Peso do provete imerso [g]	Temperatura da água [°C]	Baridade [kg/m³]
4 A	1168,6	676,8	16,0	2373,9
4 B	1161,1	672,4	16,0	2373,7
4 C	1166,6	670,7	16,0	2350,3
4.5 A	1169,8	678,5	16,0	2378,8
4.5 B	1162,0	673,9	16,0	2378,4
4.5 C	1154,9	668,8	16,0	2373,6
5 A	1167,7	679,9	16,0	2391,6
5 B	1162,2	678,3	16,0	2399,5
5 C	1177,6	687,9	16,0	2402,5
5.5R_A	1168,2	683,3	16,0	2406,9
5.5R_B	1169,9	685,3	16,0	2411,9
5.5R_C	1174,7	689,4	16,0	2418,3
6 A	1160,1	680,4	16,0	2416,1
6 B	1166,0	684,8	16,0	2420,8
6 C	1162,2	681,5	16,0	2415,5

Tabela A.3 – Baridade aparente através do método C das misturas para ensaios Marshall

Determinação da baridade aparente em provetes de misturas betuminosas					
EN 12697-6 (Método C)					
Provete	Peso do provete seco [g]	Peso do provete com <i>parafilm</i> [g]	Peso do provete imerso [g]	Temperatura da água [°C]	Baridade [kg/m ³]
4 A	1168,6	1170,8	649,5	16,0	2249,9
4 B	1161,1	1164,4	646,1	16,0	2253,7
4 C	1166,6	1168,9	643,7	16,0	2229,8
4.5 A	1169,8	1172,4	657,9	16,0	2284,0
4.5 B	1162,0	1164,2	653,4	16,0	2283,4
4.5 C	1154,9	1156,9	647,8	16,0	2276,1
5 A	1167,7	1169,8	665,7	16,0	2324,7
5 B	1162,2	1164,6	663,8	16,0	2330,6
5 C	1177,6	1179,6	672,8	16,0	2331,4
5.5R_A	1168,2	1170,3	669,9	16,0	2343,0
5.5R_B	1169,9	1174,1	666,6	16,0	2323,9
5.5R_C	1174,7	1177,0	674,8	16,0	2348,6
6 A	1160,1	1162,8	667,3	16,0	2353,0
6 B	1166,0	1168,2	673,4	16,0	2365,7
6 C	1162,2	1164,3	668,2	16,0	2351,3

Tabela A.4 – Baridade aparente através do método D das misturas para ensaios Marshall

Determinação da baridade aparente em provetes de misturas betuminosas					
EN 12697-6 (Método D)					
Provete	Peso do provete seco [g]	Volume do provete [cm ³]	Dimensões do provete (cm)		Baridade [kg/m ³]
			Altura	Diâmetro	
4 A	1168,6	521,3	6,4	10,2	2241,6
4 B	1161,1	516,4	6,3	10,2	2248,3
4 C	1166,6	527,0	6,5	10,2	2213,5
4.5 A	1169,8	518,1	6,3	10,2	2258,0
4.5 B	1162,0	509,9	6,2	10,2	2278,9
4.5 C	1154,9	512,3	6,3	10,2	2254,2
5 A	1167,7	502,5	6,2	10,2	2323,6
5 B	1162,2	499,3	6,1	10,2	2327,8
5 C	1177,6	509,9	6,2	10,2	2309,5
5.5R_A	1168,2	497,6	6,1	10,2	2347,5
5.5R_B	1169,9	501,7	6,1	10,2	2331,8
5.5R_C	1174,7	497,6	6,1	10,2	2360,6
6 A	1160,1	493,5	6,0	10,2	2350,5
6 B	1166,0	499,3	6,1	10,2	2335,4
6 C	1162,2	479,7	5,9	10,2	2423,0

ANEXO III

Resultados do ensaio Marshall

Tabela A.5 – Resultados do ensaio Marshall

Provete	% betume	Estabilidade Marshall (KN)	Estabilidade Marshall Corrigida - S (KN)	Deformação de Pico (mm)	Deformação Marshall - F (mm)	Deformação tangencial - Ft (mm)	Quociente Marshall (kN/mm)	Baridade aparente (kg/cm ³)	Altura (mm)	BMT (kg/cm ³)	Volume de vazios (%)	Volume de betume (%)	Volume de agregados (%)	VMA (%)	Saturação em betume (%)
4 A		12,27	12,31	4,19	3,36	2,24	3,67	2374,0	63,8		5,5	9,2	85,3	14,7	62,3
4 B	4,0	11,08	11,28	3,71	3,14	2,24	3,60	2373,7	63,2		5,6	9,2	85,3	14,7	62,3
4 C		10,84	10,67	4,57	4,04	2,55	2,64	2350,3	64,5		6,5	9,1	84,4	15,6	58,4
Média	4,0	11,40	11,42	4,16	3,51	2,34	3,30	2366,0	63,8	2513,2	5,9	9,1	85,0	15,0	61,0
4.5 A		12,21	12,37	5,05	4,24	2,82	2,92	2378,8	63,4		4,8	10,3	84,8	15,2	68,1
4.5 B	4,5	12,29	12,77	3,93	3,42	2,33	3,74	2378,4	62,4		4,9	10,3	84,8	15,2	68,0
4.5 C		12,11	12,49	4,63	4,05	2,59	3,08	2373,6	62,7		5,1	10,3	84,6	15,4	67,1
Média	4,5	12,20	12,54	4,54	3,90	2,58	3,25	2377,0	62,8	2500,0	4,9	10,3	84,7	15,3	67,7
5 A		12,96	13,78	4,67	4,07	2,51	3,38	2391,6	61,5		3,5	11,6	84,9	15,1	76,6
5 B	5,0	13,07	14,05	4,16	3,61	2,48	3,90	2399,5	61,1		3,2	11,6	85,2	14,8	78,4
5 C		14,00	14,55	4,81	3,93	2,64	3,70	2402,5	62,4		3,1	11,6	85,3	14,7	79,0
Média	5,0	13,34	14,13	4,55	3,87	2,54	3,66	2397,9	61,7	2478,8	3,3	11,6	85,1	14,9	78,0
5.5R_A		12,25	13,24	4,57	4,08	2,89	3,24	2406,9	60,9		2,2	12,8	85,0	15,0	85,1
5.5R_B	5,5	12,15	12,96	4,57	4,13	2,70	3,14	2411,9	61,4		2,0	12,8	85,1	14,9	86,3
5.5R_C		12,81	13,84	4,23	3,63	2,50	3,81	2418,3	60,9		1,8	12,9	85,4	14,6	87,9
Média	5,5	12,40	13,35	4,45	3,95	2,70	3,40	2412,4	61,1	2462,0	2,0	12,8	85,2	14,8	86,4
6 A		12,38	13,55	4,63	4,02	2,82	3,37	2416,1	60,4		0,8	14,0	85,2	14,8	94,7
6 B	6,0	13,05	14,03	4,48	3,77	2,65	3,72	2420,8	61,1		0,6	14,0	85,4	14,6	96,0
6 C		11,42	13,06	4,97	4,37	2,49	2,99	2415,5	58,7		0,8	14,0	85,2	14,8	94,5
Média	6,0	12,28	13,55	4,69	4,05	2,65	3,36	2417,5	60,1	2435,2	0,7	14,0	85,3	14,7	95,1

ANEXO IV

Gráficos dos resultados obtidos no ensaio Marshall

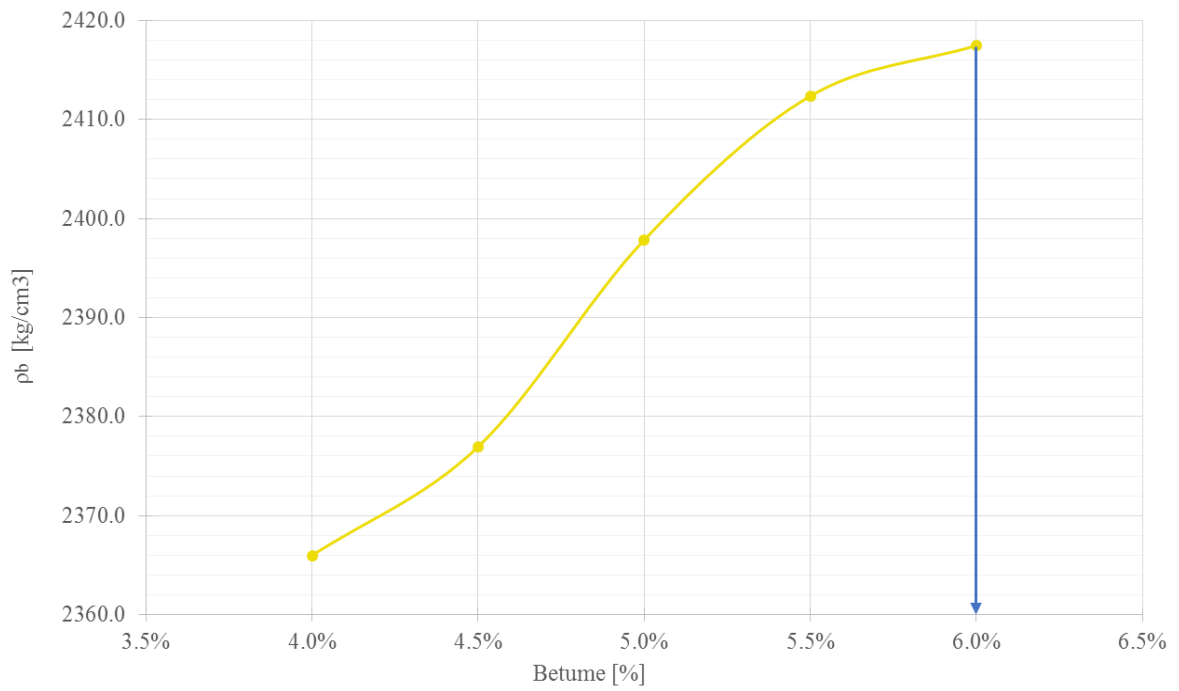


Gráfico A.1 – Evolução da baridade aparente no estudo de formulação Marshall

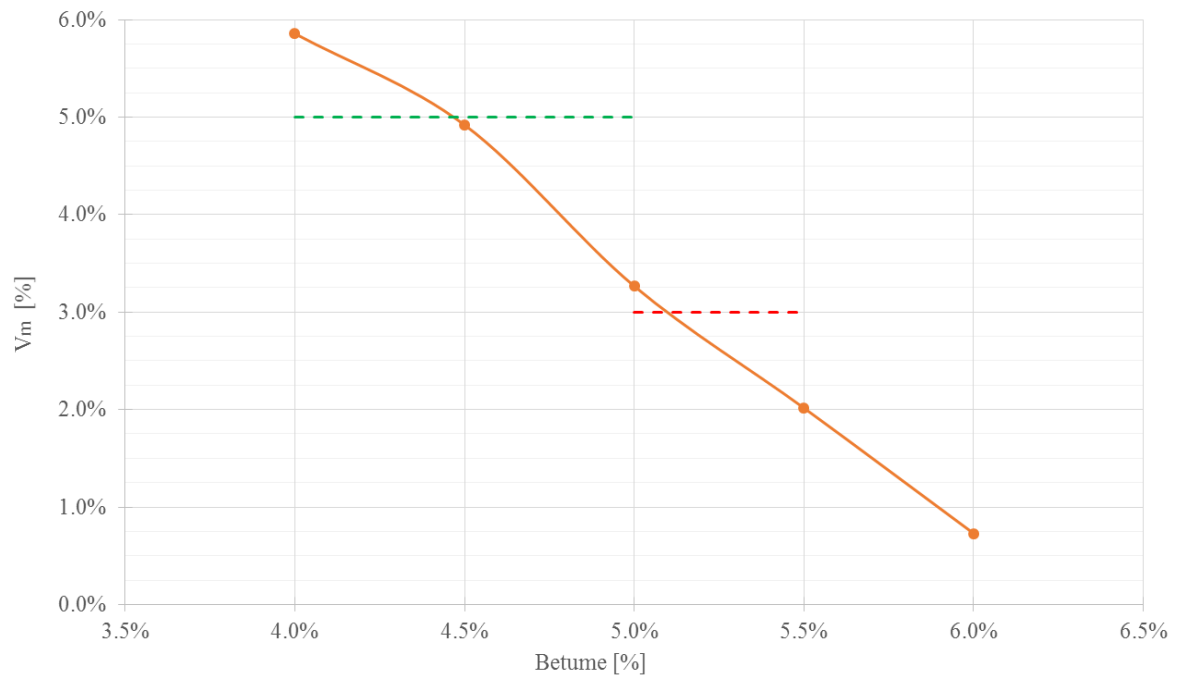


Gráfico A.2 – Evolução da porosidade no estudo de formulação Marshall

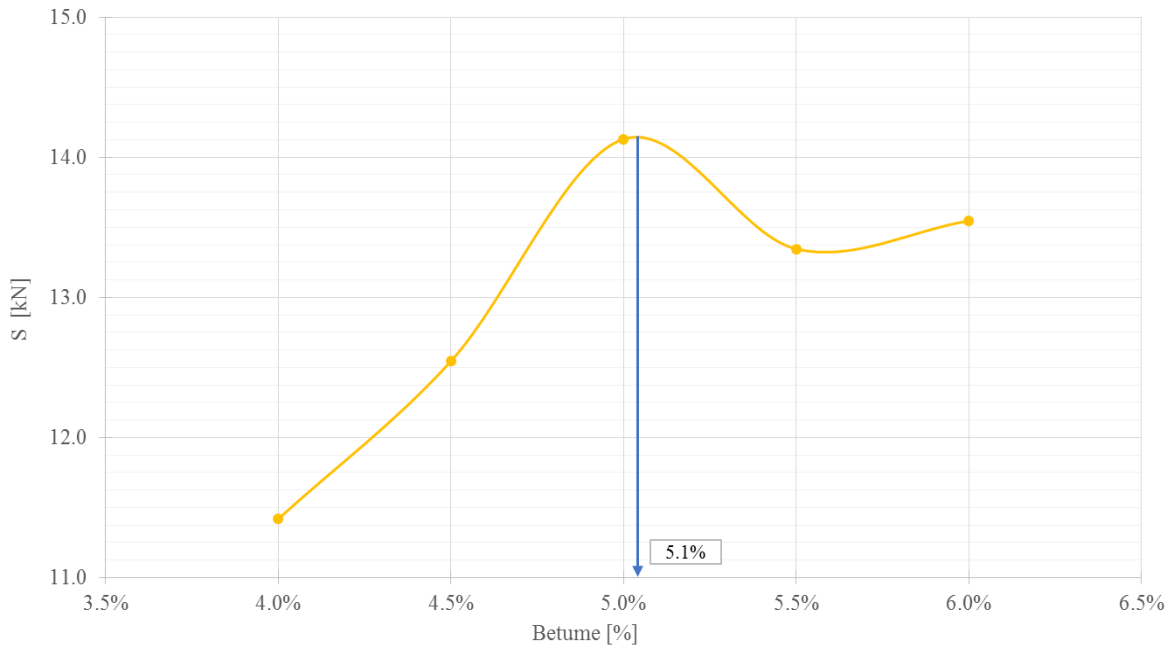


Gráfico A.3 – Evolução da estabilidade Marshall no estudo de formulação Marshall

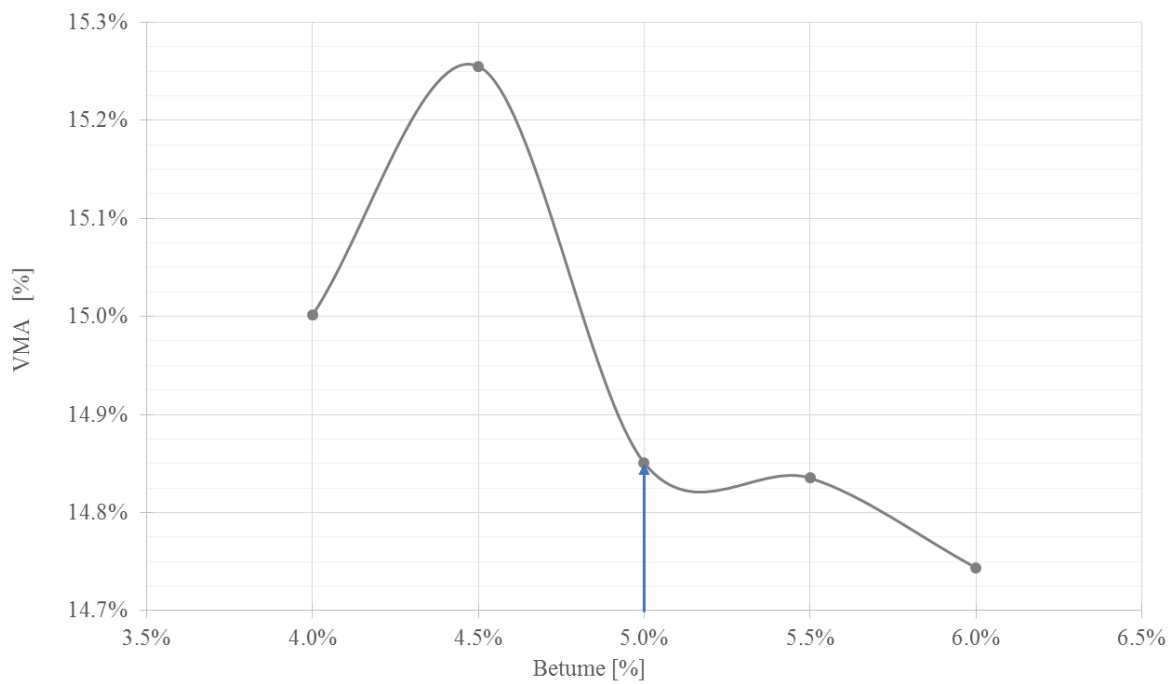


Gráfico A.4 – Evolução dos vazios na mistura de agregados no estudo de formulação Marshall

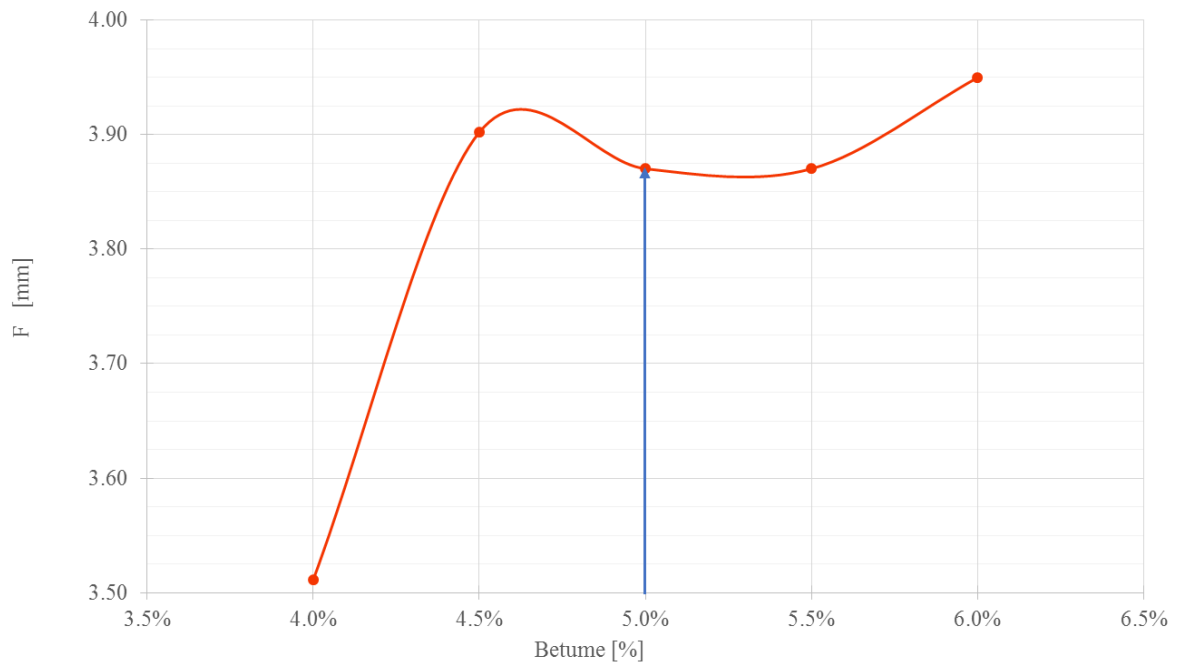


Gráfico A.5 – Evolução da deformação Marshall no estudo de formulação Marshall

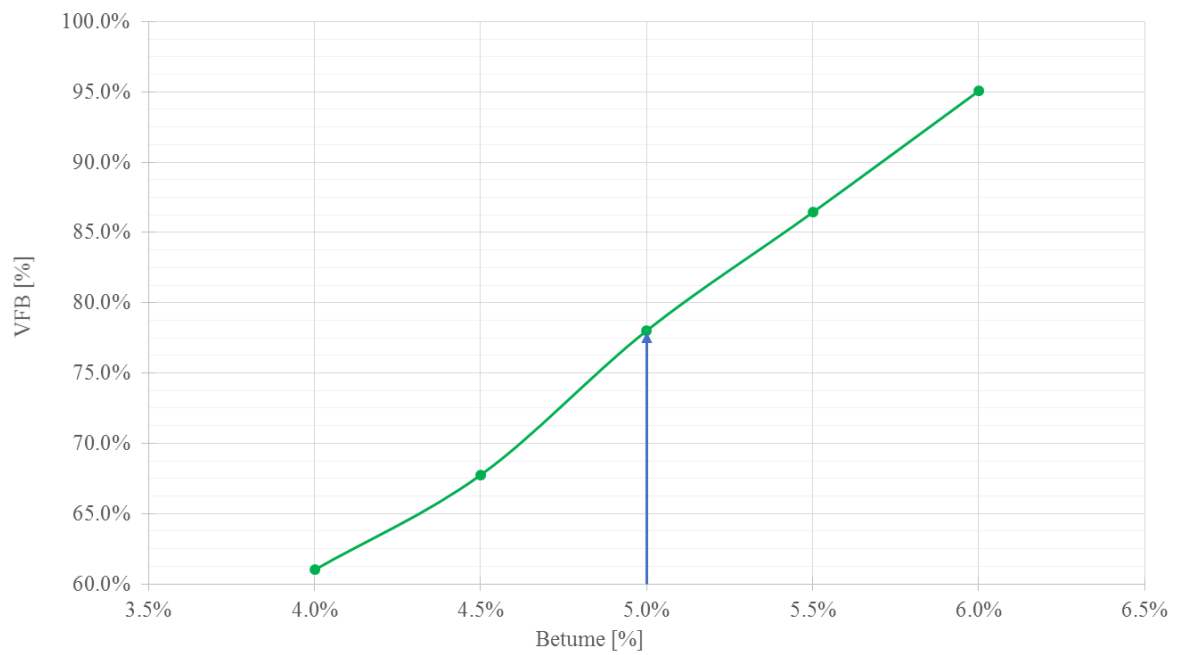


Gráfico A.6 – Evolução do grau de saturação em betume no estudo de formulação Marshall

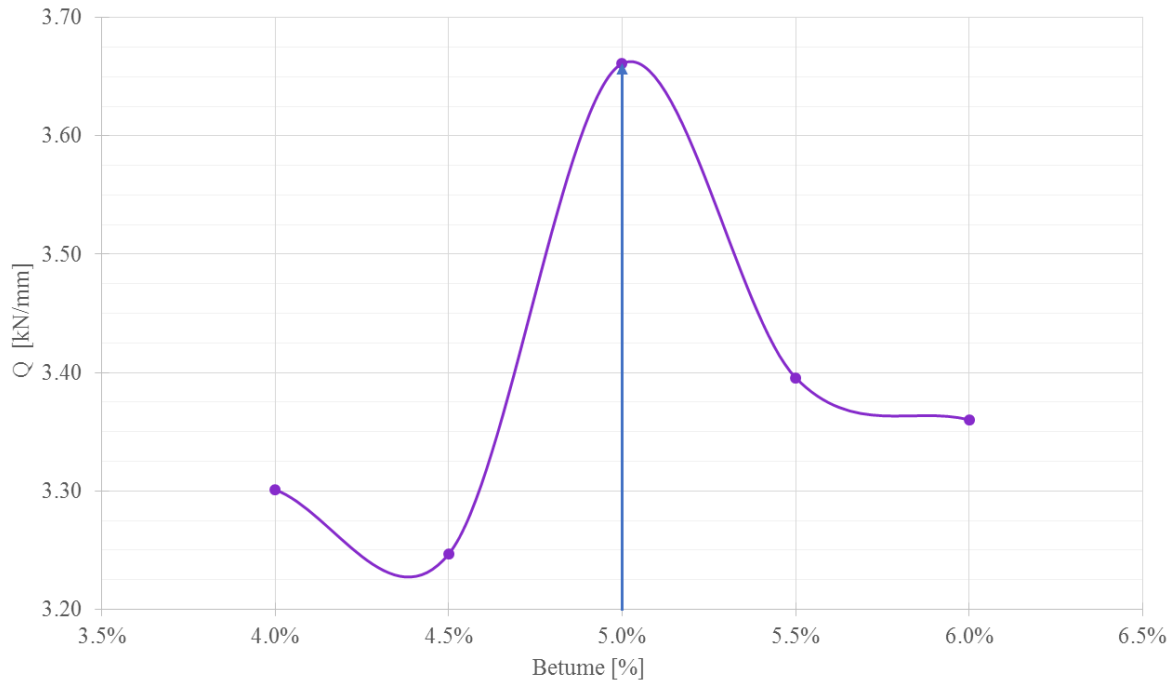


Gráfico A.7 – Evolução do quociente Marshall no estudo de formulação Marshall

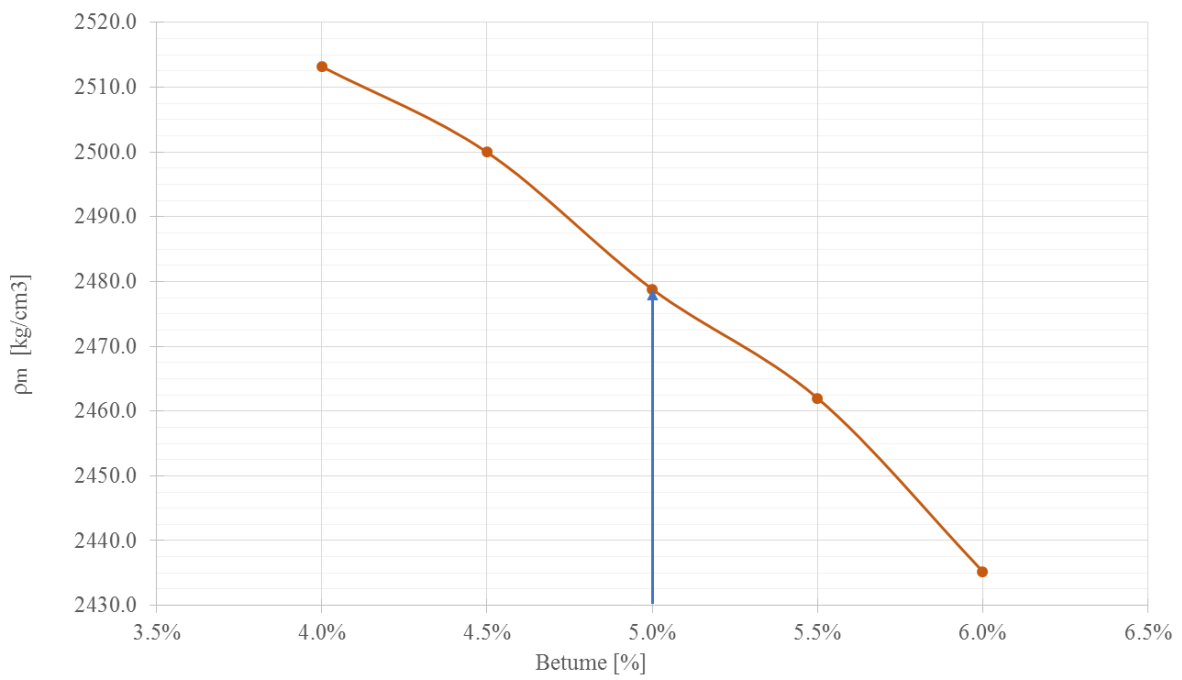


Gráfico A.8 – Evolução da baridade máxima teórica no estudo de formulação Marshall

ANEXO V

Dados obtidos nas experiências de produção de betume-espuma com
betume convencional

Tabela A.6 – Resultados obtidos ao produzir betume-espuma com betume convencional a 160 °C

Ref ^a Amostra	Diâmetro Lata [cm]	Temperatura Mistura [°C]	Água [%]	Betume [g]	Altura inicial			Altura máxima		Expansão Máxima			Meia Vida	
					Tx visual	[cm]	Tx real	Tx visual	[cm]	Tx real	[cm]	[cm ³]	Tx visual	[s]
BE_160_2	28,5	160	2,0	500,0	0,0	0,78	0,98	15,0	12,60	15,0	12,60	8038,04	7,5	2,55
BE_160_3	28,5	160	3,0	500,0	0,0	0,78	0,98	18,0	15,20	18,0	15,20	9696,68	9,0	4,43
BE_160_4	28,5	160	4,0	500,0	0,0	0,78	0,98	21,0	17,80	21,0	17,80	11355,33	10,5	5,23
BE_160_5	28,5	160	5,0	500,0	0,0	0,78	0,98	21,0	17,80	21,0	17,80	11355,33	10,5	6,28
BE_160_6	28,5	160	6,0	500,0	0,0	0,78	0,98	21,0	17,80	21,0	17,80	11355,33	10,5	7,46

Tabela A.7 – Resultados obtidos ao produzir betume-espuma com betume convencional a 170 °C

Ref ^a Amostra	Diâmetro Lata [cm]	Temperatura Mistura [°C]	Água [%]	Betume [g]	Altura inicial			Altura máxima		Expansão Máxima			Meia Vida	
					Tx visual	[cm]	Tx real	Tx visual	[cm]	Tx real	[cm]	[cm ³]	Tx visual	[s]
BE_170_2	28,5	170	2,0	500,0	0,0	0,78	0,98	12,0	10,00	12,0	10,00	6379,40	6,0	1,59
BE_170_3	28,5	170	3,0	500,0	0,0	0,78	0,98	20,0	16,93	20,0	16,93	10802,44	10,0	3,74
BE_170_4	28,5	170	4,0	500,0	0,0	0,78	0,98	22,0	18,67	22,0	18,67	11908,21	11,0	5,23
BE_170_5	28,5	170	5,0	500,0	0,0	0,78	0,98	24,0	20,40	24,0	20,40	13013,97	12,0	5,95
BE_170_6	28,5	170	6,0	500,0	0,0	0,78	0,98	23,0	19,53	23,0	19,53	12461,09	11,5	6,90

Tabela A.8 – Resultados obtidos ao produzir betume-espuma com betume convencional a 180 °C

Ref ^a Amostra	Diâmetro Lata [cm]	Temperatura Mistura [°C]	Água [%]	Betume [g]	Altura inicial			Altura máxima		Expansão Máxima			Meia Vida	
					Tx visual	[cm]	Tx real	Tx visual	[cm]	Tx real	[cm]	[cm ³]	Tx visual	[s]
BE_180_2	28,5	180	2,0	500,0	0,0	0,78	0,98	12,0	10,00	12,0	10,00	6379,40	6,0	2,54
BE_180_3	28,5	180	3,0	500,0	0,0	0,78	0,98	14,0	11,73	14,0	11,73	7485,16	7,0	7,18
BE_180_4	28,5	180	4,0	500,0	0,0	0,78	0,98	16,0	13,47	16,0	13,47	8590,92	8,0	7,10
BE_180_5	28,5	180	5,0	500,0	0,0	0,78	0,98	21,0	17,80	21,0	17,80	11355,33	10,5	9,35
BE_180_6	28,5	180	6,0	500,0	0,0	0,78	0,98	24,0	20,40	24,0	20,40	13013,97	12,0	6,49

ANEXO VI

Dados obtidos nas experiências de produção de betume-espuma com
betume aditivado

Tabela A.9 – Resultados obtidos ao produzir betume-espuma com betume aditivado a 170 °C

Refª Amostra	Diâmetro lata [cm]	Temperatura Mistura [°C]	Água [%]	Betume [g]	Altura inicial			Altura máxima		Expansão Máxima			Meia Vida	
					Tx visual	[cm]	Tx real	Tx visual	[cm]	Tx real	[cm]	[cm ³]	Tx visual	[s]
5070_170 _Ad1	28,5	170	1,0	515,0	0,0	0,81	1,01	11,0	9,13	11,0	9,13	5826,5	5,5	231,7
5070_170 _Ad2	28,5	170	2,0	515,0	0,0	0,81	1,01	12,0	10,00	12,0	10,0	6379,4	6,0	88,0
5070_170 _Ad3	28,5	170	3,0	515,0	0,0	0,81	1,01	18,0	15,20	18,0	15,2	9696,7	9,0	72,3
5070_170 _Ad4	28,5	170	4,0	515,0	0,0	0,81	1,01	24,0	20,40	24,0	20,4	13014,0	12,0	48,5
5070_170 _Ad5	28,5	170	5,0	515,0	0,0	0,81	1,01	27,0	23,00	27,0	23,0	14672,6	13,5	34,9
5070_170 _Ad6	28,5	170	6,0	515,0	0,0	0,81	1,01	27,0	23,00	27,0	23,0	14672,6	13,5	19,3

Tabela A.10 – Resultados obtidos através de cálculo com junção dos dados da Tabela A.9

Temperatura_BE [°C]	Volume inicial [cm ³]	Tx Expansão (por Vf/Vi)	dif	
			tx	[cm]
118,0	515,00	11,31	0,314	0,250898
90,0	515,00	12,39	0,387	0,309742
100,0	515,00	18,83	0,829	0,662808
98,0	515,00	25,27	1,270	1,015874
90,0	515,00	28,49	1,491	1,192407
94,0	515,00	28,49	1,491	1,192407

ANEXO VII

Resultados das baridades dos provetes de mistura convencional a quente utilizados no ensaio de sensibilidade à água

Tabela A.11 – Determinação da baridade máxima teórica para provetes de mistura convencional a quente usados no ensaio de sensibilidade à água

Determinação da Baridade Máxima Teórica em Misturas Betuminosas			
EN 12697-5 (Procedimento A - Volumétrico)			
Amostra [% betume]	4,5	5,0	5,5
Temperatura da água usada no ensaio [°C]	24,4	24,8	24,9
Peso do picnómetro vazio [g]	2067	2067	2067
Peso do picnómetro com amostra [g]	4067	4067	4067
Peso do picnómetro com amostra cheio de água [g]	7898,0	7894,5	7884,5
Volume do picnómetro [m ³]	0,00464	0,00464	0,00464
Baridade máxima teórica, ρ_{mv} [kg/m³]	2502,80	2493,07	2462,59

Tabela A.12 – Baridade aparente através do método A para provetes de mistura convencional a quente usados no ensaio de sensibilidade à água

Provete	Peso do provete seco [g]	Peso do provete imerso [g]	Temperatura da água [°C]	Baridade [kg/m³]
CD_4.5N_1	1167,9	676,9	18,4	2375,4
CD_4.5N_2	1164,6	673,1	18,4	2366,3
CD_4.5N_3	1164,1	674,8	18,4	2375,9
CD_4.5N_4	1155,2	668,6	18,4	2370,8
CD_4.5N_5	1164,7	672,3	18,4	2362,1
CD_4.5N_6	1164,7	674,4	18,4	2372,3
CD_5N_1	1171,9	686,1	18,4	2409,0
CD_5N_2	1171,7	683,0	18,4	2394,3
CD_5N_3	1173,9	686,5	18,4	2405,2
CD_5N_4	1170,7	680,8	18,4	2386,4
CD_5N_5	1164,4	676,8	18,4	2384,8
CD_5N_6	1172,5	682,8	18,4	2391,1
CD_5.5N_1	1189,1	699,6	18,4	2425,9
CD_5.5N_2	1186,3	698,0	18,4	2426,2
CD_5.5N_3	1185,8	696,2	18,4	2418,7
CD_5.5N_4	1192,9	701,5	18,4	2424,3
CD_5.5N_5	1195,1	702,0	18,4	2420,4
CD_5.5N_6	1180,3	693,3	18,4	2420,3

Tabela A.13 – Baridade aparente através do método C da norma EN 12697-6 para provetes de mistura convencional a quente usados no ensaio de sensibilidade à água

Provete	Peso do provete seco [g]	Peso do provete com <i>parafilm</i> [g]	Peso do provete imerso [g]	Temperatura da água [°C]	Baridade [kg/m ³]
CD_4.5N_1	1167,9	1169,8	659,0	18,4	2292,6
CD_4.5N_2	1164,6	1167,9	656,5	18,4	2290,2
CD_4.5N_3	1164,1	1166,2	656,2	18,4	2289,7
CD_4.5N_4	1155,2	1157,7	646,5	18,4	2268,7
CD_4.5N_5	1164,7	1167,9	655,4	18,4	2285,0
CD_4.5N_6	1164,7	1167,7	653,7	18,4	2277,3
CD_5N_1	1171,9	1174,6	673,3	18,4	2348,3
CD_5N_2	1171,7	1174,3	665,5	18,4	2312,5
CD_5N_3	1173,9	1176,7	673,3	18,4	2342,9
CD_5N_4	1170,7	1172,9	663,5	18,4	2305,9
CD_5N_5	1164,4	1166,3	660,9	18,4	2310,2
CD_5N_6	1172,5	1174,4	665,0	18,4	2307,9
CD_5.5N_1	1189,1	1191,2	689,0	18,4	2375,3
CD_5.5N_2	1186,3	1188,4	686,2	18,4	2369,7
CD_5.5N_3	1185,8	1187,9	683,8	18,4	2359,8
CD_5.5N_4	1192,9	1194,9	689,7	18,4	2368,2
CD_5.5N_5	1195,1	1197,4	690,5	18,4	2366,1
CD_5.5N_6	1180,3	1182,6	679,4	18,4	2354,1

Tabela A.14 – Baridade aparente através do método D da norma EN 12697-6 para provetes de mistura convencional a quente usados no ensaio de sensibilidade à água

Provete	Peso do provete seco [g]	Volume do provete [cm ³]	Dimensões do provete (cm)		Baridade [kg/m ³]
			Altura	Diâmetro	
CD_4.5N_1	1167,9	515,6	6,31	10,2	2265,3
CD_4.5N_2	1164,6	511,5	6,26	10,2	2277,5
CD_4.5N_3	1164,1	511,5	6,26	10,2	2275,6
CD_4.5N_4	1155,2	514,0	6,29	10,2	2247,2
CD_4.5N_5	1164,7	510,7	6,25	10,2	2281,2
CD_4.5N_6	1164,7	517,2	6,33	10,2	2252,3
CD_5N_1	1171,9	501,7	6,14	10,2	2336,0
CD_5N_2	1171,7	505,8	6,19	10,2	2317,1
CD_5N_3	1173,9	503,4	6,16	10,2	2332,4
CD_5N_4	1170,7	510,7	6,25	10,2	2292,9
CD_5N_5	1164,4	505,0	6,18	10,2	2305,0
CD_5N_6	1172,5	512,3	6,27	10,2	2289,5
CD_5.5N_1	1189,1	495,2	6,06	10,2	2401,4
CD_5.5N_2	1186,3	505,0	6,18	10,2	2349,2
CD_5.5N_3	1185,8	501,7	6,14	10,2	2363,5
CD_5.5N_4	1192,9	505,8	6,19	10,2	2358,4
CD_5.5N_5	1195,1	499,3	6,11	10,2	2393,7
CD_5.5N_6	1180,3	504,2	6,17	10,2	2341,1

ANEXO VIII

Resultados das baridades dos provetes de mistura semi-temperada com betume-espuma utilizados no ensaio de sensibilidade à água

Tabela A.15 – Determinação da baridade máxima teórica para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma

Determinação da Baridade Máxima Teórica em Misturas Betuminosas (Betume-espuma)		
EN 12697-5 (Procedimento A - Volumétrico)		
Amostra [% betume]	2%	3%
Temperatura da água usada no ensaio [°C]	24,2	24,4
Peso do picnómetro vazio [g]	2067	2067
Peso do picnómetro com amostra [g]	4067	4067
Peso do pic. com amostra cheio de água [g]	7883,5	7894,0
Volume do picnómetro [m ³]	0,00464	0,00464
Baridade máxima teórica, ρ_{mv} [kg/m ³]	2457,50	2490,31

Tabela A.16 – Baridade aparente através do método A para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 2% de água

EN 12697-6 (Método A)				
Provete	Peso do provete seco [g]	Peso do provete imerso [g]	Temperatura da água [°C]	Baridade [kg/m ³]
DB_A2_1	1189,1	691,6	15,6	2388,1
DB_A2_2	1178,1	685,5	15,6	2389,5
DB_A2_3	1174,1	683,8	15,6	2392,6
DB_A2_4	1177,2	686,4	15,6	2396,4
DB_A2_5	1162,3	675,6	15,6	2386,0
DB_A2_6	1178,6	685,8	15,6	2389,6

Tabela A.17 – Baridade aparente através do método C para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 2% de água

EN 12697-6 (Método C)					
Provete	Peso do provete seco [g]	Peso do provete com <i>parafilm</i> [g]	Peso do provete imerso [g]	Temperatura da água [°C]	Baridade [kg/m ³]
DB_A2_1	1189,1	1191,9	679,6	15,6	2332,9
DB_A2_2	1178,1	1181,3	675,0	15,6	2340,9
DB_A2_3	1174,1	1177,1	672,7	15,6	2340,8
DB_A2_4	1177,2	1180,4	674,4	15,6	2340,5
DB_A2_5	1162,3	1165,3	663,2	15,6	2327,9
DB_A2_6	1178,6	1181,5	667,4	15,6	2304,6

Tabela A.18 – Baridade aparente através do método D para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 2% de água

EN 12697-6 (Método D)					
Provete	Peso do provete seco [g]	Volume do provete [cm ³]	Dimensões do provete (cm)		Baridade [kg/m ³]
			Altura	Diâmetro	
DB_A2_1	1189,1	509,9	6,24	10,2	2332,1
DB_A2_2	1178,1	508,3	6,22	10,2	2317,9
DB_A2_3	1174,1	512,3	6,27	10,2	2291,6
DB_A2_4	1177,2	507,4	6,21	10,2	2319,9
DB_A2_5	1162,3	505,0	6,18	10,2	2301,7
DB_A2_6	1178,6	507,4	6,21	10,2	2322,7

Tabela A.19 – Baridade aparente através do método A para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 3% de água

EN 12697-6 (Método A)				
Provete	Peso do provete seco [g]	Peso do provete imerso [g]	Temperatura da água [°C]	Baridade [kg/m ³]
DB_A3_1	1188,7	689,9	15,6	2381,0
DB_A3_2	1141,2	660,4	15,6	2371,5
DB_A3_3	1147,4	666,6	15,6	2384,4
DB_A3_4	1162,6	672,7	15,6	2371,1
DB_A3_5	1178,0	682,5	15,6	2375,3
DB_A3_6	1198,2	695,0	15,6	2379,1

Tabela A.20 – Baridade aparente através do método C para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 3% de água

EN 12697-6 (Método C)					
Provete	Peso do provete seco [g]	Peso do provete com <i>parafilm</i> [g]	Peso do provete imerso [g]	Temperatura da água [°C]	Baridade [kg/m ³]
DB_A3_1	1188,7	1191,5	676,4	15,6	2319,4
DB_A3_2	1141,2	1143,9	647,1	15,6	2308,7
DB_A3_3	1147,4	1150,1	651,6	15,6	2313,3
DB_A3_4	1162,6	1165,5	657,8	15,6	2302,2
DB_A3_5	1178,0	1187,0	667,2	15,6	2307,6
DB_A3_6	1198,2	1200,6	681,7	15,6	2318,7

Tabela A.21 – Baridade aparente através do método C para provetes das misturas semi-temperadas com betume-espuma com 3% de água

EN 12697-6 (Método D)					
Provete	Peso do provete seco [g]	Volume do provete [cm ³]	Dimensões do provete (cm)		Baridade [kg/m ³]
			Altura	Diâmetro	
DB_A3_1	1188,7	515,6	6,31	10,2	2305,4
DB_A3_2	1141,2	502,5	6,15	10,2	2270,9
DB_A3_3	1147,4	493,5	6,04	10,2	2324,8
DB_A3_4	1162,6	508,3	6,22	10,2	2287,4
DB_A3_5	1178,0	513,2	6,28	10,2	2295,6
DB_A3_6	1198,2	518,9	6,35	10,2	2309,2

ANEXO IX

Definição dos conjuntos de provetes usados nos ensaios de sensibilidade à água com base na baridade e na altura

Tabela A.22 – Divisão dos provetes de mistura convencional a quente em conjuntos de baridades e alturas idênticas, a condicionar no ar ou em água

Determinação da resistência conservada						
Cálculo da média das baridades e alturas (2 conjuntos)						
Provete	Altura [mm]	Baridade [kg/m ³]	Média		Diferenças	
			Alturas	Baridades	< 5mm	< 30kg/m ³
CD_4.5N_1	63,1	2375,39				
CD_4.5N_2	62,6	2366,27	62,9	2370,82		
CD_4.5N_4	62,9	2370,81			0,07	0,72
CD_4.5N_3	62,6	2375,89				
CD_4.5N_5	62,5	2362,15	62,8	2370,10		
CD_4.5N_6	63,3	2372,27				
CD_5N_2	61,9	2394,34				
CD_5N_3	61,6	2405,23	62,0	2395,33		
CD_5N_4	62,5	2386,43			0,03	0,36
CD_5N_5	61,8	2384,79				
CD_5N_6	62,7	2391,08	62,0	2394,97		
CD_5N_1	61,4	2409,04				
CD_5.5N_6	61,7	2420,33				
CD_5.5N_2	61,8	2426,16	61,5	2422,28		
CD_5.5N_5	61,1	2420,36			0,23	0,68
CD_5.5N_4	61,9	2424,27				
CD_5.5N_3	61,4	2418,70	61,3	2422,96		
CD_5.5N_1	60,6	2425,92				

Tabela A.23 – Divisão dos provetes de mistura semi-temperada com betume-espuma em conjuntos de baridades e alturas idênticas, a condicionar no ar ou em água

Determinação da resistência conservada						
Cálculo da média das baridades e alturas (2 conjuntos)						
Provete	Altura [mm]	Baridade [kg/m ³]	Média		Diferenças	
			Alturas	Baridades	< 5mm	< 30kg/m ³
DB_A2_2	62,2	2389,51				
DB_A2_4	62,1	2396,44	62,0	2390,67		
DB_A2_5	61,8	2386,04			0,37	0,60
DB_A2_1	62,4	2388,07				
DB_A2_3	62,7	2392,57	62,4	2390,06		
DB_A2_6	62,1	2389,56				
DB_A3_1	63,1	2381,04				
DB_A3_2	61,5	2371,48	62,7	2377,20		
DB_A3_6	63,5	2379,09			0,90	0,28
DB_A3_3	60,4	2384,36				
DB_A3_4	62,2	2371,07	61,8	2376,92		
DB_A3_5	62,8	2375,33				

ANEXO X

Gráficos da evolução do assentamento dos provetes ensaiados no
ensaio de compactabilidade

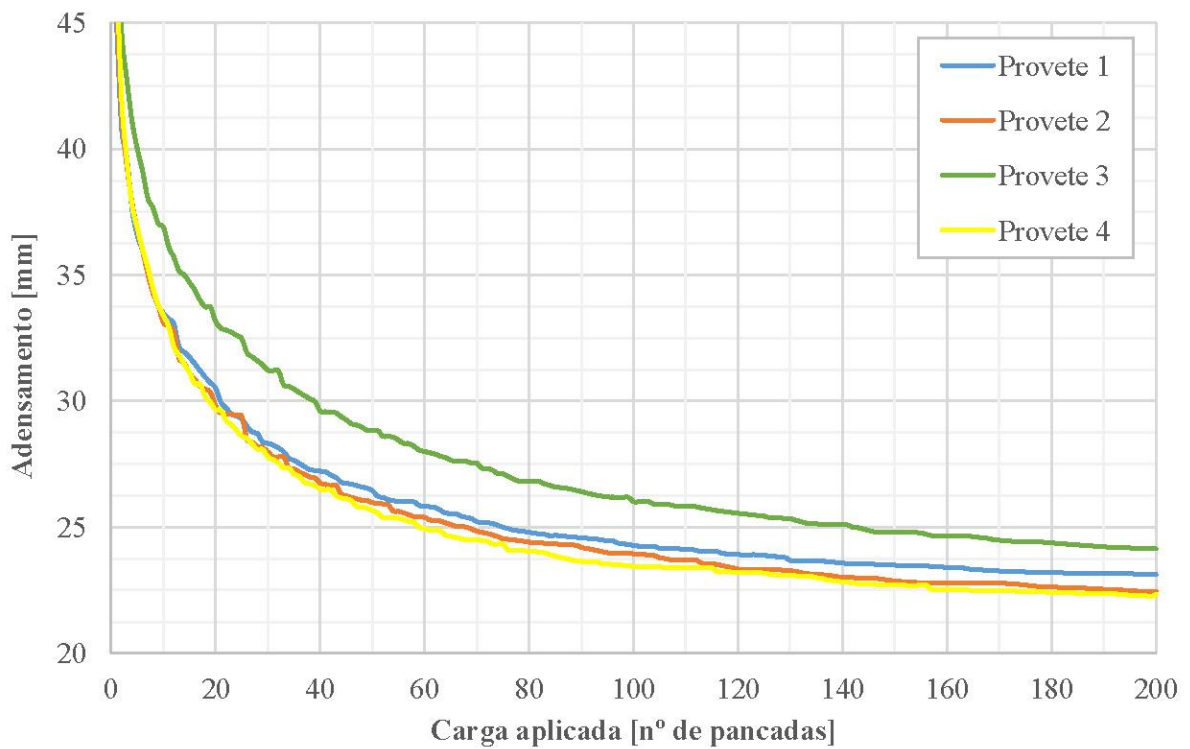


Gráfico A.9 – Evolução do assentamento dos provetes com mistura convencional a quente no ensaio de compactabilidade

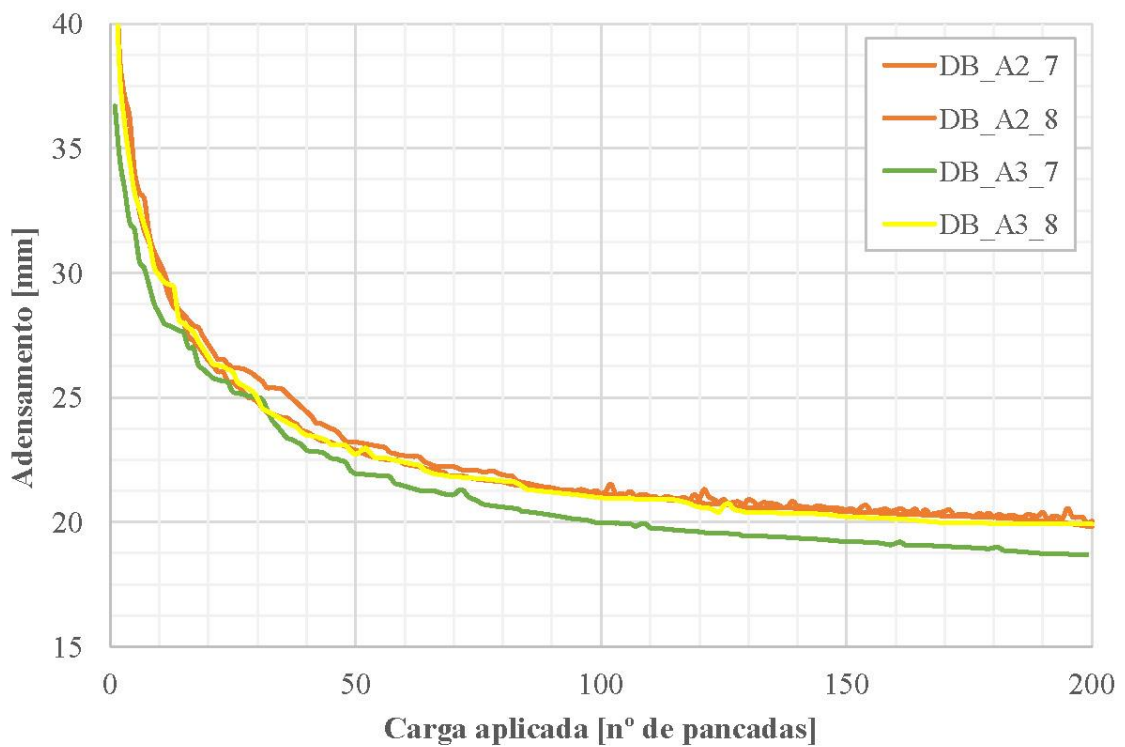


Gráfico A.10 – Evolução do assentamento dos provetes com mistura semi-temperada com betume-espuma no ensaio de compactabilidade

ANEXO XI

Gráficos da evolução da porosidade dos provetes ensaiados no ensaio de compactabilidade

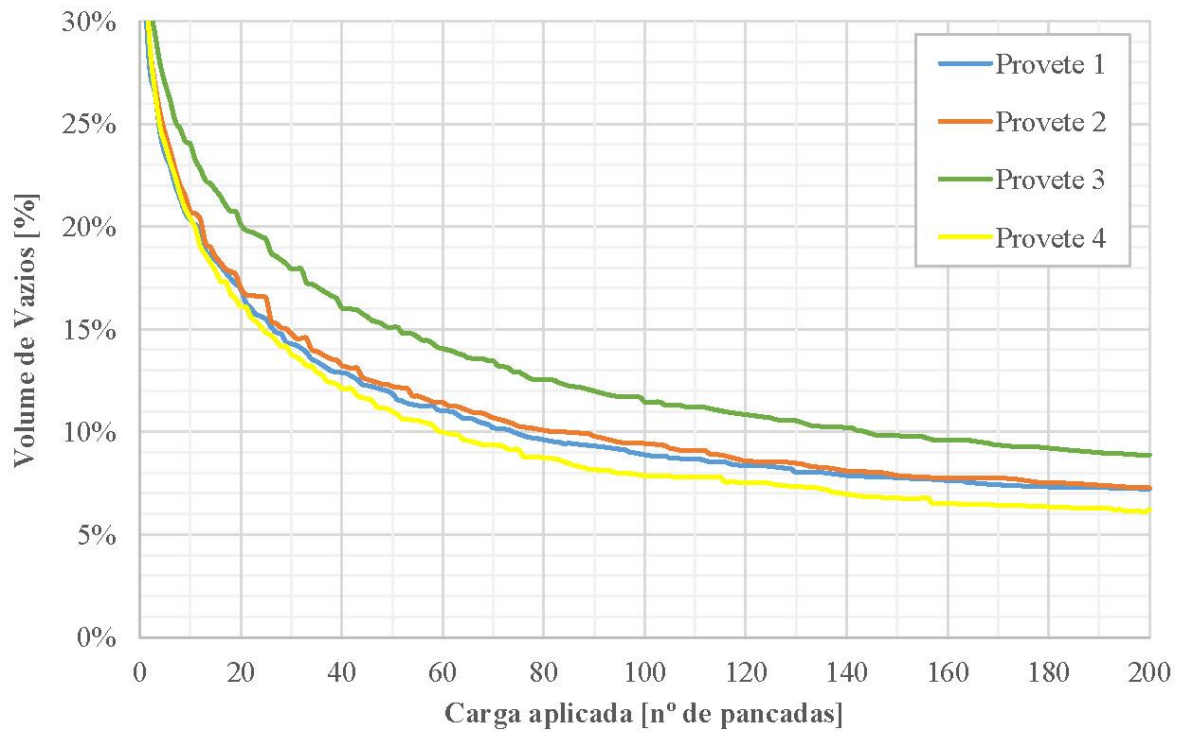


Gráfico A. 11 – Evolução da porosidade dos provetes com mistura convencional a quente no ensaio de compactabilidade

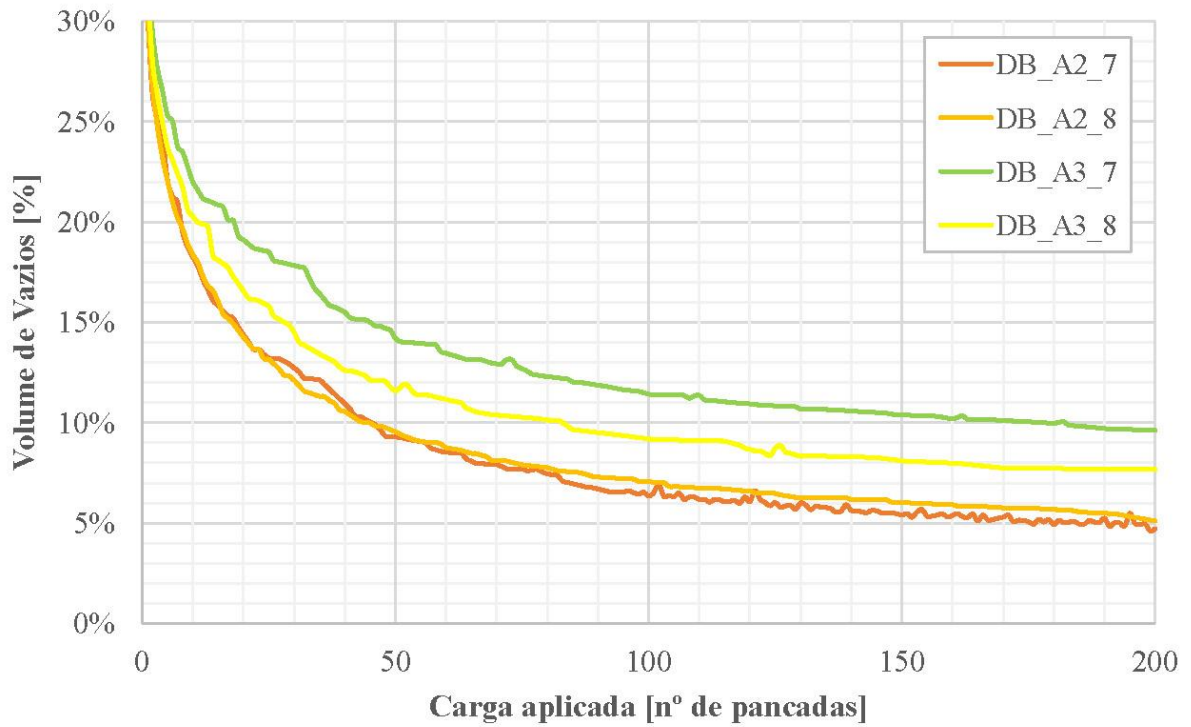


Gráfico A.12 – Evolução da porosidade dos provetes com mistura semi-temperada com betume-espuma no ensaio de compactabilidade

ANEXO XII

Gráficos obtidos no ensaio de pista relativos à profundidade de rodeira
das lajetas ensaiadas

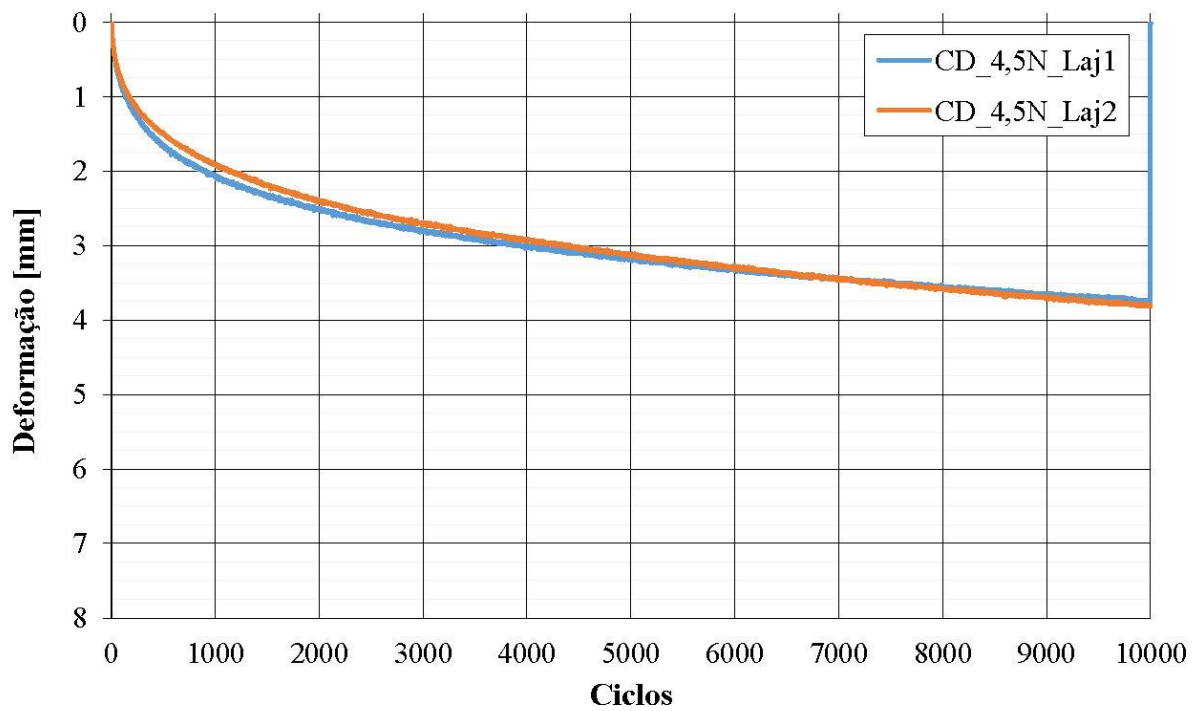


Gráfico A.13 – Profundidade de rodeira dos provetes de mistura convecional a quente com 4,5% de betume

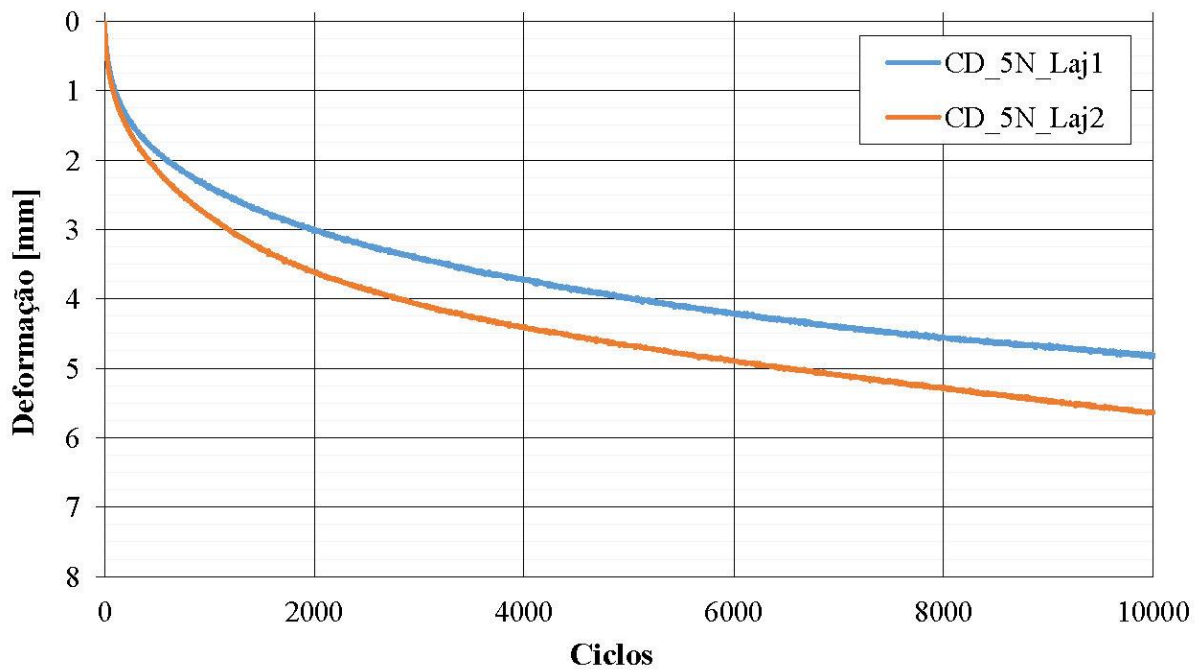


Gráfico A.14 – Profundidade de rodeira dos provetes de mistura convecional a quente com 5,0% de betume

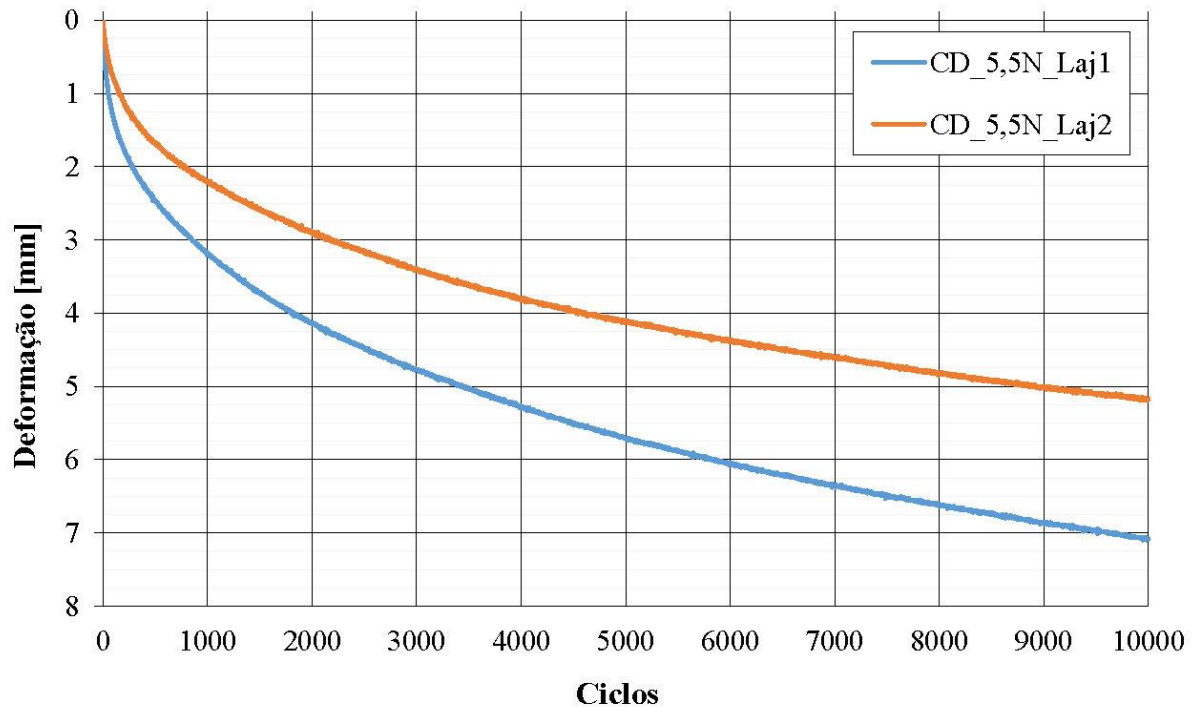


Gráfico A.15 – Profundidade de rodeira dos provetes de mistura convecional a quente com 5,5% de betume

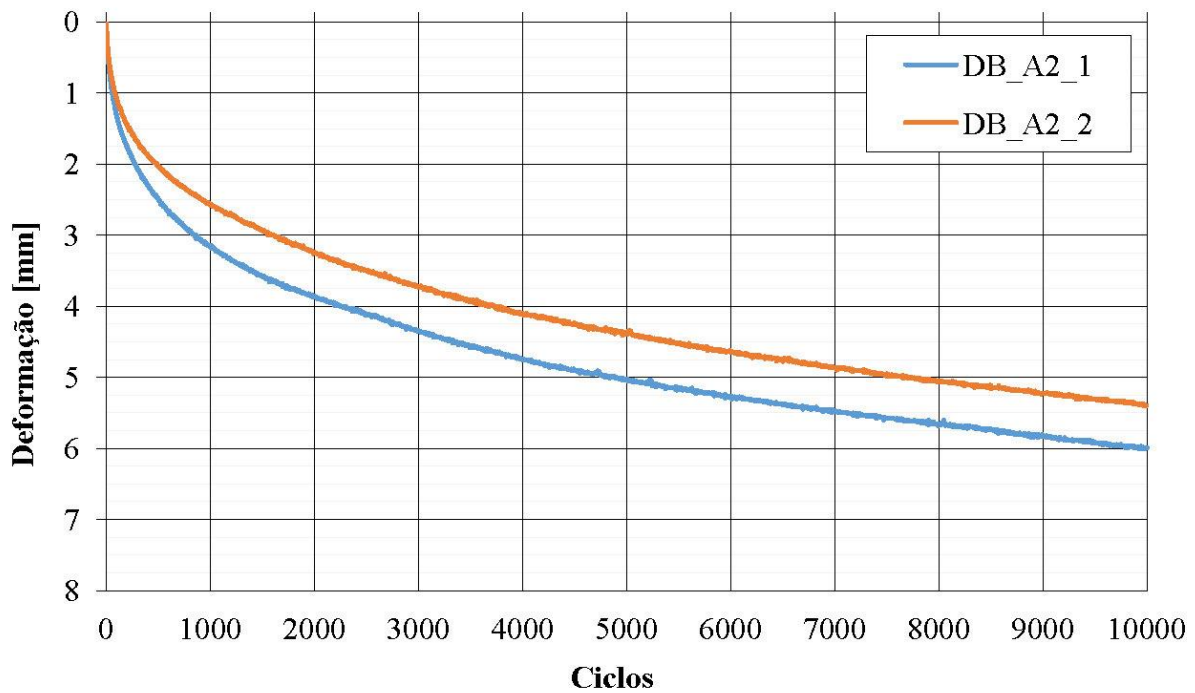


Gráfico A. 16 – Profundidade de rodeira dos provetes de mistura semi-temperada produzida com betume-espuma (utilizando 2% de água)

ANEXO XIII

Resultados médios dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das misturas betuminosas estudadas

Tabela A.24 – Resultados da média dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das vigas com mistura convencional a quente às temperaturas de 0 °C e 10 °C

Provete	Temperatura de 0 °C				Temperatura de 10 °C			
	Frequência (Hz)	Módulo de Rigidez [MPa]	Desvio Padrão	Ângulo de fase [°]	Desvio Padrão	Módulo de Rigidez [MPa]	Desvio Padrão	Ângulo de fase [°]
0,1	8394,09	491,6	15,5	0,4	3281,58	93,1	33,0	0,1
0,2	9367,96	514,2	13,4	0,3	4124,68	61,8	29,0	0,0
0,5	10549,45	565,2	11,3	0,2	5336,73	108,8	24,5	0,4
1	11399,70	604,2	10,0	0,1	6292,88	137,1	21,3	0,1
2	12191,95	586,1	8,8	0,1	7218,38	167,3	18,5	0,2
5	13214,00	630,9	7,4	0,1	8464,61	177,3	15,0	0,2
8	13705,15	694,3	6,6	0,2	9096,13	187,8	13,3	0,1
10	13910,50	697,6	6,2	0,2	9356,70	205,0	12,4	0,2
0,1	8434,27	350,7	15,2	0,4	3290,22	74,8	32,0	0,2

Tabela A.25 – Resultados da média dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das vigas com mistura convencional a quente às temperaturas de 20 °C e 30 °C

Provete	Temperatura de 20 °C				Temperatura de 30 °C			
	Frequência (Hz)	Módulo de Rigidez [MPa]	Desvio Padrão	Ângulo de fase [°]	Desvio Padrão	Módulo de Rigidez [MPa]	Desvio Padrão	Ângulo de fase [°]
0,1	717,13	3,6	47,6	1,9	238,54	50,7	44,3	0,6
0,2	1019,10	27,2	45,8	0,2	296,24	39,9	42,5	3,7
0,5	1544,53	60,5	42,2	0,9	410,19	42,2	43,7	3,3
1	2094,93	70,7	39,3	0,4	561,09	17,6	45,2	3,0
2	2714,74	115,0	35,7	0,6	736,08	14,2	45,1	3,3
5	3737,68	185,4	30,9	0,1	1114,87	28,5	44,4	2,0
8	4321,02	192,3	28,2	0,0	1386,68	33,2	43,5	1,6
10	4614,26	194,3	26,8	0,2	1502,94	67,2	43,1	1,5
0,1	699,74	3,2	46,7	2,8	216,63	42,6	43,0	1,4

Tabela A.26 – Resultados da média dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das vigas com mistura semi-temperada com betume-espuma às temperaturas de 0 °C e 10 °C

Provete	Temperatura de 0 °C				Temperatura de 10 °C			
	Frequência (Hz)	Módulo de Rigidez [MPa]	Desvio Padrão	Ângulo de fase [°]	Desvio Padrão	Módulo de Rigidez [MPa]	Desvio Padrão	Ângulo de fase [°]
0,1	7803,44	277,9	15,1	0,2	3246,63	29,7	31,0	0,7
0,2	8709,30	209,7	13,0	0,2	4030,69	55,4	27,4	0,6
0,5	9764,87	178,5	11,1	0,2	5137,36	87,4	23,2	0,2
1	10526,45	183,5	9,8	0,3	6055,04	51,4	20,5	0,2
2	11218,25	161,9	8,7	0,3	6891,56	146,5	17,5	0,1
5	12110,95	214,9	7,1	0,2	8020,56	165,6	14,3	0,0
8	12555,60	178,5	6,3	0,2	8573,56	158,1	12,7	0,0
10	12726,95	151,1	5,8	0,1	8816,43	179,8	11,9	0,0
0,1	7858,06	184,4	14,6	0,3	3248,43	53,5	30,9	0,7

Tabela A.27 – Resultados da média dos módulos de rigidez e dos ângulos de fase das vigas com mistura semi-temperada com betume-espuma às temperaturas de 20 °C e 30 °C

Provete	Temperatura de 20 °C				Temperatura de 30 °C			
	Frequência (Hz)	Módulo de Rigidez [MPa]	Desvio Padrão	Ângulo de fase [°]	Desvio Padrão	Módulo de Rigidez [MPa]	Desvio Padrão	Ângulo de fase [°]
0,1	746,24	30,4	47,3	1,3	159,61	22,7	48,7	5,7
0,2	1034,58	31,4	45,8	0,7	205,37	12,1	48,9	0,6
0,5	1580,58	54,1	41,2	0,1	329,07	22,0	49,8	0,6
1	2128,18	54,2	37,7	0,2	478,15	33,8	49,8	0,7
2	2757,62	65,8	34,2	0,6	672,55	50,8	49,0	0,6
5	3741,19	91,8	29,1	0,5	1060,48	84,6	46,2	0,4
8	4285,20	80,8	26,6	0,6	1314,52	102,2	44,6	0,5
10	4541,57	90,8	25,2	0,3	1447,90	98,0	43,8	0,8
0,1	717,94	35,8	47,3	2,1	144,06	2,4	48,4	7,0