

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado foi realizada no Instituto Superior de Engenharia de Coimbra sob a orientação do professor Silvino Dias Capitão do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Agradeço ao professor Silvino Capitão pelo apoio, disponibilidade, ensinamentos e orientações transmitidas, bem como o permanente incentivo.

Ao Engenheiro Carlos Renato, Técnico do Laboratório de Pavimentos, agradeço a ajuda, troca de opiniões e disponibilidade demonstrada e todos os bons momentos passados no laboratório.

A todos os que se mostraram disponíveis para ajudar, expresso os meus sinceros agradecimentos.

Para finalizar quero agradecer aos meus pais e irmã, ao meu grande amigo Paulo Valente por todos os ensinamentos e a Barjona Kajukenbo Team.

RESUMO

Ao longo dos tempos, tem-se vindo a verificar maior preocupação e consciência ambientais, pelo que os organismos e associações independentes têm procurado sensibilizar as empresas e os governos a nível mundial para um consumo mais racional da energia, tendo em vista uma menor emissão de dióxido de carbono para a atmosfera.

Neste contexto, as tecnologias de pavimentação têm evoluído no sentido ecológico, isto é, de modo a terem menos impactes ambientais e a serem economicamente viáveis. As misturas betuminosas não são exceção desses avanços tecnológicos, tendo surgido as misturas betuminosas temperadas com o objetivo de contribuir para a redução do consumo de energia e de emissões face às misturas convencionais. A sustentabilidade ambiental só pode consolidar-se através do desenvolvimento de tecnologias de produção ambientalmente mais adequadas, evitando desta forma comprometer o bem-estar das futuras gerações.

Atualmente, as misturas betuminosas temperadas não conseguiram ainda uma posição de destaque face às misturas convencionais, dado que os agentes que as utilizam mantem ainda alguma desconfiança relativamente à performance desta tecnologia comparativamente às convencionais, pelo que é primordial demonstrar que o seu desempenho mecânico é adequado e semelhante ao das misturas produzidas a quente.

Assim, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo exploratório de algumas características de uma mistura betuminosa temperada produzida com um betume aditivado em refinaria e que, portanto, dispensa o uso de outros aditivos para baixar a temperatura de manipulação.

Neste documento faz-se um breve enquadramento e uma abordagem histórica da evolução das misturas betuminosas temperadas e descrevem-se as diferentes tecnologias e técnicas de produção, abordando os seus benefícios e desvantagens, e indicando as propriedades típicas das mesmas. Em seguida apresentam-se os estudos laboratoriais para avaliação das diferentes propriedades volumétricas e o comportamento mecânico da mistura. Inclui-se também, sempre que possível, uma comparação das propriedades obtidas com resultados obtidos em misturas betuminosas a quente semelhantes, de forma a mostrar a aplicabilidade das MBT.

Palavras-Chave

Betume aditivado em refinaria; misturas betuminosas temperadas; propriedades de misturas betuminosas; preocupação ambiental.

ABSTRACT

Over time it has been observed a greater concern and environmental awareness. As a consequence, the agencies and independent associations have sought to sensitize enterprises and governments worldwide, for a more rational consumption of energy, aiming to lower carbon dioxide emission to the atmosphere.

In this context, paving technologies have evolved in the ecological sense, that is, to have less environmental impact and being economically feasible. Bituminous mixtures are no exception of these technological advances and, thus, warm-mix asphalt has appeared with the goal of contributing to a reduction of energy consumption and emissions as compared to conventional mixtures. Environmental sustainability can be consolidated only by developing production technologies environmentally appropriate, thus avoiding compromising welfare of future generations.

Currently, warm-mix asphalt concrete (WMA) has not yet a prominent position as compared with conventional asphalt concrete, as the agents who use it still keep some distrust regarding performance of the technology in comparison to conventional. So, it is essential to demonstrate that its mechanical performance is suitable and similar to that obtained for hot mix asphalt (HMA).

Therefore, the objective of this project is to carry out an exploratory study on some characteristics of a warm-mix asphalt mixture produced with a terminal blend warm bitumen, which exempts the use of other additives to reduce handling temperatures.

This document makes up a contextual framework and a historical approach on the evolution of WMA mixtures as well as a description of the existing technologies and production techniques, benefits, drawbacks, and typical properties. Afterwards, the laboratory studies to evaluate several volumetric properties and mechanical behaviour of the mixture are also presented. Whenever possible, a comparative analysis between the obtained properties and those of similar hot asphalt concrete is included, aiming to show the feasibility of WMA.

Key-Words

Bitumen additivated in refinery; warm-mix asphalt mixtures; properties of asphalt concrete; environmental concern.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Enquadramento	3
1.2	Objetivos e Metodologia de Trabalho	4
1.3	Organização do trabalho	4
2	MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS.....	6
2.1	Generalidades	6
2.2	Composição e Formulação das Misturas Betuminosas Temperadas	6
2.3	Tecnologias de Produção	10
2.4	Vantagens	20
2.5	Desvantagens.....	21
2.6	Propriedades Mecânicas das MBT.....	22
2.6.1	Sensibilidade à água.....	22
2.6.2	Módulo de resiliência.....	23
2.6.3	Fadiga.....	24
2.6.4	Resistência à deformação permanente	24
2.7	Considerações Finais.....	25
3	TRABALHOS EXPERIMENTAIS.....	26
3.1	Generalidades	26
3.2	Caracterização do betume	26
3.2.1	Temperatura de amolecimento – Método do anel e bola (EN 1427) 27	
3.2.2	Penetração a 25°C (EN1426)	28
3.2.3	Densidade do betume pelo método do picnómetro.....	29
3.3	Características dos agregados	29
3.4	Composição granulométrica da mistura.....	30
3.5	Produção das misturas e moldagem de provetes.....	31

3.6	Caracterização das misturas betuminosas	32
3.6.1	Determinação da baridade (EN 12697-6)	32
3.6.2	Determinação da baridade máxima teórica (EN 12697-5).....	34
3.6.3	Determinação da porosidade e VMA	36
3.6.4	Ensaio de compressão Marshall (EN 12697-34).....	39
3.6.5	Percentagem ótima de betume	45
3.6.6	Sensibilidade à água (EN 12697-12).....	45
3.6.7	Deformação Permanente (EN 12697-25).....	47
3.6.8	Módulo de Resiliência (EN 12697-26)	63
3.7	Considerações Finais	67

4 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS..... 69

4.1	Síntese do trabalho e conclusões gerais.....	69
4.2	Prosseguimento de Trabalhos Futuro	72
4.3	Considerações Finais	72

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 75

REFERÊNCIAS NORMATIVAS 78

APÊNDICES E ANEXOS 79

APÊNDICE I.	Estudo da Mistura Betuminosa.....	80
I.1	Estudo de mistura betuminosa – Formulação Marshall	80
I.2	Estudo de mistura betuminosa – Características Marshall	81
I.3	Estudo de mistura betuminosa – Sensibilidade à água.....	82
I.4	Estudo de mistura betuminosa – Módulo de Resiliência.....	85
I.5	Estudo de mistura betuminosa – Deformação Permanente	86

ANEXO I. Fichas técnicas dos Agregados..... 88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1-Classificação do tipo de mistura betuminosa tendo em conta a sua temperatura de produção (Silva et al., 2010)	10
Figura 2-2- Relação entre o processo a utilizar com a temperatura de fabrico. (Ferreira, 2009).....	11
Figura 2-3- Aditivo orgânico comercializado com a marca Sasobit (retirado de www.skbn.pl)	12
Figura 2-4-Melhoria do ângulo de contacto devido a incorporação de aditivo químico (Alves, 2012) 12	
Figura 2-5- Aditivo químico comercializado sob a marca Rediset® WMX (retirado de www.promdorresurs.com).....	13
Figura 2-6-Equipamento para a junção simultânea do aditivo e do betume (Prowell e Hurley, 2008) 13	
Figura 2-7-Ilustração esquemática de produção de espuma de betume por injeção de água.....	14
Figura 2-8-Double Barrel com opção Green (ASTEC, 2015)	15
Figura 2-9-O processo de formação de WMA-Foam®(Adaptado de Ferreira, 2009).....	15
Figura 2-10-Processo de produção das LEA (adaptado de FHWA, 2008).....	17
Figura 2-11-Central de misturas betuminosas LEA2 (Ferreira, 2009)	18
Figura 2-12-Exemplos de cristais de alumino-silicatos-hidratados	18
Figura 2-13-Sistema de válvulas para adição de zeólitos (Ferreira, 2009).....	19
Figura 2-14-Diferença na libertação de gases entre uma mistura MBQ (esquerda) e uma MBT (direita). (Ferreira et al., 2009).....	20
Figura 3-1- Aspeto dos ensaios de medição da temperatura de amolecimento do betume pelo método do anel e bola.....	27
Figura 3-2- Equipamento e ensaio de penetração a 25°C.	28
Figura 3-3- Frações granulométricas da mistura de estudo após peneiração.....	30
Figura 3-4-Curva granulométrica e fuso granulométrico de referência.....	30
Figura 3-5- Pesagem, mistura dos constituintes e compactação dos provetes no compactador Marshall.	31
Figura 3-6- Representação do processo de determinação da baridade	32
Figura 3-7- Variação da baridade média com a percentagem de betume, por grupo.....	33
Figura 3-8-Gráfico de comparação da variação da baridade da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente.....	33
Figura 3-9-Equipamento para a determinação da baridade máxima	35
Figura 3-10- Variação da baridade máxima teórica com a percentagem de betume, por grupo.....	35
Figura 3-11 Comparação da variação da baridade máxima teórica da mistura betuminosa temperada em estudo com duas misturas fabricadas a quente	36
Figura 3-12- Variação da porosidade com a percentagem de betume, por grupo.....	37
Figura 3-13- Variação do VMA com a percentagem de betume, por grupo	38
Figura 3-14- Comparação da variação da porosidade da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente.....	38
Figura 3-15- Comparação da variação do VMA da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente	39
Figura 3-16-Equipamento para a realização do Ensaio Marshall	40
Figura 3-17- Estabilidade Marshall do provete 1.6 –3,5% de betume.....	41
Figura 3-18- Variação da estabilidade Marshall com a percentagem de betume, por grupo	42

Figura 3-19- Comparação da variação da estabilidade da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente	42
Figura 3-20- Variação da deformação Marshall com a percentagem em betume	43
Figura 3-21- Comparação da variação da deformação da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente	43
Figura 3-22- Resultados obtidos para a rigidez de Marshall para a mistura temperada em estudo.....	44
Figura 3-23-Gráfico de comparação da variação da rigidez Marshall da mistura betuminosa temperada com duas misturas a quente	44
Figura 3-24- Vista geral dos ensaios de avaliação da sensibilidade à água	46
Figura 3-25- Comparação dos resultados de ITRR da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente.....	47
Figura 3-26- Moldagem dos provetes para estudo da deformação permanente	48
Figura 3-27- Equipamento de ensaio para avaliação da resistência à deformação permanente e vistas da montagem durante a realização do ensaios (adaptado de IPC global, 2016)	49
Figura 3-28-Ensaio de Deformação Permanente a 40°C de um provete	50
Figura 3-30- Variação da extensão vertical acumulada dos provetes com 5% de betume a 40°C	51
Figura 3-29- Variação da extensão vertical acumulada dos provetes com 4,5% de betume a 40°C	51
Figura 3-31-Variação da extensão vertical acumulada dos provetes com 5,5% de betume a 40°C	52
Figura 3-32- Variação da extensão média acumulada para as diferentes percentagens de betume, a 40°C	52
Figura 3-33-Gráfico de comparação da extensão média acumulada dos diversos grupos a 40°C, com uma mistura betuminosa quente.....	53
Figura 3-34- Gráfico da variação da deformação permanente média a 40°C com a percentagem de betume, por grupo	54
Figura 3-35-Variação da extensão vertical acumulada dos provetes com 4,5% de betume a 60°C	55
Figura 3-36- Variação da extensão vertical acumulada dos provetes com 5% de betume a 60°C	55
Figura 3-37- Variação da extensão média acumulada para as diferentes percentagens de betume, a 60°C	56
Figura 3-38- Gráfico da variação da deformação permanente média a 60°C com a percentagem de betume, por grupo	57
Figura 3-39- Gráfico da variação da deformação permanente média a 40°C e 60°C com a percentagem de betume, por grupo	57
Figura 3-40-Variação do parâmetro f_c a 40°C em função da percentagem de betume	59
Figura 3-41-Variação do parâmetro f_c a 60°C em função da percentagem de betume	59
Figura 3-42- Gráfico da variação do parâmetro f_c médio a 40°C e 60°C com a percentagem de betume, por grupo.....	60
Figura 3-43-Variação do parâmetro ϵ_n médio a 40°C em função da percentagem de betume	61
Figura 3-44-Variação do parâmetro ϵ_n médio a 60°C em função da percentagem de betume	62
Figura 3-45- Gráfico da variação do parâmetro ϵ_n médio a 40°C e 60°C com a percentagem de betume, por grupo.....	62
Figura 3-46-Suporte utilizado para a determinação do módulo de resiliência à direita e esquema de montagem de ensaio à esquerda (adaptado de IPC global, 2016)	63
Figura 3-47- Exemplo de relatório do ensaio de medição do Módulo de Resiliência de um provete ...	64
Figura 3-48-Variação do módulo de resiliência em função da percentagem de betume	65
Figura 3-49- Comparação da variação do módulo de resiliência em função da percentagem de betume de uma MBT com MBQ	66
Figura 3-50- Comparação da variação do módulo de resiliência em função da percentagem de betume e do método usado para a sua determinação	67

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1-Requisitos das camadas de desgaste (E.P., 2009)	7
Quadro 2.2-Requisitos das camadas de desgaste - continuação (E.P., 2009).....	8
Quadro 2.3- Requisitos das camadas de desgaste – continuação (E.P., 2009).....	9
Quadro 3.1- Requisitos para o betume 35/50 indicados na norma EN 12591	26
Quadro 3.2- Resultados obtidos no ensaio do anel e bola.....	28
Quadro 3.3 – Resultados obtidos no ensaio de penetração a 25°C.....	28
Quadro 3.4- Resultados obtidos no ensaio da densidade pelo método do picnómetro	29
Quadro 3.5- Requisitos dos materiais grossos utilizados e comparação com os limites habitualmente utilizados em Portugal	29
Quadro 3.6- Composição ponderal da mistura de agregados da mistura em estudo	30
Quadro 3.7-Baridades médias por grupo	33
Quadro 3.8- Baridade máxima teórica obtida	35
Quadro 3.9-Valores de porosidade e VMA em função da percentagem de betume	37
Quadro 3.10- Resultados do ensaio de compressão Marshall	42
Quadro 3.11- Resumo do cálculo da percentagem ótima de betume pelo método de Marshall.....	45
Quadro 3.12- Resultado do ensaio da deformação permanente a 40°C para os diversos provetes e resultado da deformação média em função da percentagem de betume	54
Quadro 3.13- Resultado do ensaio da deformação permanente a 60°C para os diversos provetes e resultado da deformação média em função da percentagem de betume	56
Quadro 3.14- Resultado do ensaio da deformação permanente a 40°C para os diversos provetes, para o parâmetro f_c ($\mu\text{m}/\text{ciclo}$).	58
Quadro 3.15- Resultado do ensaio da deformação permanente a 60°C para os diversos provetes, para o parâmetro f_c ($\mu\text{m}/\text{ciclo}$).	58
Quadro 3.16- Resultado do ensaio da deformação permanente a 40°C para os diversos provetes, para o parâmetro ϵ_n (%).	61
Quadro 3.17- Resultado do ensaio da deformação permanente a 60°C para os diversos provetes, para o parâmetro ϵ_n	61
Quadro 3.18- Resultados obtidos no ensaio de determinação do módulo de resiliência.....	65
Quadro 3.19- Resultados obtidos nos Métodos de calculo da Shell e Nottingham.....	66

ÍNDICE DE QUADROS EM APÊNDICE

Quadro I. 1 – Quantidade percentual de cada fração de agregados para formulação da mistura betuminosa.....	80
Quadro I. 2 – Estudo da mistura betuminosa.....	80
Quadro I. 3– Características dos provetes Marshall.....	81
Quadro I. 4 – Características dos provetes.....	82
Quadro I. 5 – Resultados do ensaio de tração indireta e determinação da sensibilidade à água.....	83
Quadro I. 6 – Resultados do ensaio de tração indireta e determinação da sensibilidade à água (continuação).....	84
Quadro I. 7 – Características dos provetes.....	85
Quadro I. 8 – Características dos provetes e resultados dos ensaios a 40°C.....	86
Quadro I. 9 – Características dos provetes e resultados dos ensaios a 60°C.....	87

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Nos últimos anos tem-se notado uma crescente preocupação ambiental, sendo de enorme importância sensibilizar a população para desenvolver hábitos ambientalmente corretos. Resultado da poluição, tem-se verificado o aumento da temperatura global e, conseqüentemente, o degelo de glaciares e o aumento do nível médio das águas do mar.

Uma das principais ameaças ambientais identificadas é a emissão excessiva para a atmosfera de gases que provocam efeito estufa, sendo o dióxido de carbono um dos principais. Este gás é originado sempre que ocorre uma combustão, como acontece, por exemplo, nos tambores secadores das centrais de produção de misturas betuminosas, onde se queimam grandes quantidades de combustível para aquecer e secar os agregados.

As misturas betuminosas temperadas são produzidas a menores temperaturas que as misturas fabricadas a quente, o que leva a um menor consumo de energia e a uma menor emissão de gases com efeito estufa para a atmosfera. Nalgumas tecnologias disponíveis, estas misturas incorporam aditivos que reduzem a viscosidade do betume, o que permite envolver completamente os agregados a temperaturas mais baixas, assim como facilitar as condições de trabalhabilidade e de compactação da mistura a temperaturas também mais baixas. Uma das vantagens é que podem ser utilizadas em situações para as quais a distância de transporte seja grande ou as temperaturas do ambiente sejam baixas.

Atualmente, já está disponível no mercado um betume aditivado em refinaria para o fabrico de misturas temperadas. Esta situação demonstra claramente uma evolução tecnológica que vai evitar a necessidade de utilizar aditivos na central de produção, uma vez que estes já se encontram no betume.

Geralmente, as misturas betuminosas temperadas, mesmo quando compostas por materiais pétreos britados virgens, têm um comportamento à deformação permanente mais fraco que as misturas fabricadas a quente. Isso acontece, entre outras razões, porque o betume fica menos endurecido no processo de fabrico e, como os agregados não são aquecidos a temperaturas tão elevadas, existe alguma tendência para a permanência de água no seu interior.

As soluções de misturas temperadas que incorporam betume aditivado em refinaria constituem uma tecnologia que vem contribuir para o uso mais sustentável de materiais na tecnologia rodoviária, facilitando o processo produtivo, um vez que não é necessário incorporar aditivos em central. Torna-se, portanto, necessário estudar as propriedades das misturas que é possível produzir, de modo a incrementar a sua aplicação futura.

1.2 Objetivos e Metodologia de Trabalho

O objetivo deste documento é contribuir para o estudo das características volumétricas e mecânicas de uma mistura betuminosa temperada, do tipo AC 14 surf, produzida com betume aditivado em refinaria. Pretende-se ainda comparar as propriedades daquela mistura com os valores típicos obtidos para misturas similares produzidas a quente com betume de destilação direta, de modo a avaliar a bondade da mistura temperada como alternativa para a construção de camadas de desgaste.

A metodologia de trabalho consistiu na elaboração de uma revisão da literatura sobre os aspetos associados à produção e aplicação das MBT, designadamente os relacionados com a sua formulação, tecnologias de fabrico e aplicação, assim como um balanço entre as suas vantagens e desvantagens.

Os trabalhos experimentais que se realizaram consistiram, numa primeira fase, em caracterizar o betume e os agregados utilizados. Depois, procedeu-se à caracterização de várias composições da MBT no âmbito do processo de formulação, com vista à identificação das que ofereciam melhor potencial de aplicação prática. O estudo experimental incluiu ainda a determinação de algumas propriedades mecânicas.

Para possibilitar uma comparação relativa com as propriedades típicas do betão betuminoso convencional para camadas de desgaste, procedeu-se a um cotejo das propriedades medidas para a MBT com valores típicos utilizados em misturas do tipo AC 14 surf convencionais.

1.3 Organização do trabalho

A dissertação é constituída por quatro capítulos, um apêndice e um anexo cuja organização e conteúdo se sintetizam neste subcapítulo.

No capítulo 1 é feito o enquadramento do trabalho, sendo referidos os aspetos que deram o desenvolvimento ao tema. Neste capítulo são ainda definidos os objetivos que se pretende atingir, e metodologia do trabalho e a organização do documento.

No capítulo 2 desenvolve-se o tema das MBT, apresentando-se as tecnologias já desenvolvidos para o fabrico deste tipo de misturas. Apresenta-se ainda uma síntese

das vantagens e desvantagens deste tipo de misturas, e indicam-se alguns critérios importantes para a sua composição e formulação.

No capítulo 3 apresentam-se os trabalhos experimentais que foram realizados em laboratório e discutem-se os resultados obtidos. Ao longo do mesmo capítulo são apresentados os procedimentos adotados e as particularidades de cada ensaio. Os resultados dos ensaios são depois comparados com os obtidos em trabalhos realizados com misturas convencionais e com requisitos de especificações existentes.

No capítulo 4 faz-se uma revisão sumária do trabalho desenvolvido, apresentam-se as principais conclusões obtidas, e apontam-se sugestões para a realização de possíveis trabalhos futuros.

Esta dissertação inclui ainda um apêndice e um anexo, os quais contêm os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais:

- O apêndice I contém as tabelas que foram desenvolvidas, resultantes da avaliação da mistura betuminosa, isto é, formulação método de Marshall, avaliação da sensibilidade à água, módulo de resiliência e deformação permanente;
- O anexo I contém as fichas técnicas dos diversos agregados usados na mistura.

2 MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS

2.1 Generalidades

Ao longo dos tempos tem-se vindo a denotar uma maior responsabilidade sobre o tema da sustentabilidade, isto é, a preocupação de garantir que a satisfação das necessidades das gerações futuras não fica comprometida pelo uso de recursos para a satisfação das necessidades atuais. A evolução das técnicas de pavimentação tem evoluído no sentido de incorporarem menos recursos energéticos, baixando as temperaturas necessárias para a manipulação dos materiais betuminosos.

As misturas betuminosas temperadas, por serem produzidas a menores temperaturas que as misturas a quente, são menos poluidoras e não exigem tanta energia para o seu aquecimento, ao mesmo tempo que libertam menos gases para a atmosfera.

O processo de fabrico das MBT não é muito diferente do processo de fabrico das misturas a quente. Para baixar a temperatura de fabrico pode utilizar-se um processo de fabrico que origine a formação de espuma de betume ou incluir aditivos. As diversas tecnologias disponíveis para a produção de misturas betuminosas temperadas tem permitido o uso de temperaturas entre 110 e 135°C (Capitão et al, 2012), no entanto a sua menor temperatura de fabrico garante boas condições de trabalhabilidade.

2.2 Composição e Formulação das Misturas Betuminosas Temperadas

As misturas betuminosas temperadas são compostas por um mástique betuminoso, agregados e ar. Quando se utilizam aditivos, o ligante incorpora aditivos orgânicos ou químicos. O ligante é normalmente betume asfáltico, o qual pode ser introduzido na mistura através de um processo de produção de espuma de betume, obtido por adição de minerais sintéticos ou naturais na forma de pó que contém uma teor de humidade relativamente elevado. Uma forma alternativa de produção de espuma é por injeção de água que reduz a temperatura e aumenta a trabalhabilidade da mistura. A mistura de agregados é constituída por diversas frações, podendo ser agregados naturais britados e/ou subprodutos, como alguns RCD – resíduos de construção e demolição.

Os métodos de seleção do betume e dos agregados utilizados para avaliação das várias propriedades das misturas são semelhantes aos utilizados nas MBQ (NCHRP, 2011). Habitualmente, avaliam-se os materiais através de ensaios em laboratório, os quais permitem verificar o cumprimento de alguns requisitos, em geral, estabelecidos em especificações ou cadernos de encargos da administração rodoviária. Por exemplo, em Portugal, a entidade Infraestruturas de Portugal (ex-Estradas de Portugal, SA) inclui no seu cadernos de encargos

um quadro de requisitos que as misturas betuminosas devem cumprir quando se destinam a camada de desgaste (Quadros 2.1 a 2.3).

Quadro 2.1-Requisitos das camadas de desgaste (E.P., 2009)

Camadas de misturas betuminosas a quente Camada de desgaste - Requisitos/Propriedades							
Requisitos /Propriedades	Ref. normativa	Condições específicas de ensaio	Uni	Tipo de mistura			
				AC 14	PA12,5(BBd)	AC10surf (mBBr)	AC14surf (BBr)
				rubrica 14.03.2.	rubrica 14.03.2.4.2	rubrica 14.03.2.4	rubrica 14.03.2.4
Característica Marshall	EN 12697-34	Moldagem dos provetes: EN12697-30 75pancadas	kN	$S_{max15}^{(a)}$	NA		$S_{max15}^{(a)}$
			kN	$S_{min7,5}$			$S_{min12,5}$
			mm	F4			F4
			mm	F2			F2
			kN/mm	Q_{min3}			Q_{min3}
Vazios na mistura de agregados (VMA),mín.	EN 12697-8	EN12697-8 Calculada com base na baridade máxima teórica ^(b) –determinada segundo a EN 12697-5, procedimento A, em água e na baridade ^(c) determinada segundo a EN 12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	VM_{Amin14}	VM_{AminNR}	VM_{Amin14}	
Porosidade, V_m	EN 12697-8	EN12697-8 Calculada com base na baridade Máxima teórica ^(b) –determinada segundo a EN12697-5, procedimento A, em água e na baridade ^(c) determinada segundo EN 12697-6, procedimento B, provete Saturado com a superfície seca	%	$V_{min3,0-Vmax5}$	$V_{min22-Vmax30}$	$V_{min3,0-Vmax6}$	
Relação ponderal defiler /ligante	-	Estudo de formulação (item15.03.2)	%	Item14.03.0-3			
Índice de Resistência Conservada (IRC)em ensaios de compressão Marshall,mín.	MIL- STD-620A	Moldagem dos provetes: EN12697-30 75 pancadas ^(d)	%	80			
Resistência à Deformação Permanente ("Wheel-tracking")	EN 12697-22	Equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, temperatura do ensaio a 60°C	mm ³ /10 ³ ciclos de carga	Categoria a declarar	NA	Categoria a declarar	
			%				
% de ligante ,mín.	-	-	%	$B_{min4,0}^{(e)}$	$B_{min4,0}^{(f)}$	$B_{min5,0}^{(f)}$	$B_{min4,0}^{(e)}$
Sensibilidade à água, ITSR,mín	EN 12697-12	Moldagem dosprovetes:EN12697-30–75pancadas,temperatura doen	%	Categoria a declarar			
Permeabilidade <i>insitu</i>	EN 12697-40	-	s	NA	Categoria a declarar	NA	
Permeabilidade <i>insitu</i> (permeâmetroLCS)	NLT 327	-	s		10-30		
Perda de massa,PL	EN 12697-17	Moldagem dosprovetes:EN12697-30 75 pancadas, temperatura do ensaio:25	%		Categoria a declarar		
Ensaio Cântabro húmido ^(h) , máx	NLT36 ^{2(f)}	Moldagem dos provetes: EN12697-30 perda por desgaste: NPEN1097-2,temperatura do ensaio: 25°C	%		≤25		

Quadro 2.2-Requisitos das camadas de desgaste - continuação (E.P., 2009)

Camadas de misturas betuminosas a quente Camada de desgaste - Requisitos/Propriedades										
Camada de desgaste										
Requisitos /Propriedades	Ref. normativa	Condições específicas de ensaio	Uni	Tipo de mistura						
				AC14surf(BB) com incrustação De agregados duros ^(f)	MBA-BBA ^(k)	MBR-BBA ^(k)	MBA-BBM ^(l)	MBR-BBM ^(l)		
				rubrica1 4.03.2.4.5	rubrica1 4.03.2.4.6	rubrica1 4.03.2.4.7	rubrica1 4.03.2.4.8	rubrica1 4.03.2.4.9		
Característ. Marshall	EN 12697-34	Moldagem dos provetes: EN12697-30 75pancadas	kN	$S_{max}15^{(a)}$	NA					
			kN	$S_{min}7,5$						
			mm	F4						
			mm	F2						
			kN/mm	$Q_{min}3$						
Vazios na mistura de agregados (VMA), mín.	EN 12697-8	EN12697-8 Calculada com base na baridade máxima teórica ^(b) - determinada Segundo a EN12697-5, procedimento A, em água e na baridade ^(c) determinada segundo EN12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície seca	%	$VM_{min}14$	25	17	21	14		
Porosidade, Vm	EN 12697-8	EN12697-8 Calculada com base na baridade máxima teórica ^(b) - determinada segundo a EN12697-5, procedimento A, em água e na baridade ^(c) determinada segundo a EN12697-6, procedimento B, provete saturado com a superfície	%	$V_{min}3,0$ $V_{max}5$	12-18	3,5-6,5	12-18	3-6		
Relação ponderal defiler /ligante	-	Estudo de formulação (item 15.03.2)	%	Item14.03.0-3						
Índice de Resistência Conservada (IRC) em ensaios de compressão Marshall, mín.	MIL-STD-620A	Moldagem dos provetes: EN12697-30 75 pancadas ^(d)	%	80	75	80	75			
Resistência à Deformação Permanente ("Wheel-tracking")	Taxa de deformação, WTS_{AR}	EN 12697-22	Equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, temperatura do ensaio a	mm/10 ³ Ciclos de carga	Categoria a declarar	Betume base		Betume base		Categoria a declarar
						35/50	50/70	35/50	50/70	
						≤0,15	≤0,20	≤0,08	≤0,09	
	Profundidade e de rodeira máxima, PRD_{AR}					Betume base		Betume base		
		35/50	50/70	35/50	50/70					
		≤9,0	≤10,0	≤6,0	≤7,0					
% de ligante, mín.	-	-	%	$B_{min}4,0^{(e)}$	9-10 ^(f)	8-9 ^(f)	5 ^(f)	4 ^(f)		
Sensibilidade à água, ITSR, mín	EN 12697-12	Moldagem dos provetes: EN12697-30-75 pancadas, temperature do ensaio: 15°C ^(g)	%	Categoria a declarar	75	65	Categoria a declarar			
Permeabilidade <i>in situ</i>	EN 12697-40	-	s	NA						
Permeabilidade <i>in situ</i> (permeâmetro LCS)	NLT 327	-	s							
Perda de massa, PL	EN 12697-17	Moldagem dos provetes: EN12697-30 75pancadas, temperatura	%	NA	≤10	NA	Categoria a declarar			
Ensaio Cântabro húmido ^(h) , máx	NLT36 2 ⁽ⁱ⁾	Moldagem dos provetes: EN 12697-30 Perda por desgaste: NPEN1097-2, temperature do ensaio: 25°C	%		10		20	NA		

Quadro 2.3- Requisitos das camadas de desgaste – continuação (E.P., 2009)

NA – Não aplicável

(a) – Para granitoides e agregados provenientes de rochas com predominância de sílica na sua composição a estabilidade máxima deverá ser 21kN.

(b) - Calculada para a percentagem ótima de ligante da mistura em estudo.

(c) – Para a moldagem dos provetes é utilizado o compactador de impacto com 75 pancadas- a única exceção refere-se à moldagem dos provetes das misturas PA12,5(BBd) e AC10surf(mBBr) e misturas abertas com borracha, onde se aplicarão apenas 50 pancadas-, de acordo com a norma EN12697-30, à temperatura de compactação o para a qual, a viscosidade do ligante a empregar na mistura, se situe entre 280±30cSt. A baridade deverá ser determinada segundo o procedimento D- baridade geométrica, para as misturas PA12,5(BBd) e misturas betuminosas abertas com betume modificado com borracha.

No caso das misturas betuminosas com betumes modificados com borracha são moldados provetes como compactador de impacto, a uma temperatura de compactação compreendida entre 140 °C e 150°C.

(d) – Para a moldagem dos provetes é utilizado o compactador de impacto com 75pancadas- as exceções referem-se à moldagem dos provetes das misturas

PA12,5(BBd), AC10surf(mBBr) e misturas betuminosas abertas com betume modificado com alta percentagem de borracha, onde se aplicarão apenas 5 0 pancadas-de acordo com a normaEN12697-30-à temperatura de compactação para a qual, a viscosidade do ligante a empregar na mistura, se situe entre 280±30cSt.

No caso das misturas betuminosas com betumes modificados com alta percentagem de borracha, são moldados provetes com o compactador de impacto, a uma temperatura de compactação compreendida entre 140°C e 150°C.

(e) – Este valor corresponde à menor percentagem de betume a utilizar no fabrico da mistura betuminosa- a considerar para ponto de partida do ensaio

Marshall- a partir da qual serão fabricadas mais 4 misturas betuminosas, com cinco percentagens de betume, com incrementos sucessivos de 0,5%de betume.

(f) –Este valor corresponde à percentagem mínima a utilizar no trecho experimental que servirá de base à formulação da mistura (ver item15.03.2 na mistura

correspondente).

(g) –No caso das misturas PA12,5(BBd), AC10surf(mBBr) e misturas betuminosas abertas com betume modificado borracha, para efetuar o ensaio da sensibilidade à água, aplicam-se apenas 50pancadas.

(h) –Para a realização destes ensaios são moldados provetes com o compactador de impacto, a uma temperatura de compactação compreendida entre 140°C

e 150°C, utilizando para o efeito1050g de mistura betuminosa.

(i) –Este ensaio consiste numa adaptação das condições de ensaio da norma NLT362, no que respeita à utilização das novas normas de compactação, por impacto e de desgaste de Los Angeles. A perda por desgaste no ensaio Cântabro com imersão em água, não deverá ser superior a 25%. São compactados 8 provetes (com 101,6mm de diâmetro e 63,5mm de altura), utilizando o compactador de impacto (EN12697-30), a uma temperatura de compactação para a qual a viscosidade do betume a empregar na mistura, se situe entre 280°C±30cSt (gama de temperatura de compactação indicada na ficha de produto do betume), com a energia de compactação de 50 pancadas em cada face, determinando-se as respetivas baridades.

As baridades dos dois grupos de 4 provetes cada, devem ser similares entre eles, devendo proceder-se à sua extração após um mínimo de 2 horas de espera. Metade dos provetes são colocados em estufa a 25 °C, durante 24 horas. Os restantes provetes são submersos, durante 24 horas, num banho de água a 60°C. Seguidamente retiram-se estes últimos e colocam-se em estufa a 25° C, durante 24 horas, com ventilação forçada. Finalmente todos os provetes são submetidos ao ensaio de desgaste na máquina de Los Angeles (300volts, masse mesferas).

Para cada provete é determinada a perda por desgaste expressa em percentagem da massa inicial, determinando-se o valor médio para os provetes conservados ao ar (PA) e para os provetes submersos em água (PS).

Finalmente o resultado expresso em % é dado por $(PS/PA) \cdot 100$, sendo arredondado a 1%.

(j) –Os agregados devem ser pré-envolvidos em ligante betuminoso garantindo uma percentagem de betume residual compreendida entre 1,5e2,5%. A taxa média de aplicação dos agregados pré-envolvidos deve estar compreendida entre 9 a 12kg/m².

Caso seja necessário, pode ser adicionado filer de modo a garantir que os agregados sejam envolvidos com a percentagem de ligante definida.

(k) -Percentagem ponderal de borracha relativa à massa total do ligante modificado com borracha: 18-22%.

No caso das misturas betuminosas com betumes modificados com borracha, são moldados provetes com o compactador de impacto, a uma temperatura de compactação compreendida entre 140 °C e 150°C.

(l) -Percentagem ponderal de borracha relativa à massa total do ligante modificado com borracha: 8-15%.

No entanto, o referido caderno de encargos não apresenta requisitos específicos para MBT aplicadas em camadas de desgaste. Habitualmente, têm sido utilizados os requisitos aceites para a composição de misturas a quente.

A maior parte dos processos dos estudos envolvendo MBT têm utilizado processos de formulação semelhantes aos das misturas a quente, devendo assinalar-se a prevalência da aplicação do método de Marshall na Europa. No entanto, têm sido identificadas particularidades nos processos de formulação de MBT. Por exemplo, nas tecnologias que incorporam aditivos deve decidir-se as temperaturas de fabrico e compactação com base na viscosidade do betume, no caso dos aditivos que alteram aquela propriedade do ligante, ou a partir da evolução do volume de vazios no processo de compactação, quando os aditivos não alteram a viscosidade do betume (Capitão et al., 2012).

2.3 Tecnologias de Produção

As misturas temperadas produzem-se entre 100 e 140°C, como se encontra ilustrado na Figura 2.1, isto é, consegue-se uma redução de cerca de 30°C em relação à temperatura necessária para produzir misturas betuminosas a quente. Esta diminuição da temperatura de fabrico e aplicação está na origem das diversas vantagens associadas às misturas betuminosas temperadas (Hurley e Prowell, 2008).

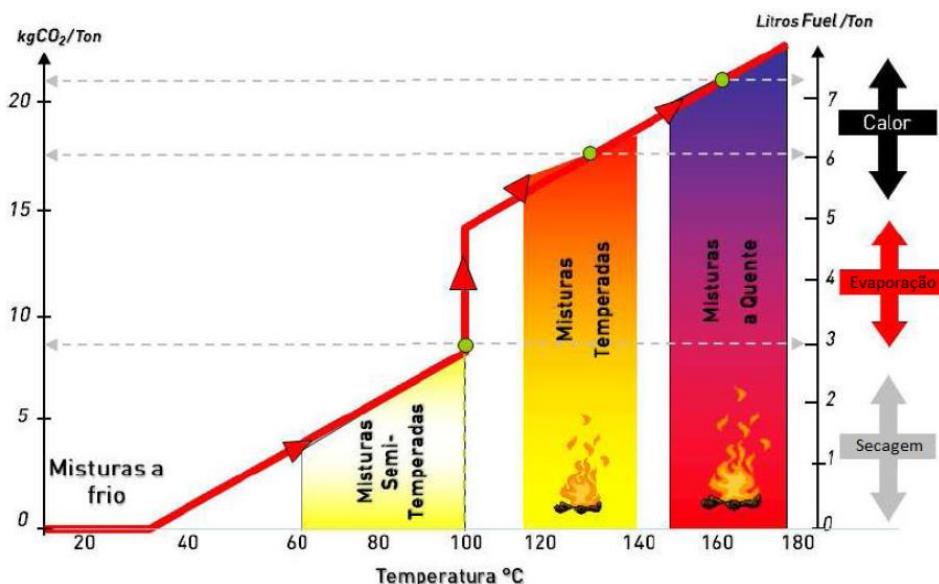


Figura 2-1-Classificação do tipo de mistura betuminosa tendo em conta a sua temperatura de produção (Silva et al., 2010)

As MBT podem ser produzidas de diversas formas. Normalmente, as MBT são produzidas alterando de forma permanente ou temporária algumas propriedades do betume. Algumas das técnicas melhoram a adesividade entre o ligante e as partículas de agregado, através de aditivos químicos, o que permite um melhor envolvimento dos agregados pelo betume, o que permite uma redução da temperatura de mistura e compactação. As técnicas que incorporam água melhoram temporariamente a trabalhabilidade da mistura betuminosa devido há formação de vapor de água, o que contribui também para a formação de espuma de betume. Assim sendo, as técnicas utilizadas para baixar a temperatura de fabrico e aplicação podem ser divididas em função do princípio utilizado para baixar a temperatura: aditivos químicos, orgânicos e tecnologias de espuma de betume. As técnicas que utilizam aditivos são normalmente mais simples de aplicar, pois as centrais de fabrico não precisam de ser alteradas (Capitão et al., 2013).

Nas misturas betuminosas temperadas os ligantes não endurecerem tanto devido à utilização de temperaturas mais baixas na produção, sem comprometer muito a resistência à deformação permanente.

As MBT também podem ser produzidas com produtos químicos, por exemplo agentes tensoativos, concebidos para promover o envolvimento dos agregados, a aderência do betume e a trabalhabilidade. Além disso, podem utilizar-se aditivos orgânicos, geralmente ceras, para reduzir a temperatura de fabrico. O principal objetivo das tecnologias e aditivos é reduzir as

temperaturas de fabrico, mantendo a manipulação da mistura de forma a que se garantam bons resultados no seu desempenho em serviço.

Na Figura 2.2 apresenta-se a gama de temperaturas de fabrico em função do processo de fabrico usados (EAPA, 2010; D'Angelo et al, 2008; Vaitkus et al, 2009; Prowell, 2007).

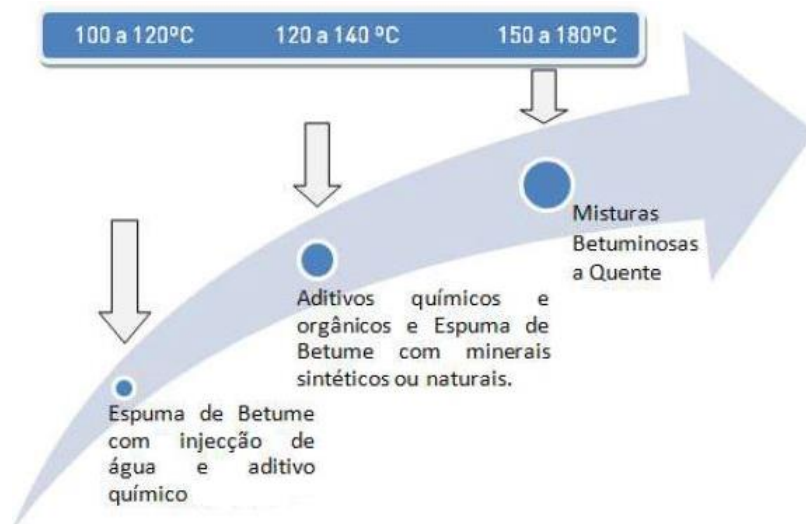


Figura 2-2- Relação entre o processo a utilizar com a temperatura de fabrico. (Ferreira, 2009)

2.3.1 Aditivos orgânicos

Estes aditivos são ceras que são adicionados ao betume (formando o betume aditivado) ou às misturas betuminosas durante o processo de fabrico, reduza a viscosidade do betume. Como o betume se encontra a temperaturas elevadas, a viscosidade mantém-se baixa durante o processo de mistura e durante a compactação. Quando a temperatura do pavimento atinge a temperatura ambiente, as ceras cristalizam aumentando a rigidez e a resistência à deformação do pavimento. O aditivo orgânico a utilizar tem ser escolhido de forma a que o seu ponto de amolecimento seja superior às temperaturas espectáveis para o pavimento em serviço, reduzindo, assim, o risco de ocorrerem deformações permanentes e a possibilidade de ocorrerem fendilhamentos associados a baixas temperaturas (Prowell e Hurley, 2008). O aspeto dos aditivos orgânicos encontra-se exemplificado na Figura 2.3 que se encontra abaixo.

A utilização de aditivos orgânicos permite reduções de temperatura de cerca de 20 a 30°C. (EAPA, 2010).



Figura 2-3- Aditivo orgânico comercializado com a marca Sasobit (retirado de www.skn.pl)

A mistura destes aditivos em central pode ser conseguida introduzindo o aditivo no misturador, sem alteração no procedimento de produção, ou previamente misturado com o betume, no tanque da central.

2.3.2 Aditivos químicos

Os aditivos químicos não têm como principal objetivo a alteração da viscosidade do betume, mas sim permitir um melhor envolvimento dos agregados pelo betume, como é apresentado na Figura 2.4. Os aditivos químicos são introduzidos no ligante na fase de fabrico da mistura, após os agregados terem sido aquecidos (Alves, 2012).

Os aditivos químicos têm a capacidade de reduzir a temperatura de produção e de compactação entre 20 e 30°C. (EAPA, 2010). O aspeto dos aditivos químicos pode ser observado na Figura 2.5.

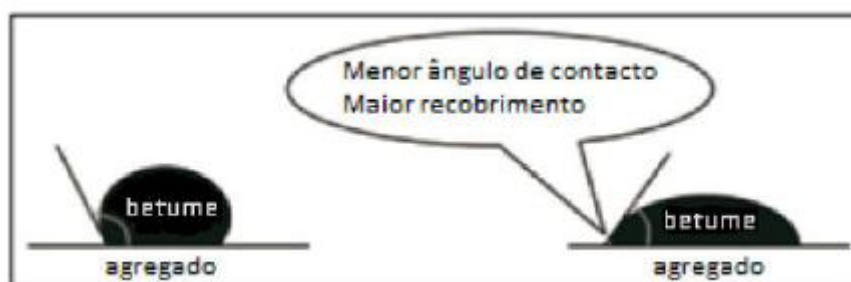


Figura 2-4-Melhoria do ângulo de contacto devido a incorporação de aditivo químico (Alves, 2012)



Figura 2-5- Aditivo químico comercializado sob a marca Rediset® WMX (retirado de www.promdorresurs.com)

É recomendado que a taxa de aplicação deste tipo de aditivo varie entre 1,5 e 2,5 % em massa de betume, não alterando significativamente as propriedades de consistência do betume da mistura à qual é adicionado (Prowell e Hurley, 2008).

Nas centrais de produção de misturas betuminosas quando se usam aditivos químicos, a sua introdução pode ser feita diretamente no tanque do betume ou na mistura imediatamente após a colocação do ligante, como se pode observar na Figura 2.6. No entanto, quando se coloca na mistura é necessário modificar o sistema de introdução do ligante, para que este possa ser introduzido ao mesmo tempo que o aditivo.

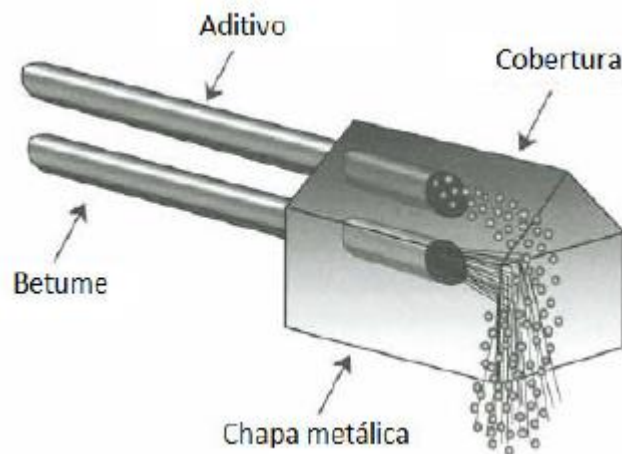


Figura 2-6-Equipamento para a junção simultânea do aditivo e do betume (Prowell e Hurley, 2008)

Segundo vários autores (Hurley e Prowell, 2008; Chowdhury e Button, 2008), esta tecnologia não exige alterações na formulação das misturas betuminosas (exceto para as suas temperaturas de fabrico e compactação), nem no processo de mistura em central.

2.3.3 Processo de produção de espuma de betume

A espuma de betume resulta da junção de água ao betume, de modo a que este expanda, aumentando assim o seu volume. Este tipo de técnicas, embora resulte em grandes reduções de gastos energéticos, na ordem dos 20 a 40%, tende a dar origem a misturas com características gerais mais fracas que as misturas a quente de composição semelhante (Olard e Romier, 2011).

Durante a de expansão, o betume adquire temporariamente uma viscosidade baixa, o que permite a mistura com os agregados a temperaturas mais baixas. Quando a mistura arrefece o volume do betume diminui, o que faz com que o betume retome as suas características iniciais. A quantidade de água a adicionar deve ser escolhida cuidadosamente uma vez que, em excesso, a água gera fenómenos de desrevestimento das partículas de agregado. É aconselhável a utilização de aditivos anti-desrevestimento e de aditivos que promovam a adesividade, diminuindo, assim, a suscetibilidade da mistura à humidade (Zaumanis, 2010).

Existem várias técnicas de produção de espuma de betume sendo possível diferenciá-las em duas categorias:

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

Espuma de betume por injeção de água natural

A espuma de betume é produzida através da introdução de pequenas quantidades de água (cerca de 2% sobre a massa do betume) em betume quente numa câmara de expansão. A água evapora e cria bolhas de filme de betume preenchidas com vapor de água, formando-se a espuma de betume. Na Figura 2.7 abaixo é apresentado este processo de produção. No estado espumado, a viscosidade do betume é menor, o que permite o recobrimento dos agregados a menores temperaturas (Croteau e Tessier, 2008).

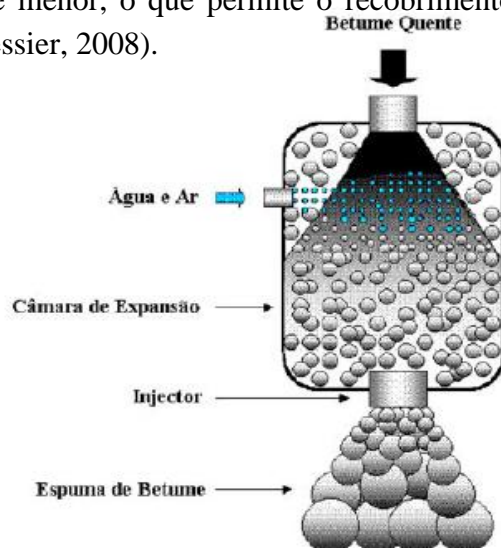


Figura 2-7-Illustração esquemática de produção de espuma de betume por injeção de água (Adaptado de Jenkins, 2000)

Double Barrel[®] com opção Green

Esta tecnologia consiste na utilização de um dispositivo incorporado no sistema Double Barrel[®] que é um tambor secador e misturador, o qual produz misturas betuminosas temperadas, como é possível observar na Figura 2.8. Esta tecnologia permite reduções na produção de 10 a 30°C. No processo é adicionada na mistura uma pequena quantidade de água através de um dispositivo capaz de espumar o betume (Fitts, 2008).



Figura 2-8-Double Barrel com opção Green (ASTEC, 2015)

O dispositivo faz o betume espumar (injeção de água e câmara de expansão para a formação de espuma), sendo a espuma de betume controlada no visor de um computador. Normalmente, não é necessário fazer alterações na composição que resultou da formulação da mistura (Hurley e Prowell, 2008).

WMA-Foam[®] (Warm Mix Asphalt Foam)

Este processo de produção de misturas betuminosas temperadas consiste na adição em duas fases de dois tipos de ligantes distintos na mistura, um mole e outro duro previamente espumado, como é apresentado no seguinte esquema da Figura 2.9.

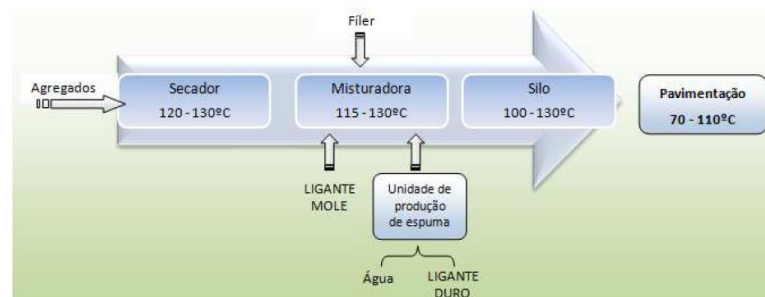


Figura 2-9-O processo de formação de WMA-Foam[®] (Adaptado de Ferreira, 2009)

A seleção do ligante a utilizar é feita de forma a que o betume resultante tenha a penetração pretendida. O betume mole (20 a 30% do betume total) é misturado com os agregados na

primeira fase a temperaturas entre 100 e 120°C, o que permite o perfeito envolvimento dos agregados. Na segunda fase, o ligante duro espumado é injetado na mistura anterior. Este processo diminui a viscosidade da mistura, permitindo que esta esteja trabalhável e possa ser aplicada entre 120 e 130°C (Chowdhury e Button, 2008).

Em centrais de produção descontínuas, 1 a 5% de água é adicionada numa câmara de expansão com o betume duro, ocorrendo a formação de espuma para promover o envolvimento dos agregados (Kristjansdottir, 2006).

O critério chave para o sucesso desta tecnologia de fabrico de MBT está na correta seleção dos betumes a usar (mole e duro). Recomenda-se também que seja aplicado um promotor da afinidade betume-agregado na primeira fase da mistura. Um aspeto a ter muito em conta neste processo é evitar que a água se infiltre na interface ligante/agregado. Para esta técnica, a Shell apresentou reduções de 30% de combustível, o que representa uma redução também de 30% nas emissões de gases para a atmosfera. Estas medições foram feitas por empresas independentes que confirmam estes resultados (Larsen et al, 2004).

LEA - Low Energy Asphalt

O processo de produção de misturas temperadas pelo método LEA, consiste na secagem parcial do esqueleto granular do agregado e na formação de espuma de betume, de forma a que este expanda e ocorra um melhor envolvimento dos agregados. A temperatura resultante da mistura é de cerca de 95°C. A adição de água permite que a mistura tenha uma boa trabalhabilidade mesmo a temperaturas baixas. O betume a ser utilizado neste tipo de misturas tem incorporado em si aditivos que facilitam a formação de espuma, uma boa adesão entre betume e os agregados, assim como a trabalhabilidade na mistura. (Orland e Noan, 2008).

Na Figura 2.10 são apresentadas as várias etapas do processo de produção de misturas temperadas por LEA.

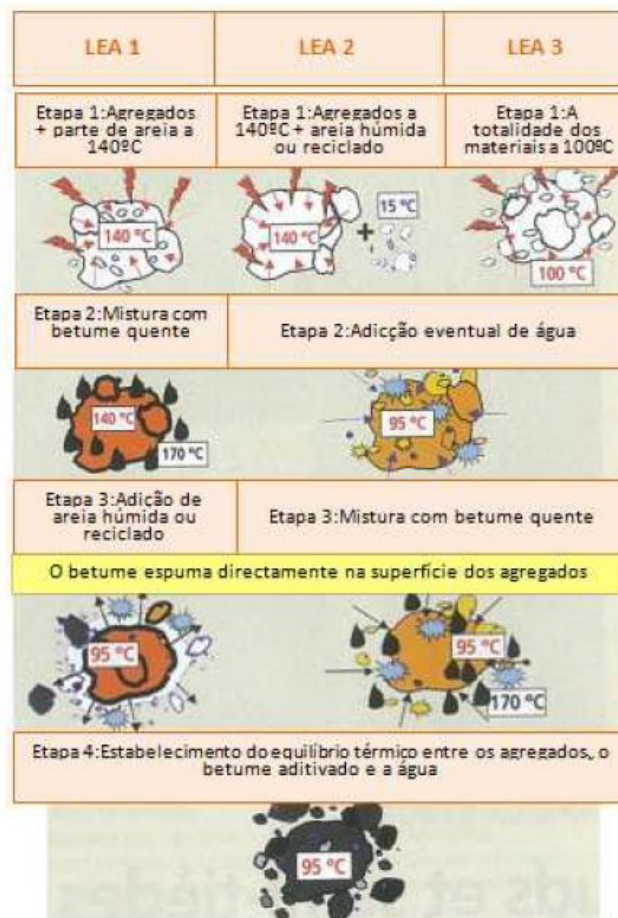


Figura 2-10-Processo de produção das LEA (adaptado de FHWA, 2008)

A vantagem desta tecnologia é a sua grande versatilidade para se adaptar as diferentes tipos de centrais, de forma a que se possam incorporar diferentes tipos de materiais e incorporar os materiais da mistura de forma alternada, como se mostra na seguinte Figura 2.11. A possibilidade de secagem parcial permite uma grande redução na energia necessária para remover a água.

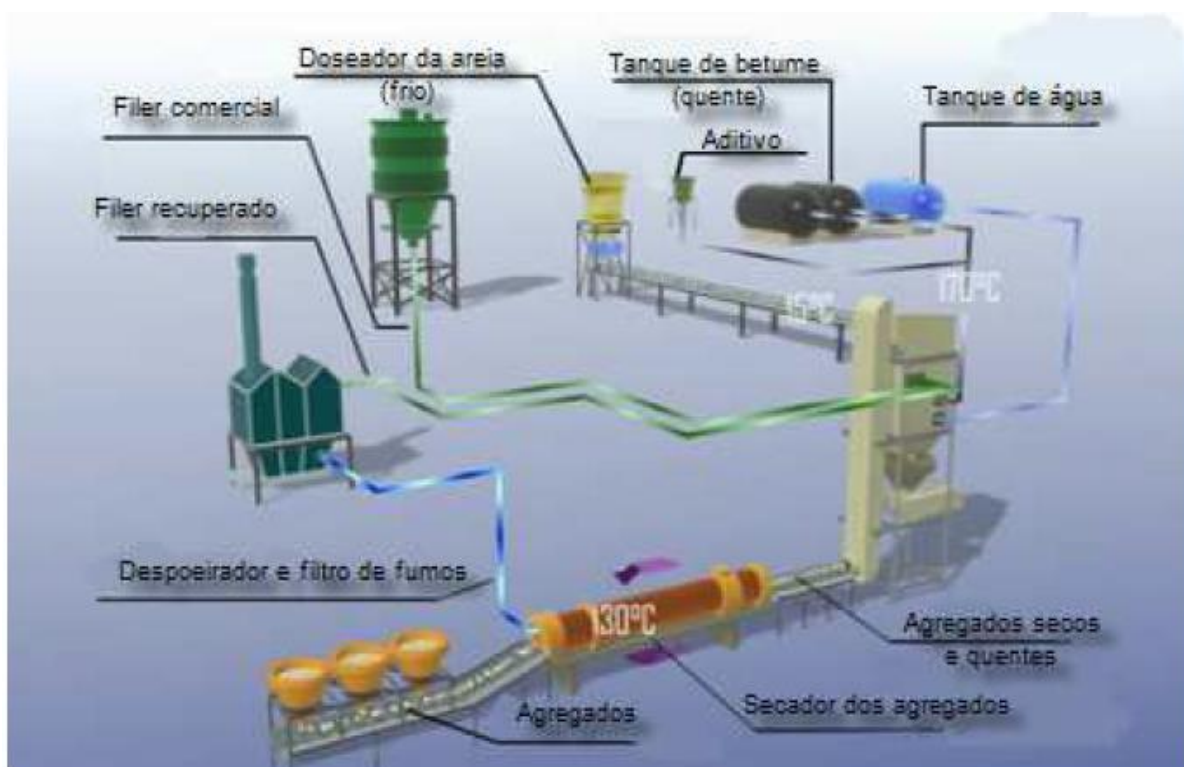


Figura 2-11-Central de misturas betuminosas LEA2 (Ferreira, 2009)

Espuma de betume com minerais sintéticos ou naturais (zeólitos)

Na tecnologia de produção de espuma de betume com minerais sintéticos ou naturais, introduzem-se na mistura cristais de alumino-silicatos-hidratados que incorporam cerca de 20% de água. Em contacto com o betume quente, a água aquece e atinge a temperatura de ebulição (100°C), formando-se vapor que em contacto com o ligante gera espuma de betume (EAPA, 2010). O aspeto dos minerais é apresentado na Figura 2.12.



Figura 2-12-Exemplos de cristais de alumino-silicatos-hidratados (retirada de www.adverawma.com)

Nesta tecnologia em que se adicionam pequenas quantidades de água, libertam-se vapores em menores quantidades, em comparação com as tecnologias de injeção de água. Por conseguinte,

a expansão do betume nesta tecnologia é menor do que a obtida na tecnologia de injeção (Capitão et al, 2012).

As reduções de temperatura atingidas nas várias tecnologias de produção de espuma variam entre si. Na maioria das tecnologias de injeção conseguem-se reduções de temperatura a rondar os 20 a 30°C face à temperatura de produção das misturas a quente. Por sua vez, tecnologias com incorporação de zeólitos atingem reduções de 30°C (EAPA, 2010; Hurley e Prowell, 2005).

Na central de produção, se esta for contínua, deve ser utilizado um sistema automático de válvulas pneumáticas, como se apresenta na Figura 2.13.

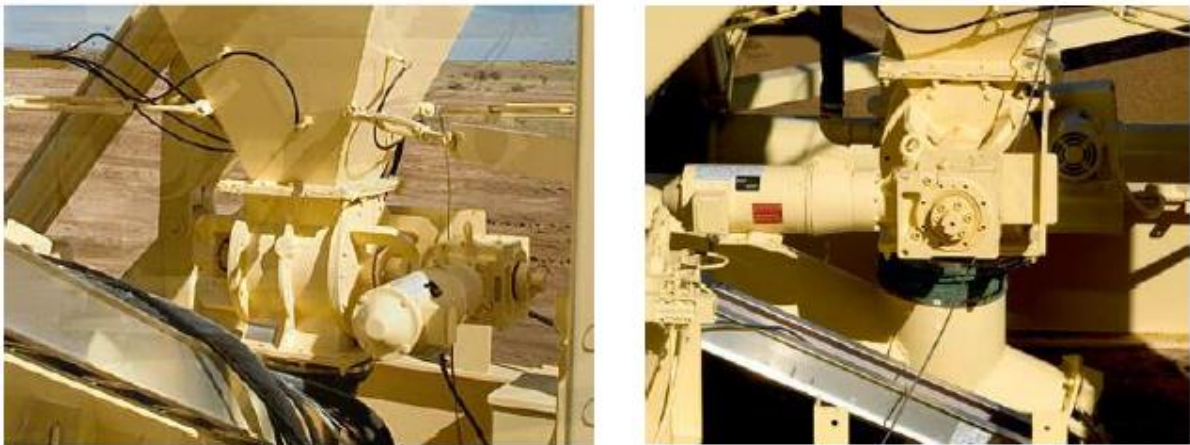


Figura 2-13-Sistema de válvulas para adição de zeólitos (Ferreira, 2009)

Se a central de produção for descontínua, os zeólitos podem ser introduzidos diretamente no misturador ou usando uma célula de pesagem automática.

Os zeólitos devem ser adicionados a cerca de 130°C, a temperatura média a que se produz a mistura. Assim forma-se a espuma de betume pelo aumento de volume devido á água incorporada que se liberta na forma de vapor.

2.4 Vantagens

A diminuição das temperaturas de produção e aplicação de misturas betuminosas proporcionam benefícios sociais, económicos e ambientais (Nynas, 2009).

O facto das MBT serem produzidas a temperaturas inferiores, leva a menores custos de produção por consumirem menos combustíveis (podem chegar a 35%, dependendo da temperatura de produção e do processo envolvido na mesma (Prowell e Hurley, 2008)), assim como a uma menor emissão de gases nocivos para a atmosfera (Figura 2.14), redução da exposição dos trabalhadores a esses gases, melhoria das condições e das técnicas de aplicação. As reduções que é possível atingir na emissão de gases são as seguintes (Prowell, 2007): 60 a 70% de óxidos nitrosos, 50% de Compostos Orgânicos voláteis, 30 a 40% de dióxido de carbono, 35% de dióxido de enxofre, 20 a 25% de pó e 10 a 30% de monóxido de carbono.

As misturas temperadas libertam menos gases durante a sua fase de produção, o que possibilita



Figura 2-14-Diferença na libertação de gases entre uma mistura MBQ (esquerda) e uma MBT (direita). (Ferreira et al., 2009)

a localização das centrais betuminosas mais perto dos centros urbanos (Capitão et al, 2012). Além disso, sendo a temperatura de produção menor, pode aplicar-se MBT em camadas e reparações pouco espessas e com boa qualidade, devido ao facto de a sua taxa de arrefecimento ser menor e, por isso, o seu arrefecimento ser mais lento. (Budny, 2012)

As MBT têm uma trabalhabilidade adequada durante a aplicação e compactação a temperaturas mais baixas que as misturas tradicionais. Isso possibilita o seu transporte a longas distâncias e em condições atmosféricas menos favoráveis, alargando assim a época favorável para pavimentação e tornando viável a utilização em países frios. A temperatura das MBT é superior à do ar mas a diferença é menor que no caso das MBQ, resultando numa taxa de arrefecimento menor para as primeiras, o que permite garantir a sua trabalhabilidade por períodos mais longos (Prowell e Hurley, 2008; Newcomb, 2007; Capitão et al, 2012).

No entanto, como as MBT são aplicadas a menores temperaturas, permitem que se atinjam mais depressa as condições para a abertura ao tráfego, o que se traduz num menor incómodo para os utentes (Capitão et al, 2012).

Quando se produz uma mistura betuminosa ocorre algum envelhecimento do betume devido ao facto de o ligante oxidar com a exposição a temperaturas elevadas. Utilizando-se nas MBT temperatura de produção menores aquele fenómeno vai ser minorado, o que se traduz num aumento da resistência do pavimento ao fendilhamento a longo prazo (Newcomb, 2007).

As MBT apresentam um melhor comportamento em serviço em relação às misturas betuminosas a frio, visto que as MBT garantem um bom envolvimento com os agregados pelo ligante (Capitão et al, 2012).

Quando incorporam misturas betuminosas recuperadas (MBR), as misturas betuminosas temperadas permitem uma maior utilização de MBR. Uma vez que a temperatura de manipulação do material é mais baixa, o envelhecimento do betume não é tão forte. Além disso, a incorporação de MBR diminui os impactes ambientais provocados pela extração de materiais virgens nas pedreiras e a criação de vazadouros onde se depositam estes materiais, o que se traduz numa redução de custos e uma alternativa mais ecológica (Olard e Romier, 2011; Prowell e Hurley, 2008; Ferreira, 2009; Ruhl e Liendemeier, 2006).

2.5 Desvantagens

A utilização de MBT é relativamente recente pelo que as aplicações e experiências realizadas neste tipo de mistura, embora já sejam bastantes, não dão resposta a todas as dúvidas relativamente ao seu comportamento a longo prazo. Mesmo assim, a literatura refere um conjunto de desvantagens já identificadas e que se sintetizam a seguir.

Alguns processos de produção das MBT exigem a aquisição de novos equipamentos para acoplar nas centrais, enquanto outros têm um custo adicional decorrente dos aditivos utilizados. Ambas as razões representam custos adicionais para a produção de MBT. Assim, é importante realizar uma análise de custos em casos concretos de aplicação, de modo a verificar que as poupanças geradas são superiores aos custos adicionais (Zaumanis, 2010; Button et al, 2007).

A incorporação de aditivos nas MBT gera emissões adicionais, o que reduz o efeito benéfico geral de diminuição de emissões associado às MBT (Zaumanis, 2010).

Vários dos processos de produção de MBT envolvem o uso de água. Caso a água não evapore durante a fase de mistura, durante a aplicação podem surgir problemas de falta de envolvimento dos agregados pelo ligante. Posteriormente, podem ocorrer problemas de sensibilidade à água devido à presença de água residual. Mesmo quando se utilizam aditivos tenso ativos para melhorar a adesividade ligante-agregado, a humidade causada pela água pode acarretar problemas (Zaumanis, 2010).

2.6 Propriedades Mecânicas das MBT

Para que as MBT sejam aceites no meio técnico é essencial que o seu desempenho seja semelhante ao das MBQ. Se as misturas temperadas não tiverem um desempenho tão bom como as misturas a quente ao longo do seu ciclo de vida, a longo prazo poderão não existir benefícios ambientais ou económicos, pois o pavimento terá de ser reparado ou substituído.

A literatura refere a utilização de diversos tipos de misturas betuminosas temperadas, como por exemplo, o Stone Masticue Asphalt (SMA), o betão betuminoso com betume modificado com granulado de borracha (CRM), entre outros tipos. Como resultado destes diversos tipos de misturas, as propriedades mecânicas das MBT podem variar numa ampla gama, dependendo da técnica utilizada na produção da mistura betuminosa específica, bem como do tipo de material utilizado na fase de fabricado.

Tal como no caso das MBQ, a sensibilidade à água, o módulo de rigidez, e a resistência à deformação permanente variam com o tipo de mistura, bem como com alguns dos parâmetros da sua composição. Obviamente, as condições de ensaio, tais como temperatura e o nível de carga utilizados, também têm uma influência significativa no desempenho observado. Portanto, o que é importante salientar é a tendência geral de desempenho mecânico, em comparação com MBQ semelhantes. Nos pontos seguintes apresenta-se um resumo sobre as principais propriedades mecânicas normalmente avaliadas em MBT e compara-se o desempenho mecânico observado com o de misturas de controlo usadas como referência. A exposição que se apresenta segue de perto a efetuada por Capitão et al. (2012).

2.6.1 Sensibilidade à água

Algumas misturas betuminosas sofrem uma redução substancial da resistência ao longo dos anos, na presença de água. Este fenómeno é conhecido como sensibilidade à água. A perda de desempenho mecânico é devido à falha da interface ligante-agregado. Em geral, o material degrada-se porque acontece falta de afinidade eletroquímica entre o ligante e a superfície do agregado.

No caso de MBT, uma vez que os agregados não são completamente secos antes da adição de betume, a água não removida no processo de construção pode também aumentar a suscetibilidade da perda de resistência por presença de água na mistura. Por isso, usam-se aditivos, tais como os agentes tensioativos, os quais atuam como uma ponte entre o ligante betuminoso e a superfície do agregado, promovendo a adesão e a resistência à ação da água. Isto é geralmente alcançado porque as moléculas de aditivo têm extremidades polarizadas que atraem outro material com carga de sinal contrário, o que lhes permite ligar-se à superfície do agregado e ser compatíveis com o ligante betuminoso, promovendo a adesão. Os tensioativos contribuem para que o ligante consiga revestir quantidades consideráveis de agregados finos, uma vez que reduzem a tensão superficial na interface ligante-agregado. Embora os dados de desempenho indiquem que as MBT e as MBQ, semelhantes em termos de composição, têm

desempenhos semelhantes, o desempenho e as condições de serviço no campo devem ser acompanhadas ao longo da vida do pavimento. Isto deve ser feito porque podem ocorrer danos causados pela presença de água como consequência de aparecimento de fendas no pavimento.

A sensibilidade à água de MBT é geralmente avaliada pelos procedimentos descritos na norma EN 12697-12, em ensaios de tração indireta, utilizando-se o parâmetro ITSR, o qual é a relação entre a resistência à tração medida em amostras compactadas, divididas em dois grupos. Um deles é formado por amostras submetidas a um procedimento de condicionamento em água, sendo o outro grupo formado por amostras secas.

Nas MBT, a resistência à tração geralmente aumenta à medida que a temperatura de compactação aumenta. O mesmo acontece quando o condicionamento da temperatura das misturas no laboratório antes da compactação é realizada durante pelo menos 2 h (envelhecimento de curto prazo), permitindo uma absorção mais elevada e envelhecimento do betume. Além disso, tem-se observado um aumento de ITSR acima de 50% em MBT em comparação com as MBQ quando as primeiras incorporam aditivos promotores de adesividade. Ao contrário, quando esse tipo de aditivo não foi incluído, o parâmetro ITSR geralmente não melhorou e a maioria das MBT teve piores resultados que as MBQ usadas para comparação.

As MBT mostram tipicamente menor resistência à tração do que as correspondente MBQ avaliadas como referência. Assim, recomenda-se a observação periódica da resistência das MBT à ação da água, bem como a utilização de promotores de adesividade quando necessário, podendo recomendar-se, em alternativa ou complementarmente, o aumento ligeiro da temperatura de produção.

2.6.2 Módulo de resiliência

Geralmente, o módulo de rigidez (relação tensão/deformação) das MBT, o qual pode ser avaliado de acordo com EN 12697-26, diminui à medida que a temperatura de fabrico diminui, embora a variação não seja proporcional. Tipicamente, o módulo de rigidez diminui à medida que aumenta a temperatura de ensaio, para a mesma frequência, e aumenta à medida que a frequência de carregamento aumenta, para a mesma temperatura. O módulo de rigidez aumenta com o aumento das temperaturas de mistura e compactação, dado que para maiores temperaturas de mistura permite-se um melhor envolvimento dos agregados pelo betume, estabelecendo-se uma melhor ligação betume-agregado.

Ao longo dos anos tem sido estudada a influencia de diferentes aditivos em MBT, tendo-se verificado que para misturas produzidas entre 140 e 160°C a introdução de aditivos leva em geral a um menor módulo de rigidez (obtido a 20 °C) nas MBT que nas MBQ de referência. O oposto tem ocorrido quando a temperatura de produção é de 120°C. Estes resultados têm demonstrado que baixando as temperaturas de fabrico para 120°C, o módulo de rigidez (obtido

a 20°C) diminuiu cerca de 50% para MBQ e num intervalo de 10 a 50% para MBT, dependendo do aditivo usado.

Os estudos têm demonstrado que a utilização de ceras orgânicas na produção de MBT tende a aumentar a rigidez (obtida a 20°C) das misturas para temperaturas de compactação entre 100 e 140 °C. Isso ocorre devido à cristalização da cera, levando a que a rigidez das MBT tenha valores similares aos das MBQ, apesar das primeiras serem produzidas e compactadas a temperaturas mais baixas que as MBQ.

Alguns resultados demonstraram que baixando as temperaturas de fabrico das MBT originou uma redução significativa no módulo de rigidez obtida a temperaturas elevadas (45°C), enquanto que o efeito foi insignificante para temperaturas de ensaio da ordem de 4°C. Alguns ensaios realizados em MBT produzidas com betumes modificados com polímeros (umas com elastómeros e outras com plastómeros), permitiram concluir que o módulo de rigidez de uma MBT sem betume modificado, medido a 25 C e 10 Hz, sofreu uma redução significativa em vários casos (40-60%), enquanto que as composições de mistura semelhantes incorporando betume modificado com polímero mostraram apenas ligeiras variações para as mesmas condições de ensaio. Isso permitiu mostrar que os elastómeros ou os plastómeros podem ser úteis para melhorar o desempenho de MBT, caso seja necessário.

2.6.3 Fadiga

Os ensaios de fadiga podem ser realizados de acordo com a EN 12697-24. Este tipo de ensaio induz um dano contínuo no provete até à sua ruína, a qual ocorre devido a uma redução gradual do módulo de rigidez inicial do material. Admite-se geralmente que a rotura ocorre quando a redução é de 50%, embora existam abordagens alternativas. As MBT tendem geralmente a sofrer mais dano de fadiga que as MBQ para níveis de tensão mais baixos. Contudo, aparentemente, as MBT são menos sensíveis ao aumento do nível de tensão de tração. Portanto, o uso de MBT pode ser vantajoso em pavimentos com elevado tráfego de pesados.

Além disso, a incorporação de Sasobit tende a beneficiar o desempenho à fadiga da mistura, enquanto o *Asphamin* reduz um pouco a vida de fadiga. No entanto, os estudos referidos Capitão et al. (2012) concluíram que a influência dos aditivos em MBT não é estatisticamente significativo sobre o desempenho à fadiga.

2.6.4 Resistência à deformação permanente

A avaliação do desempenho à deformação permanente é crucial em climas quentes. Pode ser avaliada no laboratório através de vários métodos de ensaio, os quais utilizam uma variedade de parâmetros para classificar misturas. As MBT produzidas com aditivos de cera, como o Sasobit, permitem mudar as propriedades do ligante para maiores temperaturas de serviço, permitindo uma resistência melhorada. Contudo, as MBT geralmente mostram um pior desempenho que as MBQ, particularmente quando as tecnologias de fabrico de MBT são de espuma de betume.

Verifica-se que a resistência da MBT à deformação permanente diminui à medida que a temperatura de produção diminui, apesar desta diminuição de resistência não apresentar uma evolução proporcional no comportamento. Os fatores que afetam a sua capacidade de resistência a deformação permanente são a quantidade de aditivo e o tipo de tecnologia utilizada para a produção da MBT. Tendo em conta este aspeto, algumas agências estatais americanas seguem um procedimento específico para determinar uma temperatura mínima para a produção da mistura betuminosa, visando evitar possíveis problemas de deformação permanente.

2.7 Considerações Finais

Após análise da literatura, é possível verificar um progresso nas diversas tecnologias de misturas betuminosas temperadas. Nos dias de hoje existem diversas tecnologias disponíveis para a produção de misturas betuminosas temperadas, as que usam aditivos químicos ou orgânicos, e as que se baseiam na formação de espuma de betume.

Todas as tecnologias usadas na produção das misturas têm como principal objetivo a redução da temperatura de fabrico, para, assim, se obter um menor consumo de energia e menos emissões de gases com efeito de estufa, mantendo um desempenho adequado.

As misturas betuminosas temperadas podem ser espalhadas e compactadas através dos meios tradicionais. Este tipo de misturas consegue ainda apresentar um nível de desempenho mecânico comparável ao das misturas betuminosas a quente.

3 TRABALHOS EXPERIMENTAIS

3.1 Generalidades

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios realizados nas misturas betuminosas temperadas em estudo, utilizando um betume aditivado em refinaria, de modo a possibilitar a sua utilização a uma temperatura moderada, na gama das utilizadas no fabrico de misturas betuminosas temperadas.

Além da caracterização do betume, foram realizados ensaios para a caracterização das misturas betuminosas produzidas, nomeadamente ensaios de avaliação da resistência mecânica: compressão de Marshall, sensibilidade à água, módulo de resiliência em compressão diametral e deformação permanente em compressão uniaxial.

3.2 Caracterização do betume

As propriedades de uma mistura betuminosa dependem em grande medida das características do betume utilizado, pelo que é importante conhecer algumas características do betume que está a ser utilizado.

O fornecedor do ligante indicou que o betume aditivado em refinaria era da classe 35/50, cumprindo os requisitos da norma EN 12591 que se encontram no Quadro 3.1 para um betume de destilação direta daquela classe. Mesmo assim, optou-se por verificar experimentalmente os requisitos para a temperatura de amolecimento e para a penetração a 25°C.

Quadro 3.1- Requisitos para o betume 35/50 indicados na norma EN 12591

Propriedades [Condições de ensaio]	Métodos de Ensaio	Betume 35/50	
Penetração (0,1 mm) [25°C; 100g; 5s]	EN 1426	Min.	35
		Máx.	50
Temperatura de amolecimento (°C)	EN 1427	Min.	50
		Máx.	58

3.2.1 Temperatura de amolecimento – Método do anel e bola (EN 1427)

A temperatura de amolecimento do betume foi determinada pelo método do anel e bola, tendo-se seguido o procedimento descrito na norma EN 1427. Este ensaio tem como objetivo medir a temperatura para a qual o betume fica mole, isto é, a temperatura a que se deforma até um certo ponto numa situação normalizada.

O ensaio consiste em utilizar duas amostras de betume, vertidas para o interior de anéis de latão. Cada amostra é formada por um disco de betume, o qual preenche o interior do anel. Os anéis são colocados horizontalmente num suporte metálico, colocando-se esferas metálicas normalizadas sobre os discos de betume. Após o suporte ter sido montado, este é colocado num vaso de vidro com água destilada. O conteúdo do recipiente é aquecido a uma taxa fixa. À medida que a temperatura aumenta o betume vai-se deformando. O ensaio termina quando o betume ao deformar com o aumento da temperatura e o peso da bola toca na parte inferior do suporte. A temperatura de amolecimento é a média dos valores registados, para cada uma das amostras, no instante em que atingem a situação de fim de ensaio, como é possível ver na Figura 3.1. Os resultados do ensaio estão resumidos no Quadro 3.2.



a)



b)



c)

- a) Suporte com as amostras já colocadas e esferas
- b) Suporte colocado em água, com placa térmica ligada, e ensaio a decorrer
- c) Aspeto final do ensaio

Figura 3-1- Aspeto dos ensaios de medição da temperatura de amolecimento do betume pelo método do anel e bola

Quadro 3.2- Resultados obtidos no ensaio do anel e bola

Nº Ensaio	Amostra1	Amostra2	Resultado (°C)
	Temperatura de Amolecimento (°C)		
1	50	51	51
2	51	51	51
Valor médio de T _{AB}			51

Comparando o valor médio de T_{AB} de 51°C obtido para as amostras ensaiadas com os limites indicados no Quadro 3.1 (50 a 58 °C), verifica-se que o betume aditivado cumpre os requisitos dos betumes da classe 35/50.

3.2.2 Penetração a 25°C (EN1426)

A penetração do betume, a 25°C (Figura 3.2), tal como a sua temperatura de amolecimento é uma medida indireta da viscosidade do betume. O ensaio consiste em deixar que uma agulha com uma massa de 100 gramas, penetre uma amostra de betume, durante 5 segundos, quando o betume se encontra a 25°C. Os resultados do ensaio encontram-se no Quadro 3.3.



Figura 3-2- Equipamento e ensaio de penetração a 25°C.

Quadro 3.3 – Resultados obtidos no ensaio de penetração a 25°C

Ensaio Nº	Resultado (0,01 mm)	Valor médios (0,01 mm)
1	39-36-41-38-37-38	38
2	34-34-34-36-35-42	36
3	37-35-38-37-35-38-42	37
Média		37

Comparando o valor médio de pen₂₅ de 37 décimas de milmetro obtido sobre as amostras ensaiadas com os limites indicados no Quadro 3.1 (35 a 50 0,01 mm), verifica-se que o betume aditivado cumpre os requisitos dos betumes da classe 35/50.

3.2.3 Densidade do betume pelo método do picnómetro

Embora os requisitos da EN 12591 não incluam a densidade do betume, optou-se por determinar o seu valor porquanto o mesmo pode ser útil para a estudo da composição das misturas betuminosas em laboratório. Além disso, pretendia-se saber se a aditivção do betume resultaria numa densidade consideravelmente diferente de um betume semelhante de destilação direta. Determinou-se a densidade do betume pelo método do picnómetro, de acordo com a Especificação E35 do LNEC. Os resultados da densidade a 25°C obtidos encontram-se no Quadro 3.4

Quadro 3.4- Resultados obtidos no ensaio da densidade pelo método do picnómetro

Nº Ensaio	Resultado
1	1,04
2	1,04
Média	1,04

O valor médio determinado para a densidade do betume é semelhante aos valores habitualmente obtidos para betumes de destilação direta convencionais.

3.3 Características dos agregados

A mistura betuminosa em estudo é do tipo AC 14 surf 35/50, típica de camada de desgaste, para a qual se utilizaram agregados de gnaiss e um filer calcário. No Quadro 3.5 resumem-se algumas propriedades das frações utilizadas e comparam-se com os requisitos geralmente estabelecidos em Portugal, nomeadamente no caderno de encargos da Infraestruturas de Portugal. As fichas de produto incluem uma caracterização mais detalhada dos agregados, sendo apresentadas no Anexo I.

Quadro 3.5- Requisitos dos materiais grossos utilizados e comparação com os limites habitualmente utilizados em Portugal

Característica	Massa volúmica (Mg/m ³)			Granulometria	FI (%)	SI (%)	C (%)	LA (%)	M _{DE} (%)
	pa	prd	pssd						
Material									
Brita gnaiss 8/20	2,63	2,61	2,61	G _c 90/15	FI ₁₅	SI ₁₅	C _{100/0}	LA ₂₀	M _{DE10}
Brita gnaiss 4/12	2,62	2,59	2,61	G _c 90/15	FI ₁₅	SI ₁₅	C _{100/0}	LA ₂₀	M _{DE10}
Limites habitualmente utilizados em Portugal									
Limite/ Categoria	±0,05 Mg/m ³ do valor declarado			A declarar	FI ₁₅	ND	C _{100/0}	LA ₂₀ *	M _{DE15}

pa, prd, pssd – massas volúmicas do material impermeável das partículas, das partículas secas em estufa, e das partículas saturadas com superfície seca, respetivamente; FI – índice de achatamento; SI – índice de forma; C – percentagem de partículas esmagadas ou partidas e de partículas totalmente roladas; LA – coeficiente de Los Angeles; M_{DE} – coeficiente do micro-Deval. *Para rochas granitoides: LA₃₀

3.4 Composição granulométrica da mistura

A mistura de agregados foi obtida pela combinação das frações granulométricas disponíveis nas proporções indicadas no Quadro 3.6, de modo a respeitar o fuso granulométrico tipicamente utilizado em Portugal.

Quadro 3.6- Composição ponderal da mistura de agregados da mistura em estudo

d/D	4/12	8/20	0/4	Filer
%	40	10	48	2

As Figuras 3.3 e 3.4 ilustram, respetivamente, as frações granulométricas retidas em cada um dos peneiros da série utilizada, e a curva de estudo sobreposta ao fuso granulométrico de referência. Nos Quadro I.1 e I.2 do Apêndice I apresentam-se mais detalhadamente as composições da mistura.

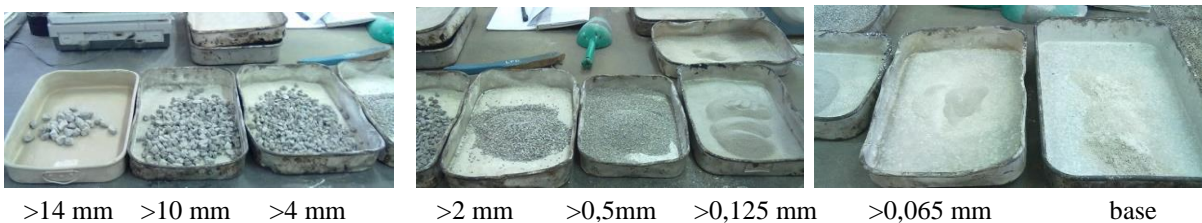


Figura 3-3- Frações granulométricas da mistura de estudo após peneiração

Curva Granulométrica

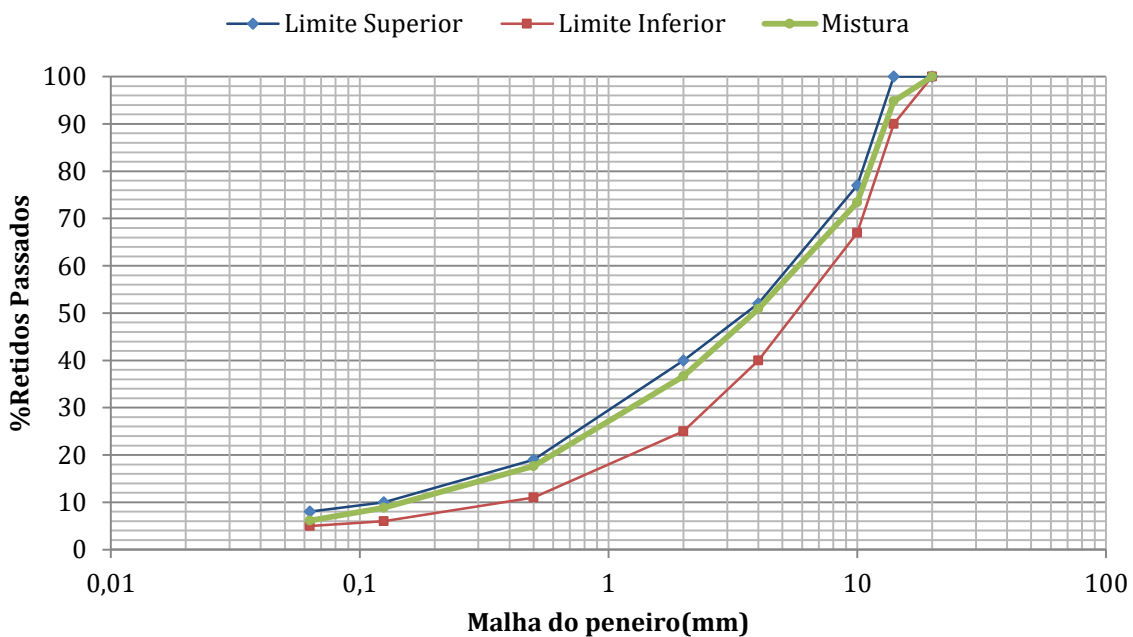


Figura 3-4-Curva granulométrica e fuso granulométrico de referência

3.5 Produção das misturas e moldagem de provetes

Concluída a caracterização dos constituintes e determinada a combinação de agregados a utilizar na mistura betuminosa, iniciou-se o processo de produção da mistura e moldagem de provetes, com vista à aplicação do método de Marshall para determinar a percentagem ótica de betume. Para a realização de ensaios complementares de caracterização mecânica das misturas betuminosas, produziram-se também amassaduras e procedeu-se à moldagem dos provetes necessários. A aplicação do método de Marshall fez-se para provetes com percentagens de betume compreendidas entre 3,5% e 5,5%. O processo de mistura e compactação das amostras é o ilustrado na Figura 3.5.



Figura 3-5- Pesagem, mistura dos constituintes e compactação dos provetes no compactador Marshall.

Adotaram-se valores típicos referidos na bibliografia para a produção e compactação de misturas betuminosas temperadas. A temperatura de mistura utilizada foi de 125°C e a de compactação foi de 110°C. No caso de estudo, verificou-se que, para a gama de temperaturas utilizadas, o betume aditivado em refinaria permitiu obter boas condições de trabalhabilidade. O procedimento de compactação utilizado seguiu as indicações da norma NP EN 12697 – 30. O método consiste em compactar de forma dinâmica, provetes cilíndricos, com um diâmetro de $101 \pm 0,1$ mm e com uma altura de $63,5 \pm 2,5$ mm pela aplicação de 75 pancadas por face.

3.6 Caracterização das misturas betuminosas

3.6.1 Determinação da baridade (EN 12697-6)

A baridade dos provetes foi determinada segundo a norma NP EN 12697-6, usando o procedimento B (SSD – provete saturado com a superfície seca), como é possível ver na Figura 3.6. Assim, a baridade foi determinada a partir do volume e da massa da amostra, sendo a massa da amostra obtida pela pesagem da amostra seca ao ar e o seu volume determinado a partir da sua massa ao ar e da sua massa dentro de água. O procedimento consiste em determinar a massa dos provetes secos, pesados ao ar. De seguida imergem-se durante 30 minutos para que fiquem saturados, devendo após este tempo ser efetuada a leitura da balança. A temperatura da água é medida para que possa determinar-se a sua densidade na altura do ensaio e aplicar fatores corretivos. Os provetes são de seguida retirados da água, secando-se a superfície com um pano para se proceder a nova pesagem do provete saturado.

Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 3.7 e encontram-se ilustrados graficamente na Figura 3.7.



a)



b)



c)

- | |
|--|
| <p>a) Pesagem dos provetes secos e saturados com a superfície seca</p> <p>b) Provede imerso durante a pesagem</p> <p>c) Limpeza da superfície do provede</p> |
|--|

Figura 3-6- Representação do processo de determinação da baridade

Quadro 3.7-Baridades médias por grupo

Grupo	Betume (%)	Baridade Média (kg/m ³)
1	3,5	2277,7
2	4	2286,1
3	4,5	2300,3
4	5	2330,7
5	5,5	2314,0

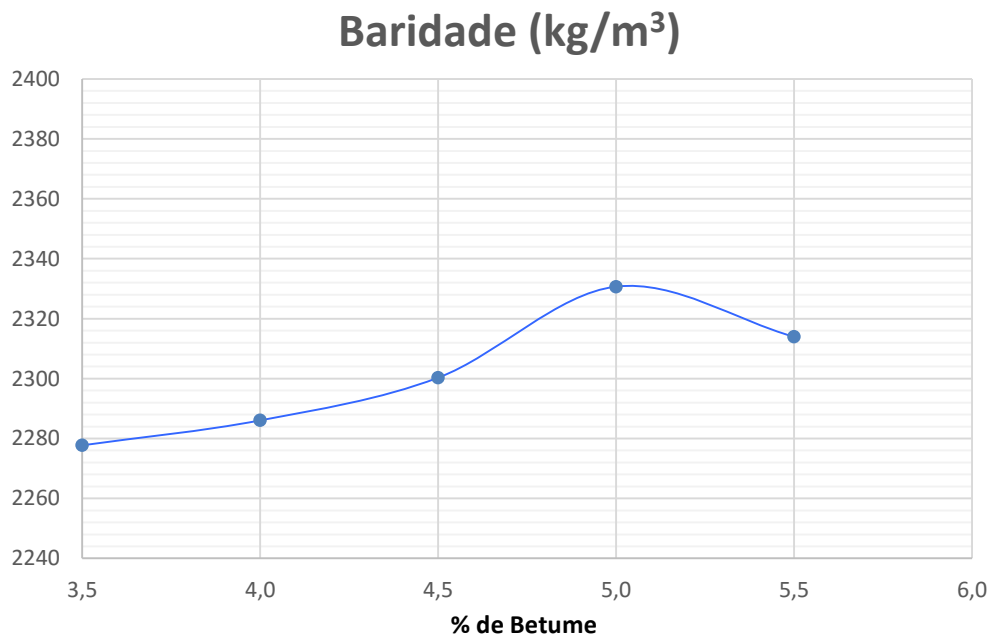


Figura 3-7- Variação da baridade média com a percentagem de betume, por grupo

No gráfico da Figura 3.8 comparam-se os valores obtidos para a baridade da mistura em estudo com valores típicos de misturas betuminosas a quente, do tipo AC 14, obtidos noutros trabalhos.

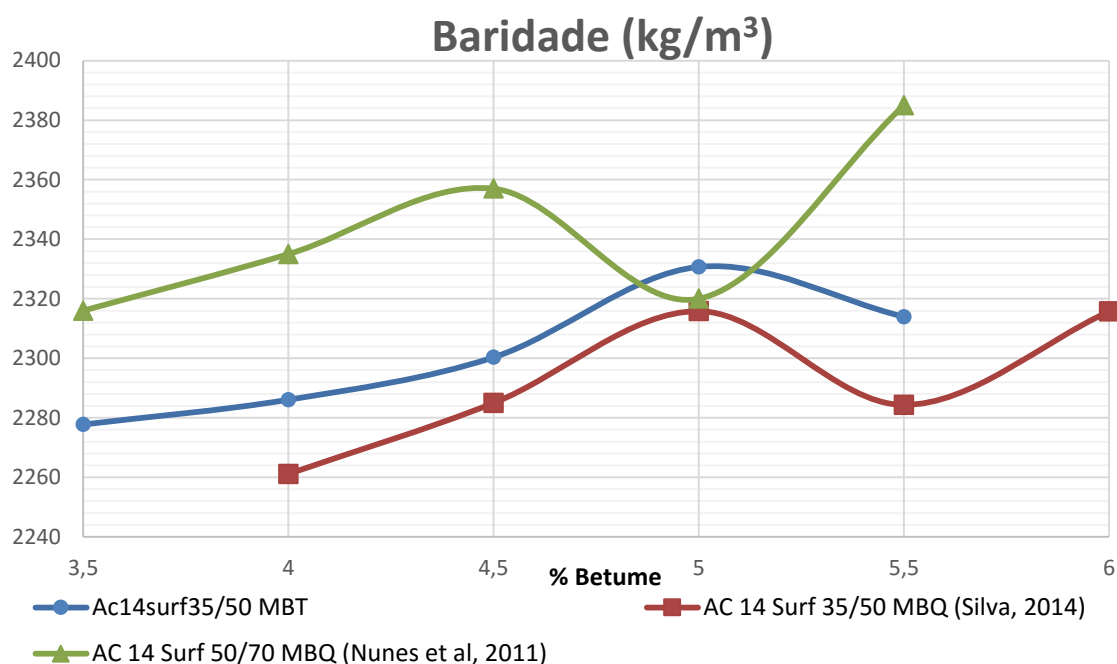


Figura 3-8-Gráfico de comparação da variação da baridade da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente

Verifica-se que a mistura temperada apresenta o seu valor máximo de baridade para 5% de betume e que, além disso, as gamas de valores obtidos para a aquela propriedade são semelhantes às correntemente obtidas para misturas betuminosas a quente com uma composição semelhante. Note-se que a natureza dos agregados utilizados foi semelhante em todos os casos, tendo-se utilizado agregados graníticos e um filer calcário.

3.6.2 Determinação da baridade máxima teórica (EN 12697-5)

A baridade máxima teórica foi determinada segundo a norma EN 12697-5 pelo procedimento A (método volumétrico), tal como se que descreve na Figura 3.9.

Para realizar o ensaio de determinação da baridade máxima deve pesar-se o picnómetro vazio, com tampa. De seguida é colocada a amostra seca dentro do picnómetro e pesa-se novamente o conjunto. Por fim, enche-se o picnómetro com água destilada, de forma a libertar o ar que se encontra dentro do picnómetro, utilizando pressão negativa e vibração do picnómetro contendo a amostra. Efetua-se a pesagem do picnómetro completo com água nestas condições.

Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 3.8 e estão representados graficamente na Figura 3.10.

Quadro 3.8- Baridade máxima teórica obtida

Percentagem de betume	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%
Baridade máxima teórica (kg/m ³)	2526,9	2480,3	2466,4	2443,4	2429,6



Figura 3-9-Equipamento para a determinação da baridade máxima

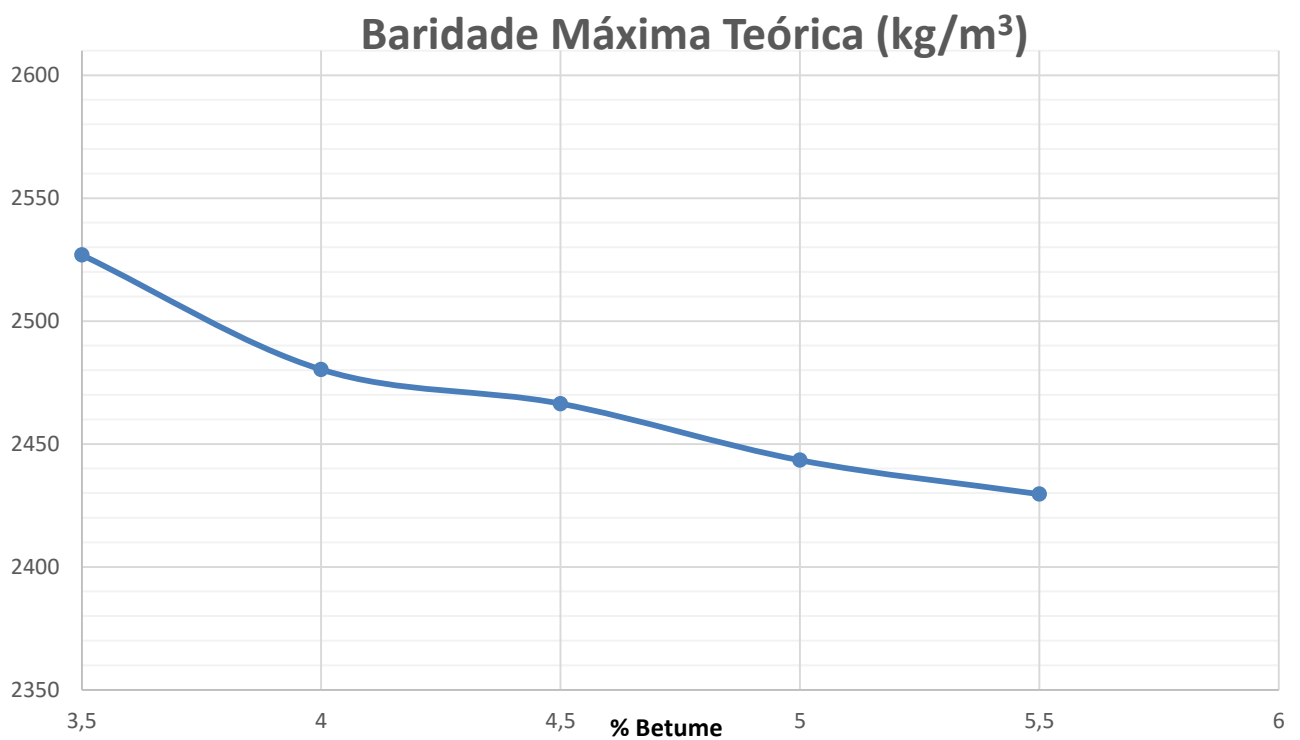


Figura 3-10- Variação da baridade máxima teórica com a percentagem de betume, por grupo

No gráfico da Figura 3.11 comparam-se os resultados da baridade máxima teórica obtidos para a mistura em estudo com os determinados noutros trabalhos para misturas betuminosas a quente, com composição semelhante.

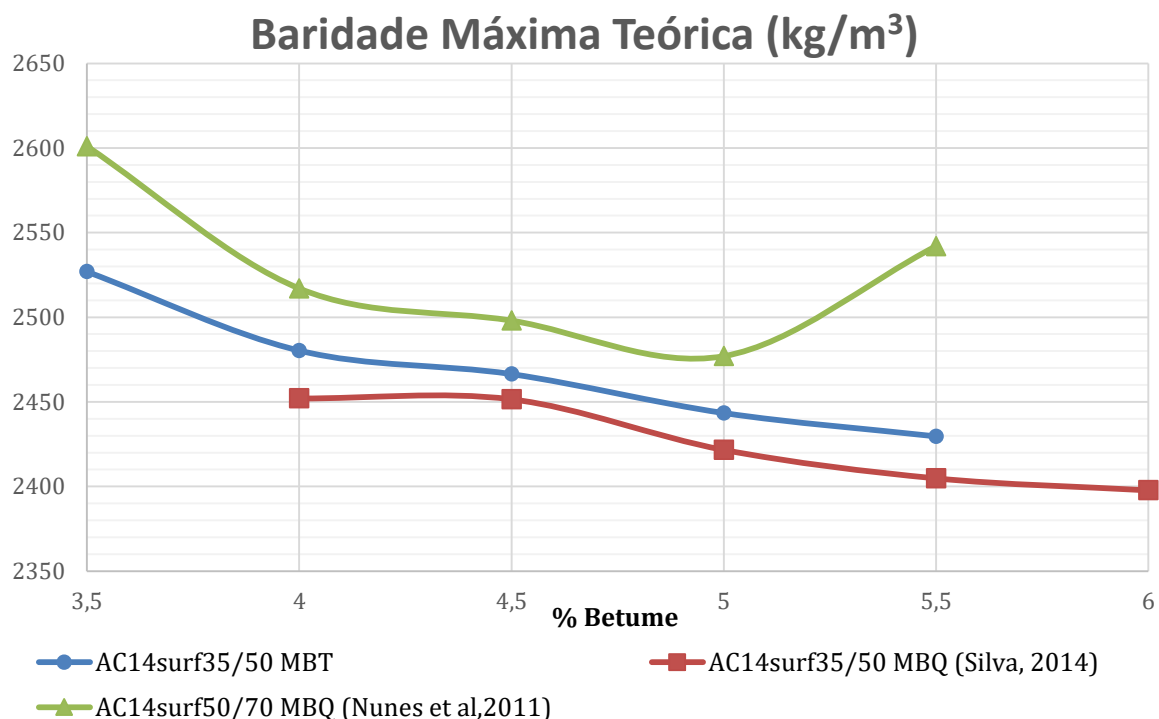


Figura 3-11 Comparação da variação da baridade máxima teórica da mistura betuminosa temperada em estudo com duas misturas fabricadas a quente

Mais uma vez se verifica que os resultados obtidos para a mistura temperada não diferem muito dos valores típicos determinados para misturas betuminosas a quente.

3.6.3 Determinação da porosidade e VMA

Com base nos valores obtidos para a baridade dos provetes e para a baridade máxima teórica da mistura, foram determinadas as características volumétricas relacionadas com os vazios existentes nos provetes. Assim, determinaram-se as porosidades e o VMA dos provetes que se apresentam, em valores médios, no Quadro 3.9 e se representam graficamente nas figuras 3.12 e 3.13.

Quadro 3.9-Valores de porosidade e VMA em função da percentagem de betume

Grupo	Betume (%)	Porosidade (%)	VMA (%)
1	3,5	9,9	17,5
2	4,0	7,8	16,6
3	4,5	7	16,9
4	5,0	5,3	16,5
5	5,5	5,4	17,6

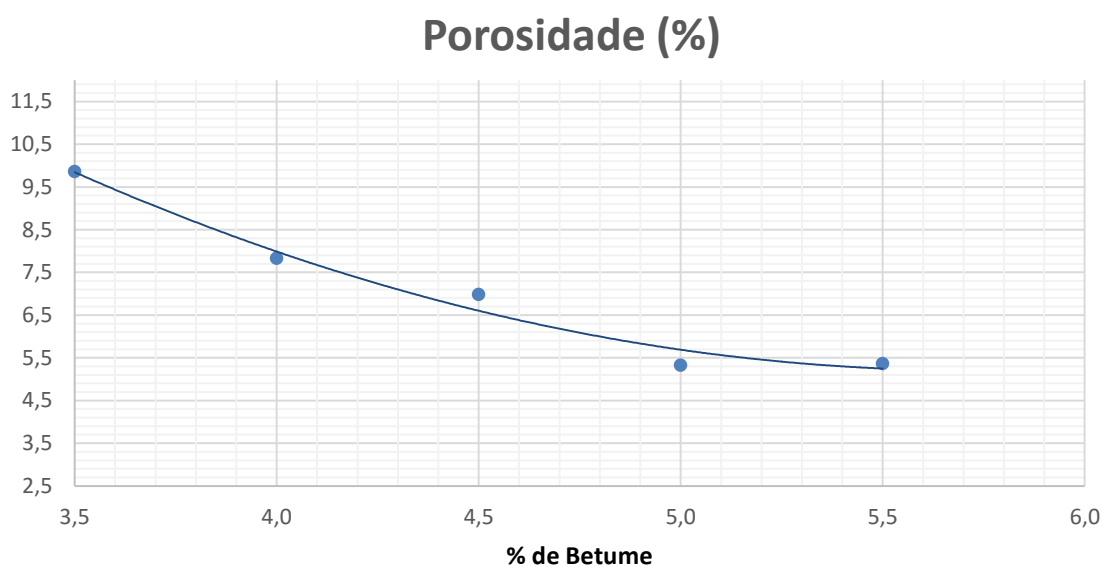


Figura 3-12- Variação da porosidade com a percentagem de betume, por grupo

Os valores obtidos para o volume de vazios na mistura de agregados (VMA) e os de porosidade apresentam uma variação típica para o tipo de mistura estudada.

Refere-se ainda que, segundo o Caderno de Encargos da Estradas de Portugal, S.A. (E.P., S.A., 2009) o VMA mínimo para uma mistura AC 14 Surf deve ser superior a 14%, o que se verifica. Nas figuras 3.14 e 3.15 encontra-se a representação gráfica da comparação da variação da porosidade e do VMA em função da percentagem de betume com diferentes misturas obtidas em trabalhos de outros autores (Silva, 2013; Nunes et al, 2011).

Em relação há porosidade podemos comprovar que a mistura betuminosa temperada apresenta valores genericamente semelhantes aos das misturas betuminosas fabricadas a quente tomadas para comparação (Silva, 2013; Nunes, 2010), embora umas das misturas a quente apresente diferenças consideráveis para baixas percentagens de betume. O mesmo acontece para o VMA (Figura 3.15).

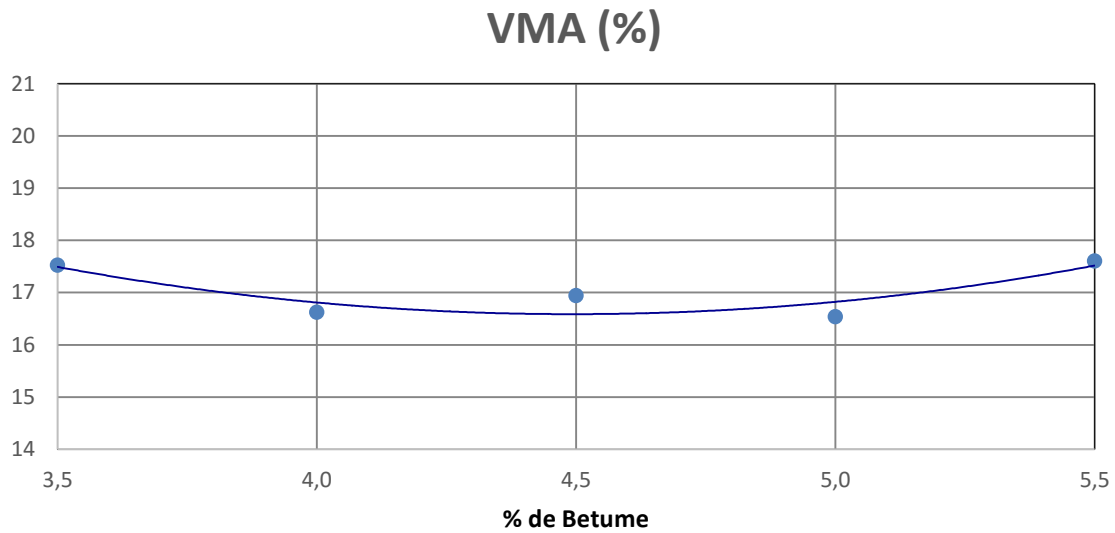


Figura 3-13- Variação do VMA com a percentagem de betume, por grupo

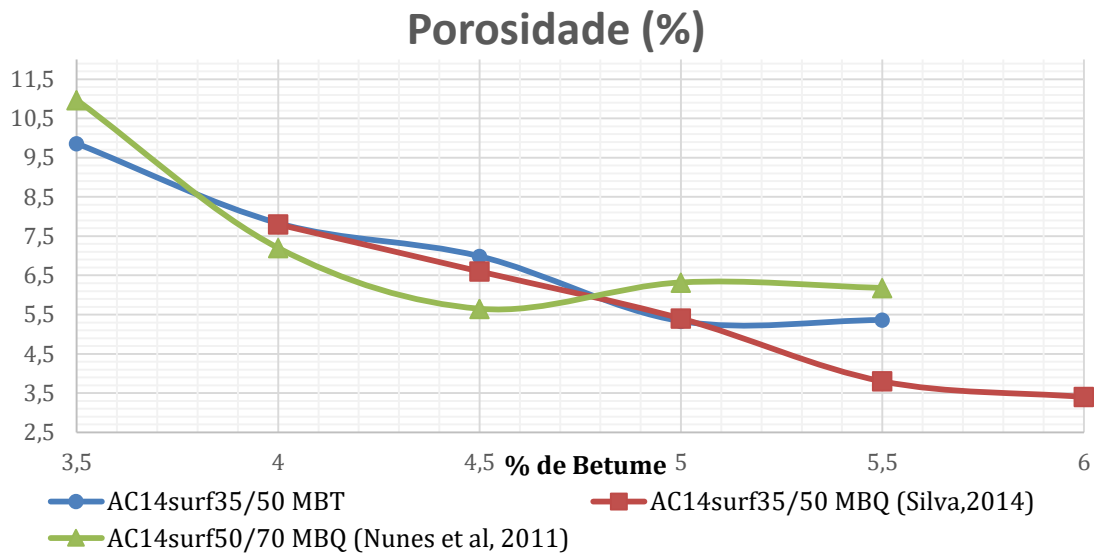


Figura 3-14- Comparação da variação da porosidade da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente

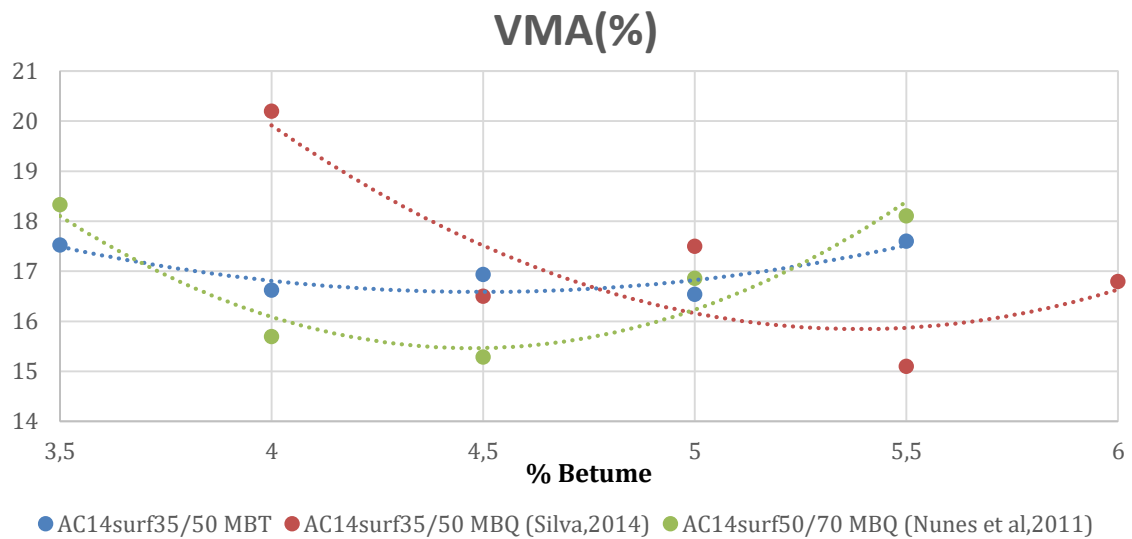


Figura 3-15- Comparação da variação do VMA da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente

3.6.4 Ensaio de compressão Marshall (EN 12697-34)

O ensaio de compressão de Marshall foi realizado de acordo com a norma EN 12697-34, consistindo em medir a resistência mecânica dos provetes quando submetidos a condições específicas de ensaio, tal como está ilustrado na Figura 3.16. A realização deste ensaio é fundamental pois a composição da mistura é estabelecida em função das características volumétricas e do comportamento mecânico obtidos. O ensaio consiste em comprimir os provetes Marshall através de duas “meias canas” de aço que os envolvem, devendo o material estar a uma temperatura de $60 \pm 1^\circ\text{C}$.

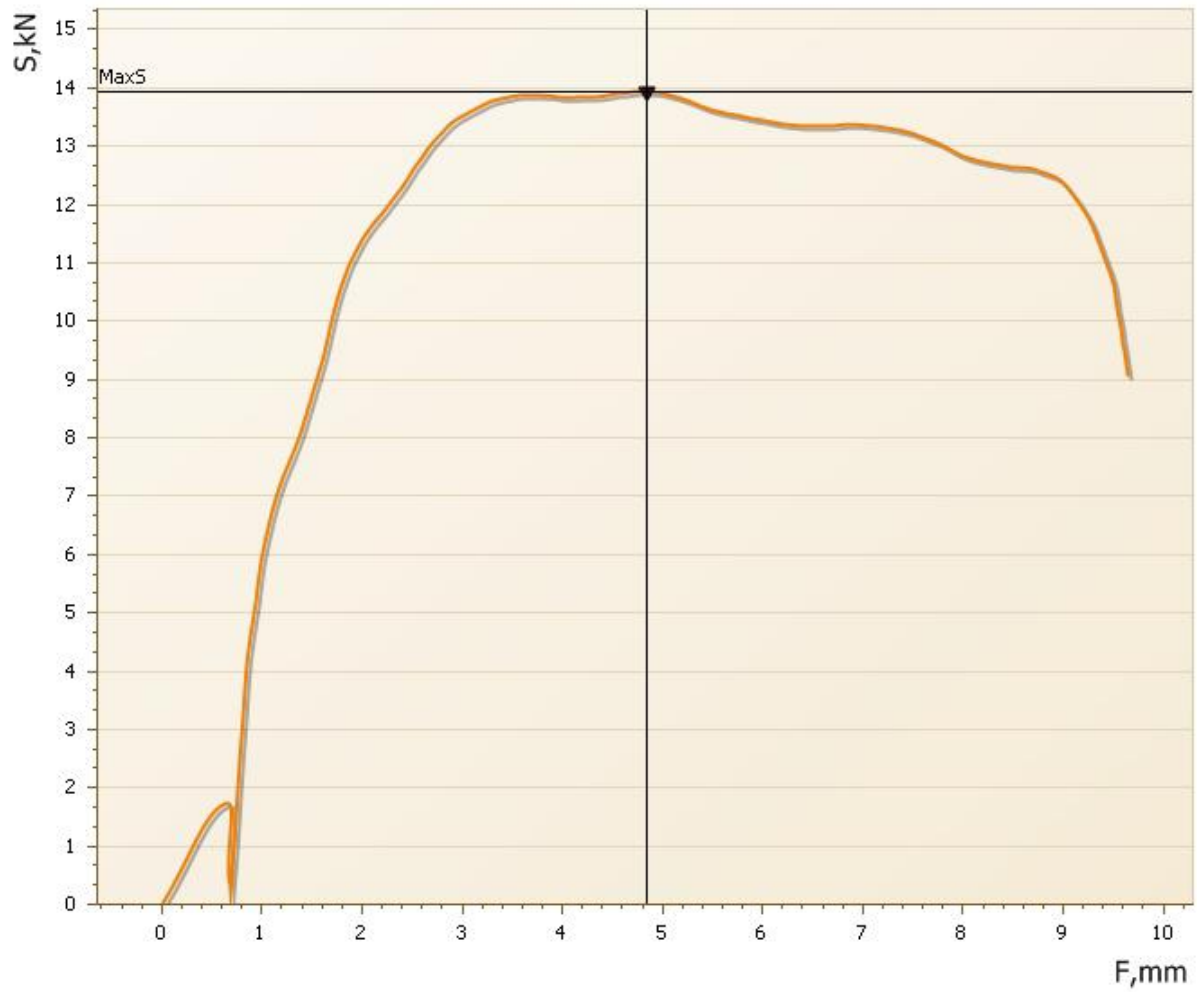
A força máxima medida no momento da rotura é designada por “estabilidade Marshall” e caracteriza a resistência mecânica da mistura, enquanto a deformação máxima, obtida aquando da rotura, é designada por “deformação Marshall”. Apresentam-se na Figura 3.16 as várias etapas da realização do ensaio de compressão Marshall. Na Figura 3.17 apresenta-se um exemplo de relatório realizado pelo software de ensaio.



- a) Compressão do provete
- b) Prensa Marshall
- c) Provetes imersos em água a 60°C
- d) Aspeto do provete no final do ensaio

Figura 3-16-Equipamento para a realização do Ensaio Marshall

Os valores obtidos nos ensaios de compressão realizados são apresentados, em valores médios, no Quadro 3.10 e nas figuras 3.18 e 3.20. As características dos provetes encontram-se no Apêndice 1, no Quadro I.3. Nas figuras 3.19 e 3.21 faz-se a comparação dos resultados dos ensaios de compressão Marshall com os obtidos para duas misturas semelhantes fabricadas a quente (Nunes et al, 2011; Silva, 2014) estudadas noutros trabalhos.

**Resultados:**

Estabilidade de Marshall: 13,9 kN

Fator de correção (c): 0,980 (altura) [mm]

Estabilidade de Marshall corrigida (S): 13,7 kN

Deformação Marshall Nominal (Fn): 4,8 mm

Figura 3-17- Estabilidade Marshall do provete 1.6 –3,5% de betume

Quadro 3.10- Resultados do ensaio de compressão Marshall

Provete	Betume (%)	Estabilidade (kN)	Deformação (mm)
1	3,5	10,8	4,4
2	4,0	12,0	5,4
3	4,5	12,8	4,9
4	5,0	13,7	5,1
5	5,5	10,6	5,6

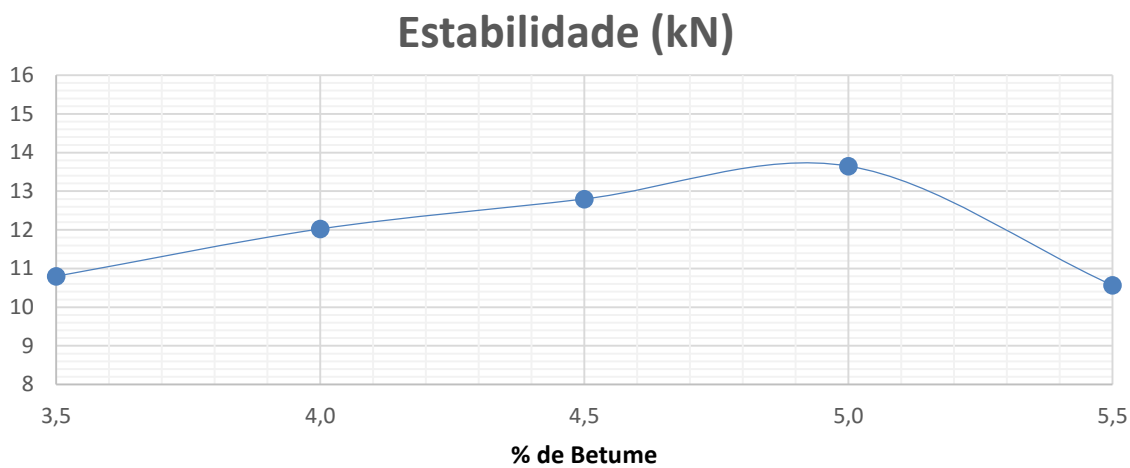


Figura 3-19- Variação da estabilidade Marshall com a percentagem de betume, por grupo

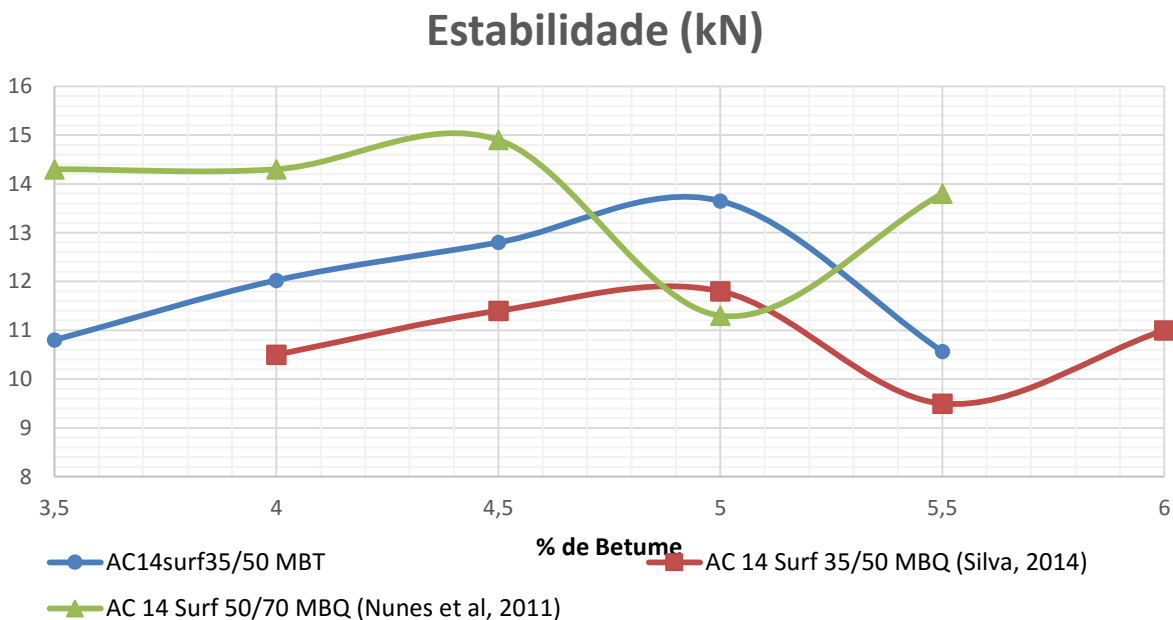


Figura 3-18- Comparação da variação da estabilidade da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente

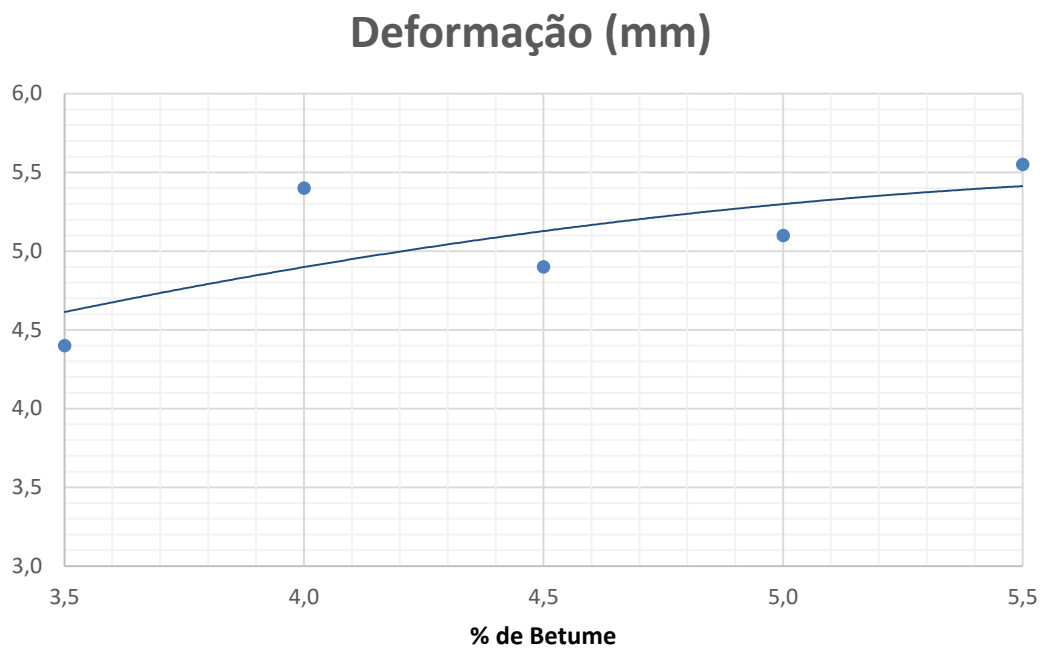


Figura 3-20- Variação da deformação Marshall com a percentagem em betume

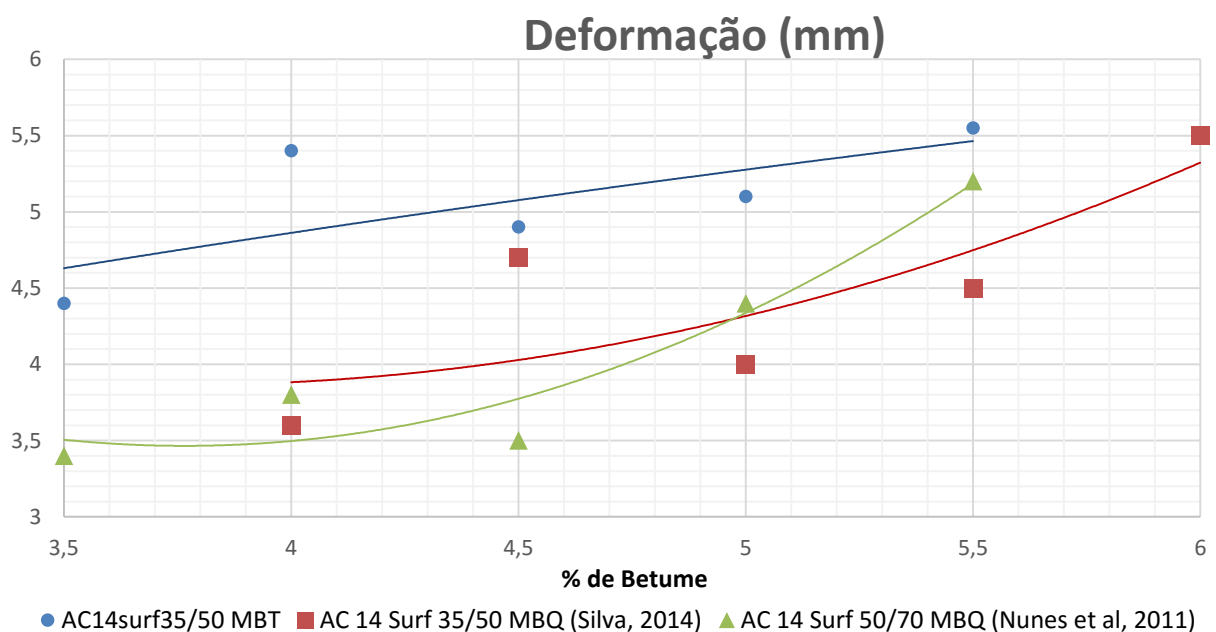


Figura 3-21- Comparação da variação da deformação da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente

Em relação a deformação atingida no ensaio de Marshall, a mistura betuminosa temperada apresenta de uma forma geral maiores valores que as obtidas para as misturas a quente consideradas para comparação.

Na Figura 3.22 ilustra-se a evolução do parâmetro de rigidez Marshall da mistura em estudo. Na Figura 3.23 comparam-se os valores obtidos para a rigidez Marshall com os medidos para as misturas fabricadas a quente, produzidas noutros trabalhos (Silva, 2013; Nunes et al, 2011), usados para comparação.

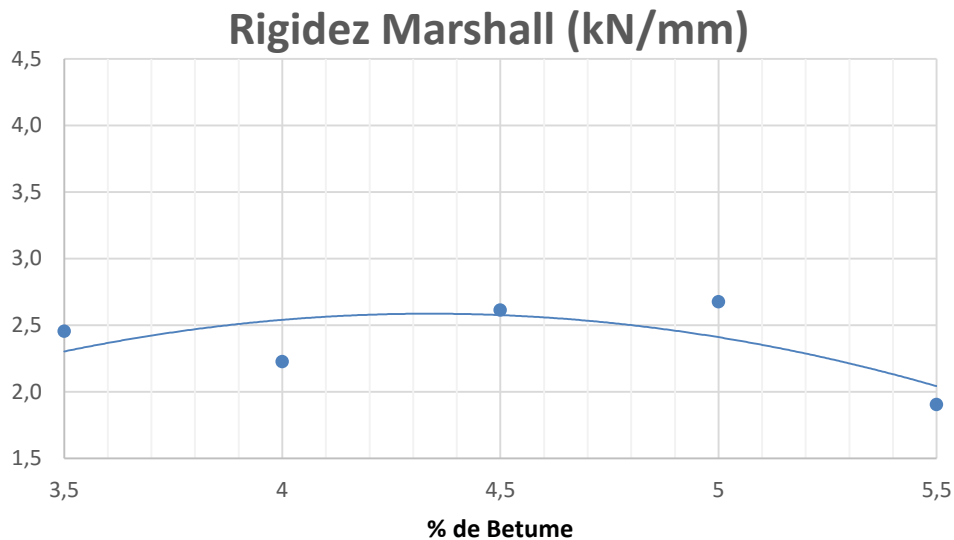
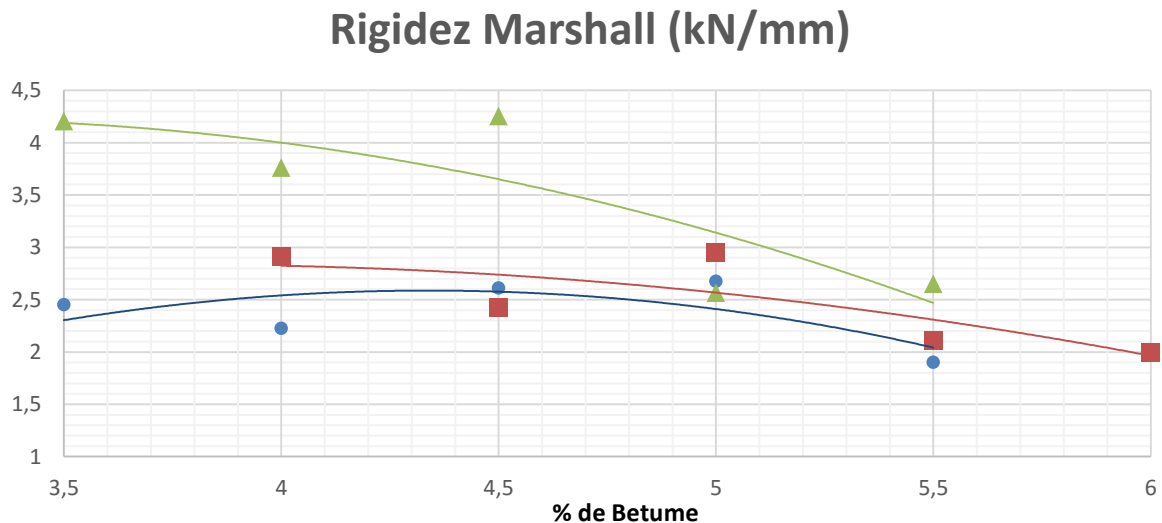


Figura 3-22- Resultados obtidos para a rigidez de Marshall para a mistura temperada em estudo



● AC 14 Surf 35/50 MBT ■ AC 14 Surf 35/50 MBQ (Silva, 2014) ▲ AC 14 Surf 50/70 MBQ (Nunes et al, 2011)

Figura 3-23-Gráfico de comparação da variação da rigidez Marshall da mistura betuminosa temperada com duas misturas a quente

Em relação ao valor da rigidez Marshall, apenas a mistura AC 14 surf 50/70 (Nunes et al, 2011) apresenta valores que cumprem, para todas as percentagens de betume estudadas, os requisitos do Caderno de Encargos da EP (E.P., S.A., 2009), ou seja, um mínimo de 3 kN/mm. Este

resultado pode configurar uma deformabilidade excessiva da mistura temperada em estudo, sendo recomendável a avaliação da mistura em ensaios de deformação permanente.

3.6.5 Percentagem ótima de betume

A partir dos valores das propriedades Marshall atrás determinados, nomeadamente os da baridade, porosidade, VMA, estabilidade e deformação, determinou-se a percentagem ótima de betume, tomando para referência um valor de porosidade entre 3 e 5%, tal como indicado no Caderno de Encargos da E.P. para misturas betuminosas do tipo AC 14 surf. Considerou-se que a percentagem de betume deveria corresponder à média correspondente às percentagens de betume para as quais se obtiveram a máxima baridade, a máxima estabilidade e um valor dentro dos limites da porosidade. O valor assim determinado deve cumprir os requisitos relativos à deformação (de 2 a 4 mm) e ao VMA (mínimo de 14%).

Tendo em conta as premissas apresentadas obteve-se a percentagem ótima de betume cujo cálculo se resume no quadro 3.11.

Quadro 3.11- Resumo do cálculo da percentagem ótima de betume pelo método de Marshall

Propriedade	% Ótima de betume a considerar	Média
Baridade	5,1%	5%
Estabilidade	4,9%	
Porosidade (3-5)	5,0%	
Deformação (2-4)	5%	4,4 mm
VMA (min 14)	5%	16,6%

Verificou-se o não cumprimento dos valores impostos pela infraestruturas de Portugal no que diz respeito à deformação. Mesmo assim, considerou-se uma percentagem ótima de betume de 5% para a mistura betuminosa, a verificar mais adiante no âmbito da avaliação da resistência à deformação permanente. Note-se que, segundo a NP EN 13108-1, as camadas de desgaste do tipo AC 14 surf *ligante* (BB) devem apresentar uma percentagem de betume mínima de 4,9%, o que também pesou na adoção da percentagem de 5% de betume para a mistura AC 14 surf 35/50 MBT. Este valor também é próximo dos obtidos para as misturas fabricadas a quente, do tipo AC 14 surf estudadas nos trabalhos consultados, ou seja, 5,1% para o AC 14 surf 35/50 estudado em (Silva, 2014) e 4,8% para o AC 14 surf 50/70 avaliado em (Nunes et al, 2011).

3.6.6 Sensibilidade à água (EN 12697-12)

A avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas foi realizada de acordo com o método A da norma EN 12697-12. Os seus valores obtêm-se com recurso a ensaios de resistência mecânica, realizados sobre dois grupos de provetes expostos a condições distintas.

O primeiro grupo de provetes é acondicionado ao ar a 20 °C. O segundo grupo é colocado em imersão e submetido a vácuo, de forma a saturar os provetes e garantir a chegada de água aos interstícios, sendo as amostras posteriormente acondicionadas em água a 40°C por um período de 68 a 72 horas. Concluído o período de acondicionamento, os provetes são sujeitos a ensaios de compressão diametral, a uma temperatura de ensaio de 25°C para determinar a resistência à tração indireta. Na Figura 3.24 ilustra-se o procedimento de ensaio descrito.

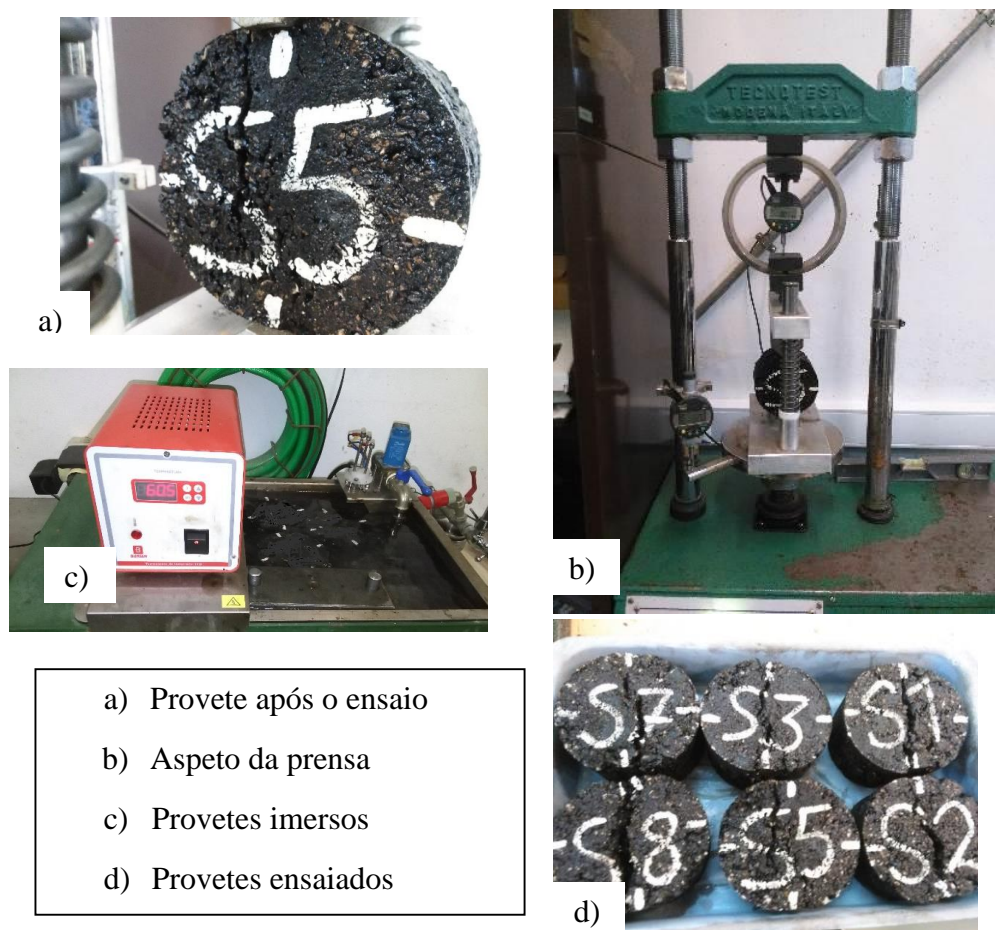


Figura 3-24- Vista geral dos ensaios de avaliação da sensibilidade à água

O valor médio da resistência dos provetes (ITS) “a seco” foi de 3,87 kN. Já os provetes sujeitos a condicionamento apresentaram um valor médio de 3,57 kN. Consequentemente, a resistência conservada em tração indireta (ITSR), calculada a partir dos valores médios do parâmetro ITS, é de 92%, o que representa um resultado final adequado, sendo mesmo melhor que o determinado para as misturas betuminosas fabricadas a quente, produzidas noutros trabalhos (Nunes et al, 2011; Silva, 2014), tomadas como referência (Figura 3.25).

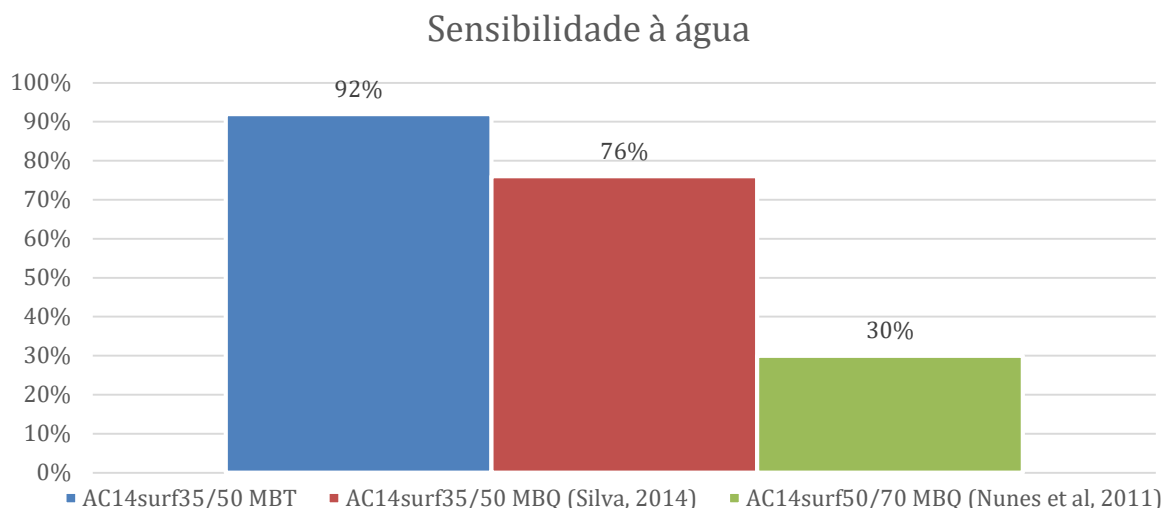


Figura 3-25- Comparação dos resultados de ITRSR da mistura betuminosa temperada com duas misturas fabricadas a quente.

Em relação às misturas betuminosas a quente que têm sido comparadas com a mistura betuminosa temperada, conclui-se que a temperada apresenta menor sensibilidade à ação da água. Embora não haja evidência experimental, as características dos provetes ensaiados são apresentados no Apêndice I, nos Quadros I.4, I.5 e I.6.

3.6.7 Deformação Permanente (EN 12697-25)

Tendo em consideração que as misturas do tipo AC 14 surf são aplicadas em camadas de desgaste e, por isso, estão expostas diretamente às ações climáticas e do tráfego, a avaliação da resistência daquele tipo de misturas betuminosas à deformação permanente é muito importante, de modo a antecipar se a resistência àquele tipo de mecanismo será adequada.

Este ensaio permite obter informação complementar relativa à escolha da percentagem ótima de betume, pois permite inferir se a quantidade de ligante a que se chega, por exemplo pelo método de Marshall, conduzirá a uma fraca resistência à deformação permanente.

Moldaram-se provetes para as várias percentagens de betume em estudo, recorrendo ao método de compactação por vibrocompressão, tendo sido aplicado um tempo de compactação de 1 minuto e 30 segundos em cada face do provete. A temperatura de compactação foi de cerca de 110 °C. Os provetes foram compactados em moldes cilíndricos de forma a que ficassem com o diâmetro de 148 ± 5 mm e uma altura de cerca de 60 ± 2 mm como se pode ver na Figura 3.26.

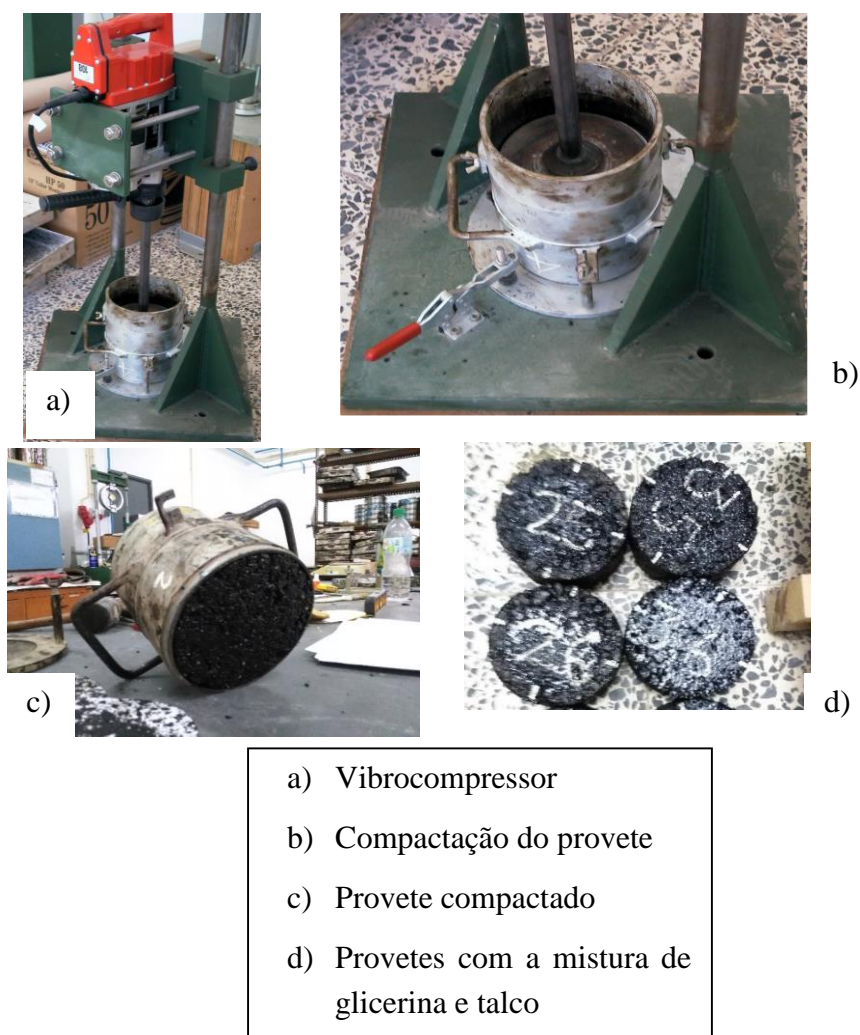


Figura 3-26- Moldagem dos provetes para estudo da deformação permanente

Durante o carregamento em ensaios cíclicos de compressão uniaxial, desenvolvem-se tensões tangenciais devidas ao atrito entre as bases dos provetes e os pratos da máquina de ensaio (o chamada efeito de fronteira). Este efeito pode gerar campos de tensões não uniformes no provete que tendem a influenciar os resultados. Assim, de modo a reduzir o efeito de fronteira durante os ensaios cíclicos de compressão uniaxial, aplicou-se uma mistura de pó de talco e de glicerina nas placas de carga, de modo a que se reduzir o atrito entre as superfícies em contacto.

A temperatura de ensaio escolhida para o ensaio foi de 40 e 60°C, de modo a avaliar o comportamento para dois cenários de condições térmicas, um muito exigente e outro moderado. Antes dos ensaios, os provetes foram colocados durante 4 horas na câmara climática à temperatura a que iam ser ensaiados. A estrutura de carga encontrava-se no interior da câmara pelo que a temperatura foi constante durante todo o ensaio.

A primeira fase do ensaio consiste num pré-carregamento para que haja um bom ajuste entre o prato e a superfície do provete, de modo a reduzir os erros de leitura quando o atuador começa a aplicar cargas repetidas. Segundo a EN 12697-25 a tensão de pré carregamento deve ser 10% do valor máximo aplicado no ensaio, neste caso 10kPa, sendo este pré-carregamento aplicado de forma estática durante 2 minutos.

Os ensaios tem a duração de 3600 ciclos, o que se traduz numa duração de duas horas, dadas as condições de carregamento indicadas pela norma EN 12697-25. Aplicaram-se carregamentos formados por impulsos de carga e tempos de repouso, com uma tensão máxima aplicada de 100kPa, sendo o tempo de carregamento de 1 segundo e o tempo de repouso de 1 segundo, de acordo com as indicações da norma EN 12697-25. Durante o tempo de carregamento o provete deforma-se e durante o tempo de repouso o provete recupera a parte reversível da deformação.

A aplicação dos ciclos de carga foi feita recorrendo a placas de carregamento circular. A placa superior tem um diâmetro de 96mm, e a placa inferior um diâmetro 10mm superior ao do provete, como é possível observar na Figura 3.27.

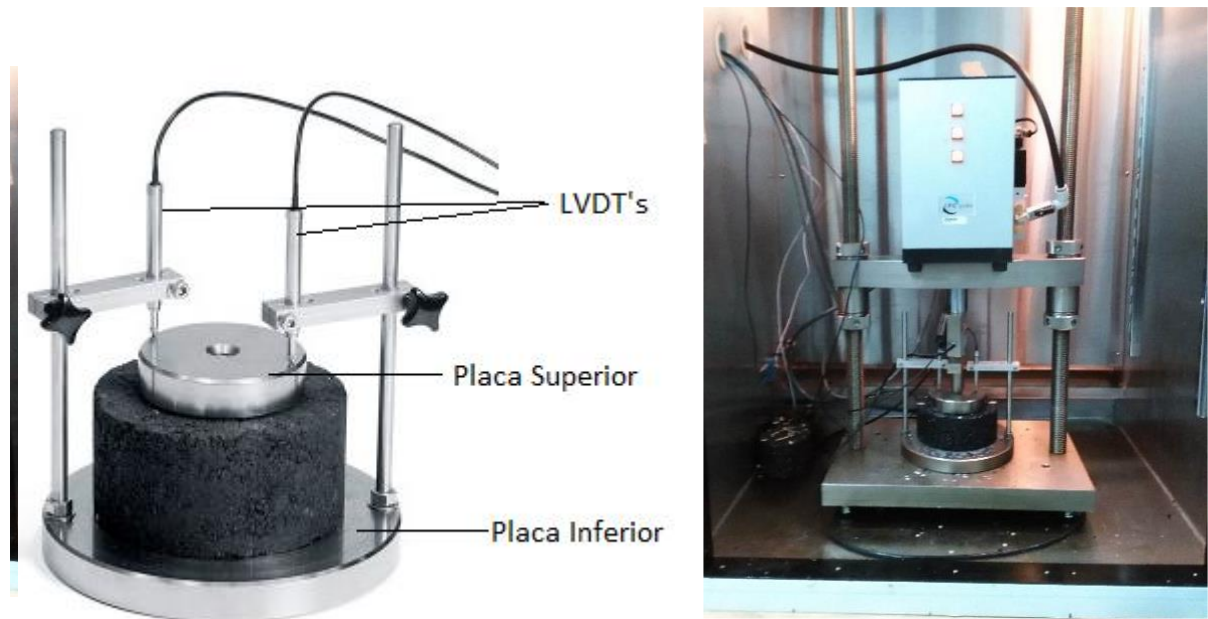


Figura 3-27- Equipamento de ensaio para avaliação da resistência à deformação permanente e vistas da montagem durante a realização do ensaios (adaptado de IPC global, 2016)

Na realização do ensaio a placa superior tem uma dimensão inferior ao diâmetro do provete, para se conseguir criar um efeito de confinamento no material que se encontra a ser solicitado.

Os resultados dos ensaios são obtidos pelo *software* do equipamento utilizado. Os resultados do ensaio adquiridos são a força exercida na célula de carga e as leituras dos dois LVDT, que registavam as deformações axiais do provete ao longo do ensaio, traduzidos por curvas de deformação em função do tempo de ensaio (Figura 3.28). Para cada grupo de provetes ensaiados são apresentados nas figuras 3.29 a 3.31 os resultados dos ensaios realizados a 40°C, sendo o resultado médio para cada grupo apresentado na Figura 3.32. Na figura 3.33 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos a 40°C para a mistura temperada em estudo com os obtidos para uma mistura betuminosa a quente, do tipo AC 20 surf 50/70, estudada por Gardete (2006). A deformação acumulada corresponde é função da variação da altura do provete ao longo do ensaio.

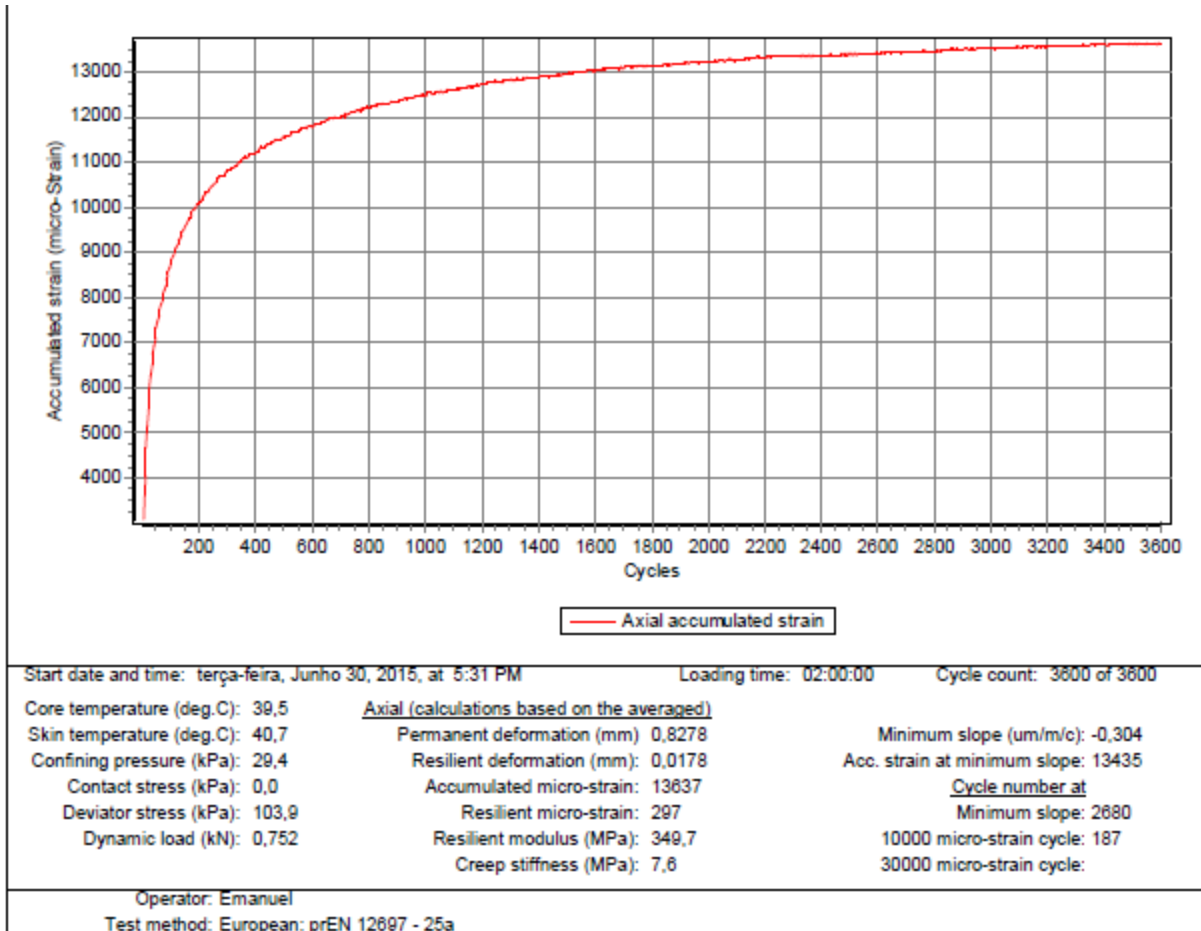


Figura 3-28-Ensaio de Deformação Permanente a 40°C de um provete

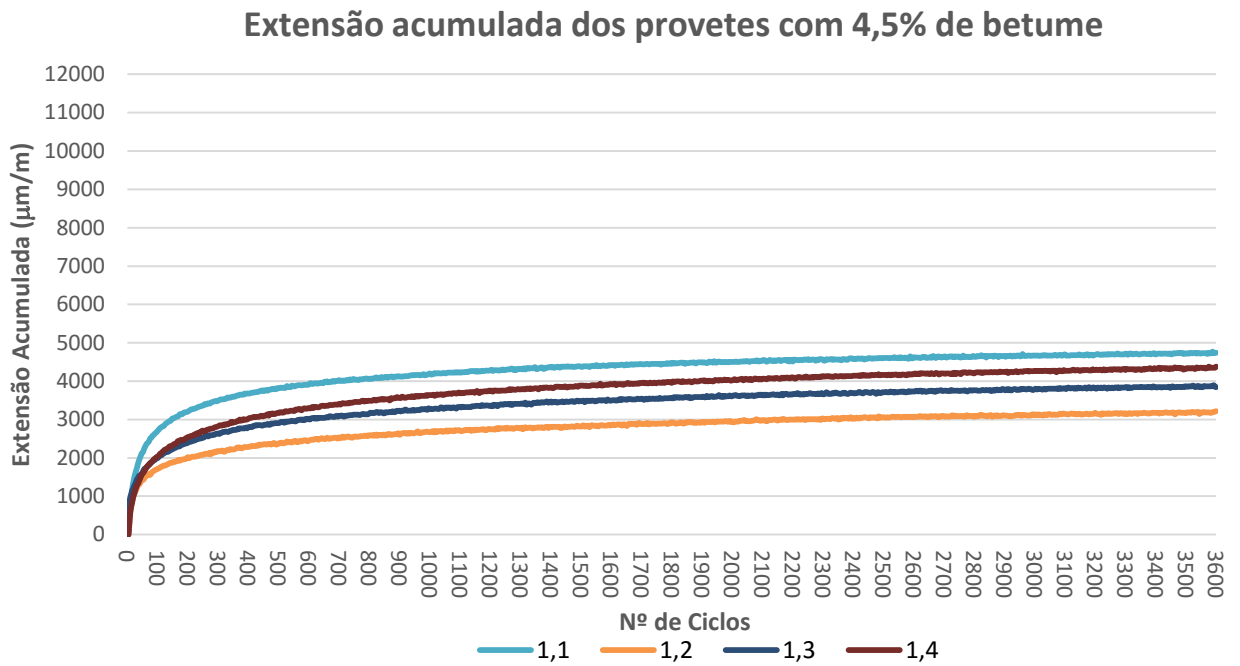


Figura 3-29- Variação da extensão vertical acumulada dos provetes com 4,5% de betume a 40°C

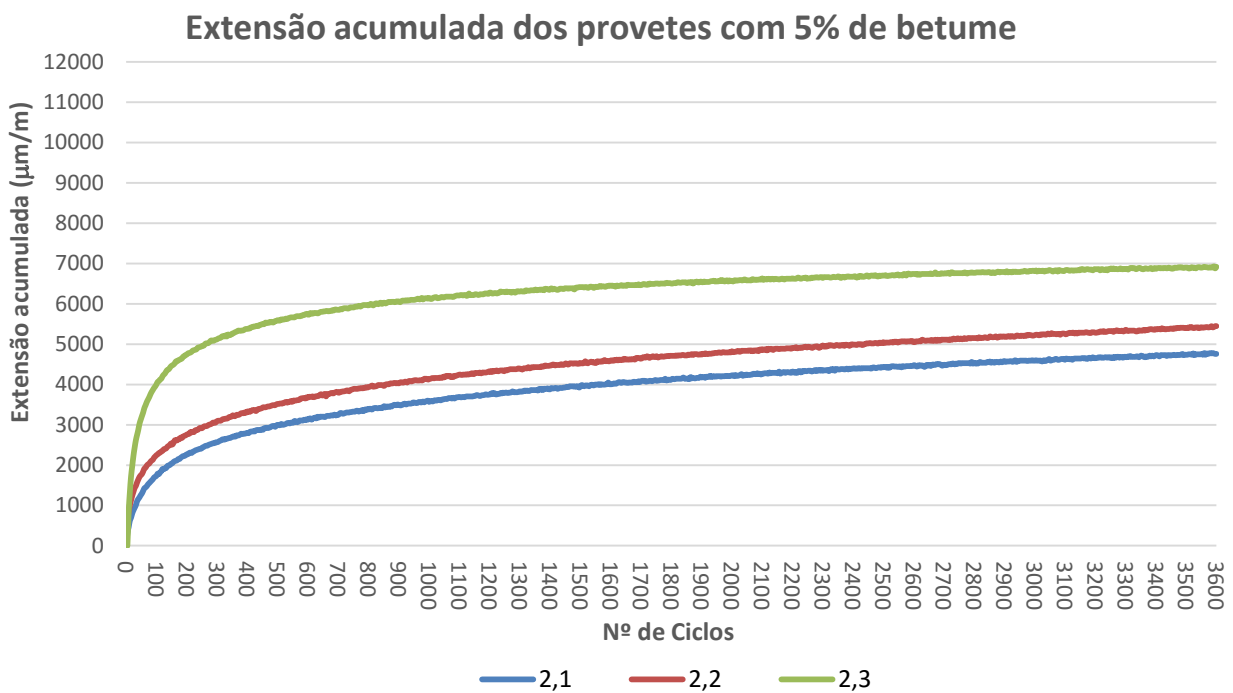


Figura 3-30- Variação da extensão vertical acumulada dos provetes com 5% de betume a 40°C

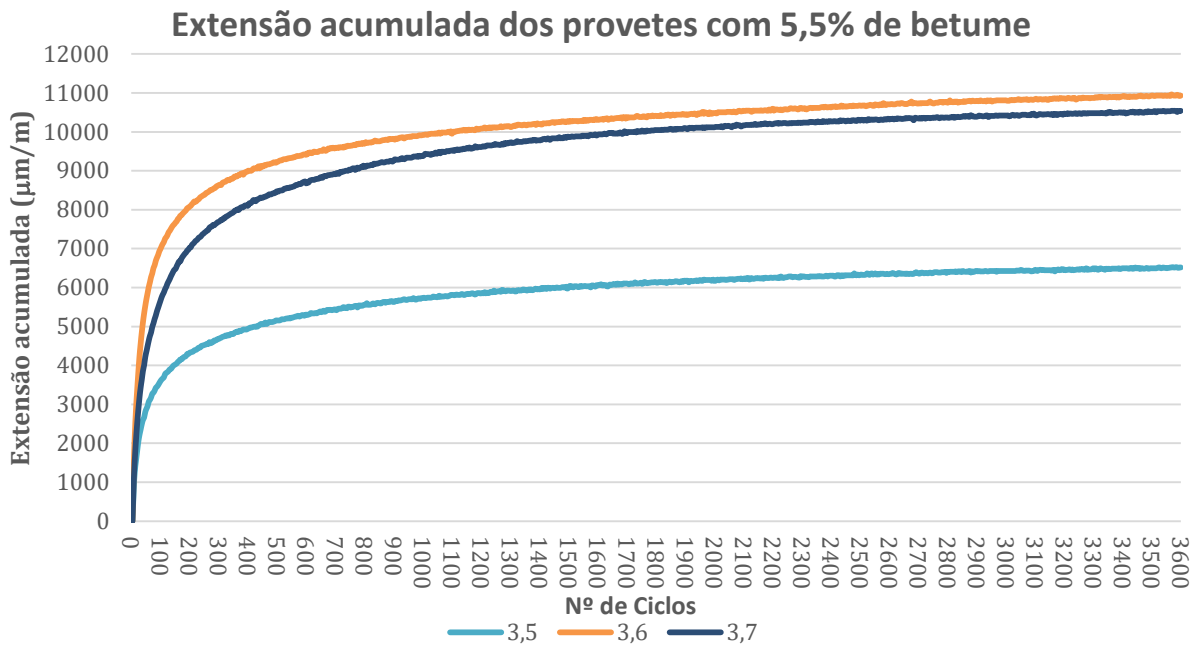


Figura 3-31-Variação da extensão vertical acumulada dos provetes com 5,5% de betume a 40°C

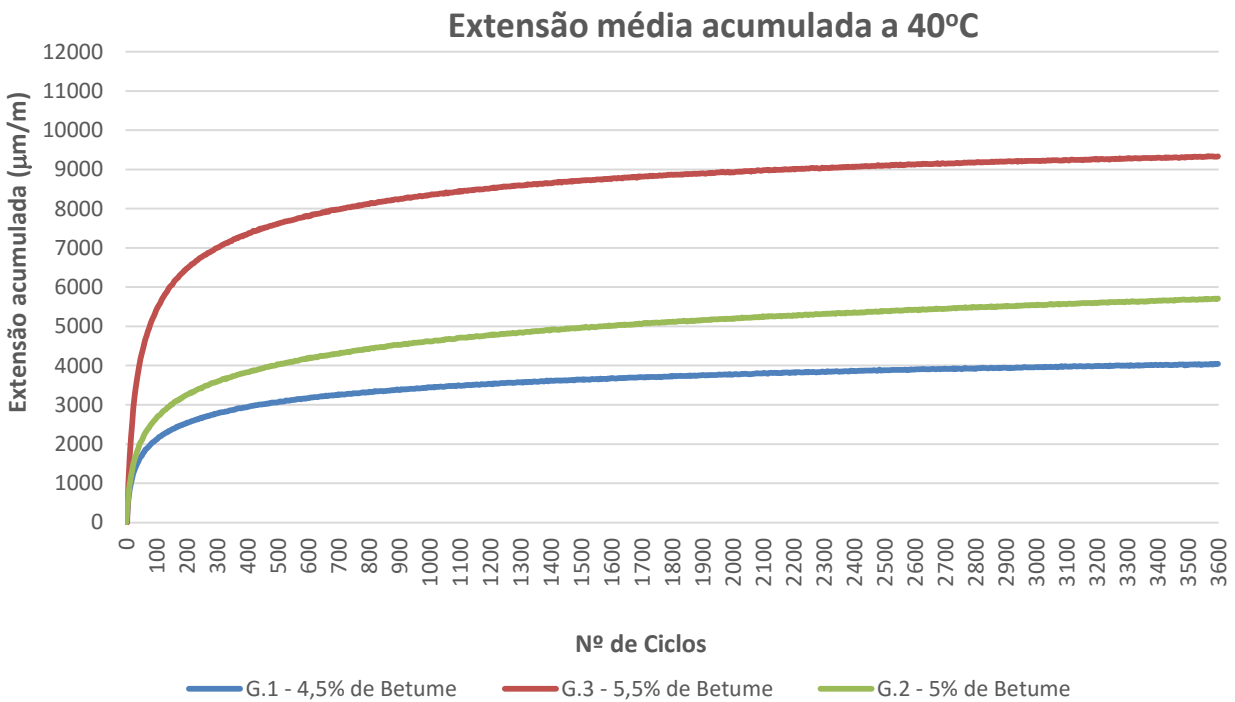


Figura 3-32- Variação da extensão média acumulada para as diferentes percentagens de betume, a 40°C

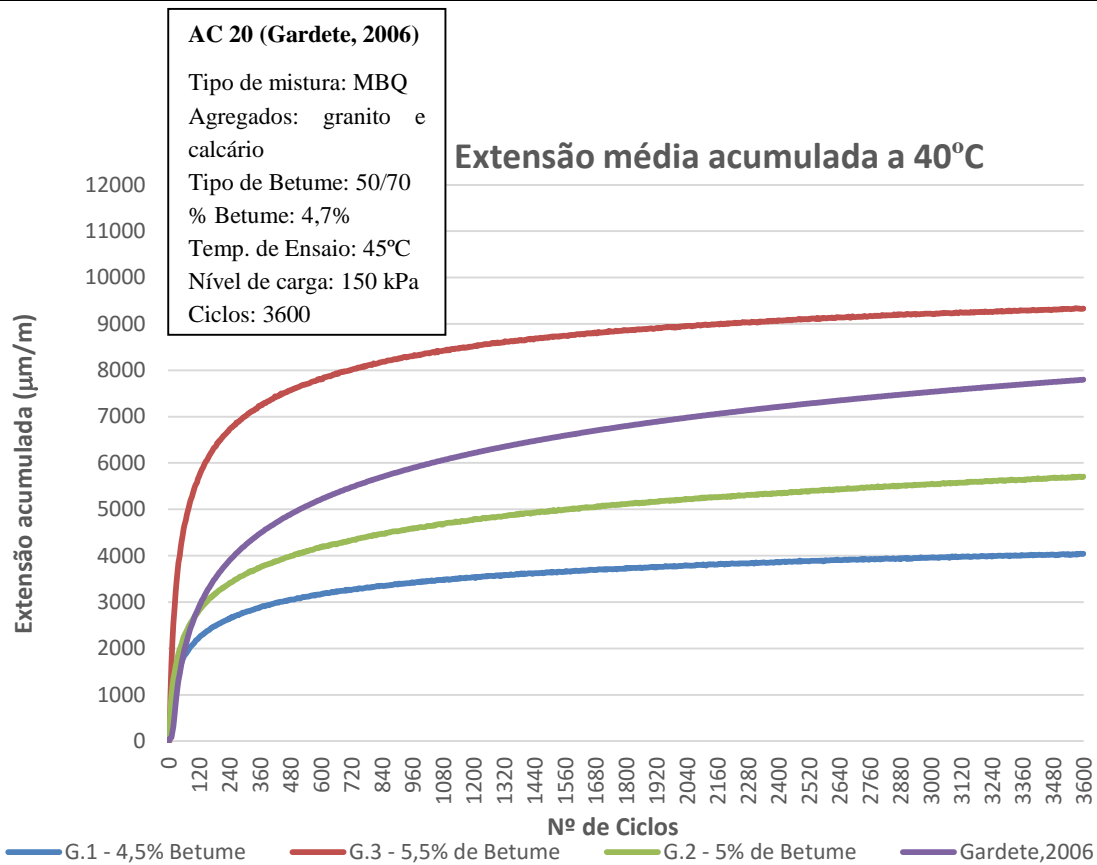


Figura 3-33-Gráfico de comparação da extensão média acumulada dos diversos grupos a 40°C, com uma mistura betuminosa quente

Verifica-se que a deformação aumenta à medida que a percentagem de betume aumenta. Apesar de os resultados não serem diretamente comparáveis com os obtidos por Gardete (2006) para misturas a quente, porquanto as condições de ensaio naquele caso foram um pouco mais gravosas, verifica-se que a extensão média acumulada obtidas para o grupo 3 de MBT (5,5% de betume: G.3) apresenta valores da deformação superiores aos obtidos para a mistura a quente usada para comparação, com 4,7% de betume 50/70. Para o grupo 2 (5% de betume: G.2) e para o grupo 1 (4,5% de betume: G.1) da MBT as deformações são menores que as medidas para a mistura a quente tomada como termo de comparação. Pode, portanto, afirmar-se que o grupo 2, o qual tem uma percentagem de betume (de 5%) muito próxima da utilizada na mistura a quente com 50/70 (4,7%), apresenta um comportamento à deformação permanente similar e tendencialmente melhor que o da mistura a quente. No Quadro 3.12 e na Figura 3.34 apresenta-se uma análise complementar em termos de deformação permanente total sofrida pelos provete em função da percentagem em betume.

Quadro 3.12- Resultado do ensaio da deformação permanente a 40°C para os diversos provetes e resultado da deformação média em função da percentagem de betume

Provete	% betume	Deformação (mm)	Média (mm)
1.1	4,5	0,2843	0,241725
1.2	4,5	0,193	
1.3	4,5	0,2268	
1.4	4,5	0,2628	
2.1	5	0,2768	0,338733
2.2	5	0,3243	
2.3	5	0,4151	
3.5	5,5	0,391	0,559767
3.6	5,5	0,6559	
3.7	5,5	0,6324	

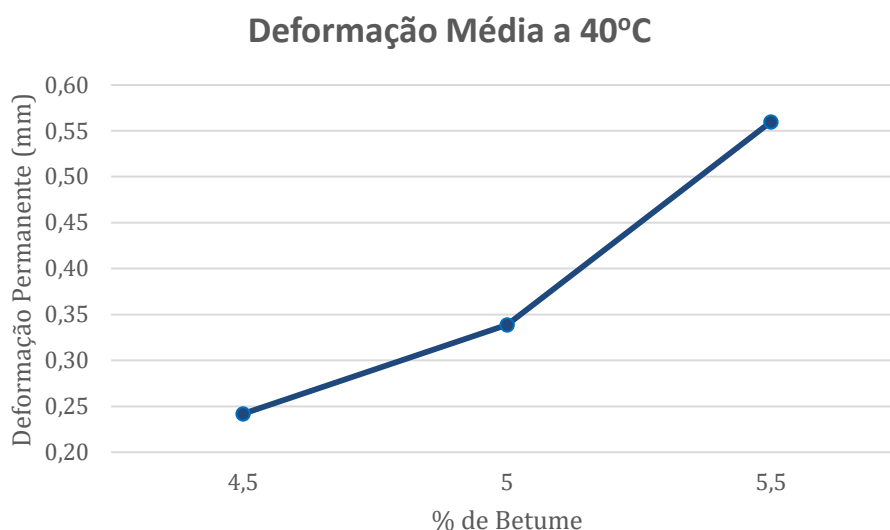


Figura 3-34- Variação da deformação permanente média a 40°C com a percentagem de betume, por grupo

Os resultados obtidos para a deformação permanente mostram que esta varia com a percentagem de betume na mistura, observando-se que com o aumento da percentagem de betume a deformação permanente aumenta também, verificando-se que a evolução dos valores está de acordo com o comportamento esperado.

Sendo a temperatura de ensaio um parâmetro que influencia a resistência à deformação permanente, ensaiaram-se dois grupos de provetes com diferentes percentagens de betume, 4,5 e 5,0% de betume, a uma temperatura de 60°C. Os resultados obtidos apresentam-se graficamente nas figuras 3.35 e 3.36 e o seu resultado em valor médio na Figura 3.37.

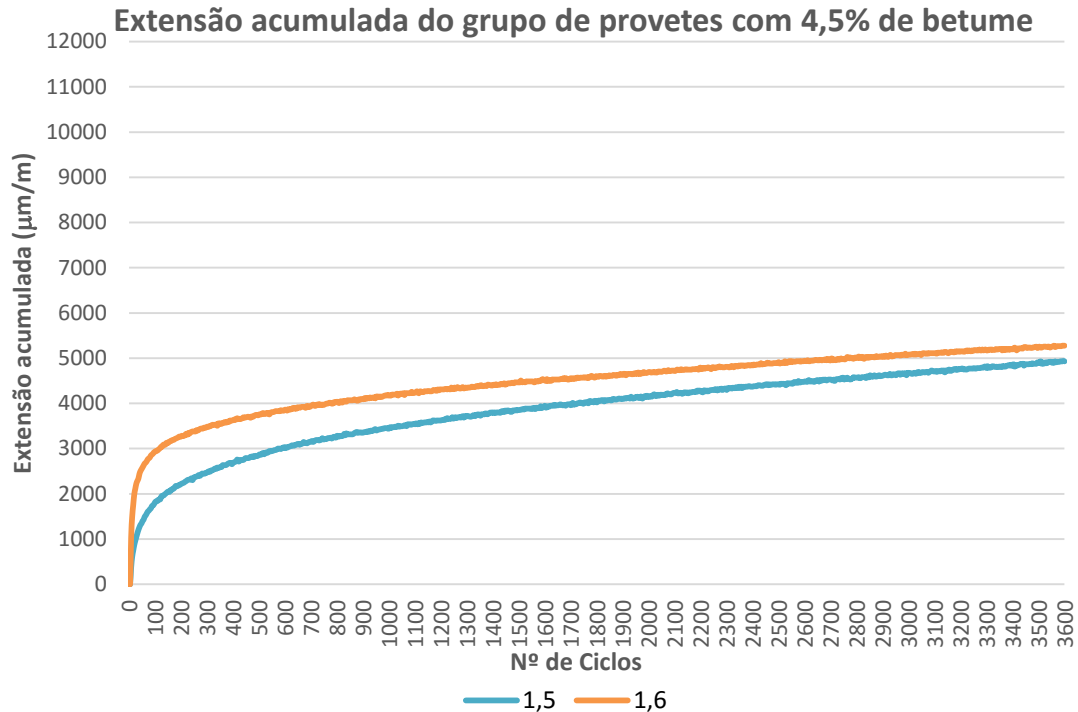


Figura 3-35-Variação da extensão vertical acumulada dos provetes com 4,5% de betume a 60°C

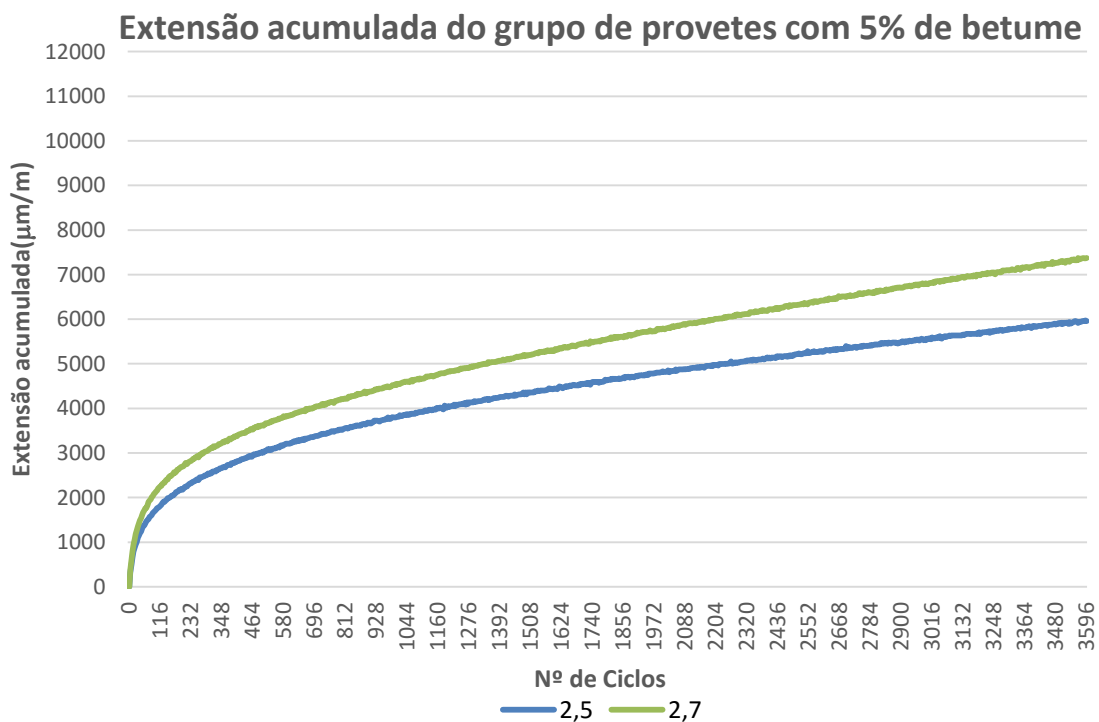


Figura 3-36- Variação da extensão vertical acumulada dos provetes com 5% de betume a 60°C

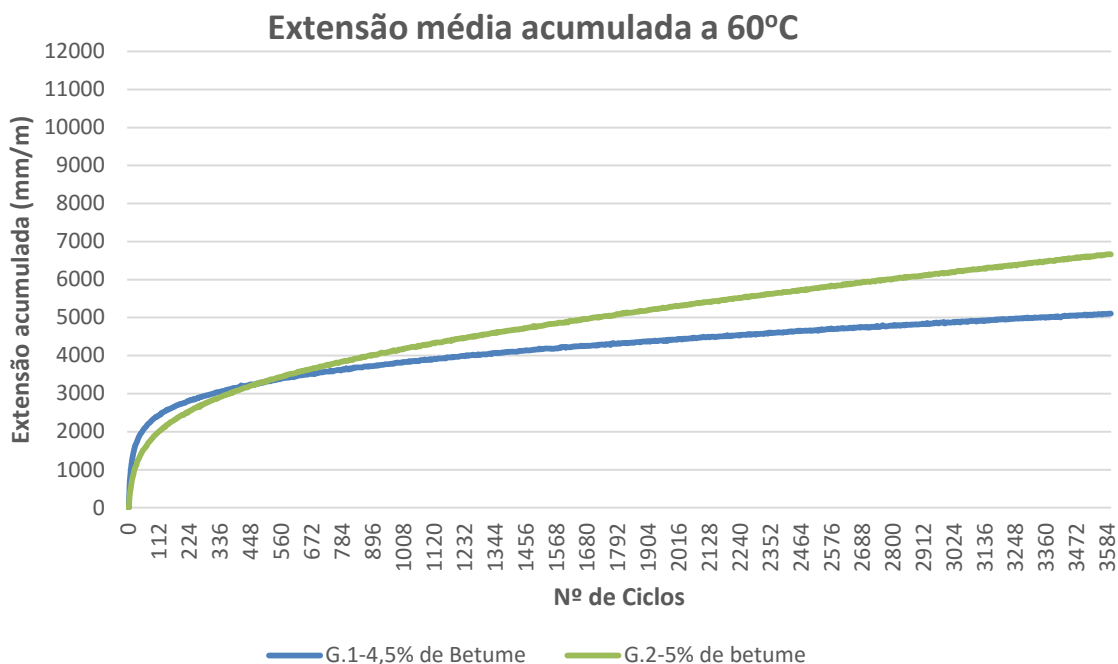


Figura 3-37- Variação da extensão média acumulada para as diferentes percentagens de betume, a 60°C

Como é possível observar, tal como acontecia a 40°C, à temperatura de 60°C a deformação permanente aumenta com o aumento da percentagem em betume. Esta análise pode ser confirmada quantitativamente através da magnitude da deformação permanente que os provetes sofreram, como se apresenta no Quadro 3.13 e nas figuras 3.38 e 3.39.

Quadro 3.13- Resultado do ensaio da deformação permanente a 60°C para os diversos provetes e resultado da deformação média em função da percentagem de betume

Provete	%betume	Deformação (mm)	Média (mm)
1.5	4.5	0,2957	0,30615
1.6	4.5	0,3166	
2.5	5	0,3573	0,3999
2.7	5	0,4425	

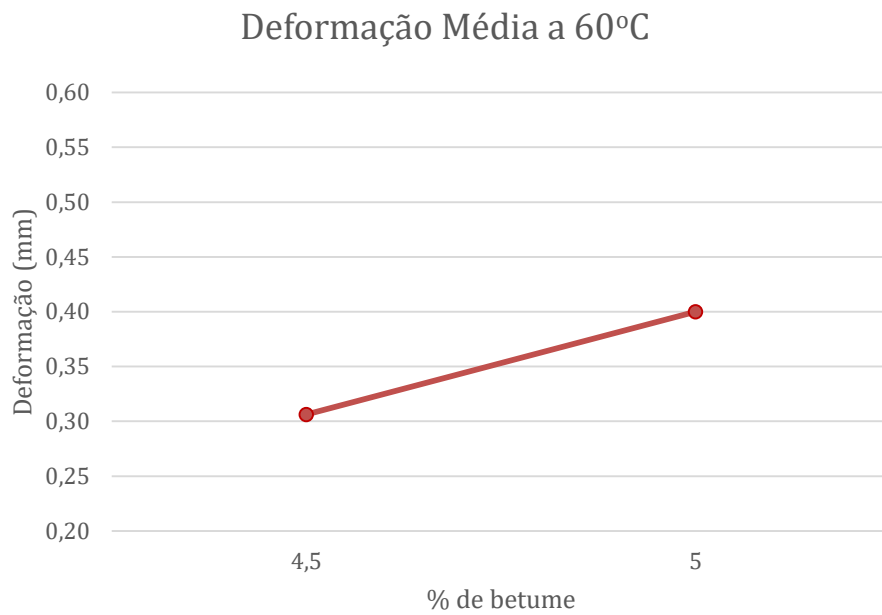


Figura 3-38- Variação da deformação permanente média a 60°C com a percentagem de betume, por grupo

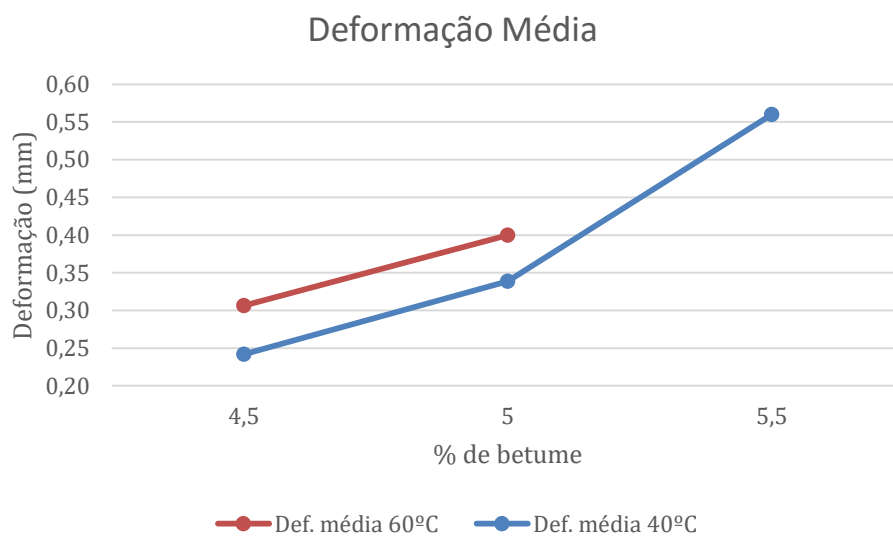


Figura 3-39- Variação da deformação permanente média a 40°C e 60°C com a percentagem de betume, por grupo

Como é possível observar para uma percentagem de betume de 4,5%, os provetes ensaiados a 60°C deformaram-se mais que os ensaiados a 40°C como seria de esperar, dado que o betume tende a tornar-se mais deformável. Também para uma percentagem de betume de 5%, o grupo de provetes deformou-se menos a 40°C que os ensaiados a 60°C. Este comportamento era o esperado tendo em conta a redução da viscosidade do betume que tende a ocorrer com o aumento da temperatura.

Segundo a EN 12697-25, parâmetro f_c , isto é, a taxa de deformação, traduz o acréscimo de extensão acumulada no provete por cada ciclo de carga aplicado. Para o cálculo do valor de f_c , toma-se a parcela do ensaio na qual o provete tem uma deformação quase linear com o número de carregamentos, sendo o parâmetro f_c o declive da reta. O indicador f_c é igual à divisão da diferença da extensão acumulada entre os ciclos n e 3600 pela diferença entre n e 3600, representando n o número do ciclo a partir do qual se considera uma evolução quase linear da curva deformação – número de ciclos. Nos quadros 3.14 e 3.15 apresentam-se os valores obtidos para o parâmetro f_c a 40 e 60°C, e nas figuras 3.40 e 3.41 a ilustração gráfica da variação do parâmetro f_c em função da percentagem de betume. Na Figura 3.42 apresenta-se a variação do parâmetro f_c em função da percentagem de betume e da temperatura de ensaio.

Quadro 3.14- Resultados do parâmetro f_c ($\mu\text{m}/\text{ciclo}$) obtido nos ensaios de deformação permanente a 40°C

Provete	% betume	f_c ($\mu\text{m}/\text{ciclo}$)	f_c médio ($\mu\text{m}/\text{ciclo}$)
1,1	4,5	0,219061	0,220995
1,2	4,5	0,20203	
1,3	4,5	0,191859	
1,4	4,5	0,271028	
2,1	5	0,431079	0,399463
2,2	5	0,455019	
2,3	5	0,312291	
3,5	5,5	0,35304	0,444714
3,6	5,5	0,460449	
3,7	5,5	0,520654	

Quadro 3.15- Resultados do parâmetro f_c ($\mu\text{m}/\text{ciclo}$) obtido nos ensaios de deformação permanente a 60°C

Provete	% betume	f_c ($\mu\text{m}/\text{ciclo}$)	f_c médio ($\mu\text{m}/\text{ciclo}$)
1.5	4,5	0,590474	0,517063
1.6	4,5	0,443653	
2.5	5	0,88605	1,018627
2.7	5	1,151204	

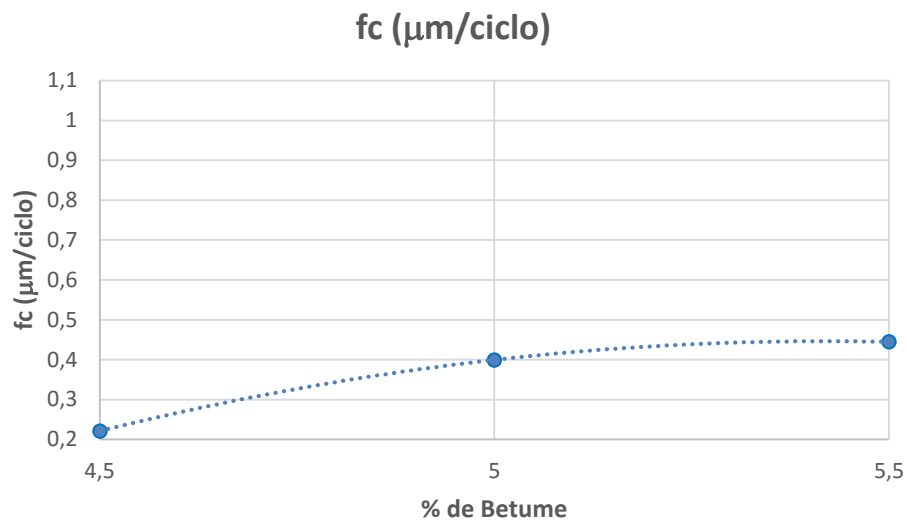


Figura 3-40-Variação do parâmetro f_c a 40°C em função da percentagem de betume

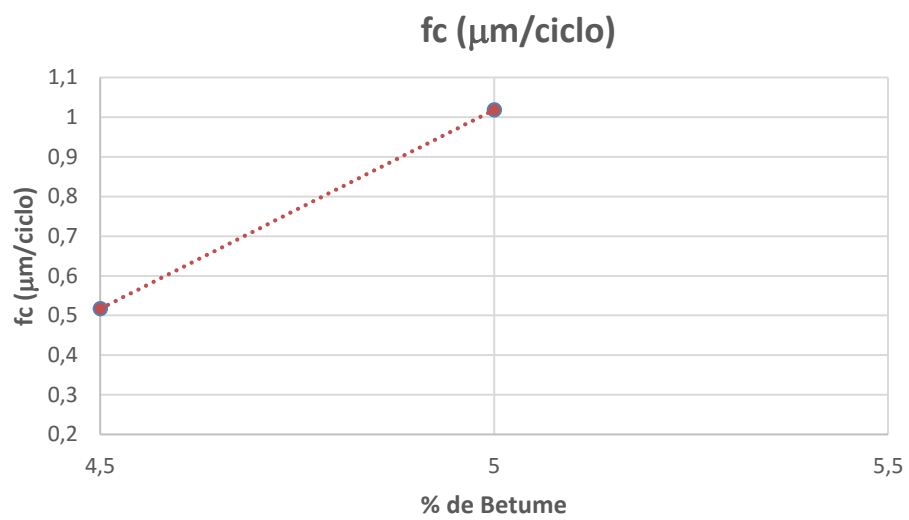


Figura 3-41-Variação do parâmetro f_c a 60°C em função da percentagem de betume

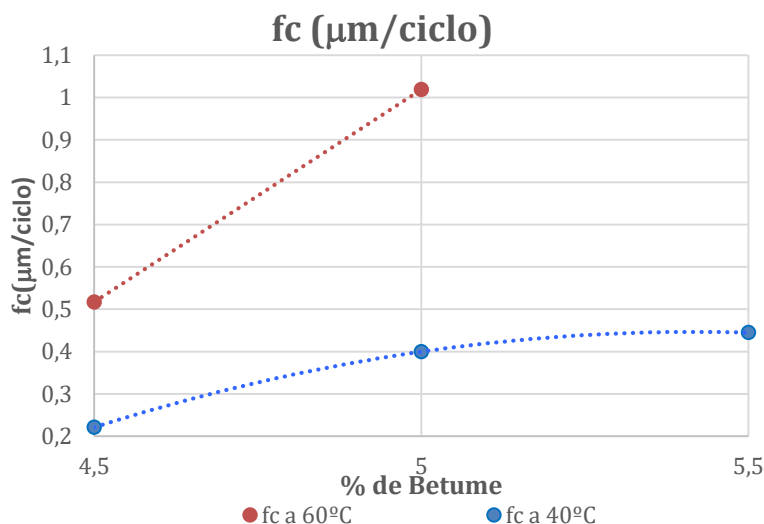


Figura 3-42- Variação do parâmetro f_c médio a 40°C e 60°C com a percentagem de betume, por grupo

Na Figura 3.42 é possível observar que para os provetes ensaiados a temperatura mais elevada a taxa de deformação, f_c , é maior que a medida para provetes de idêntica composição mas ensaiados a menor temperatura. Aquele parâmetro também é mais elevado para percentagens de betume mais altas.

Segundo a EN 12697-25 pode determinar-se também o parâmetro ϵ_n , isto é, a extensão acumulada no provete, em percentagem, após a aplicação de 3600 ciclos. O valor de ϵ_n obtém-se pela divisão entre a deformação total no provete e a altura do provete no início do ensaio (h_0), traduzida em percentagem. Nos quadros 3.16 e 3.17 encontram-se os valores obtidos para o parâmetro ϵ_n a 40 e 60°C, sendo estes resultados representados graficamente em valor médio nas figuras 3.43 e 3.44. Na Figura 3.45 representa-se a variação do parâmetro ϵ_n em função da percentagem de betume e da temperatura de ensaio.

Quadro 3.16- Resultados do parâmetro ϵ_n (%) obtido nos ensaios de deformação permanente a 40°C para os diversos provetes

Provete	% betume	Deformação (mm)	h ₀ (mm)	ϵ_n (%)	ϵ_n médio (%)
1.1	4,5	0,2844	59,40	0,4788	0,4048
1.2	4,5	0,193	58,10	0,3322	
1.3	4,5	0,2268	59,00	0,3844	
1.4	4,5	0,2628	62,00	0,4239	
2.1	5	0,2768	59,25	0,4672	0,5635
2.2	5	0,3243	59,55	0,5446	
2.3	5	0,4151	61,15	0,6788	
3.5	5,5	0,3910	60,90	0,6420	0,9290
3.6	5,5	0,6559	59,50	1,1024	
3.7	5,5	0,6324	60,65	1,0427	

Quadro 3.17- Resultados do parâmetro ϵ_n (%) obtido nos do ensaio de deformação permanente a 60°C para os diversos provetes

Provete	% betume	h ₀ -h _n	h ₀	ϵ_n (%)	ϵ_n médio (%)
1.5	4,5	0,2957	58,23	0,5079	0,5221
1.6	4,5	0,3166	59,03	0,5364	
2.5	5	0,3573	58,93	0,6064	0,6718
2.7	5	0,4425	60,03	0,7372	

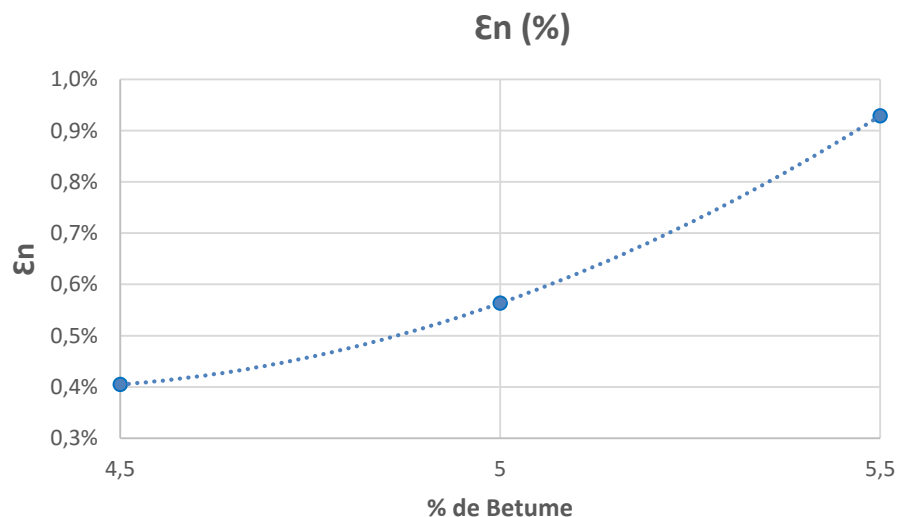


Figura 3-43-Variação do parâmetro ϵ_n médio a 40°C em função da percentagem de betume

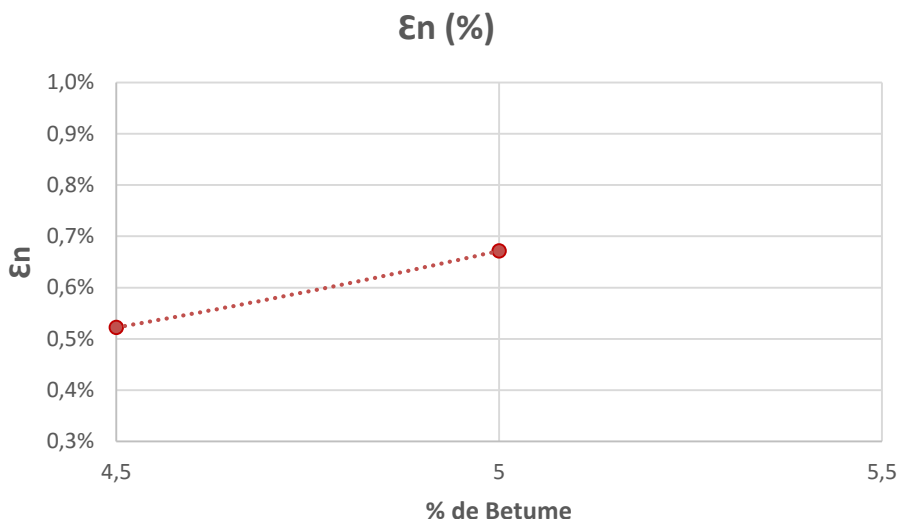


Figura 3-44-Variação do parâmetro ϵ_n médio a 60°C em função da porcentagem de betume

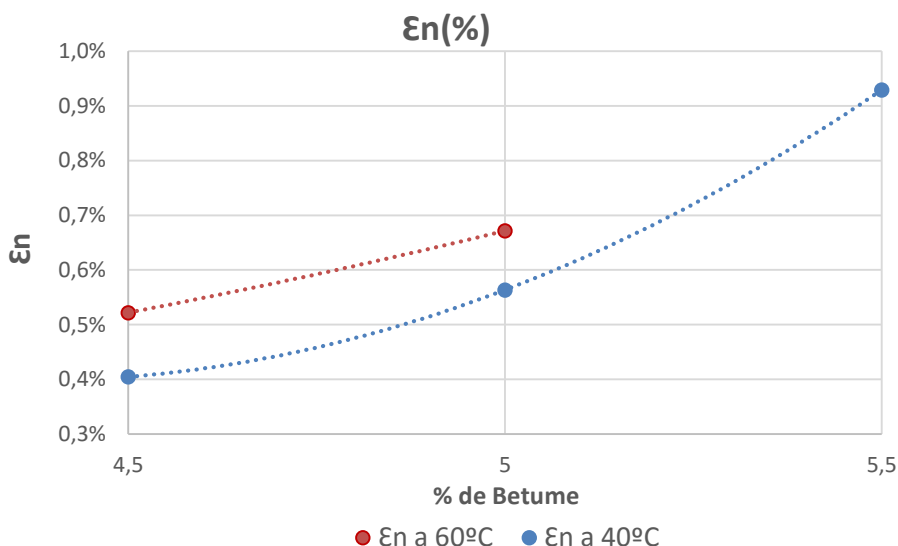


Figura 3-45- Variação do parâmetro ϵ_n médio a 40°C e 60°C com a porcentagem de betume, por grupo

Após análise comparativa dos resultados obtidos para o parâmetro ϵ_n (Figura 3.45), concluiu-se que para os provetes ensaiados a 40°C e 60°C tiveram um comportamento esperado, observando-se uma maior porcentagem de deformação nos provetes, com o aumento da porcentagem de betume.

As características dos provetes utilizados nos ensaios de deformação permanente encontram-se nos quadros I.8 e I.9 do Apêndice I.

3.6.8 Módulo de Resiliência (EN 12697-26)

O ensaio para o estudo do Módulo de Resiliência tem como objetivo estudar a resposta de uma mistura quando submetida a um determinado estado de tensão. O ensaio foi realizado de acordo com a EN 12697-26. Na Figura 3.46 é mostrado o suporte do provete utilizado na medição do módulo de resiliência.



Figura 3-46-Suporte utilizado para a determinação do módulo de resiliência à direita e esquema de montagem de ensaio à esquerda (adaptado de IPC global, 2016)

O procedimento de ensaio consiste na colocação dos provetes à temperatura de ensaio (20°C, no caso em estudo), colocando-os durante 4 horas na câmara climática. Quando os provetes atingem a temperatura especificada, inicia-se o ensaio após o ajuste dos LVDT (transdutores de deslocamento). A primeira fase do ensaio consiste na aplicação de um pré-carregamento para que os elementos da estrutura de carregamento possam ficar convenientemente ajustados. Depois, dá-se início ao ensaio propriamente dito, o qual consiste na aplicação de impulsos de carga. Os ensaios são realizados com controlo de força, de modo a que a deformação do diâmetro horizontal do provete seja da ordem de 0,005% do diâmetro, ou seja, $5 \pm 2 \mu\text{m}$. No caso em estudo utilizou-se um impulso de carga com um tempo de subida de carga da ordem de 60 ms e um tempo de repetição de carregamento de 3 s. Os provetes são carregados na direção do diâmetro vertical, sendo depois rodados 90° e ensaiados de novo para verificar se o provete sofreu danos no primeiro ensaio. Na Figura 3.47 apresenta-se um exemplo de relatório realizado pelo *software* de ensaio. Os resultados obtidos são apresentados no Quadro 3.18 e na Figura 3.48. Verificou-se uma assinalável dispersão dos resultados, o que tende a acontecer quando se determinam módulos de resiliência em ensaios de compressão diametral utilizando a estrutura de suporte de provetes disponível.

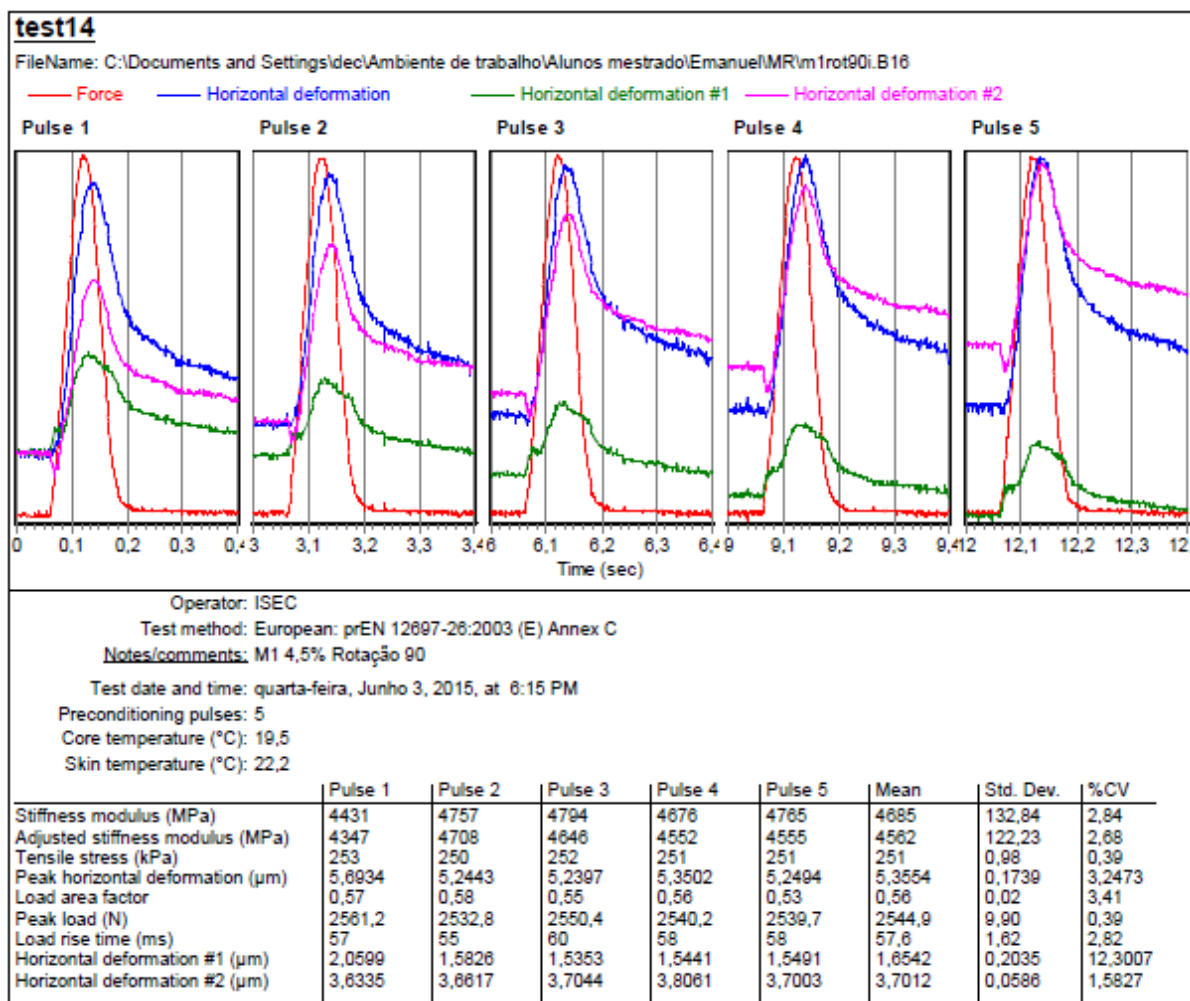


Figura 3-47- Exemplo de relatório do ensaio de medição do Módulo de Resiliência de um provete

Quadro3.18- Resultados obtidos no ensaio de determinação do módulo de resiliência

Provetes	Orientação		Média (MPa)	Média por grupo (MPa)	Coef. de Variação (%)	%betume
	0º	90º				
M1	4911	4562	4736,5	5570	13,1	4,50%
M3	7087	4676	5881,5			
M4	5192	6991	6091,5			
M5	3395	3475	3435	4037	19,4	5,00%
M6	3924	3582	3753			
M8	4991	4857	4924			
M9	3331	4187	3759	3912	5,5	5,50%
M10	4164	3967	4065,5			

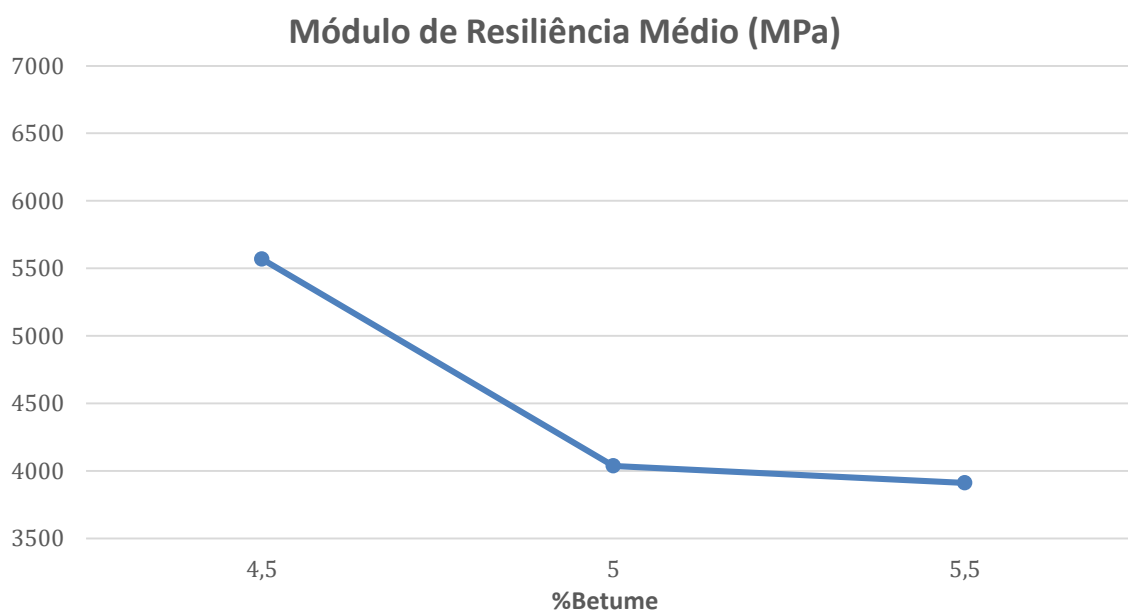


Figura 3-48-Variação do módulo de resiliência em função da percentagem de betume

Tal como acontece de uma forma geral com as misturas betuminosas, o aumento da percentagem de betume conduz a uma diminuição do módulo de resiliência. Comparativamente com as misturas convencionais que têm um módulo de resiliência de cerca de 4000 a 6000 MPa, para provetes ensaiados a 20°C e frequências de carregamento na ordem dos 2Hz (segundo Dantas Neto et al, 2001), este valor encontra-se na gama de valores obtidos para a MBT. Na Figura 3.49 é representada uma análise comparativa do módulo de resiliência da mistura em estudo com duas MBQ (Gardete, 2016; Martinho, 2013) e algumas MBT com aditivos incorporados na fase de produção (Martinho, 2013).

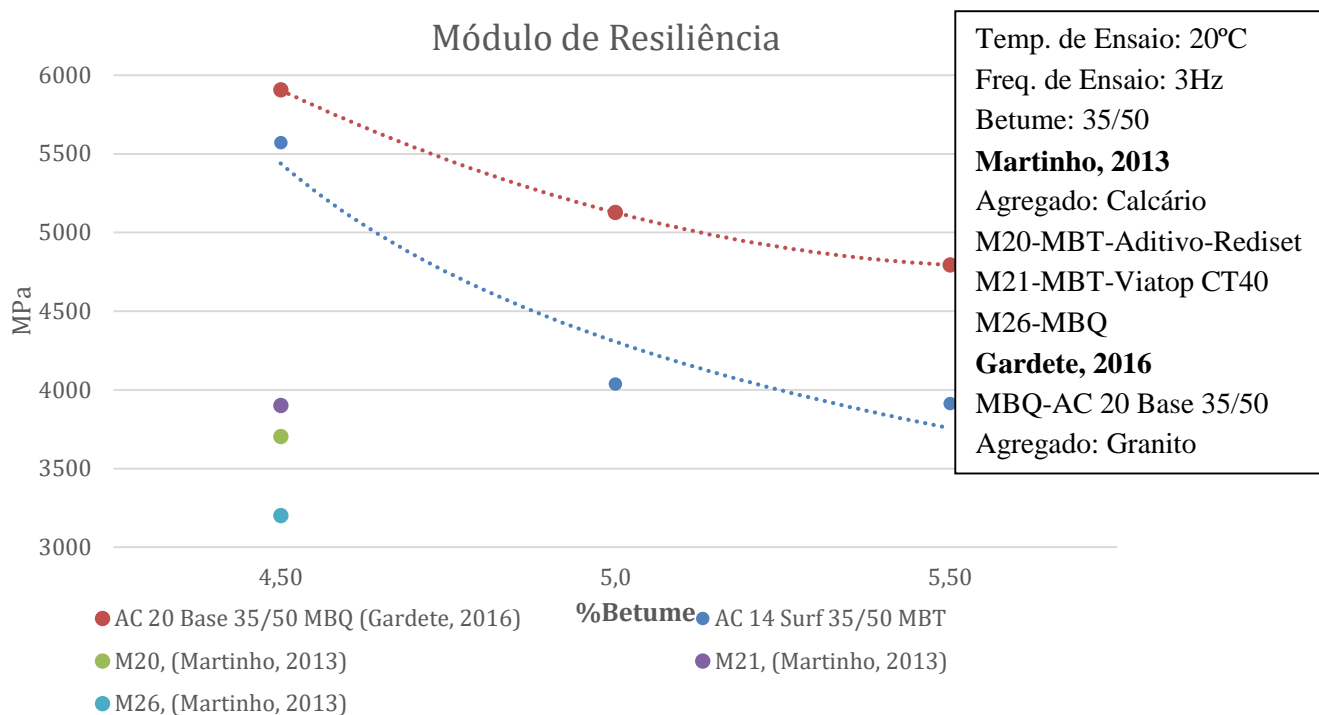


Figura 3-49- Comparação da variação do módulo de resiliência em função da percentagem de betume de uma MBT com outras MBT e MBQ

Os resultados obtidos para o módulo de resiliência da MBT em estudo são inferiores aos medidos para a mistura a quente, do tipo AC 20 base 35/50 estudado por Gardete (2016). No entanto, os módulos obtidos para a MBT (AC 14 surf 35/50) do presente estudo são superiores aos obtidos por Martinho (2013), quer para misturas temperadas quer para a MBQ, do tipo AC 20 bin que analisou. Note-se que as misturas do tipo AC 20 base/bin 35/50, tendem a apresentar módulos superiores às AC 14 surf 35/50, porquanto o seu esqueleto de agregados é mais grosseiro. Pode, portanto, concluir-se que, dentro da gama de condições de ensaio utilizadas, a mistura betuminosa temperada em estudo apresenta módulos de rigidez adequados. As características dos provetes utilizados nos ensaios encontram-se no Quadro I.7 do Apêndice I.

Após a análise dos resultados obtidos compararam-se os resultados anteriores com os calculados pelas expressões de previsão dos métodos da Shell e da Universidade de Nottingham, sendo os resultados obtidos apresentados no quadro 3.19.

Quadro3.19- Resultados obtidos pelas expressões de previsão dos métodos da Shell e da Universidade de Nottingham a 20°C

% de Betume	Temperatura de Amolecimento (°C)	Porosidade (%)	Velocidade (km/h)	Método da Shell (MPa)	Método da Univ. de Nottingham (MPa)
4,5	51	9,0	8,1	4215	4050
5	51	5,1	8,1	5173	6273
5,5	51	5,6	8,1	4449	4868

Comparando aos valores obtidos nos ensaios com os calculados pelos métodos da Shell e da Universidade de Nottingham, observa-se que não existe uma correspondência direta. Enquanto nos ensaios o aumento da percentagem de betume (e a correspondente redução da porosidade) conduziu a uma redução do módulo de resiliência, as expressões de previsão conduzem a um máximo do módulo para a percentagem de 5% de betume.

Na figura 3.50 representa-se uma comparação entre os diferentes resultados obtidos e métodos de cálculo utilizados em função da percentagem de betume utilizada em cada mistura.

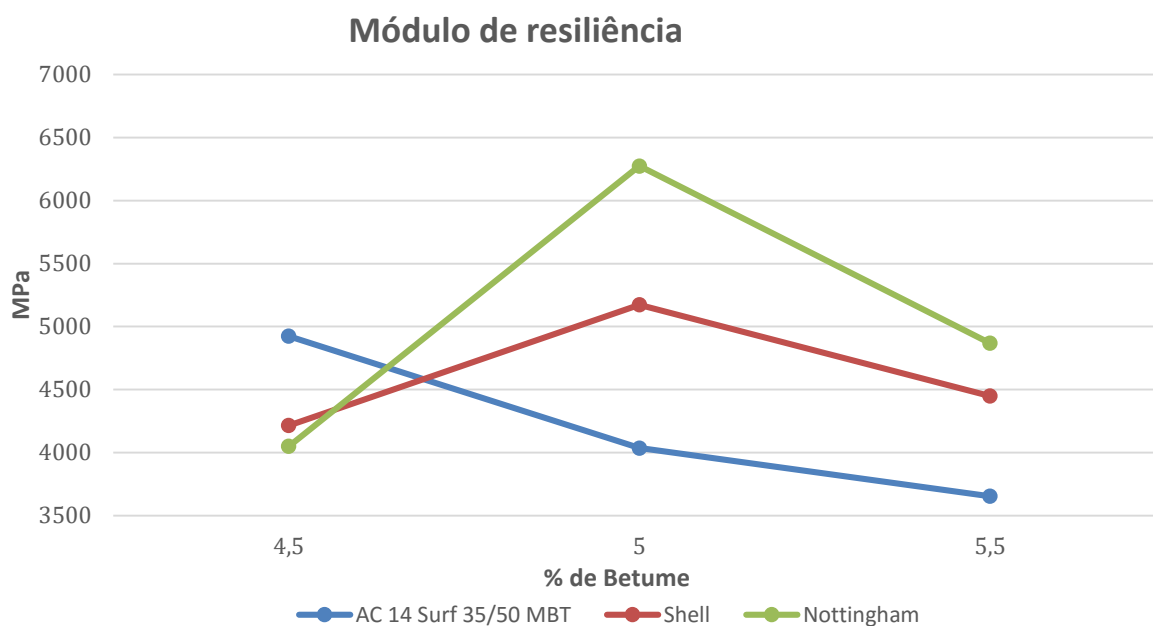


Figura 3-50- Comparação da variação do módulo de resiliência em função da percentagem de betume e do método usado para a sua determinação

3.7 Considerações Finais

Tendo em conta os resultados obtidos no estudo das diversas misturas betuminosas, conclui-se que a MBT produzida com betume de refinaria é comparável às misturas betuminosas a quente convencionais e, por isso, pode constituir uma boa alternativa.

Da interpretação dos resultados obtidos para a caracterização volumétrica, pode-se concluir que a mistura de um modo geral cumpre as especificações existentes para misturas betuminosas a quente.

Relativamente aos resultados obtidos para a caracterização mecânica a mistura teve um comportamento dentro do espectável, quer no ensaio de deformação permanente quer no módulo de resiliência. De um modo geral, verificou-se um bom desempenho no ensaio de deformação permanente e de sensibilidade à água da mistura temperada, quando comparada com misturas a quente.

No entanto, os ensaios realizados no presente documento não são suficientes para evidenciar uma melhor aptidão em serviço quando comparadas com as misturas a quente. Ainda assim, obteve-se resultados encorajadores, como se observou na deformação permanente, o que representa uma alternativa promissora relativamente à produção de misturas temperadas com utilização de aditivos para baixar a temperatura de fabrico e compactação.

4 CONCLUSÕES GERAIS E TRABALHOS FUTUROS

4.1 Síntese do trabalho e conclusões gerais

As misturas betuminosas temperadas nos dias de hoje podem ser produzidas com base em diversas tecnologias disponíveis para a sua fabricação. Um dos principais objetivos da utilização de misturas betuminosas temperadas é a redução de emissões, constituindo uma solução ambientalmente mais correta que as misturas betuminosas a quente tradicionais. Além disso, o desenvolvimento de MBT tem sido contínuo, tentando estabelecer as suas propriedades num nível adequado para que constituam uma alternativa às misturas betuminosas tradicionais.

Com a realização do presente trabalho pretende-se contribuir para o conhecimento e desenvolvimento das misturas betuminosas temperadas, de modo a incentivar a sua aplicação na construção rodoviária, tirando partido das características que apresentam, ao mesmo tempo que se reduz a pegada ambiental associada.

Ao longo da dissertação foram abordados diversos aspetos relacionados com as misturas temperadas, tais como as técnicas de produção, os aditivos utilizados e as suas características. Os trabalhos experimentais desenvolvidos foram direcionados para o estudo da aplicação de um betão betuminoso temperado para camadas de desgaste, do tipo AC 14 surf 35/50.

A revisão da literatura realizada permitiu sintetizar algumas ideias-chave relativas à aplicação de misturas betuminosas temperadas:

- As MBT podem geralmente ser produzidas com agregados dos mesmos tipos que os utilizados para as MBQ;
- Exceto quando se utilizam técnicas de betume espuma, as MBT podem ser produzidas, espalhadas e compactadas com os equipamentos habitualmente utilizados para as MBQ;
- As reduções de temperatura que é possível atingir nas diversas técnicas usadas para a produção de MBT são significativas, da ordem de 30°C;
- Os grandes benefícios das MBT face às MBQ estão associados a um menor consumo energético e, conseqüentemente, a uma menor emissão de gases com efeito de estufa;
- As desvantagens das MBT são associadas aos custos de aquisição dos aditivos e equipamentos a adquirir, assim como a menores desempenhos mecânicos face às MBQ em relação à sensibilidade à água ou à resistência à deformação permanente.

A mistura betuminosa temperada estudada no presente trabalho consistiu na utilização de um betume temperado, aditivado em refinaria. A primeira fase do trabalho experimental consistiu em verificar algumas propriedades do betume aditivado, nomeadamente a sua temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola e a sua penetração a 25°C. Com base nestes dois parâmetros, verificou-se que o ligante poderia ser classificado na classe 35/50. Determinou-se ainda a densidade do betume a 25°C, tendo-se obtido o valor de 1,04.

Depois procedeu-se ao estudo de formulação da mistura com diferentes percentagens de betume recorrendo ao método de Marshall, tendo-se determinado a percentagem ótima de betume de 5% a utilizar na mistura. De forma a poder comparar os resultados com uma mistura de referência produzida a quente, utilizaram-se agregados e uma composição semelhantes aos estudados numa dissertação anterior (Silva, 2014).

Na segunda parte do trabalho, avaliaram-se algumas propriedades caracterizadoras do desempenho mecânico da MBT, designadamente a sensibilidade à água, a resistência à deformação permanente e módulo de resiliência. Após a realização dos ensaios de avaliação de desempenho foi possível concluir o seguinte:

- A MBT apresentou um bom desempenho em termos de sensibilidade à água, tendo-se obtido o valor de 92% de conservação da resistência à tração, o que representa um resultado bastante bom, semelhante aos obtidos para as MBQ;
- Os módulos de resiliência a 20°C, medidos em ensaios de compressão diametral, com um tempo de carregamento de 60 ms, foram bastantes satisfatórios, tendo atingido valores médios de 5570 MPa para 4,5% de betume, 4037 MPa para 5% de betume e 3912 MPa para 5,5% de betume;
- A resistência à deformação permanente foi adequada e de acordo com o esperado, tendo-se observado uma resistência decrescente com o aumento da percentagem de betume na mistura e da temperatura de ensaio;
- As curvas de variação da deformação com o número de ciclos de carga, obtidas a 40 e 60°C, permitiram medir deformações permanentes médias de 0,24 mm a 40°C e 0,3 mm a 60°C, para 4,5% de betume, 0,34 mm a 40°C e 0,4 mm a 60°C, para 5% de betume, e 0,56 mm a 40°C, para 5,5% de betume;
- Os parâmetros fc e ϵn , os quais representam, respetivamente, a taxa de deformação por cada ciclo de carga na zona quase linear da curva deformação – número de ciclos, e a extensão que o provete sofre ao longo do ensaio, corroboraram a resistência relativa das várias composições da MBT, medida a diferentes temperaturas de ensaios;
- À temperatura de 40°C, obtiveram-se valores de fc de 0,221 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ para 4,5% de betume, 0,3995 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ para 5% de betume e 0,4447 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ para 5,5% de betume, enquanto que à temperatura de 60°C se determinaram os valores de 0,5171 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ para 4,5% de betume e de 1,0186 $\mu\text{m}/\text{ciclo}$ para 5% de betume;

-
- Para ϵ_n , à temperatura de 40°C, obtiveram-se os valores de 0,4048 % para 4,5% de betume, 0,5635% para 5% de betume e 0,929 % para 5,5% de betume, enquanto que para os ensaios realizados a 60°C se obtiveram-se os valores de 0,5221 % e 0,6718 % para 4,5% e 5% de betume, respetivamente;
 - A análise dos resultados de desempenho da MBT estudada permitiu concluir que a percentagem de betume e a temperatura de serviço/ensaio são fatores que influenciam consideravelmente a capacidade da mistura para resistir à deformação permanente, uma vez que se observou um acréscimo considerável da deformação permanente para um aumento de 20°C da temperatura, o mesmo ocorrendo para aumentos da percentagem de betume de 0,5%;
 - Para a MBT estudada, verificou-se que a deformação permanente sofrida pelos provetes atingiu mais do dobro, quando medida pelo parâmetro f_c , para temperaturas de ensaio de 60°C, comparativamente à temperatura de 40°C, e um aumento de cerca de 80% para um acréscimo de 0,5% de betume; o parâmetro ϵ_n aumentou cerca de 30% para um acréscimo de 20°C na temperatura de ensaio, sendo o aumento de cerca de 70% para um aumento de 0,5% de betume.

A MBT analisada no presente estudo foi produzida com betume aditivado em refinaria. Tratando-se de uma técnica ainda pouco divulgada, julga-se ser útil a comparação das propriedades obtidas com as de outras misturas analisados noutros estudos, quer MBQ quer MBT, as quais podem tomar-se como referência. Após a comparação dos resultados obtidos para a MBT em estudo com outros obtidos por diferentes autores foi possível concluir o seguinte:

- As propriedades volumétricas obtidas para a MBT, designadamente, a porosidade e o VMA, para percentagens típicas de betume de 4,5 e 5% foram semelhantes às MBQ de referência;
- A estabilidade Marshall da MBT avaliada foi ligeiramente superior à da MBQ de referência, o mesmo acontecendo com a deformação Marshall, resultando uma rigidez Marshall abaixo do limite de 3 kN/mm geralmente recomendado pelos cadernos de encargos;
- O desempenho da MBT em relação à sensibilidade à água foi superior ao da MBQ utilizada como referência;
- Embora não se dispondo de valores que possam ser utilizados diretamente como referência, verificou-se que a resistência à deformação permanente da MBT foi adequado, tendo em conta a evolução da deformação com o número de ciclos, e comparando de forma aproximada o seu desempenho com o obtido por Gardete (2006) em misturas betuminosas a quente;

- Em relação ao módulo de resiliência, obtiveram-se módulos menores que os módulos de rigidez medidos para uma MBQ que se tomou como referência (Gardete, 2006), mas superiores aos de outra MBQ produzida noutra estudo (Martinho, 2013);
- Os valores do módulo resiliente foram superiores aos módulos de rigidez de duas MBT estudadas por Martinho (2013), as quais incorporaram aditivos orgânicos e químicos.

Face aos resultados, pode concluir-se que a MBT produzida com betume de refinaria mostrou ter características que levam a antever um desempenho adequado. Obviamente, é necessário prosseguir os estudos para confirmar a bondade deste tipo de mistura para outras circunstâncias de solicitação e para uma gama mais alargada de composições.

O facto de não ser necessário juntar aditivos na fase de produção constitui uma vantagem adicional a considerar em conjunto com outras vantagens geralmente associadas à utilização de MBT.

4.2 Prosseguimento de Trabalhos Futuro

Tendo como principal objetivo o desenvolvimento das misturas temperadas, as MBT produzidas com betumes aditivados em refinaria devem ser ensaiadas de uma forma mais extensa, com um maior número de amostras em estudo e com a variação de um maior número de parâmetros. A realização de outro tipo de ensaios para análise do desempenho, designadamente o ensaio de pista de laboratório (wheel-tracking) para avaliar a resistência à deformação permanente e os ensaios de avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga deverão ser também realizados para caracterizar de forma mais ampla a utilização de betume temperado na produção de MBT.

Será ainda interessante a realização de trechos experimentais nos quais possam ser recolhidos provetes para ensaios de avaliação de desempenho em laboratório. Os referidos trechos podem ainda ser utilizados para observar o comportamento ao longo do tempo, de modo a comparar o desempenho de MBT produzidas com betume aditivado em refinaria, quer com MBT fabricadas com aditivos quer com MBQ, quando submetidas a condições reais de solicitação.

4.3 Considerações Finais

Finalmente, considera-se que os objetivos propostos inicialmente foram atingidos. Foi realizada uma revisão da literatura e foram realizados ensaios de caracterização laboratorial da MBT que se estudou. Além da síntese relativa à utilização das MBT que se fez, o autor desenvolveu um conjunto de competências associadas à realização de ensaios laboratoriais e à sua interpretação, ao mesmo tempo que contribui para o conhecimento de MBT produzidas com um betume inovador.

O presente documento deu um pequeno contributo para o desenvolvimento de uma visão mais sustentável da construção e conservação de pavimentos de vias de comunicação, contribuindo

para o estudo de uma MBT que alia a facilidade de produção e aplicação com a poupança de energia e a redução de emissões de gases com efeitos de estufa para a atmosfera.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, M. , 2012. “*Estudo do desempenho de materiais alternativos na pavimentação rodoviária- O caso das Misturas Betuminosas Temperadas*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Astec – Astec Industrie Companie Products, 2015
http://www.astecinc.com/index.php?option=com_content&view=article&id=117&Itemid=188>
- Budny, J., 2012. “*Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas*”. Dissertação de Mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Button, J. , Estakhri, C., Wimsatt, A.,2007. “*A Synthesis of Warm-Mix Asphalt. Texas Transportation Institute and Federal Highway Administration.*” Report 0-5597-1. Texas.
- Capitão, S.; Picado-Santos, L.; Martinho, F., 2012. “*Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt.*” Construction and Building Materials Vol.36. Elsevier. p. 1016-1024.
- Capitão, S.; Picado-Santos, L.; Martinho, F., 2013. “*Reabilitação de pavimentos- Misturas betuminosas temperadas com resíduos de base como possibilidade de reforço estrutural.*”
- Chowdhury, A., Button, J. ,2008. “*A review of warm mix asphalt*”. Texas A&M University System.
- Croteau, P., Tessier, B. ,2008. “*WMA Paving Technology: A road Builder’s Prespective*” Annual Conference of the Transportation Association of Canada.
- D’Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowsert, J., Harman, T., Jamshidi, M., Jones, W., Newcomb, D., Prowell, B., Sines, R.; Yeaton, B.,2008. Warm-Mix Asphalt: “*European Practice. Federal Highway Administration*”, U.S. DoT, AASHTO, NCHRP, Report no. FHWA PL-08-007, Alexandria.
- Dantas Neto, S.; Farias, M.; Leite, L.; Santos, C., 2001. “*Estudo da influência do tipo de ligante nas características mecânicas das misturas asfálticas.*” In: Reunião Anual de Pavimentação, 33, Florianópolis,2001,CD-ROM.

- EAPA, 2010. “*The use of warm mix asphalt – EAPA position paper*”. Brussels: European Asphalt Pavement Association.
- Ferreira, C., 2009. “*Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas*”. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Braga.
- Ferreira, C., J. Oliveira and H. Silva.,2009 “*Avaliação do desempenho de misturas betuminosas temperadas*”. XV CILA - Congresso Latino-Americano do Asfalto. Lisboa.
- FHWA, 2008. “*Warm Mix Asphalt Technologies and Research*”. Federal Highway Administration. U.S. DoT.
- Fitts, G.,2008. “*Warm Mix Asphalt: Experience in Texas.*” 32nd Annual Asphalt Conference, Asphalt Institute.
- Gardete, D.,2006.”*Comparação de Ensaio Laboratoriais para a caracterização de Misturas Betuminosas à deformação Permanente.*” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- Gardete, D.,2016.”*Contribuição para o estabelecimento duma mistura betuminosa adequada para o ciclo de vida através da definição na fase de formulação duma parametrização eficiente.*” Dissertação de Doutoramento, Universidade de Lisboa
- Prowell, B., Hurley, G.; 2005. “*Evaluation of SasobitR for use in Warm mix asphalt*”. National Center for Asphalt Technology, Report 05-06, Auburn University, Auburn.
- Hurley, G., Prowell, B. ,2008. “*Warm Mix Asphalt: Best Practices*”. National Asphalt Pavement Association. 53rd Annual Meeting.
- IPC-Global, 2016 <http://www.ipcglobal.com.au/bs-en-12697-25-2/>
- Jenkins K., 2000. “*Mix design considerations for cold and half-warm bituminous mixes with emphasis on foam bitumen*”. [PhD Thesis]. Stellenbosch: University of Stellenbosch, South Africa.
- Kristjansdottir, O., 2006. “*Warm Mix Asphalt for Cold Weather Paving*”. University of Washington. Master of Science in Civil Engineering, Washington,
- Larsen, O., Moen, O., Robertus, C., Koenders, B., 2004. “*WAM Foam Asphalt Production at Lower Operating Temperatures as an Environmental Friendly Alternative to HMA*”. Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobitume Conference, Book 1, Foundation Eurasphalt, Breukelen, The Netherlands, pp 641-650
- LEA-CO, 2015. http://www.lea-co.com/lea_co/rubrique.php?page=2&sous_rub=61&id=11
- Martinho, F. 2013. “*Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais – Caracterização e Validação.*” Dissertação de Doutoramento, Universidade de Lisboa
- Newcomb, D.,2007.”*An Introduction to Warm-mix Asphalt*”. National Asphalt Pavement Association.

-
- Nunes, T., 2010. “Marcação CE de Misturas Betuminosas: A experiencia Portuguesa.” Coimbra, ISEC.
- Nunes, T., Capitão, S., Picado-Santos, L., 2011. “*Estudo Sobre a Aplicação da Marcação CE em Misturas Betuminosas em Portugal*”, Atas do XVI CILA – Congresso Ibero-Latino Americano do Asfalto, Rio de Janeiro, Brasil.
- Nynas, 2009. “*Asfalto templado, semi-templado y frío: el caso a favor de la sostenibilidad*”. Nynas Bitumen Magazine: Performance, issue 1.
- NCHRP, 2011. “*Mix design practices for warm mix asphalt. National Cooperative Highway Research Program Report 691.*” Washington DC - USA : Transportation Research Board.
- Olard, F.; Romier, A., 2011. “*Low emissions and low energy asphalts for sustainable road construction: The European experience of LEA process*”. www.aapaq.org
- Prowell B., 2007. “*Warm Mix Asphalt*”. The international technology scanning program summary report.
- Ruhl, R., Liendemeier, B., 2006. “*Progress Report 2006 - The German Bitumen Forum*”. The Germany Bitumen Forum. Issue 2, Heurich Lanck GmbH, Germany.
- Silva, H.; Oliveira, J.; Ferreira, C.; Pereira, P., 2010. “*Assessment of the performance of warm mix asphalts in road pavements*”. International Journal of Pavement Research and Technology 2010; 3 (3):119-27.
- Silva, A., 2014. “*Formulação de misturas betuminosas a quente: Análise comparativa da aplicação de métodos empíricos e volumétricos.*” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil. ISEC.
- Vaitkus, A., Vorobjovas, V., Ziliute, L., 2009. “*The Research on the use of warm mix asphalt for asphalt pavement structures*”. International Baltic Road Conference. Riga, Lithuania.
- Zaumanis M., 2010. “*Warm mix asphalt investigation*”. Master of Science Thesis. Kgs.Lyngby: Technical University of Denmark in cooperation with the Danish Road Institute, Department of Civil Engineering.
-

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

- EN 1426: 2007, *Bitumen and bituminous binders. Determination of needle penetration.* European Committee for Standardization, Bruxelas.
- EN 1427:2007, *Bitumen and bituminous binders. Determination of the softening point. Ring and Ball method.* European Committee for Standardization, Bruxelas.
- EN 12591:2009, *Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens.* Edition 2°. European Committee for Standardization, Bruxelas.
- EN 12697-5:2009, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 5: Determination of the maximum density.* European Committee for Standardization, Bruxelas.
- EN 12697-6:2003+A1: 2007, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.* European Committee for Standardization, Bruxelas.
- EN 12697-25, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 25: Cyclic compression test.* European Committee for Standardization, Bruxelas.
- EN 12697-26, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 26: Stiffness.* European Committee for Standardization, Bruxelas.
- NP EN 12697-30:2004+A1:2009, *Misturas betuminosas. Métodos de ensaio para misturas betuminosas a quente. Parte 30: Preparação de provetes por compactador de impacto.* European Committee for Standardization, Bruxelas.
- EN 12697-34:2004+A1:2009, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 34: Marshall test.* European Committee for Standardization, Bruxelas.
- NP EN 13043:2004, *Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.* Instituto Português da Qualidade, Lisboa.
- NP EN 13108-1:2008, *Misturas Betuminosas – Especificações dos materiais: Parte 1: Betão Betuminoso.* Instituto Português da Qualidade, Caparica.

APÊNDICES E ANEXOS

APÊNDICE I. Estudo da Mistura Betuminosa

I.1 Estudo de mistura betuminosa – Formulação Marshall

Quadro I. 1 – Quantidade percentual de cada fração de agregados para formulação da mistura betuminosa

Porcentagem dos agregados				
d/D	8/20	4/12	0/4	Filer
%	10	40	48	2

Quadro I. 2 – Estudo da mistura betuminosa

Amostra	% Betume	Massa Betume	% 8/20	Massa 8/20	% 4/12	Massa 4/12	% 0/4	Massa 0/4	% Filer	Massa Filer	S
1	3,5	41	10,0	114	40,0	455	48,0	547	2	23	1180
2	4,0	47	10,0	113	40,0	453	48,0	544	2	23	1180
3	4,5	53	10,0	113	40,0	451	48,0	541	2	23	1180
4	5,0	59	10,0	112	40,0	448	48,0	538	2	22	1180
5	5,5	65	10,0	112	40,0	446	48,0	535	2	22	1180

I.2 Estudo de mistura betuminosa – Características Marshall

Quadro I. 3– Características dos provetes Marshall

Provete	% b	h (mm)	Massa do provete (g)			T água (°C)	Valor de K água	Baridade (kg/m ³)		def (mm)	def média	Frot (kN)	Frot média	Baridade máx. teórica	n (%)	TVB (% bet)	VMA (%)
			ar	imerso	sup seca			provete	média								
1.1	3,5	---	1182,7	676,9	1197,8	21,2	1,0094000	2285,2	2277,7	---	4,2	---	10,8	2526,9	9,9	7,7	17,5
1.2	3,5	65,7	1160,1	668,0	1173,2	21,2	1,0094000	---		4,5		9,7					
1.3	3,5	66,4	1172,9	671,0	1186,8	20,5	1,0011000	2269,8		---		11,4					
1.5	3,5	65,6	1162,1	661,9	1172,8	21,0	1,0010000	2270,3		3,9		11,3					
1.6	3,5	65,0	1139,5	653,7	1151,3	21,0	1,0010000	2285,6		4,8		---					
2.1	4,0	64,3	1141,5	650,6	1152,5	21,2	1,0094000	2289,1	2286,1	4,9	4,9	12,3	12,0	2480,3	7,8	8,8	16,6
2.2	4,0	65,2	1153,8	659,2	1167,5	21,2	1,0094000	2284,6		---		11,3					
2.3	4,0	62,1	1112,1	638,5	1121,0	21,0	1,0010000	---		---		12,4					
2.4	4,0	65,2	1157,7	661,0	1166,8	21,0	1,0010000	2284,5		---		12,1					
3.1	4,5	62,0	1128,0	648,5	1132,0	20,0	1,0012000	2329	2300,3	---	5,3	13,4	12,8	2466,4	6,7	10,0	16,7
3.2	4,5	63,4	1129,8	644,0	1135,1	20,0	1,0012000	2296,6		4,6		12,6					
3.3	4,5	63,9	1136,6	646,7	1145,7	20,0	1,0012000	2273,9		5,6		12,4					
3.4	4,5	63,4	1147,9	655,1	1152,7	22,2	1,0006600	2301,7		---		12,8					
4.1	5,0	65,8	1173	671,2	1179,0	21,2	1,0094000	2324,9	2330,7	---	5,6	13,4	13,7	2443,4	4,6	11,2	15,8
4.2	5,0	65,6	1182,4	674,2	1186,7	21,2	1,0094000	2322,1		---		11,5					
4.3	5,0	---	1109,8	641,7	1112,7	21,0	1,0010000	2351,8		---		16,4					
4.4	5,0	64,3	1159,00	665,3	1163,1	20,5	1,0011000	2324		5,6		13,3					
5.1	5,5	---	1079,2	616,3	1083,8	19,6	1,0012736	2304,7	2314,0	---	6,0	---	7,9	2429,6	4,8	12,2	17,0
5.2	5,5	64,9	1182,6	676,8	1185,2	17,6	1,0016576	2323,2		5,1		9,6					
5.3	5,5	61,6	1122,9	645,2	1124,8	17,6	1,0016576	---		4,6		11,0					
5.4	5,5	61,9	1174,9	683,5	1175,3	17,6	1,0016576	---		6,0		11,1					

I.3 Estudo de mistura betuminosa – Sensibilidade à água

Quadro I. 4 – Características dos provetes

Provete	% b	h (mm)	massa do provete (g)			T Água (°C)	valor de K água	Baridade (kg/m ³)	
			ar	imerso	Sup. seca			Provete	média
S1	5,0	62,7	1110,6	631,6	1115,8	23,2	1,0094000	2308,5	2301,8
S2	5,0	62,6	1110,4	632,8	1116,0	23,2	1,0094000	2312,9	
S3	5,0	64,5	1146,6	653,2	1151,3	23,2	1,0094000	2316,8	
S4	5,0	64,7	1122,2	641,6	1130,5	23,2	1,0094000	2310,2	
S5	5,0	64,5	1131,4	640,5	1140,4	23,2	1,0094000	2277,9	
S6	5,0	61,9	1076,4	609	1088,6	23,2	1,0094000	2258,9	
S7	5,0	65,7	1177,4	671,4	1182,5	23,2	1,0094000	2318,6	
S8	5,0	63,6	1132,2	647,9	1141,0	23,2	1,0094000	2310,9	

Quadro I. 5 – Resultados do ensaio de tração indireta e determinação da sensibilidade à água

Grupos	Provetes " a seco"				Provetes "imersos"			
Características dos provetes	s1	s2	s3	s4	s5	s6	s7	s8
Massa do provete (arredondado a 0,1g)	1110,6	1110,4	1146,6	1122,2	1131,4	1076,4	1177,4	1132,2
Diâmetro do provete (arredondado a 0,1mm)	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5	101,5
Altura do provete (arredondado a 0,1 mm)	62,7	62,6	64,5	64,7	64,5	61,9	65,7	63,6
Altura média (mm)	63,3				64,6			
Diferença entre a altura média dos dois grupos (arredondada a 0,1 mm)	1,3							
Volume geométrico do provete (cm ³)	507,3	506,5	521,9	523,5	521,9	500,8	531,6	514,6
Baridade geométrica média (g/cm ³)	2,189	2,192	2,197	2,144	2,168	2,149	2,215	2,200
Massa do provete imerso em água (arredondado a 0,1g)	631,6	632,8	653,2	641,6	640,5	609,0	671,4	647,9
Massa provete com Sup. Seca	1115,8	1116	1151,3	1130,5	1140,4	1088,6	1182,5	1141
valor de K para correção	1,00046	1,00046	1,00046	1,00046	1,00046	1,00046	1,00046	1,00046
Baridade imersa (g/cm ³)	2,288	2,292	2,296	2,290	2,258	2,239	2,298	2,290
Baridade média (g/cm ³)	2,290				2,282			
A diferença da baridade imersa média dos dois grupos de provetes (g/cm ³)	0,008							

Quadro I. 6 – Resultados do ensaio de tração indireta e determinação da sensibilidade à água (continuação)

Ensaio de tração indireta EN 12697-23							
Resistência máxima (kN)		3,6	4,2	3,8	3	3,6	4,1
Resistência média(kN)		3,866666667			3,566666667		
Tração indireta ITS	GPa	0,00036	0,00042	0,00038	0,0003	0,00036	0,00041
Tração indireta média ITS	GPa	0,000386667			0,000356667		
Arredondada até 3 algarismos Significativos	kPa	387			357		
ITSR (%)		92%					

I.4 Estudo de mistura betuminosa – Módulo de Resiliência

Quadro I. 7 – Características dos provetes

Provete	% b	h (mm)	massa do provete (g)			T ^o c água	valor de K água	Baridade (kg/m ³)	
			ar	imerso	sup seca			provete	média
M1	4,5	65,7	1193,5	678,5	1202,2	25,0	1,0094000	2293,727736	2298,6
M2	4,5	65,7	1153,6	654,5	1160,0	25,0	1,0094000	2296,868354	
M3	4,5	66,4	1175,1	668,0	1183,5	25,0	1,0094000	2294,289266	
M4	4,5	66,4	1134,4	647,5	1141,9	25,0	1,0094000	2309,350073	
M5	5,0	65,6	1151,5	653,8	1156,3	25,0	1,0094000	2306,374846	2354,9
M6	5,0	65,0	1123,9	642,3	1128,9	25,0	1,0094000	2324,650046	
M7	5,0	64,3	1081,6	647,9	1087,5	25,0	1,0094000	2476,344212	
M8	5,0	65,0	1157,4	658,3	1162,1	25,0	1,0094000	2312,2103	
M9	5,5	62,1	1111,8	634,2	1114,5	25,0	1,0094000	2329,786368	2328,0
M10	5,5	65,2	1077,7	613,2	1080,4	25,0	1,0094000	2321,651695	
M11	5,5	62,0	1135,2	642,2	1141,4	25,0	1,0094000	2288,757721	
M12	5,5	60,0	1110,8	640,6	1112,0	25,0	1,0094000	2371,637504	

I.5 Estudo de mistura betuminosa – Deformação Permanente


Quadro I. 8 – Características dos provetes e resultados dos ensaios a 40°C

Provete	% bet	altura (mm)					Baridade (kg/m ³)	Baridade Média (kg/m ³)	h3600	n	hn	n	fc(%)
		h1	h2	h3	h4	h médio							
1,1	4,5	59,3	59,4	59,8	59,4	59,4	2359,8347379	2358,09	4739,169	3600,000	4160,848	960	0,219060985
1,2	4,5	59,1	57,9	57,4	58,3	58,1	2376,3603827		3217,086	3600,000	2693,425	1008	0,202029707
1,3	4,5	59,3	59,7	58,3	58,7	59	2383,6706365		3844,291	3600,000	3356,201	1056	0,191859277
1,4	4,5	62	62	62	62	62	2312,4891655		4379,442	3600,000	3715,965	1152	0,271028186
2,1	5	59,2	59,5	59,3	58,8	59,25	2302,0621231	2320,41	4757,655	3600,000	3681,683	1104	0,431078526
2,2	5	60	59,6	59,1	59,5	59,55	2290,5276738		5446,219	3600,000	4419,696	1344	0,45501906
2,3	5	61,8	60,5	60,5	62	61,15	2346,5679269		6917,649	3600,000	6078,211	912	0,312290923
2,4	5	60	60	60,5	61,4	60,25	2342,4986868		9708,563	3600,000	8566,801	1104	0,457436699
3,1	5,5	59,9	60	58,8	57,5	59,35	2375,7213162	2387,26	1073,657	3600,000	631,108	432	0,139693497
3,2	5,5	57,6	59,2	59	57,5	58,3	2386,4309074		2316,814	3600,000	2045,818	672	0,092553279
3,3	5,5	57,4	57,5	58,2	58,3	57,85	2396,7172897		4712,106	3600,000	4082,61	960	0,238445455
3,4	5,5	58	58	58,5	58	58	2390,1667424		5157,194	3600,000	4455,368	912	0,261095982
3,5	5,5	61,3	60	60,5	61,4	60,9	2345,6029062	2348,76	6516,291	3600,000	5741,015	1404	0,353040073
3,6	5,5	60	59,6	59,2	59,4	59,5	2336,5544203		10932,421	3600,000	9921,276	1404	0,460448543
3,7	5,5	61,5	60	60	61,3	60,65	2362,1788993		10540,54	3600,000	9397,184	1404	0,520653916
3,8	5,5	58,6	58,8	58	58	58,3	2350,6932349		1002,644	3600,000	568,754	416	0,136271985

Quadro I. 9 – Características dos provetes e resultados dos ensaios a 60°C

Provete	% bet	altura (mm)					Baridade (kg/m ³)	Baridade Média (kg/m ³)	h3600	n	hn	n	fc(%)
		h1	h2	h3	h4	h médio							
1,5	4,5	58,5	58,1	58	58,3	58,2	2372,455710	2369,16	4929,091	3600,000	3294,659	832	0,590473988
1,6	4,5	59,4	59,1	58,7	58,9	59	2386,084234		5275,904	3600,000	4047,873	832	0,443652818
1,7	4,5	60	59,5	60	60,6	60	2347,348034		10279,905	3600,000	8662,345	832	0,584378613
1,8	4,5	59,3	60	59,9	58,9	59,6	2370,767963		9347,505	3600,000	8294,603	832	0,380383671
2,5	5	59,8	58,5	58,4	59	58,75	2320,40863	2337,27	5955,087	3600,000	3403,262	720	0,886050347
2,6	5	60	59,7	60,9	61	60,45	23401,4073		3996,758	3600,000	2473,033	720	0,529071181
2,7	5	58,8	59,7	60,9	60,7	60,2	2337,88682		7375,742	3600,000	4060,274	720	1,151204167
2,8	5	62,2	61,3	61,5	62,5	61,85	2350,65509		3373,022	3600,000	2205,794	720	0,4052875

ANEXO I. Fichas técnicas dos Agregados

 IRMÃOS CAVACO, S.A.	Ficha Técnica do Produto	DQ.ES.003/5
		09-02-2011 Página 1 de 1

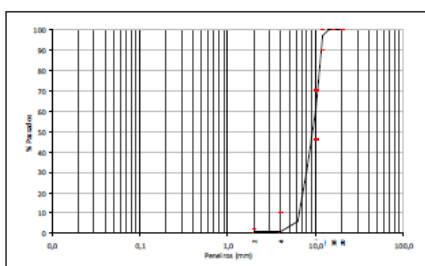
IRMÃOS CAVACO SA. RUA VIANA DA MOTA, 8 • APARTADO 7 4524-909 ST.ª MARIA DA FEIRA • PORTUGAL 04 0866-CPD-2004/CE.011	 0866
--	--

Origem: "PEDREIRA DA MALAPOSTA" Nº 4655	Produto: 4/12
--	----------------------

UTILIZAÇÃO	EN 12620 Agregados para betão
	EN 13043 Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação
	EN 13242 Agregados para materiais tratados com ligantes hidráulicos e materiais não tratados utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária

CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO

Características	EN 12620	EN 13043	EN 13242
Dimensão das partículas Designação (d/D) Granulometria	4/12 G _c 90-15 G _r 15	4/12 G _c 90-15 G _{20/15}	4/12 G _c 85-15 GT _c 20/15
Forma das partículas Índice de achatamento Índice de forma	F ₁₅ S ₁₅	F ₁₅ S ₁₅	F ₂₀ S ₂₀
Massa volúmica das partículas Material impermeável Partículas secas em estufa Partículas saturadas	2,62 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,59 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,61 ^{+0,05} Mg/m ³	2,62 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,59 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,61 ^{+0,05} Mg/m ³	2,62 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,59 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,61 ^{+0,05} Mg/m ³
Absorção de água	0,6 ^{+0,1} %	0,6 ^{+0,1} %	0,6 ^{+0,1} %
Baridade	1,38 ^{+0,1} Mg/m ³	1,38 ^{+0,1} Mg/m ³	1,38 ^{+0,1} Mg/m ³
Limpeza Teor em finos Equivalente de areia Azul de metileno	F _{1,5} NA NA	f ₂ NA NA	f ₂ NA NA
Percentagem de partículas britadas	NA	C _{100/0}	C _{90/3}
Resistência à fragmentação *	LA ₂₀	LA ₂₀	LA ₂₀
Resistência ao polimento/abrasão/desgaste Coeficiente de polimento acelerado * Resistência ao desgaste do agregado grosso *	PSV ₅₀ M _{DE10}	PSV ₅₀ M _{DE10}	NA M _{DE20}
Composição/teor Cloretos solúveis * Teor de húmus * ** Retração por secagem * Contaminantes orgânicos leves * Sulfatos solúveis em ácido * Enxofre total *	0,009% Mais clara 0,027% NA AS _{0,2} <1 %	NA NA NA m _{LCR} 0,10% NA NA	NA NA NA NA AS _{0,2} S ₁
Durabilidade face ao gelo-degelo *	MS ₁₈	MS ₁₈	MS ₁₈
Descrição petrográfica *	Rocha metamórfica – Gnaisse. Estrutura bandada gnaissica com textura granoblástica. Sá a pouco alterada com superfície áspera e baixa porosidade.		




DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA				
Peneiros	Valores Típicos	Limites Min./Max.	Limites Min./Max.	Limites Min./Max.
(mm)	(% passados)	(% passados)	(% passados)	(% passados)
20	100	100	100	100
16	100	98 a 100	100	98 a 100
12	97	90 a 100	90 a 100	85 a 100
10	61	46 a 70	46 a 76	46 a 76
4	1	0 a 15	0 a 10	0 a 15
2	1	0 a 5	0 a 2	0 a 5

DND – Desempenho não determinado NA – Característica não aplicável ao agregado ou à norma de aplicação NR – Propriedade não requerida
* Ensaio executado noutra produto da mesma origem ** Se a solução for mais clara que a solução padrão, o agregado não contém teor considerável de húmus

APROVADO:


 Rui Régio

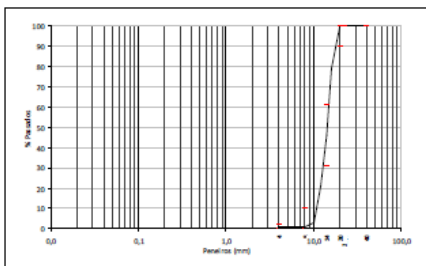
 IRMÃOS CAVACO, S.A.	Ficha Técnica do Produto	DQ.ES.004/6 09-02-2011 Página 1 de 1
---	---------------------------------	---

IRMÃOS CAVACO SA. RUA VIANA DA MOTA, 8 • APARTADO 7 4524-909 ST.ª MARIA DA FEIRA • PORTUGAL 04 0866-CPD-2004/CE.011	 0866
--	--

Origem: "PEDREIRA DA MALAPOSTA" Nº 4655	Produto: 8/20
---	----------------------


UTILIZAÇÃO	EN 12620 Agregados para betão EN 13043 Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação EN 13242 Agregados para materiais tratados com ligantes hidráulicos e materiais não tratados utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária
-------------------	---

CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO			
<i>Características</i>	EN 12620	EN 13043	EN 13242
Dimensão das partículas Designação (d/D) Granulometria	8/20 G _c 90-15 G ₇ 15	8/20 G _c 90-10 G _{25/15}	8/20 G _c 85-15 GT _c 20/15
Forma das partículas Índice de achatamento Índice de forma	F ₁₅ S ₁₅	F ₁₅ S ₁₅	F ₂₀ S ₂₀
Massa volúmica das partículas Material impermeável Partículas secas em estufa Partículas saturadas	2,63 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,61 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,61 ^{+0,05} Mg/m ³	2,63 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,61 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,61 ^{+0,05} Mg/m ³	2,63 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,61 ^{+0,05} Mg/m ³ 2,61 ^{+0,05} Mg/m ³
Absorção de água	0,5 ^{+0,1} %	0,5 ^{+0,1} %	0,5 ^{+0,1} %
Baridade	1,37 ^{+0,1} Mg/m ³	1,37 ^{+0,1} Mg/m ³	1,37 ^{+0,1} Mg/m ³
Limpeza Teor em finos Equivalente de areia Azul de metileno	f _{1,5} NA NA	f ₂ NA NA	f ₂ NA NA
Percentagem de partículas britadas	NA	C _{100/0}	C _{90/3}
Resistência à fragmentação	LA ₂₀	LA ₂₀	LA ₂₀
Resistência ao polimento/abrasão/desgaste Coeficiente de polimento acelerado * Resistência ao desgaste do agregado grosso	PSV ₅₀ M _{DE} 10	PSV ₅₀ M _{DE} 10	NA M _{DE} 20
Composição/teor Cloretos solúveis * Teor de húmus * ** Retração por secagem Contaminantes orgânicos leves * Sulfatos solúveis em ácido * Enxofre total *	0,009% Mais clara 0,027% NA AS _{0.2} <1 %	NA NA NA m _{LCP} 0,10% NA NA	NA NA NA NA AS _{0.2} S ₁
Durabilidade face ao gelo-degelo *	MS ₁₈	MS ₁₈	MS ₁₈
Descrição petrográfica *	<i>Rocha metamórfica – Gnaiss. Estrutura bandada gnaissica com textura granoblástica. Sá a pouco alterada com superfície áspera e baixa porosidade.</i>		



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA				
Peneiros (mm)	Valores Típicos (% passados)	Limites Min./Max. (% passados)	Limites Min./Max. (% passados)	Limites Min./Max. (% passados)
40	100	100	100	100
22,4	100	98 a 100	100	98 a 100
20	100	90 a 100	90 a 100	85 a 100
14	46	31 a 61	31 a 61	31 a 61
8	1	0 a 15	0 a 10	0 a 15
4	1	0 a 5	0 a 2	0 a 5

DND – Desempenho não determinado NA – Característica não aplicável ao agregado ou à norma de aplicação NR – Propriedade não requerida
 * Ensaio executado noutro produto da mesma origem ** Se a solução for mais clara que a solução padrão, o agregado não contém teor considerável de húmus

APROVADO: 
 Rui Régio



Omya Comital S.A.

Tel: + 351 229 773 590

Fax: + 351 229 773 599

Portugal

www.comital.pt

Micro 200 - OU

CENTRO DE PRODUÇÃO

SOURE, Portugal (certificado ISO 9001)

BREVE DESCRIÇÃO DO PRODUTO

Filer de carbonato de cálcio natural.
Em cumprimento com os requisitos normativos:
- Marcação CE: EN 12620, EN 13139 e EN 13043.
- Especificação LNEC E 466-2005.

ANÁLISE QUÍMICA DA MATÉRIA PRIMA ⁽¹⁾

Teor de carbonato de cálcio	98	%
Teor de carbonato	98	%
Teor de cloretos	< 0,001	%
Sulfatos solúveis em ácido	< 0,05	%
Teor de enxofre total	< 0,04	%
Carbono orgânico total	0,2	%
Qualidade dos finos	0,6	g kg ⁻¹
Silica total	< 0,5	%
Reactividade álcalis-silica	NR, classe I	

DADOS ESPECÍFICOS DO PRODUTO ⁽¹⁾

Granulometria:		
Partículas < 2 mm	100	%
Partículas < 0,125 mm	98	%
Partículas < 0,063 mm	82	%
Superfície específica Blaine	5100	cm ² g ⁻¹
Brancura L* (CIELab)	94	%
Teor de humidade <i>ex works</i>	0,1	%
Vazios do filer seco compactado (Rigden)	32	%
Variação da temperatura anel e bola	14	°C
Necessidade de água	21	%

DADOS GERAIS DO PRODUTO

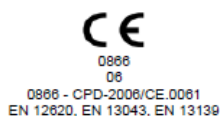
Massa volúmica	2,7	g cm ⁻³
Densidade aparente	0,9	g cm ⁻³

APLICAÇÕES

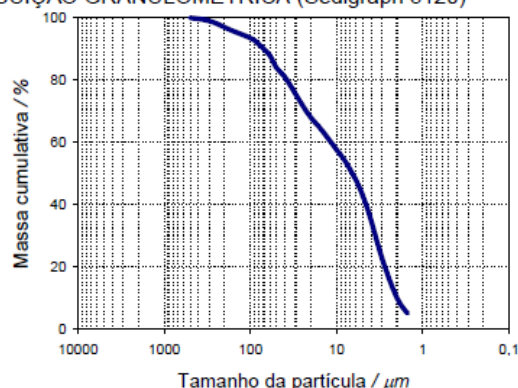
Betão pronto
Betão auto-compactável
Betão projectado
Colas de base cimento e gesso
Argamassas
Misturas betuminosas

EMBALAGEM

- GRANEL



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (Sedigraph 5120)




(1) - os dados apresentados são apenas indicativos.

A informação contida nesta Ficha Técnica diz respeito apenas ao material específico aqui referido e não se refere à utilização em combinação com qualquer outro material ou em qualquer processo. A informação aqui fornecida baseia-se em especificações técnicas que a Omya considera fiáveis, não fazendo a Omya qualquer declaração nem dando qualquer garantia relativamente à integridade ou precisão da mesma e não assumindo a Omya qualquer responsabilidade resultante da sua utilização ou relativa a quaisquer reivindicações, perdas ou danos a terceiros. Os receptores desta informação terão que exercer a sua própria capacidade de decisão relativamente à adequabilidade da sua utilização e é da responsabilidade do utilizador determinar a adequabilidade do material (incluindo a respectiva segurança) para um determinado fim antes da sua utilização.

edição : 24/02/2011
PRODINFO : PTOU
171710_01_PT
versão : 002

 Iberobrita, sa	Ficha de Características Técnicas do Produto	FCTP	15
		Edição	13

	1592	Identificação do produto	
	4	Designação	Instalação de britagem
1592-CPD-1610	Pó 0/4	IV	

Características do produto	NP EN 12620	NP EN 13043	NP EN 13139	NP EN 13242
Dimensão das Partículas				
Designação (d/D)	0/4	0/4	0/4	0/4
Categoria de tolerância	G _F 85	G _A 85 G _{TC} 20	NA	G _F 85 G _T 20
Forma das partículas do agregado grosso				
Índice de achatamento	NA	NA	NA	NA
Índice de forma	NA	NA	NA	NA
Limpeza				
Teor de finos	f ₁₆	NA	categoria 4	f ₁₆
Equivalente de areia	SE ≥80%	NA	SE ≥80%	SE ≥80%
Azul de metileno	MB10	MB _F 10	MB10	MB10
Resistência à fragmentação do agregado grosso				
Massa volumica (fracção de 0,063mm - 4mm)				
Material impermeável	2,65 Mg/m ³	2,65 Mg/m ³	2,65 Mg/m ³	2,65 Mg/m ³
Partículas secas em estufa	2,61 Mg/m ³	2,61 Mg/m ³	2,61 Mg/m ³	2,61 Mg/m ³
Partículas saturadas	2,63 Mg/m ³	2,63 Mg/m ³	2,63 Mg/m ³	2,63 Mg/m ³
Absorção de água	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%
Estabilidade volumétrica - retração por secagem*	0,014%	NA	NA	NA
Composição /teor				
Enxofre total*	< 0,04%	NA	< 0,04%	S ₁
Sulfatos soluveis em ácido*	AS _{0,2}	NA	AS _{0,2}	AS _{0,2}
Teor de cloretos*	< 0,001%	NA	< 0,001%	NA
Tempo de presa em minutos e resistência à compressão*	37min / 93%	NA	37min / 93%	37min / 93%
Teor em húmus* **	mais claro	NA	mais claro	NA
Contaminantes orgânicos leves*	< 0,1%	m _{LPC} 0,1	< 0,1%	< 0,1%
Descrição petrográfica* - descrição da rocha	98% de calcário e 2% de calcite, com forma subprismática a subdiscoidal, muito anguloso a subarredondado de superfície rugosa/lisa.			

Observações:

* Ensaio realizado com o objectivo de caracterizar a rocha

** Se a solução for mais clara que a solução padrão, o agregado não contém teor considerável de húmus.

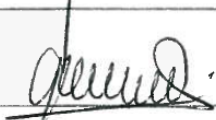

DND - Desempenho Não Determinado.

NA - Característica não aplicável ao agregado ou à norma de aplicação

Distribuição granulométrica

Peneiros (mm)	Valores típicos (%passado)	Limite min./máx. (%passados)	Limite min./máx. (%passados)	Limite min./máx. (%passados)	Limite min./máx. (%passados)
8	100	100	100	100	100
5,6	100	95-100	98-100	95-100	98-100
4	95	90-100	90-100	90-100	90-100
2	60	--	40-80	--	40-80
1	30	10-50	--	10-50	--
0,25	15	5-45	--	5-45	--
0,063	9	6-12	6-12	6-12	5-13

Utilização prevista	NP EN 12 620 - Betão para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil
	NP EN 13 043 - Misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas e outros trabalhos de engenharia civil
	NP EN 13 139 - Argamassas para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil
	NP EN 13 242 - Materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos e não tratados para estradas e outros trabalhos de engenharia civil

Elaborado por:		Aprovado por:		Data	Página
Filipa Gomes, Eng ^o .		Luis Lopes, Dr.		12-01-2011	1/1

Mod.161/2

Sede: Rua de Ansião, 3100-474 Pombal • Tel. 236 200 110 • Fax. 236 200 190
 www.grupojulioledes.com • E-mail: iberobrita@grupojulioledes.com
 Pedreira: Rua da Pedreira, Barrocal, 3100-419 Pombal • Tel. 236 218 715 • Fax. 236 218 831
 Objectivo Social: Extração, Produção e Comercialização de Agregados Calcários
 Sociedade Anónima, Matriculada na C.R.C. de Pombal sob o nº 500 374 740 - Capital Social € 1.000.000 - Contribuinte Nº 500 374 740