



Rui Sérgio Carvalho Lopes

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Fabrico e compactação de misturas betuminosas temperadas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientador: Professor Doutor Rui Alexandre Lopes Baltazar Micaelo

Co-orientador: Professor Doutor José Manuel Coelho das Neves

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Ildi Cismasiu
Arguente: Prof. Luís Manuel Trindade Quaresma
Vogal: Prof. Doutor José Manuel Coelho das Neves

 **FAÇULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

[Junho de 2015]

‘Copyright’ Rui Sérgio Carvalho Lopes, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores pela disponibilidade e pelo apoio dado por eles ao longo desta dissertação.

Agradeço ao Instituto Superior Técnico e ao Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes (LVCT) do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos onde foi realizada a componente experimental deste trabalho.

Agradeço à empresa Galo, SA pelos agregados disponibilizados, assim como à CEPSA pela cedência do betume utilizado.

Ao Rui, João e ao Luís, pela ajuda que me deram durante a campanha experimental.

Agradeço aos meus colegas que me acompanharam neste percurso, em especial ao Tiago, à Filipa e à Ana.

Um especial agradecimento à minha mãe e irmão.

Resumo

As misturas betuminosas temperadas caracterizam-se por serem produzidas a temperaturas mais baixas que as tradicionais a quente, existindo várias tecnologias disponíveis no mercado. A redução da temperatura (cerca de 25°C) conduz a um menor consumo de combustível na central de produção e à diminuição das emissões poluentes. Na literatura é referida como vantagem adicional o aumento da distância de transporte da mistura. Tal é conseguido devido à menor temperatura de compactação deste tipo de mistura, esse tempo de transporte pode ainda aumentar caso se aumente a temperatura de fabrico da mistura.

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência das temperaturas de fabrico e de compactação no comportamento das misturas betuminosas temperadas.

Neste estudo selecionou-se uma mistura betuminosa do tipo AC 20 base 35/50 (MB), utilizada em trabalhos laboratoriais anteriores. Esta mistura foi produzida com dois aditivos diferentes que permitem baixar a temperatura de fabrico e compactação, o Sasobit® e o Rediset®. As misturas foram fabricadas a 165°C e 120 °C, compactadas a 150, 120 e 100 °C. Foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de escorrimento para avaliar o comportamento da mistura durante a fase de produção; avaliação volumétrica para analisar a compactabilidade; e ensaio de deformação permanente para avaliar o desempenho em serviço

Os resultados obtidos com este trabalho permitem concluir que o aumento da temperatura de fabrico não influencia o comportamento da mistura. Obtiveram-se resultados semelhantes para a mistura quando fabricada a temperaturas diferentes. A mistura apresenta resultados consistentes relativamente à volumetria e à deformação permanente.

Palavras chave: pavimentos; misturas betuminosas temperadas; temperatura; compactação; deformação permanente.

Abstract

Warm asphalt mixtures are characterized by a lower production temperature than the traditional hot asphalt mixtures. The reduction of temperature (about 25 °C) leads to a lower consumption of fuel in the production plant and of the pollutant emissions. The increase of the haul distance referred in the literature is achieved due the lower compaction temperature for this mixture and, the maximum transportation time can be extended with the increase of the mixture production.

The objective of this dissertation is to evaluate the influence of the production and compaction temperatures in the behavior of warm asphalt mixtures.

In this study was selected an asphalt concrete AC 20 base 35/50 (MB), based on previous laboratory work. This mixture is modified with two different additives, Sasobit® and Rediset®, which permits to reduce production and compaction temperatures. The mixtures were produced at 165 °C and 120°C and compacted at 150, 120 and 100 °C. Binder drainage tests were performed to evaluate the performance of the mixture during production and transport. Volumetric tests were made to evaluate the behavior of the mixture during compaction. Wheel tracking tests were used to evaluate the influence of the production and compaction temperatures on the in-service pavement performance.

The results obtained allow to conclude that the increase of the production temperature does not influence the behavior of the mixture. Similar results were obtained, when the mixture was produced at different temperatures. The results concerning the volumetric and rutting resistance tests are similar when the mixture is produced and compacted at normal temperatures.

Keywords: pavements; warm asphalt mixtures; temperature; compaction; permanent deformation.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento.....	1
1.2	Objetivos e metodologia.....	2
1.3	Estrutura	3
2	Revisão bibliográfica.....	5
2.1	Misturas betuminosas.....	5
2.1.1	Generalidades	5
2.1.2	Misturas a quente	5
2.1.3	Misturas temperadas.....	6
2.1.4	Misturas fabricadas a frio	13
2.2	Fabrico de misturas betuminosas	13
2.3	Compactação de misturas betuminosas.....	15
3	Programa experimental	17
3.1	Introdução	17
3.2	Caracterização dos materiais.....	18
3.2.1	Agregados.....	18
3.2.2	Betume	19
3.2.3	Aditivos	20
3.3	Formulação da mistura betuminosa.....	21
3.4	Preparação e caracterização dos provetes de mistura betuminosa	24
3.4.1	Fabrico da mistura.....	24
3.4.2	Compactação das lajes	25
3.5	Avaliação do desempenho da mistura betuminosa.....	28
3.5.1	Ensaio de deformação permanente.....	28
3.5.2	Baridade aparente	30
3.5.3	Baridade máxima teórica.....	31
3.5.4	Determinação da porosidade	32
3.6	Ensaio de escorrimento	32
4	Resultados e discussão	35
4.1	Ensaio de escorrimento	35
4.2	Volumetria.....	35
4.2.1	Baridade aparente.....	35
4.2.2	Baridade máxima teórica.....	37
4.2.3	Porosidade	38
4.3	Ensaio de deformação permanente.....	41
4.4	Análise de ganhos de tempo para pavimentação.....	47
5	Conclusões e trabalhos futuros.....	53

5.1	Conclusões	53
5.2	Trabalhos futuros.....	54
6	Bibliografia	55

Índice de Figuras

Figura 2.1-Diminuição do ângulo de contacto entre o betume e o agregado, provocado por aditivos Químicos (Martinho, 2014).	9
Figura 3.1- Curva granulométrica do agregado com dimensão 0/4 mm.	18
Figura 3.2- Curva granulométrica do agregado com dimensão 6/12 mm.	19
Figura 3.3- Curva granulométrica do agregado com dimensão 12/20 mm.	19
Figura 3.4- Aditivos utilizados, Aditivo Químico, Rediset® (esquerda), e Aditivo Orgânico, Sasobit® (direita).	20
Figura 3.5-Curva Granulometrica da distribuição da mistura base, e da mistura utilizada na presente dissertação.....	22
Figura 3.6- Misturadora utilizada no fabrico das misturas, Controls modelo 76-B0077/B.	24
Figura 3.7-Adição do Betume ao agregado antes de se proceder a mistura.....	25
Figura 3.8- Mistura moldada antes da compactação.	26
Figura 3.9-Roller Compacter utilizado na compactação das lajes, Controls, modelo 77-B3602.....	26
Figura 3.10-Compactação de uma mistura, com o Roller Compacter.	27
Figura 3.11-Wheel Tracking, Controls, modelo77-B3502.....	28
Figura 3.12- Ensaio de pista, efetuado no Wheel Tracking.	29
Figura 3.13- Deformação Permanente causada pelo ensaio de Pista	30
Figura 3.14- Determinação da Baridade Aparente, pesagem com os provetes saturados.	30
Figura 3.15-Cesto e base utilizados no Ensaio de Escorrimento.....	33
Figura 4.1- Baridade Aparente das misturas fabricadas a 165 °C, e compactadas a 150 °C.....	36
Figura 4.2- Baridade Aparente das misturas fabricadas a 165 °C, e compactadas a 120 °C.....	36
Figura 4.3- Baridade Aparente das misturas fabricadas a 120 °C, e compactadas a 120 °C.....	37
Figura 4.4- Baridade Aparente, das misturas fabricadas a 120 °C, e compactadas a 100 °C.....	37
Figura 4.5-Baridade Máxima Teórica	38
Figura 4.6- Porosidade das misturas produzidas a 165 °C, e compactadas a 150 °C.....	39
Figura 4.7- Porosidade das misturas produzidas a 165 °C, e compactadas a 120 °C.....	39
Figura 4.8-- Porosidade das misturas produzidas a 120 °C, e compactadas a 120 °C.	40
Figura 4.9-- Porosidade das misturas produzidas a 120 °C, e compactadas a 100 °C.	40
Figura 4.10- Resultados do Ensaio de Pista, mistura de controlo, fabricada a 165 °C.....	42
Figura 4.11- Resultado do Ensaio de pista de mistura aditivada com Sasobit®, e Fabricada a 165 °C.....	43
Figura 4.12- Resultado do Ensaio de pista de mistura aditivada com Rediset®, e Fabricada a 165 °C.	43
Figura 4.13- Resultado do Ensaio de pista de mistura aditivada com Sasobit®, e Fabricada a 120 °C.....	44
Figura 4.14- Resultado do Ensaio de pista de mistura aditivada com Rediset®, e Fabricada a 120 °C.....	44
Figura 4.15- Influência do aumento da temperatura de fabrico no tempo disponível para compactação, com temperatura atmosférica de 0°C.....	49
Figura 4.16- Influência do aumento da temperatura de fabrico no tempo disponível para compactação, com temperatura atmosférica de 5°C.....	50
Figura 4.17- Influência do aumento da temperatura de fabrico no tempo disponível para compactação, com temperatura atmosférica de 10°C.....	50

Índice de Quadros

Quadro 2.1-Resumo dos Benefícios e Desvantagens das MBT.....	10
Quadro 3.1- Temperatura de fabrico e compactação.	17
Quadro 3.2- Especificações do betume 35/50.....	20
Quadro 3.3- Distribuição granulométrica da mistura.....	21
Quadro 3.4- Distribuição de agregado utilizado na formulação da mistura.....	22
Quadro 3.5- Baridade aparente media da mistura base, obtido por F. Martinho, (Martinho, 2014).	23
Quadro 3.6- Determinação da massa das Lajes.....	23
Quadro 3.7-Determinação das massas dos constituintes da mistura	24
Quadro 3.8- Ciclo de carregamento efetuado durante a compactação de uma Laje.	27
Quadro 4.1- Resultados Obtidos no Ensaio de Escorrimento.	35
Quadro 4.2- Resumo dos resultados do Ensaio de Pista, e de Volumetria.....	45
Quadro 4.3-Relação entre a temperatura do ar e a temperatura da camada de base.	48

Lista de siglas e símbolos

Siglas

MBT- Mistura betuminosa temperada

MBQ- Mistura betuminosa quente

Símbolos

M- massa

L- maior dimensão da laje

l- menor dimensão da laje

E- espessura da laje

ρ_m - máxima densidade da mistura betuminosa

v-volume de vazios

ρ_{bssd} - baridade de um provete saturado com a superfície seca

m_1 - massa do provete seco

m_2 - massa do provete imerso em água

m_3 - massa do provete saturado com a superfície seca

ρ_w - massa volúmica da água à temperatura do ensaio

ρ_{mv} - baridade máxima da mistura betuminosa

$m^?_1$ - massa do picnómetro mais acessórios

$m^?_2$ - massa do picnómetro mais acessórios e mistura

$m^?_3$ - massa do picnómetro mais acessórios

V_p - volume do picnómetro preenchido ate a marca de referência

ρ_w - massa volúmica da água à temperatura de ensaio

V_m - porosidade do provete

ρ_{mv} - baridade máxima teórica da mistura

ρ_{bssd} - baridade aparente

D- material escorrido

W1- massa do tabuleiro envolto em papel de prata

W2- massa do tabuleiro envolto em papel de prata com o material que escorreu

B- massa da mistura ensaiada

1 Introdução

1.1 Enquadramento

As misturas betuminosas a utilizar em pavimentos rodoviários devem apresentar as seguintes principais características: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, trabalhabilidade, aderência e impermeabilidade. Estas características são obtidas com a variação da temperatura e método de fabrico, assim como das características dos constituintes da mistura betuminosa. Tradicionalmente, as misturas betuminosas são produzidas segundo dois métodos de fabrico, designadas por misturas a frio e a quente. No entanto, na última década começou a aplicar-se aditivos nas misturas a quente de modo a baixar a temperatura de fabrico e de compactação, sendo designadas por misturas temperadas (*warm* e *tiedé* nas terminologias anglo-saxónica e francesa, respetivamente).

As misturas a frio são produzidas em central à temperatura ambiente e são compostas por uma mistura de agregados a qual se junta uma emulsão betuminosa como ligante e, eventualmente, água ou aditivos, de tal forma que todas as partículas de agregado fiquem envolvidas por uma película de ligante, depois de ocorrer a rotura (separação da água quimicamente e por evaporação) (Branco, et al., 2011). Em Portugal, são essencialmente aplicadas as seguintes misturas frias: agregado britado de granulometria extensa com emulsão betuminosa; misturas betuminosas abertas a frio (Branco, et al., 2011). As misturas betuminosas que são utilizadas para pavimentos com tráfego pouco intenso são denominadas por tradicionais. As restantes são utilizadas para tratamentos superficiais, sendo as mais comuns microaglomerado betuminoso, lama asfáltica, e revestimento superficial.

Consideram-se misturas betuminosas a quente as misturas constituídas por agregados e um ligante betuminoso, onde os agregados que a constituem estejam dispostos por várias frações, doseados de uma forma ponderal ou volumétrica, que sejam misturados com uma quantidade pré-definida de ligante e em que, pelo menos, um dos constituintes (betume ou agregado) é aquecido e misturado por misturadora ou betoneira (Branco, et al., 2011).

As misturas a quente são produzidas entre os 150 e os 200°C (Branco, et al., 2011) e compactadas entre os 120 e os 140°C, estando estas temperaturas dependentes do tipo de betume e do tipo de compactador a utilizar (Branco, et al., 2011). Estas misturas permitem criar pavimentos com melhores características pois a sua maior temperatura de fabrico permite que o betume esteja num estado menos viscoso, o que permite que este penetre os espaços entre os agregados com maior facilidade, promovendo assim um melhor aproveitamento da adesividade do betume em relação aos agregados, o que vai levar a uma mistura mais densa com melhor desempenho.

Os principais tipos de mistura betuminosa a quente (MBQ) são as misturas dos grupos betão betuminoso (macadame betuminoso, mistura betuminosa densa, misturas de alto módulo, betão betuminoso rugoso) e betão betuminoso drenante.

Devido a uma maior consciência ambiental nasceu a necessidade de baixar a temperatura de produção das misturas a quente sem que estas perdessem qualidade. As elevadas temperaturas a que se produzem as MBQ são necessárias para secar o agregado, revesti-lo com ligante betuminoso, e para, atingir uma boa trabalhabilidade (Button, et al., 2007).

Ao utilizar-se a tecnologia das misturas betuminosas temperadas (MBT) pode-se baixar a produção das misturas betuminosas para uma gama de temperaturas entre os 100 e os 140°C (Capitão, et al., 2012).

A utilização desta tecnologia e a conseqüente redução da temperatura de produção e de compactação permite vários ganhos ambientais entre os quais:

- redução energética na produção e conseqüente diminuição do seu custo (Hurley & Prowell, 2005); (Rubio, et al., 2011);
- redução das emissões e odores provenientes das fábricas (Jamshidi, et al., 2013); (Rubio, et al., 2011);
- redução de fumos provenientes da mistura (Jamshidi, et al., 2013);
- melhoria das condições de trabalho no local de aplicação (Jamshidi, et al., 2013).

A utilização desta tecnologia também exige um menor custo de energia durante a compactação, visto que na generalidade dos casos as misturas tem melhor trabalhabilidade (Button, et al., 2007).

O fabrico de uma MBT pode ser realizado recorrendo a vários métodos. O fabrico de uma MBT a temperaturas mais baixas que uma MBQ só é conseguido devido ao aumento de trabalhabilidade da mistura. Esse aumento é conseguido de duas formas, através da junção de aditivos à mistura, ou através da adição de água à mistura.

Devido à importância das MBT, torna-se importante estudar a influência que a diminuição da temperatura de fabrico e compactação tem no comportamento deste tipo de misturas.

1.2 Objetivos e metodologia

Esta dissertação tem como objetivos:

- Avaliar o comportamento de uma MBT quando esta é produzida a temperaturas típicas de uma mistura betuminosa quente.
- Analisar a influência da temperatura de fabrico na compactação da MBT.
- Verificar se o aumento da temperatura de fabrico de uma MBT possibilita o aumento da distância de transporte, sem comprometer a qualidade do pavimento.

Este trabalho foi desenvolvido em 3 fases:

- A primeira fase consistiu na recolha de dados relativos ao “revisão bibliográfica”, onde se procurou aprofundar as matérias mais relevantes das misturas betuminosas com especial ênfase para as MBT. Aprofundaram-se os conhecimentos do método de fabrico das MBT, assim como o efeito que tem neste tipo de misturas. Procurou-se estudar também as normas dos ensaios realizados e da informação da literatura acerca destes e relacionada com as MBT.
- Na segunda fase realizou-se a campanha experimental, com o fabrico e compactação de duas misturas que apenas diferem entre si no aditivo utilizado, sendo que na mistura M02 foi adicionado o aditivo Sasobit® e na mistura M03 foi utilizado o Rediset®. Ambas as misturas foram sujeitas a ensaios de deformação permanente, volumetria (baridade e porosidade) e de escorrimento.
- Na última fase efetuou-se uma análise comparativa dos resultados obtidos para ambas as misturas, assim como numa mistura de controlo igual às anteriores mas sem a adição de qualquer aditivo. Recorrendo a um modelo de cálculo determinou-se qual o tempo de compactação ganho com o aumento da temperatura de fabrico de uma MBT.

1.3 Estrutura

A presente dissertação é constituída por 5 capítulos.

No Capítulo 1 – Introdução - enquadra-se, estrutura-se, e define-se os objetivos desta dissertação. Nele é abordado inicialmente o que são as misturas betuminosas temperadas e como estas podem contribuir para o aumento da distância de transporte. Este capítulo é dividido em 3 partes: Enquadramento; Objetivos e Metodologia; e Estrutura.

No Capítulo 2 - Estado de Arte - descreve-se os tipos de misturas mais utilizadas, com especial atenção para as misturas temperadas. Este capítulo é dividido em 3 partes: Misturas Betuminosas a Frio; Misturas Betuminosas a Quente; e Misturas betuminosas Temperadas.

No Capítulo 3 - Programa Experimental - definem-se os materiais utilizados para a formulação da mistura, e também são descritos os ensaios laboratoriais realizados. Este capítulo é dividido em 4 partes: Introdução; Caracterização dos Componentes da Mistura Betuminosa; Formulação da Mistura Betuminosa; Ensaio de Deformação Permanente; e Ensaio de Escorrimento.

No Capítulo 4 - Resultados e Discussão - apresenta-se e discute-se os resultados obtidos, sendo comparadas ambas as misturas relativamente aos ensaios de deformação permanente e de escorrimento. Este capítulo é constituído por 4 partes: Apresentação dos ensaios de deformação permanente; Discussão dos Ensaios de Deformação Permanente; Apresentação dos resultados de Escorrimento; Discussão dos Resultados do Ensaio de Escorrimento.

No Capítulo 5 - Conclusões e Trabalhos Futuros - sintetiza-se a análise e discussão dos resultados, sendo apresentadas as principais conclusões desta dissertação. Também se sugerem algumas linhas de investigação que podem ser pertinentes para a continuação do estudo deste tema. Este Capítulo é dividido em 2 partes: Conclusões; e Trabalhos Futuros.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Misturas betuminosas

2.1.1 Generalidades

As misturas betuminosas podem ser classificadas relativamente à sua temperatura de fabrico como misturas a frio, a quente, temperadas e semi-temperadas. Em seguida apresenta-se uma breve descrição das misturas fabricadas a quente, das misturas temperadas, e por fim das misturas fabricadas a frio.

2.1.2 Misturas a quente

As misturas a quente são misturas betuminosas produzidas a temperaturas elevadas. Permite obter misturas com melhor qualidade em comparação com as fabricadas a frio, e por isso, tradicionalmente são utilizadas em pavimento com maior tráfego. Os métodos de formulação deste tipo de mistura podem ser: empíricos; analíticos; volumétricos; racionais e de definição por especificação.

O método de formulação de misturas betuminosas a quente mais popular é o método de Marshall. O ensaio de Marshall é um método empírico que foi desenvolvido por Bruce Marshall, aperfeiçoado e melhorado pelo U.S Corps of Engineers (Wright & Dixon, 2004). Este ensaio aplica-se em misturas a quente para agregados com dimensão máxima de 25,4mm. O ensaio consiste na criação de 5 conjuntos de 3 provetes com uma mistura de agregados dentro do fuso granulométrico previamente especificado. Esses provetes terão a mesma constituição variando apenas na percentagem de betume sendo que cada conjunto variará 0,5% em relação ao anterior. Cada um dos provetes será sujeito a uma série de ensaios através dos quais se determinara as seguintes características de cada provete:

- baridade máxima teórica da mistura compactada;
- baridade aparente da mistura compactada;
- porosidade;
- volume de vazios na mistura de agregados (VMA);
- estabilidade;
- deformação.

Para cada grupo de provetes será feita a média de cada uma destas características. Posteriormente, por análise das especificações técnicas aplicáveis à mistura em estudo determina-se a percentagem ótima de betume a utilizar para a mistura.

As características das misturas a quente dependem essencialmente do tipo de agregados a utilizar da sua distribuição granulométrica, e da percentagem de betume da mistura.

As misturas betuminosas produzidas a quente mais comuns são as seguintes:

- Macadame betuminoso.
- Mistura betuminosa densa.
- Misturas de alto módulo de deformabilidade.
- Betão betuminoso.
- Betão betuminoso drenante.
- Microbetão betuminoso rugoso.
- Argamassa betuminosa.

2.1.3 Misturas temperadas

Devido a uma maior consciência ambiental nasceu a necessidade de criar uma tecnologia que permitisse a produção de misturas betuminosas de boa qualidade com menor fatura ambiental.

Segundo (Jamshidi, et al., 2013), as MBT permitem uma redução da temperatura de produção entre 30 a 50 °C. Esta diminuição de temperatura de fabrico leva a uma diminuição do consumo de combustível de cerca de um litro por cada 10 °C, assim como, à diminuição da emissão de CO₂ de aproximadamente 1kg/ton.

Devido à necessidade de criar misturas que possam ser trabalhadas a temperaturas mais baixas, foram criados vários métodos que permitem baixar a temperatura de fabrico e compactação das misturas betuminosas. Nesta nova tecnologia evidenciam-se as ceras orgânicas, os aditivos químicos, e a espuma de betume. A utilização desta nova tecnologia implica um elevado investimento inicial na conversão das fábricas e se for o caso, nos aditivos, no entanto a longo prazo tal investimento torna-se menos significativo quando comparado com as vantagens oferecidas por esta tecnologia.

Este tipo de tecnologia permite a redução da temperatura de fabrico, o que é conseguido de várias formas e vai depender do tipo de tecnologia a usar. Nas misturas onde se recorre as espumas de betume, o abaixamento é conseguido com a adição de água, que quando em contacto com o betume a elevadas temperaturas, vai evaporar criando uma espuma de betume. Esta espuma torna o envolvimento do ligante ao agregado mais fácil. Já os aditivos químicos vão modificar a interação entre o ligante betuminoso e o agregado, sendo, que os efeitos provocados na mistura vão variar conforme o tipo de aditivo aplicado. Os aditivos orgânicos vão modificar a reologia do betume, tornando-o menos viscoso, permitindo assim um melhor envolvimento a temperaturas mais baixas.

A redução da temperatura de fabrico só é possível devido à maior trabalhabilidade das MBT. Esta maior trabalhabilidade permite o aumento até 50% da incorporação de misturas recuperadas, devido à maior trabalhabilidade das misturas temperadas que permite baixar a temperatura de fabrico da mistura. A diminuição da temperatura de fabrico leva a um menor envelhecimento do ligante, permitindo o aumento de material recuperado na constituição da mistura (Rubio, et al., 2011). Desta forma consegue-se um ganho económico e ecológico. Mas os ganhos ecológicos não ficam por aqui, a diminuição da temperatura vai levar à diminuição do combustível consumido, e conseqüentemente, à diminuição de emissões de elementos prejudiciais ao ambiente.

Segundo (Jamshidi, et al., 2013) um trabalhador que esteja envolvido com a produção espalhamento ou compactação, está exposto a cerca de 0.1 a 2 mg/m³ de fumos venenosos. Com a diminuição da temperatura da mistura a quantidade de fumos produzidos pela mistura vai diminuir significativamente proporcionando assim melhores condições de trabalho.

Este tipo de misturas também vai proporcionar o aumento do período de pavimentação, pois, devido a sua menor temperatura de compactação torna-se possível compactar a mistura a temperaturas mais baixas (Button, et al., 2007). No entanto os elevados custos iniciais desta tecnologia podem levar ao desencorajamento da sua utilização.

O custo inicial vai depender do tipo de tecnologia a usar, sendo que todas requerem modificações nas fábricas para a sua produção. Para além disso as tecnologias que requerem a adição de aditivos, ainda vão ter associados os custos dos aditivos assim como com as licenças destes (Rubio, et al., 2011).

Estes custos podem ser contrabalançados com a diminuição do combustível gasto, cerca de 30% (Hurley & Prowell, 2005), assim como os custos referentes com o controlo das emissões

poluentes, que segundo (Hurley & Prowell, 2005) representa 30 a 50% dos custos de produção de uma fábrica. (Hurley & Prowell, 2005).

Esta tecnologia também apresenta algumas contrapartidas de desempenho, como é o caso da maior vulnerabilidade à deformação permanente dos pavimentos realizados com esta tecnologia. Estes problemas ocorrem devido à baixa temperatura de fabrico e compactação destas misturas, o que vai levar a um menor envelhecimento do betume, tornando-o mais mole. Esta consequência pode ser mitigada com a utilização de um betume mais duro (Rubio, et al., 2011).

Existe também a incerteza da emissão de CO₂ durante a produção de alguns destes aditivos, o que, poderá atenuar a diminuição de CO₂ obtida durante o fabrico da mistura (Capitão, et al., 2012).

A presença de água durante o fabrico e a compactação pode levar a problemas de sensibilidade à água do pavimento (Rubio, et al., 2011). A baixa temperatura de produção, e a necessidade de adição de água de algumas tecnologias são as principais causas deste problema, uma vez, que as temperaturas de produção variam entre os 140 e os 100 °C, o que torna a evaporação desta água mais difícil (Khodaii, et al., 2012), diminuindo assim a qualidade da mistura. Em seguida são apresentados alguns benefícios e custos desta tecnologia.

Benefícios

A diminuição da temperatura de produção e de compactação vai criar uma serie de benefícios como: a diminuição da energia necessária para produzir uma mistura, e consequentemente a um menor custo em energia; a uma menor produção de fumos poluentes e venenosos, melhorando assim as condições de trabalho na fábrica e em obra.

A redução da temperatura de fabrico poderá levar a uma diminuição de custo energético na ordem do 30%. A diminuição da temperatura de produção também vai levar á diminuição da produção de fumos tóxicos e consequentemente á diminuição de custos, uma vez que uma grande parte dos custos de produção de asfalto é devida ao controlo das emissões poluentes, sendo que este controlo de emissões pode representar 30 a 50% dos custos de produção de uma fábrica (Hurley & Prowell, 2005);

A diminuição da temperatura de fabrico irá provocar um menor desgaste na fábrica onde a mistura é produzida, levando assim, a menores custos de manutenção da mesma (M. Carmen Rubio, 2011). No entanto as potenciais vantagens das MBT podem ser mais extensas, pois o aumento da trabalhabilidade deste tipo de mistura vai permitir a sua aplicação em condições que antes não eram possíveis, segundo (Button, Estakhri, & Wimsatt, 2007), as MBT permitem o aumento da estação de pavimentação em climas mais frios, assim como o aumento da distância de transporte. Tal é conseguido, devido a menor temperatura de produção e compactação das MBT. O facto de este tipo de misturas se fabricarem a temperaturas mais baixas leva a uma menor diferença de temperatura de fabrico e a temperatura ambiente o que leva à diminuição da velocidade de arrefecimento da mistura, permitindo assim uma compactação eficaz mesmo a temperaturas atmosféricas mais baixas (M. Carmen Rubio, 2011).

Segundo (León, et al., 2011), a diminuição da temperatura de fabrico tem uma influência significativa no tempo disponível para a compactação de uma mistura. Uma MBQ fabricada a 165 °C e compactada a 100 °C tem cerca de 60 minutos disponíveis desde o fabrico ate à compactação, por sua vez uma MBT produzida a 115 °C e compactada a 90 °C apresenta um intervalo de 75 minutos entre o fabrico e a compactação.

Segundo (Smith, 2013) o ganho de tempo devido ao aumento da temperatura de produção de uma MBT permite aumentar o tempo disponível entre a produção e a compactação da mistura, sem que exista consequências no comportamento futuro do pavimento. Este ganho de tempo pode ser utilizado para aumentar o tempo de transporte o que leva a vários benefícios, podendo ser um fator decisivo no rápido restabelecimento das vias de comunicação após uma catástrofe.

Este tipo de misturas também poderá levar ao aumento do tempo de serviço do pavimento, uma vez que devido à menor temperatura de produção e compactação leva ao menor envelhecimento do betume e conseqüentemente, a um pavimento mais durável (Button, Estakhri, & Wimsatt, 2007).

O aumento da trabalhabilidade das MBT permite o aumento da quantidade de pavimento recuperado que se pode adicionar à mistura, sendo que este aumento pode ser nos valores da ordem dos 50%. Os pavimentos recuperados para além de benefícios económicos também vão ser benéficos nas características do pavimento a longo prazo. As MBT são menos rígidas que as MBQ, a adição de asfalto reciclado irá conferir à mistura maior rigidez, também vai diminuir ao envelhecimento do ligante e conseqüentemente levar ao aumento de longevidade do pavimento (M. Carmen Rubio, 2011).

Devido à maior rigidez das misturas com asfalto recuperado a sua compactação é mais difícil, limitando assim a quantidade de asfalto recuperado a utilizar. No entanto a implementação deste tipo de material nas MBT, que tem uma elevada compactabilidade, permite a utilização de maiores quantidades material recuperado na mistura, sem que condicione comportamento da mistura durante a compactação (Button, Estakhri, & Wimsatt, 2007).

A produção e compactação das MBT a temperaturas mais baixas leva à diminuição do tempo de aplicação de pavimentos com várias camadas de mistura betuminosa. Tal ocorre devido à menor temperatura de compactação das MBT, o que leva a que o tempo de espera para se aplicar e compactar a próxima camada seja reduzido. Esta característica das MBT também vai diminuir o tempo de cura de um pavimento tornando a abertura do pavimento mais rápida (Button, Estakhri, & Wimsatt, 2007).

Devido à menor emissão de fumos poluentes torna-se possível a existência de centrais de produção mais perto de zonas urbanas, onde a emissão de fumos poluentes é mais restrita. Este fator leva à diminuição do tempo de transporte, permitindo assim uma execução mais rápida e um asfalto de melhor qualidade, pois com a diminuição do tempo de transporte o risco de a mistura já não estar em condições ótimas de espalhamento e compactação é mais reduzido (Hurley & Prowell, 2005).

Custos

Esta tecnologia apesar das suas vantagens, também tem algumas desvantagens. O fato de a mistura ser realizada a temperaturas mais baixas vai permitir um menor envelhecimento do betume, o que pode aumentar a durabilidade do pavimento. No entanto a curto prazo poderá causar problemas relacionados com a falta de rigidez do ligante. Quando sujeito a cargas permanentes um pavimento que foi fabricado recorrendo a tecnologia das MBT poderá ser mais suscetível a problemas de deformação permanente, devido à menor rigidez do pavimento (M. Carmen Rubio, 2011). Este problema não é comum a todas as tecnologias das MBT, e poderá ser atenuado com a utilização de betumes com maior rigidez. Quando o betume pouco envelhecido está num pavimento com um baixo índice de vazios a resistência a deformação permanente é particularmente afetada. Uma

Devido ao pouco tempo de uso desta tecnologia ainda existem dúvidas em relação ao comportamento a longo prazo das MBT, principalmente das que incorporam asfalto recuperado. Sendo necessário realizar mais ensaios de forma a determinar o comportamento a longo prazo deste tipo de pavimentos (Sargand, et al., 2011).

Existe também a incerteza da emissão de CO₂ durante a produção de alguns destes aditivos o que poderá atenuar a diminuição de CO₂ obtida durante o fabrico da mistura (Capitão, et al., 2012).

A diminuição da temperatura relativamente à temperatura de produção das MBQ poderá provocar problemas relativos à sensibilidade à água. Estes problemas poderão causar a desagregação do pavimento. Tal é devido à presença de água durante o fabrico e a compactação da mistura. Segundo (M. Carmen Rubio, 2011) as duas principais causas do aparecimento de água nestas fases são a baixa temperatura de produção e a presença de água em alguns aditivos utilizados para a formulação das MBT.

As temperaturas de produção típicas das MBT variam entre os 100°C e os 140°C, o que torna a secagem do agregado mais difícil, a presença de água vai tornar o envolvimento do betume ao agregado mais difícil criando assim uma mistura com menos qualidade (Khodaii, et al., 2012).

A maior presença de água não advém apenas da maior dificuldade da secagem de agregado, pois existem várias soluções tecnológicas, que implicam a adição de água para baixar a temperatura de produção (espuma betuminosa e alguns aditivos), introduzindo assim, água na mistura, e devido à baixa temperatura de produção, poderá dificultar a secagem do agregado, tornando a ligação entre o betume e o agregado mais difícil, levando assim à criação de um pavimento com potenciais problemas de desagregação.

No Quadro 2.1 estão resumidas algumas das vantagens e desvantagens deste tipo de tecnologia.

As MBT são produzidas essencialmente por três métodos distintos: adição de produtos químicos; adição de produtos orgânicos; e através de espuma betuminosa. A presença de aditivos, químicos ou orgânicos, na formulação de MBT permite baixar a energia de compactação relativamente a MBQ.

a) Aditivos Químicos

Os aditivos químicos vão baixar a temperatura de produção e compactação das misturas de forma diferente dos aditivos orgânicos e espumas betuminosas. Estes aditivos são constituídos pela combinação de vários agentes que vão modificar o comportamento do betume, nomeadamente: surfactantes; promotores de adesividade, polímeros e aditivos que promovem o envolvimento dos agregados, a trabalhabilidade e a compactação da mistura (Rubio, et al., 2011). Muitos destes aditivos vão mudar o ângulo de contacto do betume facilitando assim a envolvimento entre o betume e os agregados, como pode ser visto Figura 2.1.

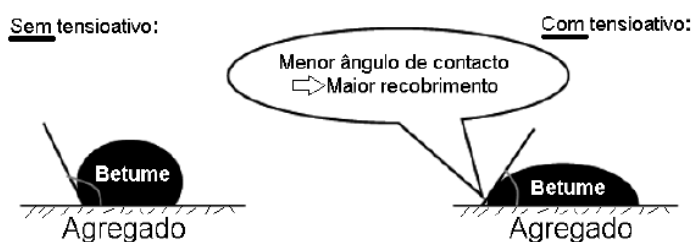


Figura 2.1-Diminuição do ângulo de contacto entre o betume e o agregado, provocado por aditivos químicos (Martinho, 2014).

Dependendo dos constituintes dos aditivos vão variando as características da mistura betuminosa. Os aditivos químicos mais populares são, o Rediset[®], o Evoterm[®] e o Cecabase[®].

Quadro 2.1-Resumo dos benefícios e desvantagens das MBT.

Benefícios	Ambientais	<p>Diminuição da emissões de CO₂ relativamente as MBQ</p> <p>Diminuição da emissão de fumos venenosos</p> <p>Melhores condições de trabalho</p>
	Económicos	<p>Diminuição de energia consumida durante o fabrico das misturas</p> <p>Diminuição dos custos associados ao controlo de gases emitidos</p> <p>Maior facilidade na obtenção de licenças para fábricas em zonas urbanas</p> <p>Diminuição dos encargos de manutenção</p>
	Produção	<p>Aumento da trabalhabilidade</p> <p>Menor envelhecimento da mistura</p> <p>Permite execução de misturas betuminosas recuperadas, com melhor aproveitamento de material reutilizado</p> <p>Aumento da distância de transporte</p>
	Pavimentação	<p>Melhor trabalhabilidade facilita o espalhamento</p> <p>Requer menos energia para ser compactado</p> <p>Aumento da estação de pavimentação</p> <p>Maior rapidez na construção de pavimentos de várias camadas</p> <p>Diminuição da suscetibilidade da mistura antes de ser compactada a baixas temperaturas</p> <p>Menor tempo de cura</p>
Desvantagens	<p>Aumento dos custos de produção devido ao custo dos aditivos e das licenças</p> <p>Falta de dados relativamente ao comportamento do pavimento a longo prazo</p> <p>Maior suscetibilidade ao dano provocado pela água</p> <p>Problemas de revestimento e de ligação, provocados por uma deficiente evaporação da água, devido a baixas temperaturas de produção</p> <p>Possibilidade de maior deformação permanente</p> <p>Incerteza nas emissões de CO₂ durante a produção de alguns aditivos</p>	

O Rediset[®] foi introduzido pela AkzoNobel em 2007 e é um aditivo químico que foi desenhado para colmatar algumas deficiências evidenciadas por outros aditivos, entre elas, a pouca rigidez que outras misturas temperadas apresentam, assim como, uma elevada propensão a problemas causados pela água. É um aditivo constituído por um pacote de produtos tensoativos e promotores de adesividade (Capitão, et al., 2012).

Segundo o fabricante deve ser adicionado 1 a 2% deste aditivo, e tem como objetivo, melhorar o envolvimento e a adesividade do ligante betuminoso ao agregado. Conferindo à mistura maior

trabalhabilidade, o aditivo vai permitir, o abaixamento das temperaturas de fabrico e compactação. O aditivo encontra-se em forma de pastilhas e dispensa a adição de água na mistura, pois pode ser misturado no betume, ou adicionado durante o fabrico da mistura. Tem um ponto de fusão de 110 °C (Zaumanis, et al., 2012), o que permite uma fácil aplicação durante a produção da mistura, assim como, a garantia da manutenção das características que oferece à mistura durante o seu espalhamento e compactação.

O Rediset® permite um abaixamento da temperatura de fabrico até 35 °C (Banerjee, et al., 2012), e conseqüentemente, a diminuição do consumo de combustível de 2,5 l/ton (aproximadamente 30% relativamente as MBQ), (Logaraj, et al., 2011). Este aditivo promove o aumento da adesividade, e do envolvimento do ligante betuminoso ao agregado, o que leva ao aumento da trabalhabilidade da mistura, permitindo assim, a compactação da mistura a temperaturas mais baixas.

O que vai distinguir este aditivo de outros aditivos químicos como o Evoterm® e o Cecabase®, é o facto de ser um agente antidesagregação, melhorando assim a resistência do pavimento ao dano provocado pela água (Banerjee, et al., 2012).

Este aditivo também vai ter um efeito antioxidante na mistura, o que torna os pavimentos menos propensos ao envelhecimento, e ainda baixa a viscosidade da mistura a temperaturas de fabrico e de compactação (Sundaran & Almeida, 2010)

Ao contrário das ceras orgânicas o aditivo Rediset® não vai alterar significativamente a reologia do betume. Segundo, (Logaraj, et al., 2011), a adição deste aditivo não altera significativamente a viscosidade do betume. Quando sujeito aos ensaios normalmente aplicados o betume modificado com Rediset® apresenta resultados semelhantes ao betume puro. No entanto, o betume alterado apresenta um ligeiro aumento no ponto de amolecimento, assim como uma ligeira diminuição do ponto de penetração.

b) Ceras Orgânicas

As ceras orgânicas são constituídas por uma cadeia de hidrocarbonatos, que quando se encontram a temperaturas acima dos 100 °C, passam do estado liquido ao solido. A adição destas ceras ao betume altera a viscosidade deste, tornando-o mais fluido quando este se encontra a temperaturas acima dos 100 °C (Capitão, et al., 2012).

Estas características permitem a sua fácil aplicação no fabrico de uma mistura betuminosa temperada. Estes aditivos diminuem a viscosidade do betume, facilitando a envolvimento do betume no agregado, permitindo assim, a produção da mistura a temperaturas mais baixas. Para além da menor viscosidade do betume, as ceras também podem provocar um aumento da rigidez, e conseqüentemente, da resistência a deformação do pavimento. A cera orgânica denominada por Sasobit® é produzida pela empresa Sasol Wax, a partir de gás natural, através do método Fisher-Tropsch. Dissolve-se no betume a temperaturas na ordem dos 70 a 120 °C, e possibilita o abaixamento da temperatura de produção e compactação entre os 18 e os 54 °C (Qin, et al., 2013). Este aditivo encontra-se em forma de cápsula, e não necessita de água para ser adicionado à mistura, fundindo-se completamente no betume a cerca 116°C (Jamshidi, et al., 2013). A sua adição é feita diretamente durante o fabrico da mistura, evitando assim, a necessidade de misturar o aditivo com o betume antes do fabrico da mistura.

As alterações provocadas por este aditivo no betume vão ter influência no comportamento da mistura betuminosa. Este aditivo diminui a viscosidade do betume, permitindo um melhor envolvimento do betume com o agregado, e conseqüentemente à diminuição da temperatura de fabrico e compactação da mistura. Segundo a Sasol Wax, a massa de Sasobit® a adicionar à mistura, deve estar situada entre 0,8% a 4% da massa de ligante betuminoso (Jamshidi, et al., 2013). Com quantidades abaixo dos 0,8% da massa de betume os efeitos do aditivo não vão ser sentidos na mistura, e com valores acima dos 4% da massa de betume vão ter efeitos prejudiciais nas propriedades da mistura.

Este aditivo para além de alterar as características da mistura durante o seu fabrico, e compactação, também vai modificar algumas propriedades do pavimento. Aumenta o módulo de rigidez, e a resistência à deformação do pavimento, a temperaturas de serviço mais altas. Este aumento de rigidez permite a utilização de um ligante betuminoso mais mole, com resultados semelhantes aos obtidos por um pavimento formado por uma MBQ com um ligante mais rígido. (Silva, et al., 2010).

Quando misturado com o betume, e a temperaturas abaixo do ponto de fusão, o Sasobit® vai criar estruturas cristalinas que vão promover o aumento da rigidez do pavimento. Esta estrutura cristalina vai aumentar o ponto de amolecimento do betume, e baixar o valor de penetração do mesmo. Levando assim ao aumento da resistência à deformação do pavimento. (Yi-qiu, et al., 2012).

Devido à formação destas estruturas cristalinas e do conseqüente aumento de rigidez da mistura, o pavimento vai apresentar uma menor resistência à fadiga. Então, para mitigar tal efeito deve-se utilizar um betume mais mole, e conseqüentemente menos sensível a este tipo de solicitação (Silva, et al., 2010).

O Sasobit® vai funcionar como um fluidificante do betume, ou seja, vai alterar a viscosidade do betume. O betume puro comporta-se como um fluido Newtoniano, isto é, a sua viscosidade vai estar diretamente relacionada com a temperatura a que se encontra. A temperaturas mais baixas o betume vai ser mais viscoso, e com o aumento da temperatura vai tornar-se cada vez mais fluido. Ora a presença do Sasobit® vai alterar este comportamento, tornando o betume aditivado num fluido não Newtoniano, tornando a viscosidade do fluido inversamente dependente do valor da taxa de corte. Então, quando o betume aditivado se encontrar a temperaturas acima do ponto de fusão do aditivo, este vai tornar o betume menos viscoso, permitindo assim o abaixamento da temperatura de fabrico entre os 20 a 30°C (Jamshidi, et al., 2013). Quando a temperatura do betume aditivado for mais baixa que o ponto de fusão do Sasobit®, este vai levar à criação de longas cadeias cristalinas, que vão tornar o betume mais rígido e estável (Jamshidi, et al., 2013), tornando-o assim mais viscoso.

Segundo (Yi-qiu, et al., 2012), a influência do aditivo no betume vai ser variável, e dependente da temperatura e da quantidade de Sasobit® na mistura. Para temperaturas acima dos 110°C, o betume aditivado vai ter uma viscosidade mais baixa que um betume puro e, por sua vez a temperaturas abaixo dos 70 °C, o betume aditivado vai ser mais viscoso que um betume puro. Este aumento de viscosidade está relacionado com a temperatura de fusão do Sasobit® (90 °C). De referir também, que a temperaturas acima dos 120 °C a velocidade a que o ensaio de viscosidade é realizado não vai influenciar a viscosidade do betume aditivado, o que mostra, que a temperaturas mais elevadas, o betume aditivado vai ter um comportamento Newtoniano.

O aumento de trabalhabilidade conferido pelo Sasobit® à mistura vai permitir a implementação de material recuperado, pois o aditivo vai tornar ligante mais fluido, tornando assim o envolvimento da mistura recuperada mais fácil (Jamshidi, et al., 2013). A fácil integração deste tipo de materiais, permite uma redução dos custos de produção, assim como, um aumento da rigidez do pavimento.

c) Espuma betuminosa

A tecnologia de espuma de betume consiste na criação de uma espuma que permita o mais fácil envolvimento do agregado pelo ligante betuminoso. Quando se adiciona água ao betume, que se encontra a elevadas temperaturas, esta vai evaporar, criando assim bolsas de ar, onde o vapor de água vai ficar momentaneamente preso, o que leva ao aumento do volume do ligante, criando a espuma de betume. Esta espuma vai envolver o agregado mais facilmente que o betume, o que permite a diminuição da energia necessária para o fabrico da mistura. Segundo (Rubio, et al., 2011), existem duas formas de adicionar água à mistura, por tecnologias que contêm água, ou por tecnologias que incorporam água. Como o nome indica as tecnologias que incorporam água

vão incorporar água diretamente na mistura, enquanto, as tecnologias que contêm água vão introduzir água na mistura através de aditivos zeolíticos.

As tecnologias que incorporam água na mistura fazem-no através da adição de zeolíticos, que contêm aproximadamente 20% de água. Quando estes libertam a água que contêm, esta vai evaporar, aumentando assim o volume de ligante betuminoso. O efeito espuma betuminosa dura entre 6 a 7h (Rubio, et al., 2011). Segundo (Newcomb, 2011), a adição de zeolíticos pode levar à diminuição de temperatura de fabrico entre 30 a 45 °C. Para a implementação destes aditivos na mistura é necessária a modificação da fábrica.

As tecnologias que contem água pressupõem a adição desta antes de se proceder à mistura, sendo então adicionado ao betume cerca de 1 a 3% da sua massa em água. A adição de água ao betume quente vai desencadear o aumento de volume provocado pela evaporação da água, permitindo assim, um envolvimento mais fácil do agregado por parte do ligante betuminoso. A incorporação de água na mistura permite o abaixamento da temperatura de fabrico para valores entre os 121 e os 135°C. Embora este método pressuponha a modificação da fábrica, no entanto ao contrário dos outros métodos não tem mais custos associados, pois não requer a compra de aditivos, permitindo assim custos de produção mais baixos (Newcomb, 2011).

2.1.4 Misturas fabricadas a frio

Misturas a frio são misturas que não necessitam de ser aquecidas na sua produção, no seu espalhamento, nem na sua compactação. São utilizadas em camadas de pavimento com pouco tráfego e no reperfilamento de pavimentos e no enchimento de bermas.

Estas misturas são produzidas em central e “são compostas por uma mistura de agregados à qual se junta uma emulsão betuminosa como ligante e, eventualmente água e aditivos, de tal forma que todas as partículas de agregado fiquem envolvidas por uma película de ligante, depois de ocorrer a rotura” (Branco, et al., 2011).

Segundo (Branco, et al., 2011), em Portugal são essencialmente aplicadas as seguintes misturas frias tradicionais: agregado britado de granulometria extensa com emulsão betuminosa; e misturas betuminosas abertas a frio.

As misturas a frio também são utilizadas para tratamentos superficiais. Para este fim são normalmente utilizadas as seguintes misturas: microaglomerado betuminoso frio; revestimento superficial betuminoso; e lama asfáltica.

2.2 Fabrico de misturas betuminosas

A qualidade final da mistura betuminosa vai estar ligada à qualidade de fabrico da mesma. Durante o fabrico vão ser controlados vários fatores que vão determinar a qualidade final do pavimento, fatores esses que estão relacionados com as quantidades em que cada constituinte está presente na mistura, assim como, as condições em que estes se encontram. A regulação da temperatura é um fator importante no fabrico de misturas betuminosas. Para se proceder a um correto fabrico de uma mistura betuminosa, é necessário controlar a granulometria dos agregados a utilizar, assim como, a quantidade de betume que vai ser adicionado ao agregado durante a produção da mistura. O agregado deve estar seco, e encontrar-se a uma temperatura que permita um eficaz envolvimento do betume ao agregado, sem que este perca temperatura e consequentemente se torne mais viscoso. O betume deve ser aquecido até uma temperatura onde este tenha uma fluidez necessária para se proceder a uma eficaz mistura com o agregado.

O método de produção das MBT e MBQ respeitam os mesmos princípios, sendo que as MBT são modificadas de modo a que possam ser fabricadas a temperaturas mais baixas. Para que as MBT sejam produzidas a temperaturas mais baixas, é necessário que estas tenham uma maior trabalhabilidade. Tal é conseguido com a introdução de aditivos na mistura, ou com a adição de pequenas quantidades de água no betume. A incorporação de aditivos obriga a modificações, na fábrica, e no método de produção, estando estas ligações condicionadas pelo tipo de tecnologia usado.

Com o aparecimento de MBT foi possível obter misturas com características semelhantes às MBQ mas produzidas a temperaturas mais baixas. Como já foi referido tal é conseguido recorrendo a aditivos químicos, ceras orgânicas ou sintéticas, ou através da adição de água fria ao betume. Com este tipo de tecnologia a mistura pode ser fabricada entre os 100 e os 140 °C (Capitão, et al., 2012).

a) Fabrico central

As misturas betuminosas a quente são fabricadas em centrais industriais onde se mistura os agregados com betume e eventuais aditivos. As centrais são definidas segundo a sua operacionalidade, e segundo a forma como produzem a mistura.

Segundo (Branco, et al., 2011), relativamente à operacionalidade, as centrais são frequentemente descritas como portáteis, semi-portáteis, e fixas. Por portáteis considera-se as centrais de pequenas dimensões, que são compactas e auto-transportáveis. As centrais são semi-portáteis quando os seus componentes necessitam ser desmontados para serem transportados para outro local onde serão novamente montados. Já as centrais fixas são centrais que se encontram sempre no mesmo local, quando existe procura constante. Em relação ao tipo de produção, as centrais podem ser classificadas como centrais de produção contínua ou centrais descontínuas. Nas descontínuas as quantidades corretas de agregado e betume, determinadas em peso dos materiais, são misturadas, sendo seguidamente toda a mistura colocada em camiões e transportadas para o local de colocação em obra. As centrais contínuas utilizam um processo semelhante mas a produção é contínua, isto é, a mistura é fabricada e posteriormente armazenada em silos. Em seguida a mistura é descarregada nos camiões. Quando a mistura sai da misturadora para o silo, entra nova dosagem de materiais no mesmo misturador, o qual funciona em contínuo.

Independentemente do tipo de central de produção as misturas são fabricadas de forma similar. A produção de uma mistura betuminosa a quente pode ser dividida em 3 fases: preparação; aquecimento; e produção.

b) Preparação

Esta fase consiste na preparação dos agregados que vão ser utilizadas na mistura. Após a determinação da granulometria e do tipo de agregados, é necessário tratá-los de modo a obter-se a mistura desejada. Começa-se por retirar a poeira dos agregados de maiores dimensões, sendo que essa “poeira” se tiver uma graduação uniforme pode ser reutilizada como fíler. Em seguida, recorrendo a um sistema de aquecimento, os agregados serão secos, isto é, será retirada a humidade que os agregados poderão ter, por norma, o fíler não é seco, sendo que essa secagem irá ocorrer durante o aquecimento do agregado antes da produção. O controlo da uniformidade dos agregados é realizado nesta fase. Este controlo serve para determinar se a graduação dos agregados se encontra dentro dos limites de tolerância. Esta verificação é importante uma vez que uma deficiente graduação dos agregados irá produzir diferenças significativas no resultado final da mistura.

c) Aquecimento

Na fase aquecimento os constituintes da mistura serão aquecidos. O betume será aquecido a uma temperatura que lhe permita ter uma viscosidade adequada para o seu manuseamento. Esta temperatura devera ser controlada, uma vez que, o betume se exposto a temperaturas muito elevadas corre o risco de se queimar, perdendo assim várias propriedades desejáveis. Uma viscosidade adequada permite uma mais fácil envolvência do betume com o agregado, e consequentemente uma melhor trabalhabilidade da mistura. Os agregados antes de serem misturados são aquecidos a uma temperatura igual ou superior à temperatura a que vai ser realizada a mistura. Este aquecimento é realizado para evitar que durante a mistura destes com o betume, não ocorra uma perda de temperatura do betume e consequentemente um aumento da viscosidade deste. O aquecimento também serve para retirar qualquer humidade que ainda esteja presente nos agregados.

d) Produção

Após o aquecimento dos agregados e da mistura ate à temperatura desejada, deve proceder-se à sua mistura. Uma eficaz produção da mistura depende da relação temperatura/viscosidade, sendo que esta relação é condicionada pela temperatura de produção e pelo tipo de betume a utilizar. A viscosidade a que o betume vai ser utilizado, é influenciada pelo tipo de betume, uma vez que para misturas com agregados de maiores dimensões, é preferível utilizar betumes num estado mais viscoso. Por sua vez para misturas com predominância de agregados finos convém utilizar betumes que estejam mais fluidos. A temperatura a que esta se procede vai depender do tipo de mistura e das suas características, As MBQ são normalmente produzidas a temperaturas na ordem dos 165 °C, por sua vez as MBT podem ser produzidas a temperaturas mais baixas na ordem dos 120 °C. A diminuição da temperatura de compactação é conseguida devido à maior trabalhabilidade das MBT, tal é conseguido recorrendo a aditivos ou a introdução de pequenas quantidades de água durante a produção. Esta maior trabalhabilidade acontece devido a um fácil envolvimento do agregado por parte do ligante, este envolvimento pode ser conseguido através do aumento da fluidez do ligante (aditivos orgânicos), da melhor adesividade entre o ligante e o agregado (aditivos químicos) ou graças a um aumento momentâneo de volume do betume que vai facilitar o envolvimento do agregado por este (espumas betuminosas). A diminuição da temperatura de produção pode ter vários benefícios.

2.3 Compactação de misturas betuminosas

A compactação é utilizada para dar maior densidade à mistura betuminosa, de modo a criar uma camada de pavimento mais resistente e homogénea. Uma boa compactação é influenciada pelos seguintes fatores:

- temperatura de compactação;
- seleção do agregado;
- método de compactação.

A temperatura de compactação vai influenciar a rigidez do ligante, e consequentemente a rigidez da mistura durante a compactação (Azari, et al., 2003).

Uma boa compactação está diretamente relacionada com a temperatura a que esta se encontra. Então é essencial que a mistura seja compactada no reduzido período de tempo em que esta se encontra numa gama de temperaturas aceitável.

Uma mistura deve ser compactada quando apresenta uma viscosidade dinâmica entre os 2 e os 20 Pa.s. Então uma MBQ deve ser compactada entre os 120 e os 140 °C, temperaturas onde estes valores de viscosidade dinâmica estão garantidos (Branco, et al., 2011).

A seleção de agregados é fundamental no comportamento da mistura durante e após a compactação. Um pavimento de boa qualidade deve ser constituído por agregados angulares, cúbicos e rugosos. Estas três características permitem um elevado atrito interno, e consequentemente um aumento da resistência do pavimento. No entanto o aumento do atrito interno também dificulta a compactação do mesmo, sendo que este fator é mitigado com a presença do betume, uma vez que este vai servir de lubrificante durante a compactação da mistura, facilitando-a. O betume só tem este efeito na compactação se esta for realizada a temperaturas elevadas, uma vez que a viscosidade do betume está diretamente ligada à temperatura a que este se encontra. Para além destes fatores, a granulometria também influencia a compactação de uma mistura. A curva granulométrica selecionada deve ser a mais próxima possível da curva de baridade máxima, pois quanto mais próxima desta estiver, menor será a energia necessária para se proceder a uma boa compactação.

O método de compactação de uma mistura depende do equipamento utilizado para o efeito. A compactação em obra pode ser realizada por vários tipos de compactadores: por cilindros de rasto liso estático, por cilindros de rasto liso vibradores, por cilindros de pneus, por cilindro oscilador, por cilindro com vibração orientada, e por cilindros “inteligentes”.

As temperaturas de produção e compactação variam conforme o tipo de tecnologia utilizado. A janela temporal obtida pela variação da temperatura de fabrico, e compactação é selecionada de modo a permitir um bom envolvimento da mistura, assim como uma boa compactação. No entanto os métodos utilizados para prever essa janela temporal nas misturas betuminosas quentes, poderão não ser válidos para as misturas temperadas. Uma forma de se poder estimar essa janela temporal é através da comparação da baridade aparente entre uma MBT e uma MBQ de referência (Rubio, et al., 2011).

A distribuição das partículas e dos ligantes de uma mistura estão diretamente ligados à temperatura a que se procede a sua compactação. Assim a diminuição da temperatura de fabrico e compactação efetuadas pelas MBT poderá causar problemas durante a compactação. Tal é compensado pela maior trabalhabilidade das MBT. Tal pode ser conseguido com o aumento do volume do ligante (espuma betuminosa), ou recorrendo a aditivos. Estes aditivos vão modificar o comportamento da mistura tornando-a mais trabalhável. O aumento de trabalhabilidade leva à diminuição da energia de compactação de uma mistura temperada, o que permite a diminuição da temperatura de compactação. Segundo (Zaumanis, et al., 2012) a presença dos aditivos Sasobit e Rediset, permitem a diminuição da temperatura de compactação até 25 °C, sem que exista perda de rigidez, e sem que exista um aumento da suscetibilidade do pavimento à deformação permanente. As MBT aditivadas com ceras orgânicas diminuem a viscosidade do ligante tornando a mistura mais trabalhável a baixas temperaturas e consequentemente mais contactável. Por sua vez as misturas que contêm aditivos químicos vão ter uma melhor ligação entre o agregado e o ligante o que vai levar a uma melhor trabalhabilidade por parte da mistura e consequentemente uma mais fácil compactação

3 Programa experimental

3.1 Introdução

O trabalho experimental desta dissertação foi desenvolvido no Laboratório de Vias de Comunicação e Transportes, do Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos do Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Nesta dissertação desenvolveu-se um programa experimental, que teve como objetivo avaliar o comportamento de uma mistura betuminosa temperada, quando fabricada e compactada a diferentes temperaturas. Para tal, foram estudadas as misturas M02 e M03 da tese de doutoramento “Misturas Betuminosas Temperadas com Incorporação de Subprodutos Industriais – Caracterização e Validação Tecnológica” realizada no Instituto Superior Técnico por Fernando Martinho (Martinho, 2014). A mistura betuminosa selecionada é uma mistura do tipo AC20 Base 35/50, com a mesma granulometria, diferindo no aditivo adicionado. A mistura M02 é aditivada com a cera orgânica Sasobit®, enquanto a mistura M03 é aditivada com o aditivo químico Rediset®. Ambas as misturas foram fabricadas a 165 e 120 °C, a variação da temperatura de produção existe devido à necessidade do estudo da influência que a temperatura de fabrico tem no comportamento da mistura. Relativamente às temperaturas de compactação também existiu uma variação de temperatura, com a compactação de lajes a 150, 120 e 100°C. Esta variação deveu-se à necessidade de avaliar a influência da temperatura de compactação no comportamento do pavimento relativamente à sua volumetria e resistência à deformação permanente. No Quadro 3.1 estão sintetizadas as temperaturas de fabrico e compactação utilizadas nesta campanha experimental, assim como as lajes correspondentes. A temperatura a que se realizou a produção e a compactação da mistura foi controlada recorrendo de duas formas. Durante a produção a temperatura de fabrico foi controlada recorrendo ao sensor térmico inserido no tambor de mistura, temperatura essa que é confirmada por uma sonda manual após a produção. A temperatura de compactação foi controlada com um sensor manual quando esta se encontra no molde, sendo a temperatura da mistura retirada de vários pontos da mistura.

Quadro 3.1- Temperaturas de fabrico e compactação.

Temperatura de fabrico (°C)	Temperatura de compactação (°C)	Laje		
		Sasobit (M02)	Rediset (M03)	Controlo (C)
165	150	M021	M033	C5
		M024	M034	C6
	120	M022	M031	C3
		M023	M032	C4
120	120	M025	M039	-
		M026	M0310	-
	100	M027	M0311	-
		M028	M0312	-

3.2 Caracterização dos materiais

As misturas M02 e M03 são misturas betuminosas temperadas, constituídas por agregados calcários cedidos pela pedreira José Marques Gomes Galo,SA, por betume 35/50 cedido pela Cepsa, e pelos aditivos Sasobit® e Rediset®.

3.2.1 Agregados

Para esta mistura foram selecionados os agregados calcários com as seguintes dimensões: 0/4 mm (pó de pedra); agregado 6/12mm (brita 1); agregado 12/20mm (brita 2). Todos os agregados respeitam a norma EN 13043:2002+ AC: 2004. Na Figura 3.1, Figura 3.2 e Figura 3.3 estão representadas as curvas granulométricas e os respetivos fusos granulométricos de acordo com o Caderno de Encargos da EP (2012).

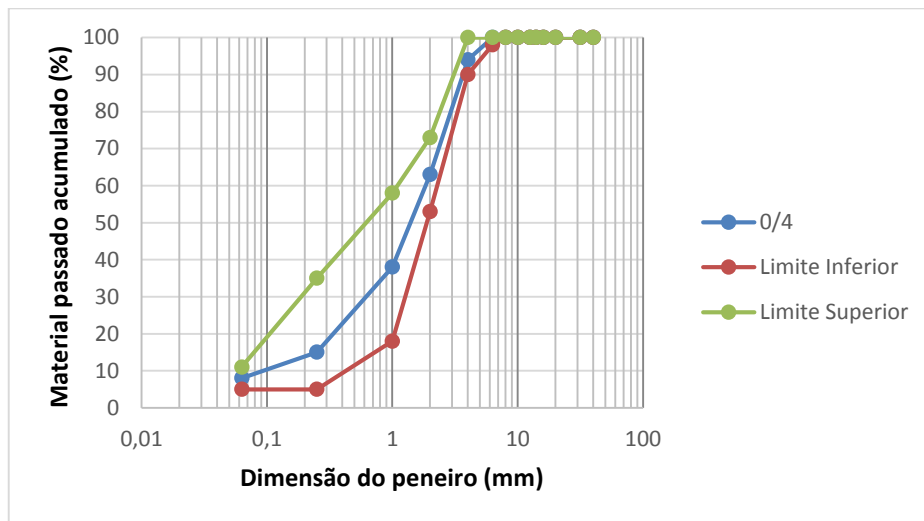


Figura 3.1- Curva granulométrica do agregado com dimensão 0/4 mm.

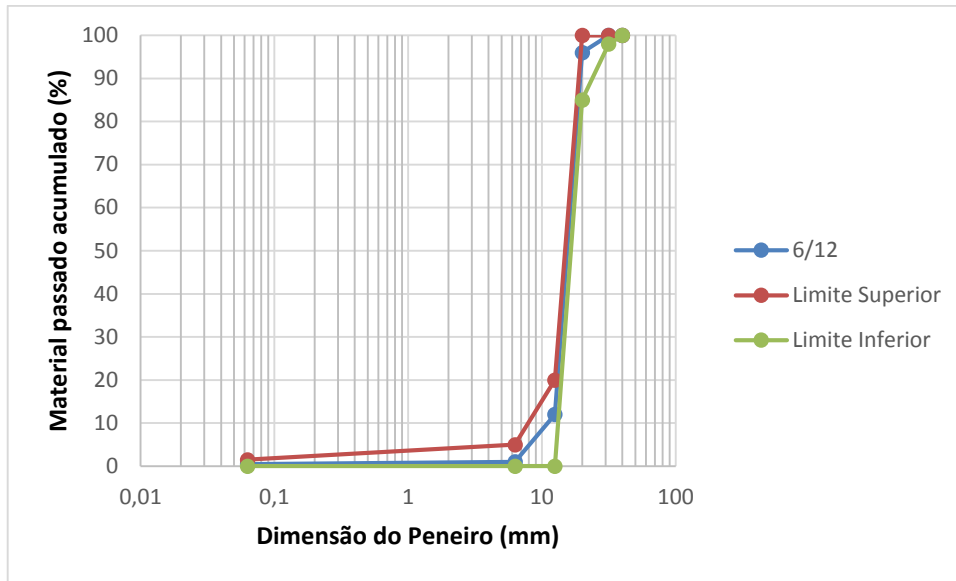


Figura 3.2- Curva granulométrica do agregado com dimensão 6/12 mm.

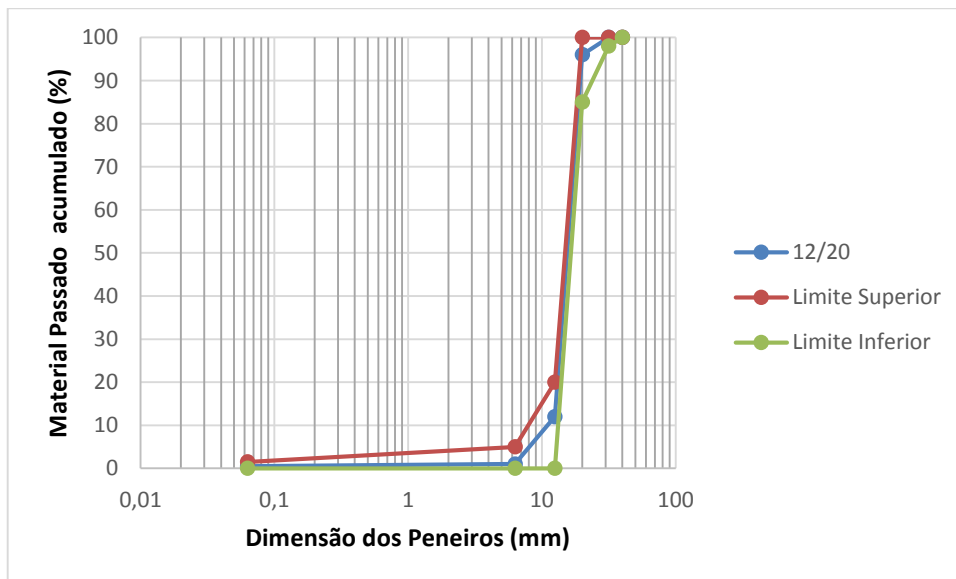


Figura 3.3- Curva granulométrica do agregado com dimensão 12/20 mm.

3.2.2 Betume

Para a formulação da mistura foi utilizado o betume de pavimentação produzido pela CEPISA, da classe 35/50 segundo as especificações da norma EN 12591 apresentadas no Quadro 3.2. Segundo o fabricante, o betume utilizado apresenta penetração de 42 mm quando ensaiado durante 5 segundos a 25 °C e sujeito a uma carga de 100g. O betume ensaiado apresenta um ponto de amolecimento de 55,5 °C.

Quadro 3.2- Especificações do betume 35/50 (Norma EN 12591)

Características	Unidade	Norma	Mínimo	Máximo
Penetração (25°C°)	0,1mm	EN 1426	35	50
Índice de penetração	-	EN 12591	-1,5	+0,7
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	50	58
Ponto de fragilidade e Fraass	°C	EN 12593	-	-5
Solubilidade	%	EN 12592	99,0	-
Ponto de inflamação	°C	EN ISO 2592	240	-
Resistência ao endurecimento a 163 °C (EN 12607-1)				
Varição de massa (valor absoluto)	%	EN 12607-1	-	0.5
Penetração retida	%	EN 1426	53	-
Varição da temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	-	11

3.2.3 Aditivos

Para a formulação das misturas M02 e M03 foram usados os aditivos Sasobit® e Rediset®, (Figura 3.4). Os aditivos são adicionados à mistura betuminosa durante a sua mistura. A quantidade de Sasobit® adicionada foi de 4% da massa de betume da mistura M02 e, por sua vez, foi adicionada uma massa de Rediset® relativa a 2% da massa de betume da mistura M03. As quantidades de aditivos Sasobit® e Rediset® adicionados à mistura são as quantidades sugeridas pelos fabricantes.



Figura 3.4- Aditivos utilizados: Aditivo Químico, Rediset® (esquerda), e Aditivo Orgânico, Sasobit® (direita).

3.3 Formulação da mistura betuminosa

Como já foi referido a mistura betuminosa utilizada baseou-se nas misturas M02 e M03 da tese de doutoramento realizada por Fernando Martinho (Martinho, 2014). Na formulação destas misturas foram utilizados os seguintes agregados calcários: Pó de pedra (0/4mm); Brita 1 (4/10mm); e Brita 2 (10/20mm). No entanto, como nem todas as dimensões dos agregados utilizados se encontravam disponíveis, foram utilizados agregados com granulometrias parecidas, substituindo-se assim, os agregados com dimensões de 4/10 mm por 6/12 mm, e agregado com dimensão de 10/20 mm por agregado de 12/20 mm. Devido ao facto das dimensões não serem exatamente iguais as utilizadas originalmente, foi necessário ajustar a nova curva o mais possível com a curva anteriormente obtida e que se enquadrasse nos limites dados pelo anexo nacional da norma EN 13108-1. A curva de distribuição granulométrica anteriormente obtida, está representada no Quadro 3.3.

Quadro 3.3- Distribuição granulométrica da mistura.

Abertura das malhas (mm)	Material acumulado que passa (%)		Limite inferior (%)	Limite superior (%)
	Mistura base	Mistura utilizada		
31,5	100	100	100	100
20	-	99	90	100
16	92	83	-	-
12,5	64	69	57	86
4	48	44	34	49
2	31	30	26	41
0,5	10	12	12	26
0,125	4	6	4	14
0,063	1	1	2	7

Devido a diferenças nas dimensões entre os agregados utilizados no estudo anterior realizado por Martinho (2014), foi necessário ajustar as quantidades utilizadas na distribuição granulométrica. Para tal recorreu-se a um sistema de equações que permitiu determinar quais as porções a utilizar de modo a obter-se uma curva granulométrica semelhante à utilizada por Martinho (2014). No Quadro 3.4 encontram-se as percentagens de agregado utilizadas na mistura e na Figura 3.5 encontra-se a curva obtida, assim como a curva a que se pretende fazer a aproximação. A distribuição de agregados é apresentada no Quadro 3.3.

Quadro 3.4- Distribuição de agregado utilizado na formulação da mistura.

Dimensão do Agregado (mm)	Proporção de Agregado (%)
0/4	45
6/12	19
12/20	35
Filer	1
Somatório	100

Implementando as porções que estão no Quadro 3.4, obtém-se a distribuição de agregados representada na Figura 3.5, assim como a mistura base obtida por Martinho (2014), tal como os fusos que a mistura tem que respeitar.

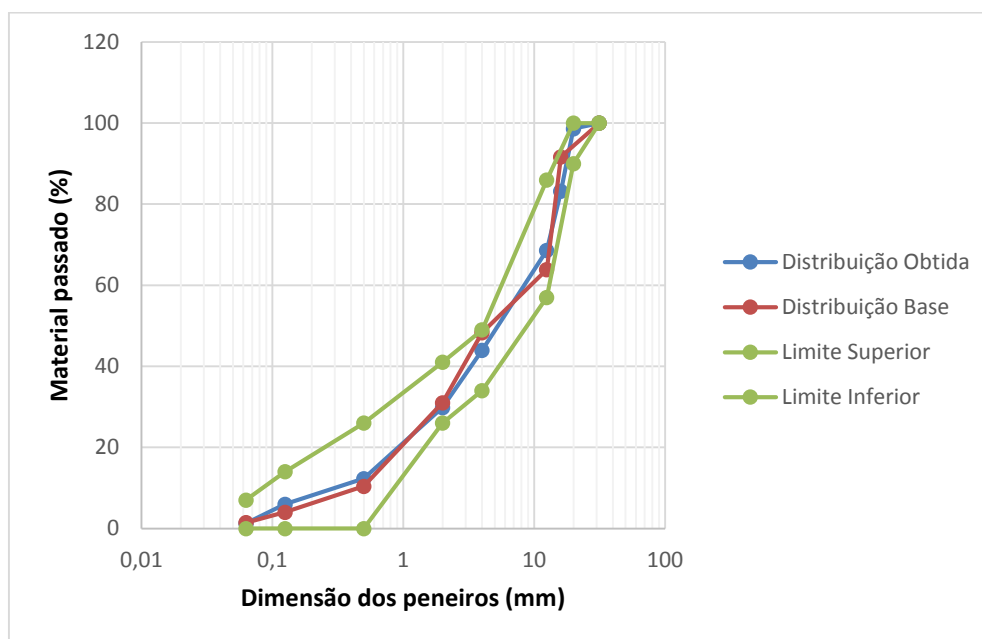


Figura 3.5-Curva Granulométrica da distribuição da mistura base e da mistura utilizada na presente dissertação.

Obteve-se assim uma curva granulométrica que respeita os fusos, para este tipo de mistura, assim como se obteve uma distribuição de agregados que se assemelha a curva obtida por Martinho (2014). Esta aproximação permite a utilização da mistura ótima obtida anteriormente, para as misturas M02 e M03 (Martinho, 2014).

No estudo de Marshall realizado por Martinho (2014), concluiu-se que as misturas que apresentaram melhor comportamento incorporavam 4,5% de betume, assim, optou-se pela utilização destas misturas. A mistura utilizada tem a mesma distribuição granulométrica e a mesma percentagem de betume, sendo que a única diferença entre as misturas será o aditivo utilizado.

Pare se realizar o ensaio de deformação permanente foi necessário compactar a mistura em lajes com as seguintes dimensões 40/30/6 cm. A massa de cada laje foi determinada recorrendo à equação (3.1), dada pela norma EN 1269-22.

$$M = L.l.e.\rho_m \cdot \frac{100 - v}{100} \cdot 10^{-6} \quad (3.1)$$

Onde:

M-massa a utiliza, em g;

L-maior dimensão da laje, em mm;

l- menor dimensão da laje, em mm;

E-espessura da laje, em mm;

ρ_m -máxima densidade da mistura betuminosa, em kg/m³;

v-volume de vazios, em %.

Recorrendo às baridades obtidas por Martinho (2014), apresentadas no

Quadro 3.5, foi efetuada uma média dos valores de baridade aparente das lajes. Então, com essa média, foi aplicada a equação (3.1) e determinou-se a massa das lajes. As massas obtidas encontram-se no Quadro 3.6. Em seguida, aplicou-se a divisão calculada no Quadro 3.4 e determinou-se qual massa em que cada constituinte vai estar presente na mistura.

Quadro 3.5- Baridade aparente media e Baridade máxima teórica da mistura base, obtido Martinho (2014).

	ρ_{aparente} (kg/m ³)	$\rho_{\text{aparente media}}$ (kg/m ³)	$\rho_{\text{máxima teórica}}$ (kg/m ³)
M02	2293,7	2262	2408
	2257,3		
	2235,4		
M03	2234,1	2249	2392
	2260,7		
	2250,9		

Quadro 3.6- Determinação da massa das lajes

Mistura	L (mm)	l (mm)	e (mm)	$\rho_{\text{aparente media}}$ (kg/m ³)	v (%)	massa (kg)
M02	400	300	60	2262	6,1	15,301
M03	400	300	60	22489	6,0	15,219

Após a determinação das massas da laje de cada mistura procedeu-se ao cálculo da massa em que cada constituinte iria estar presente na mistura. As proporções usadas na formulação da mistura estão apresentadas no Quadro 3.7.

Quadro 3.7-Determinação das massas dos constituintes da mistura.

	Proporção (%)	
Massa betume (kg)	4,5	
Massa filer (kg)	1,0	
Massa 0/4 (kg)	45,0	
Massa 6/12 (kg)	19,0	
Massa 12/20 (kg)	35,0	
Soma	100,0	
Aditivo	Proporção em relação à massa de betume (%)	
	Sasobit	4
	Rediset	2

3.4 Preparação e caracterização dos provetes de mistura betuminosa

3.4.1 Fabrico da mistura

Após se determinar qual a quantidade de agregado, betume e aditivos necessários para a mistura betuminosa, procedeu-se ao seu fabrico, tendo como base a norma EN 12697-35. As temperaturas de formulação da mistura não respeitam a norma pois trata-se de uma MBT, e a norma foi desenvolvida para misturas betuminosas a quente.

Para o fabrico desta mistura foi utilizada uma misturadora da marca Controls modelo 76-B0077/B, como está representado na Figura 3.6.



Figura 3.6- Misturadora utilizada no fabrico das misturas.

As misturas realizaram-se a temperaturas diferentes, sendo que foram efetuadas misturas a temperaturas típicas das misturas a quente, e misturas realizadas a temperaturas típicas de misturas temperadas. Então, foram efetuadas misturas a 165°C, a 120°C e 100°C. Antes de se proceder à mistura, os agregados foram aquecidos 20 °C acima da temperatura de fabrico durante cerca de 4h, de forma a que qualquer água que esteja no agregado evapore (secagem). Depois introduziu-se o agregado na misturadora a uma temperatura que permitiu uma mistura eficaz. O betume deve ser previamente aquecido à temperatura a que se vai proceder a mistura, de modo a facilitar a sua adição à mistura, como pode ser observado na Figura 3.7. A junção dos aditivos foi feita na misturadora, sendo que não foi necessário o pré-aquecimento destes, pois estes vão-se diluir na mistura durante a sua formulação, alterando assim as propriedades desta.



Figura 3.7-Adição do betume ao agregado antes de se proceder a mistura.

3.4.2 Compactação das lajes

A compactação das lajes foi realizada segundo a norma EN 12697-33 (2003). Após a realização da mistura, uma quantidade pré definida de mistura foi colocada nos moldes, 15.301 kg para a mistura aditivada com Sasobit® e 15.219 kg para a mistura aditivada com Rediset®. Estes valores garantiram que após a compactação da mistura, seja produzida uma laje com 60mm de espessura, 400 mm de comprimento, e 300 mm de largura. Quando a mistura atingiu a temperatura de compactação, procedeu-se então à compactação da mistura. Ambas as misturas foram compactadas a 150, 120, e 100 °C. Antes de se proceder à compactação da mistura, foi necessário inseri-la num molde, como o da Figura 3.8, molde este, que permitiu uma mais eficaz compactação, pois restringiu a mistura durante a compactação.



Figura 3.8- Mistura no molde antes da compactação.

A compactação foi realizada com o roller compactor, da marca Controls modelo 77- B3602 representado na Figura 3.9. Este equipamento pertence a classe de compactadores de “prensa metálica lisa”. Permite uma eficaz compactação, uma vez que a mistura está bem confinada em um molde, e a prensa deste consegue compactar a mistura, até se obter a espessura previamente determinada.



Figura 3.9-Roller Compactor utilizado na compactação das lajes.

A compactação foi realizada através da colocação de uma carga na mistura, a carga foi transferida à mistura através da prensa, que tem forma semicircular. Esta permite uma constante aplicação de carga durante a compactação, como é possível observar na Figura 3.10.

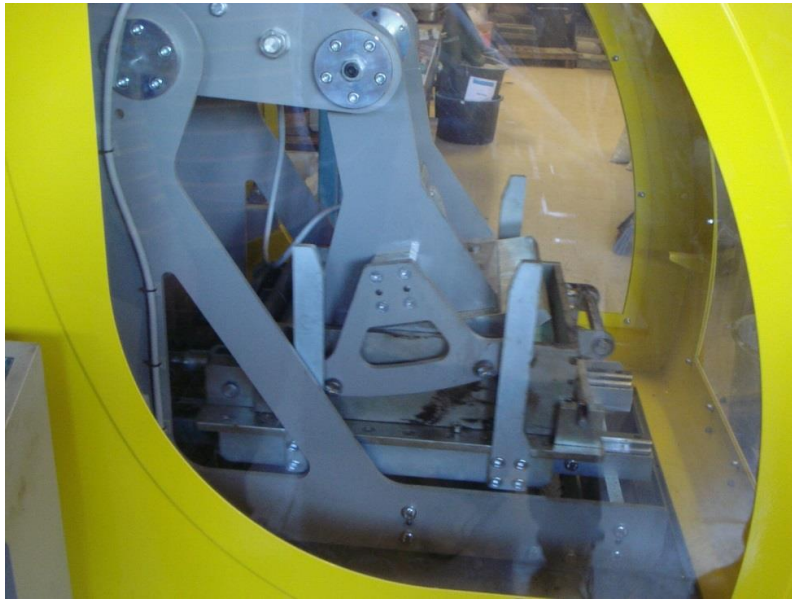


Figura 3.10-Compactação de uma mistura, com o Roller Compactor.

Nas lajes compactadas foram usados oito patamares de cargas, com cargas crescentes, sendo que para cada patamar são realizadas um número pré-determinado de passagens. Neste caso foram utilizados sete patamares de carga, com número variável de passagens. As cargas e o número de passagens de cada patamar encontram-se no Quadro 3.8.

Quadro 3.8- Ciclo de carregamento efetuado durante a compactação de uma laje.

Patamar	Carga (kN)	Número de passagens
1	2	4
2	3	4
3	7	4
4	11	4
5	15	4
6	19	5
7	23	7
8	28	7

Após a compactação foi necessário esperar algum tempo para a temperatura baixar o suficiente para que seja possível desmoldar a laje sem que ocorressem deformações da mesma. Segundo a norma EN 12697-22 (2003) +A1 (2007), após a compactação das lajes, estas devem permanecer em repouso no mínimo 48h até poderem ser ensaiadas.

3.5 Avaliação do desempenho da mistura betuminosa

3.5.1 Ensaio de deformação permanente

O ensaio de deformação permanente, também conhecido com ensaio de pista ou “Wheel-Tracking”, tem como propósito avaliar o comportamento da mistura relativamente à deformação, sendo realizado segundo a norma EN 12697-22 (2003).

Segundo esta norma, o aparelho utilizado é definido como aparelho pequeno. O aparelho consiste em uma câmara, onde no seu interior existe uma roda carregada que assenta numa mesa basculante. Tem a capacidade de registar a deformação provocada pela roda, assim como a capacidade de aquecer e manter a temperatura da camara enquanto decorre o ensaio. O aparelho utilizado respeita as especificações definidas na norma. Foi então utilizado o equipamento da Controls modelo 77-B3502, representado na Figura 3.11 e na Figura 3.12.



Figura 3.11-Wheel Tracking,

Antes de iniciar o ensaio foi necessário preparar a laje, a preparação da laje consiste em molda-la e fazer um pequeno furo na sua extremidade de modo a que seja possível introduzir a sonda de temperatura. O molde deve ser fixo na mesa basculante e a sonda deve ser introduzida no furo previamente feito. Seguidamente aqueceu-se a camara até aos 60 °C (temperatura de condicionamento), a temperatura deve ser mantida durante pelo menos 4h antes de se iniciar o ensaio (condicionamento).

O ensaio decorreu segundo o procedimento B da norma EN 12697-22 (2003)+A1(2007), que exige que seja medida a deformação vertical da roda. Antes do ensaio ser iniciado deve deixar-se que a roda efetue 5 ciclos. O ensaio deve ser registado 6 a 7 vezes durante a primeira hora, e pelo menos a cada 500 ciclos a partir da primeira hora. Foi então selecionado o registo a cada

250 ciclos que respeita ambos os limites (10 ciclos por minuto). Na Figura 3.12 é possível observar o ensaio a decorrer, e na Figura 3.13 é possível observar uma laje ensaiada.

O ensaio termina após 10.000 ciclos ou quando a rodeira formada chegar aos 20 mm de profundidade.

Após o ensaio é analisada a deformação provocada na laje, assim como o declive obtido durante o ensaio de deformação permanente denominado por wheel tracking slope (WTS). O WTS é a taxa de crescimento da deformação média no ensaio, sendo determinada como:

$$WTS = \frac{d_{10\,000} - d_{5000}}{5} \quad (3.2)$$

Onde:

WTS é o declive médio do crescimento da profundidade de rodeira, expresso em mm/10³ por ciclo de carga;

D₅₀₀ é a deformação permanente após 5000 ciclos, em mm;

d_{10 00} é a deformação permanente após 10 000 ciclos, em mm.

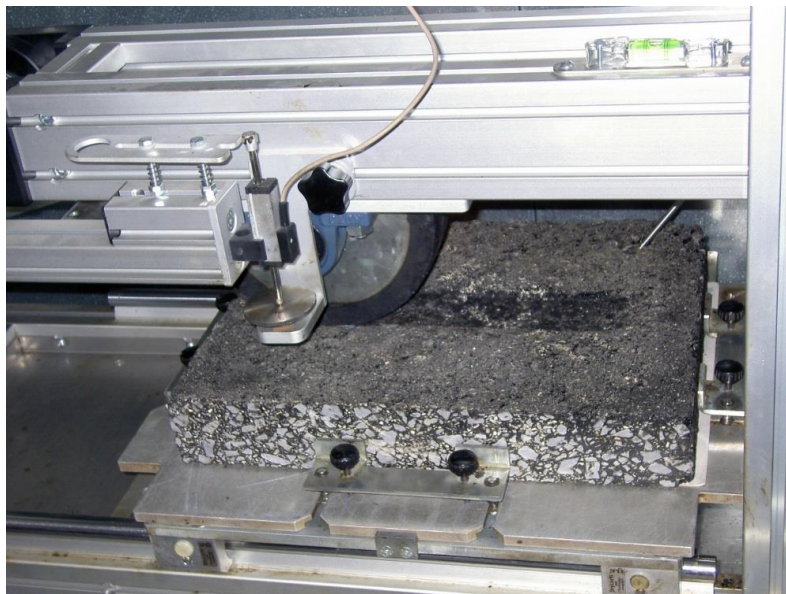


Figura 3.12- Ensaio de pista, em curso.



Figura 3.13- Deformação Permanente causada pelo ensaio de Pista.

3.5.2 Baridade aparente

O ensaio de baridade aparente foi efetuado para ajudar a interpretação dos resultados obtidos no ensaio de deformação permanente. Após o ensaio de deformação permanente foram cortados 2 provetes de cada laje. Esses provetes foram ensaiados seguindo o procedimento b da norma EN 12697-6 (2012).



Figura 3.14- Determinação da baridade aparente, pesagem com os provetes saturados.

Neste ensaio começou-se por determinar a massa seca do provete. Em seguida submergiu-se o provete em água durante pelo menos 30 minutos, este período tem como objetivo preencher os espaços vazios do provete, fazendo com que este fique saturado (Figura 3.14). Mede-se a temperatura da água. Após o provete ficar saturado deve obter-se a massa do provete imerso em

água. O provete é retirado da água e a sua superfície seca com uma toalha. Em seguida pesa-se o provete. Após concluir este processo aplica-se a equação (3.3) para determinar a baridade aparente do provete.

$$\rho_{bssd} = \frac{m1}{m3 - m2} \times \rho_w \quad (3.3)$$

onde:

ρ_{bssd} é a baridade do provete saturado com a superfície seca, em kg/m³;

$m1$ é a massa do provete seco, em g;

$m2$ é a massa do provete imerso em água, em g;

$m3$ é a massa do provete saturado com a superfície seca, em g;

ρ_w é a massa volúmica da água à temperatura a que o ensaio foi realizado, em kg/m³.

3.5.3 Baridade máxima teórica

A baridade máxima teórica foi determinada segundo o procedimento A da norma EN 12697-5, (2009), recorrendo ao método do picnómetro. Começou-se por desagregar o provete criando-se assim a amostra a ensaiar. Determinou-se a massa do picnómetro seco e dos seus acessórios, colocou-se a amostra dentro do picnómetro e pesou-se o picnómetro juntamente com os restantes acessórios e amostra. Em seguida encheu-se o picnómetro de água até aproximadamente 30 mm da tampa do picnómetro, colocou-se a tampa e respetivos acessórios. Purgou-se o ar do picnómetro recorrendo a uma bomba durante no mínimo 15 minutos, a purga do ar foi assistida por uma mesa vibratória. Em seguida, encheu-se o picnómetro com água sem bolhas de ar até a referência do mesmo. Determinou-se a massa do picnómetro cheio de água e mediu-se a temperatura da água dentro do picnómetro.

De forma a determinar a baridade máxima teórica foi utilizada a equação (3.4).

$$\rho_{mv} = \frac{m'2 - m'1}{1000 \times \left(Vp - \frac{(m'3 - m'2)}{\rho_w} \right)} \quad (3.4)$$

onde:

ρ_{mv} é a baridade máxima da mistura betuminosa, em kg/m³

$m'1$ é a massa do picnómetro mais acessórios, em g

$m'2$ é a massa do picnómetro mais acessórios e mistura, em g

$m'3$ é a massa do picnómetro mais acessórios, amostra e água, em g

Vp é o volume do picnómetro preenchido até à marca de referência, em m³

ρ_w é a massa volúmica da água á temperatura de ensaio, em kg/m^3

3.5.4 Determinação da porosidade

A porosidade dos provetes será calculada com base na norma EN 12967-8 (2004).

Para a determinação da porosidade é necessário a prévia determinação da baridade máxima teórica e da baridade aparente, determinadas segundo as normas EN 12697-5 e EN 12697-6 respetivamente.

Então, segundo a norma anteriormente mencionada, a porosidade é determinada pela equação (3.5).

$$V = \frac{\rho_{mv} - \rho_{bssd}}{\rho_{mv}} \times 100 \quad (3.5)$$

onde:

V é a porosidade do provete, em %;

ρ_{mv} é a baridade máxima teórica da mistura, em kg/m^3 ;

ρ_{bssd} é a baridade aparente, em kg/m^3 .

3.6 Ensaio de escorrimento

O ensaio de escorrimento tem como objetivo determinar a quantidade de ligante que se deposita no fundo da mistura durante o seu transporte. Foi escolhido o método do cesto da norma EN 12697-18 (2004). O método do cesto é simples e permite determinar a quantidade de betume que pode escorrer durante o transporte da mistura. Para realizar este ensaio é necessário um cesto cubico metálico com aresta de 100mm. As faces do cesto devem ser perfuradas por buracos de forma circular com 5 mm de diâmetro e deve ter pés que o sobrelevem entre 2.5 a 3.5 mm, como se mostra na Figura 3.15. Para completar o ensaio é necessário um tabuleiro metálico, uma estufa, balança, termómetro e caixas metálicas.

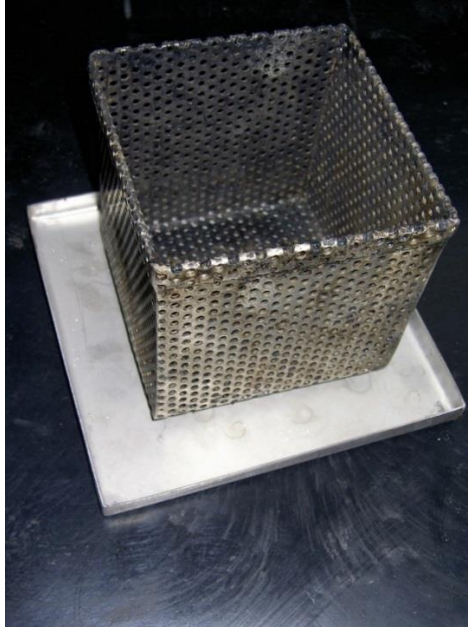


Figura 3.15-Cesto e base utilizados no Ensaio de Escorrimento.

O ensaio consistiu no fabrico de misturas com 1,1 kg de massa. Começou-se por fazer a pesagem dos agregados. Em seguida colocou-se o agregado dentro da caixa metálica. Este procedimento serviu para verificar se o volume da mistura vai ser adequado para a realização do ensaio. Depois produziu-se 1.1kg de mistura betuminosa seguindo os requisitos da norma EN 12697-18, descartou-se a primeira mistura. Realizou-se outra mistura que foi colocada dentro do cesto, que por sua vez foi colocado sobre um tabuleiro envolto em folha de prata. Pesou-se o tabuleiro e a mistura que foi ensaiada. Colocou-se o cesto com a mistura dentro da estufa à temperatura de produção da mistura (165°C) entre 3h a 3h15. Pesou-se o tabuleiro com a quantidade de material que escorreu. Recorrendo à equação (3.6) foi possível determinar a quantidade de material betuminoso que escorreu.

$$D = 100 \times \frac{W2 - W1}{1100 + B} \quad (3.6)$$

onde:

D- material escorrido, em %;

W1-massa do tabuleiro envolto em papel de prata, em g;

W2-massa do tabuleiro envolto em papel de prata com o material que escorreu, em g;

B-massa da mistura ensaiada, em g.

4 Resultados e discussão

4.1 Ensaio de escorrimento

Como já foi referido, o ensaio de escorrimento foi efetuado segundo a norma EN 12697-18. Os resultados obtidos encontram-se no Quadro 4.1.

Quadro 4.1- Resultados obtidos no ensaio de escorrimento.

	C1	C2	M02	M02	M03	M03
Material escorrido (%)	0,000	0,000	0,013	0,000	0,017	0,009

As misturas com a denominação “C” representam a misturas de controlo, a estas misturas não foi adicionado nenhum aditivo. As misturas “M02” e “M03” são misturas às quais foi adicionado um aditivo que permite baixar a sua temperatura de fabrico.

Analisando os resultados do ensaio de escorrimento, observa-se que as misturas sem aditivos não têm qualquer escorrimento, enquanto as misturas aditivadas vão apresentar um escorrimento mais baixo que o limite definido na norma, 0,5%.

Após a análise do Quadro 4.1, observa-se que o material escorrido é muito baixo, descartando-se assim um mau comportamento das MBT relativamente a este tipo de problema. As misturas de controlo não apresentaram escorrimento, por sua vez, as misturas aditivadas apresentaram um ligeiro escorrimento. Tal fenómeno é devido à influência dos aditivos, que têm como objetivo tornar a mistura mais trabalhável. Seria expectável que ocorresse escorrimento nas misturas M02, aditivadas com Sasobit®, pois este aditivo baixa a viscosidade do betume. Quando se analisa os resultados obtidos, observa-se que ambas as misturas apresentam um baixo escorrimento. Das misturas M03, aditivadas com Rediset®, não era expectável a existência de grande escorrimento uma vez que este aditivo não influencia a viscosidade do betume, mas a adesividade entre o betume e o agregado, pelo que os resultados confirmam as expectativas. Os resultados obtidos encontram-se no Apêndice II.

4.2 Volumetria

4.2.1 Baridade aparente

A baridade aparente foi determinada segunda a norma EN 12697-6, permite analisar os resultados que são apresentados seguidamente.

Para cada laje ensaiada foram cortados dois provetes. Esses provetes foram utilizados na realização deste ensaio. Os resultados são apresentados na forma de gráfico de barras, onde se encontram todos os provetes fabricados e compactados a uma determinada temperatura.

Na Figura 4.1 e na Figura 4.2 estão representados os resultados dos ensaios de baridade aparente das misturas fabricadas a 165 °C. Analisando estes resultados observa-se que a baridade aparente destas lajes apresenta valores semelhantes, quando produzidas à mesma temperatura e com o mesmo aditivo, com valores ligeiramente mais elevados para as lajes compactadas a 150

°C. De referir também que as misturas aditivadas com o aditivo Sasobit® (M02) apresentam valores mais elevados.

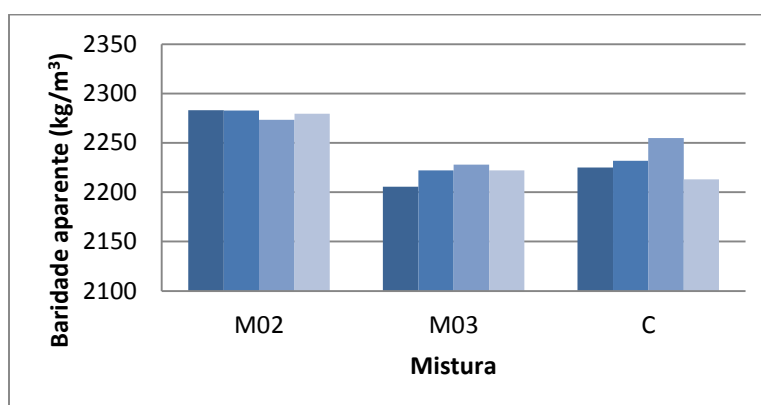


Figura 4.1- Baridade aparente das misturas fabricadas a 165 °C e compactadas a 150 °C.

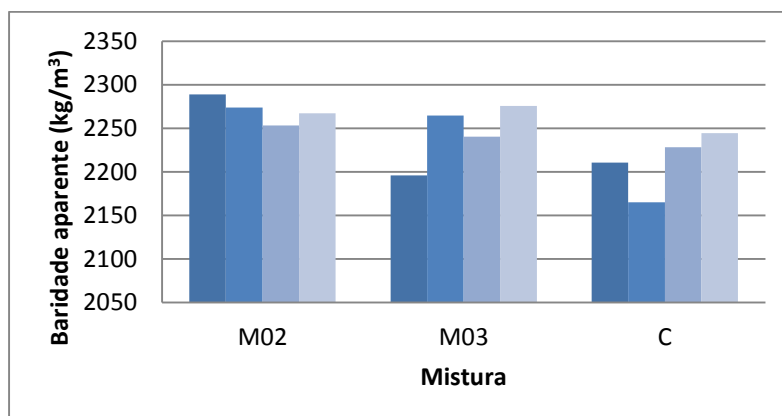


Figura 4.2- Baridade aparente das misturas fabricadas a 165 °C e compactadas a 120 °C.

Na Figura 4.3 e Figura 4.4 estão apresentados os resultados do ensaio de baridade aparente para as lajes fabricadas a 120 °C. A Figura 4.3 apresenta os resultados referentes às misturas compactadas a 120 °C, e por sua vez, a Figura 4.4 apresenta as baridades referentes as misturas compactadas a 100 °C. Comparando os resultados de ambas as figuras observa-se que os resultados são muito próximos, com valores de baridades médias de 2221,36 kg/m³ para as misturas compactadas a 120 °C, e 2243,03 kg/m³ para as misturas compactadas a 100 °C. Tal como nas misturas fabricadas a 165 °C, as misturas aditivadas com Sasobit® apresentam valores de baridade aparente mais elevados, no entanto, nas misturas compactadas a 100 °C a diferença entre as misturas aditivadas com Sasobit® (M02) e as misturas aditivadas com Rediset® (M03) é menor.

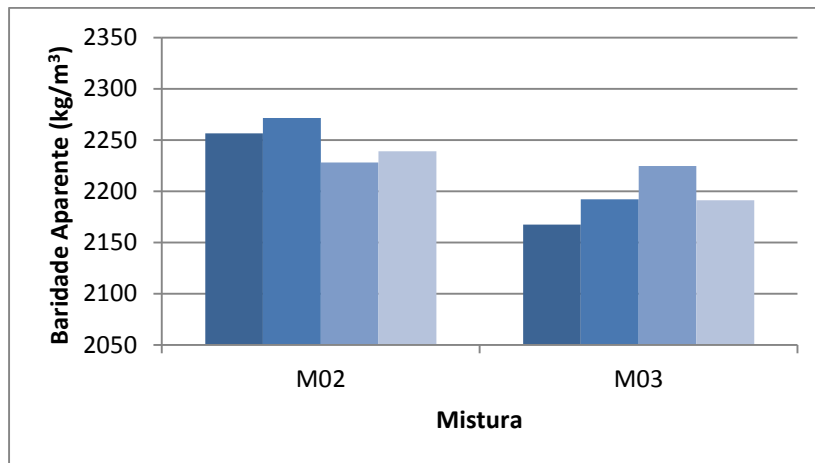


Figura 4.3- Baridade aparente das misturas fabricadas a 120 °C e compactadas a 120 °C.

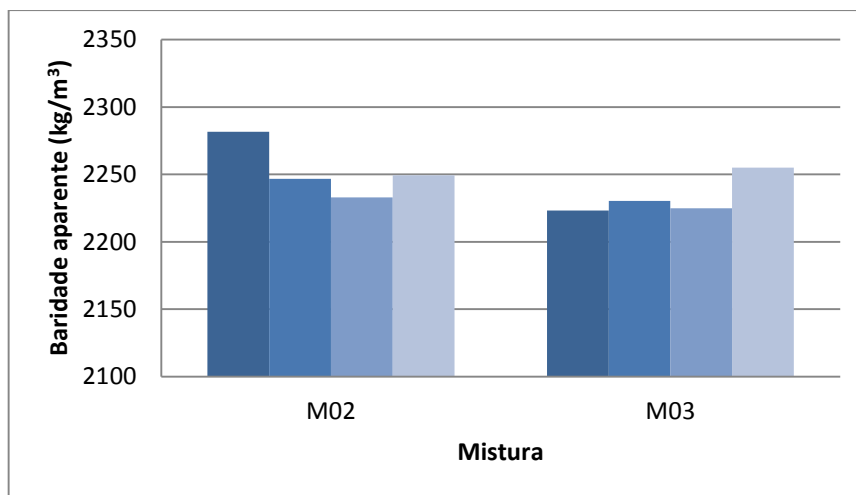


Figura 4.4- Baridade aparente, das misturas fabricadas a 120 °C e compactadas a 100 °C.

Analisando todas as misturas é evidente que todas apresentam valores de baridade aparente com valores médios próximos. De salientar os maiores valores de baridade aparente obtidos para as misturas aditivadas com Sasobit® (M02), o que indica, que estas misturas necessitam de menos energia para se proceder à sua compactação. Os resultados obtidos encontram-se no ponto I.1 do Apêndice I.

4.2.2 Baridade máxima teórica

A baridade máxima teórica foi determinada em conformidade com a norma EN 12697-5, foi determinada a baridade máxima teórica de dois provetes os resultados estão representados na Figura 4.5.

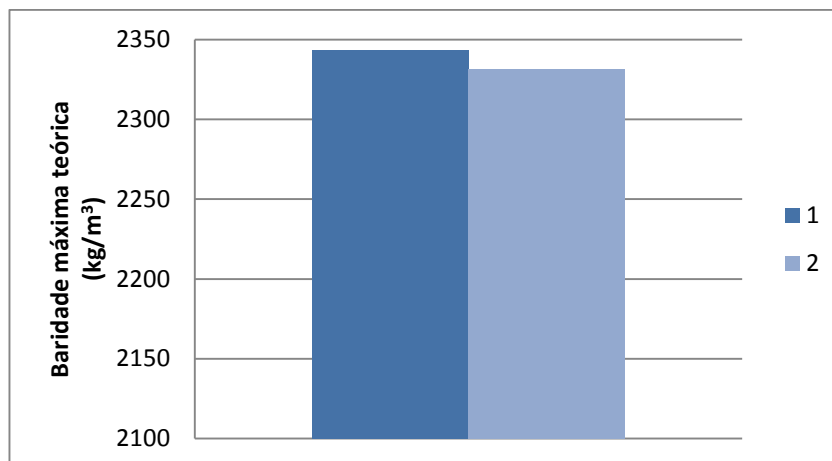


Figura 4.5-Baridade máxima teórica

Estes resultados demonstram valores muito parecidos para ambas as misturas, tal era esperado pois ambas as misturas são iguais diferindo apenas no aditivo usado. Os valores obtidos neste ensaio são superiores aos valores de baridade aparente, validando assim os resultados do ensaio de baridade aparente. Os resultados obtidos encontram-se no ponto I.2 do Apêndice I.

4.2.3 Porosidade

A determinação da porosidade das amostras foi determinada conforme indicado na norma EN 12697-8, (2004).

A porosidade de cada laje está relacionada com o grau de compactação a que cada laje é sujeita. Os resultados apresentados estão agrupados por temperatura de fabrico e compactação. Na Figura 4.6 e Figura 4.7 estão representadas as misturas fabricadas a 165 °C. A Figura 4.6 mostra as misturas compactadas a 150 °C, enquanto a Figura 4.7 mostra as misturas compactadas a 120°C. As misturas compactadas a 150 °C apresentam um valor médio de 4,1%, por sua vez, as misturas compactadas a 120 °C têm um valor médio de 4,1%. Apesar de apresentarem valores médios semelhantes o comportamento das misturas não é igual para ambos. As misturas compactadas com Rediset® apresentam valores de porosidade muito semelhantes aos valores da mistura de controlo. Já as misturas aditivadas com Sasobit apresentam valores de porosidade muito mais baixos que os valores da mistura de controlo, o que indica um elevado grau de compactação que pode vir a ter consequências no comportamento do pavimento, tornando-o mais propício a problemas de deformação permanente.

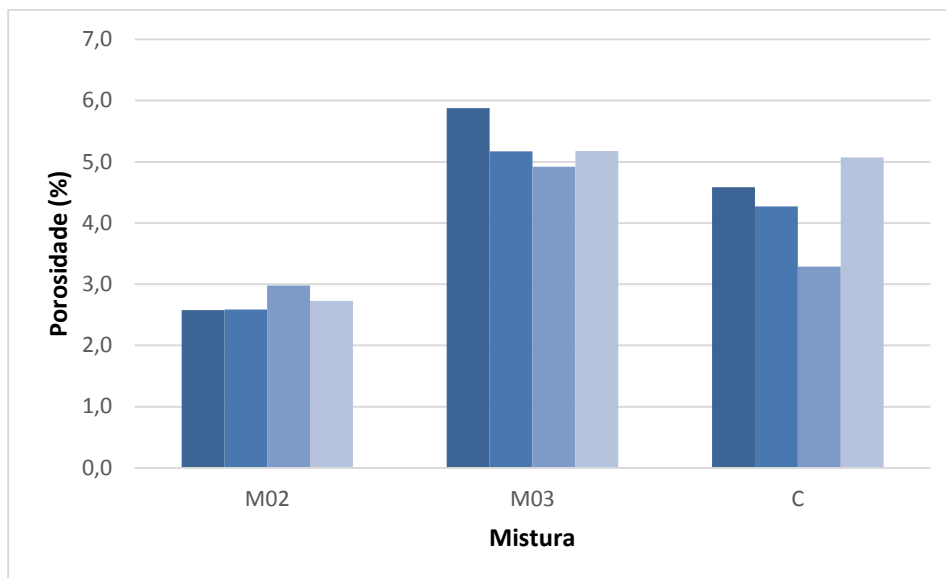


Figura 4.6- Porosidade das misturas produzidas a 165 °C e compactadas a 150 °C.

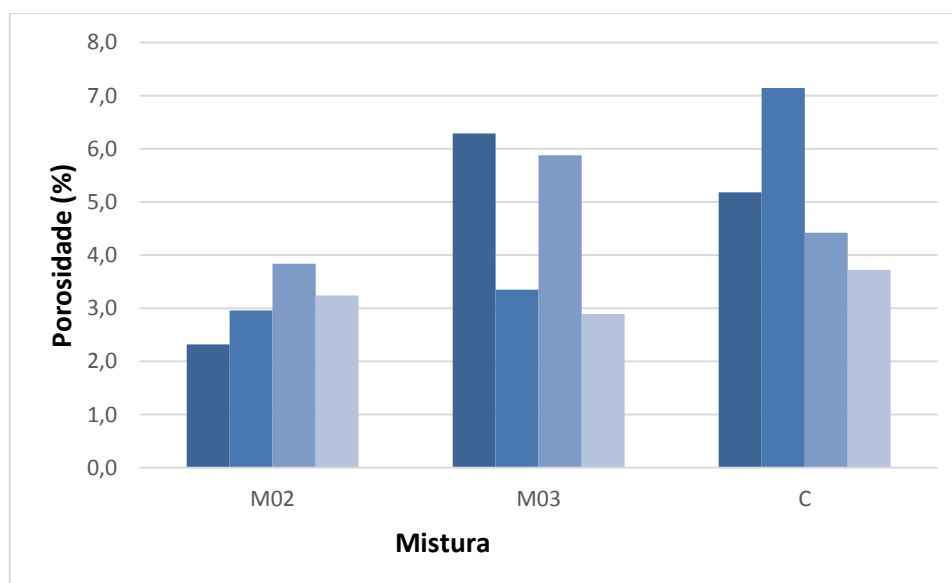


Figura 4.7- Porosidade das misturas produzidas a 165 °C e compactadas a 120 °C.

Na Figura 4.8 e Figura 4.9 estão representadas as misturas fabricadas a 120°C. A Figura 4.8 é referente às misturas compactadas a 120 °C, enquanto a Figura 4.9 mostra as misturas compactadas a 100 °C. Analisando ambas as figuras é possível observar que existe uma aproximação de resultados, com exceção das misturas M03-9 e M03-10, que apresentam porosidades bastante elevadas, indicando uma deficiente compactação destas misturas. As misturas compactadas a 120 °C apresentam uma porosidade média de 5,2%, enquanto a mistura compactada a 100 °C apresenta um valor médio de 4,3%. Esta diferença de valores é justificada com os maus resultados obtidos pelas misturas aditivadas com Rediset®. As misturas aditivadas com Sasobit voltam a apresentar porosidades mais baixas relativamente às misturas aditivadas

com Rediset[®], no entanto existe uma aproximação de porosidade nas misturas compactadas a 100 °C, com ambas as misturas a apresentarem valores de porosidade muito semelhantes

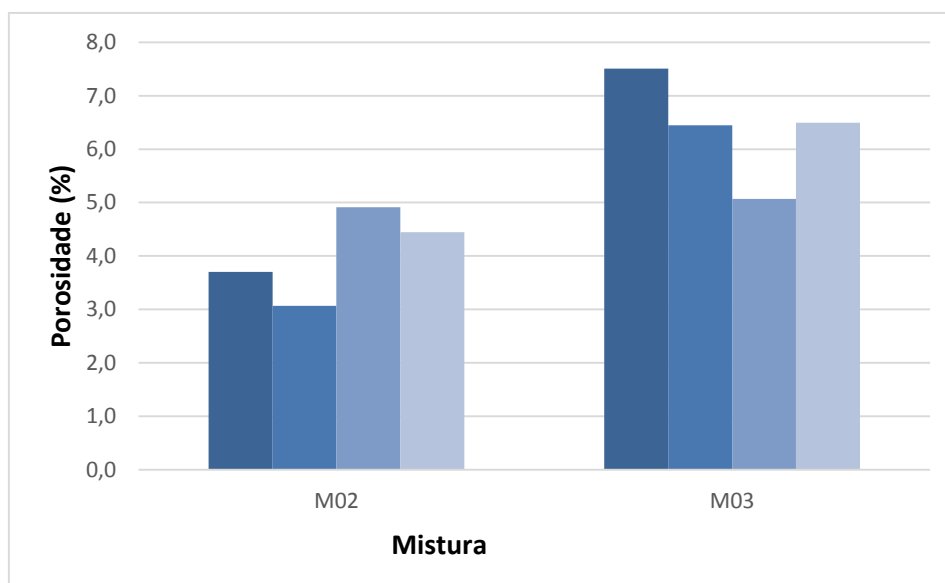


Figura 4.8-- Porosidade das misturas produzidas a 120 °C e compactadas a 120 °C.

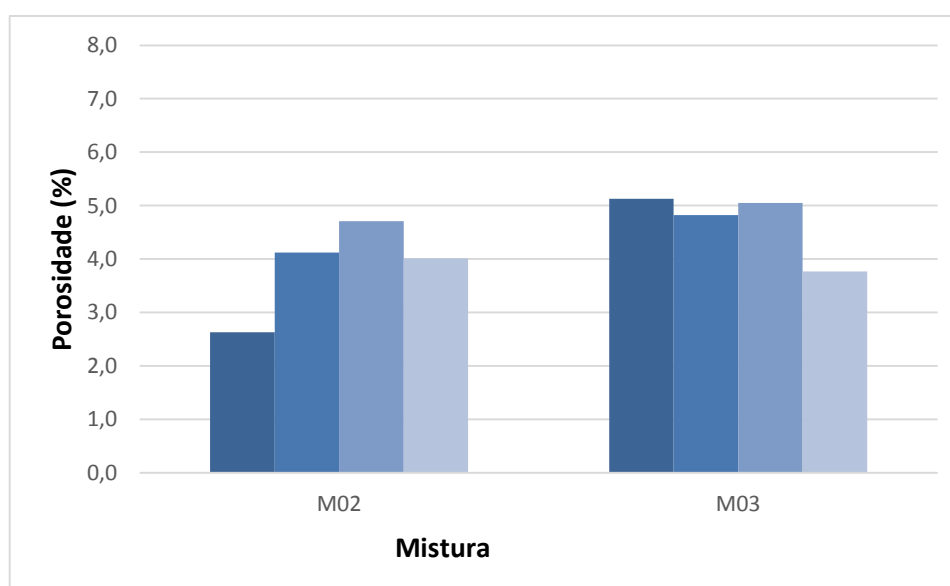


Figura 4.9-- Porosidade das misturas produzidas a 120 °C e compactadas a 100 °C.

Após a análise dos resultados obtidos, pode-se verificar que ambos os aditivos apresentam porosidades semelhantes, prevalecendo o melhor comportamento das misturas aditivadas com Sasobit[®] (M02).

As misturas M02 e M03 têm comportamentos diferentes quando são produzidas e compactadas a temperaturas típicas de misturas a quente. As misturas aditivadas com Sasobit[®] apresentam uma porosidade mais baixa que a mistura de controle, por sua vez a mistura aditivada com

Rediset® apresenta resultados ligeiramente piores que a mistura de controlo. No entanto, a temperaturas de compactação da ordem dos 120 °C ambas as misturas aditivadas apresentam uma porosidade mais baixa que a mistura de controlo, sentindo-se assim o efeito de ambos os aditivos na mistura.

A mistura M02 aditivada com Sasobit® apresenta valores de porosidade na ordem dos 2,3 a 3% quando fabricada a 165 °C e compactada a 150 °C, temperaturas típicas de misturas a quente. Estes valores são substancialmente mais baixos que os valores obtidos pela mistura de controlo, o que indica uma compactação excessiva destas lajes.

Estes valores indicam uma maior compactação da mistura, o que pode ser devido à elevada fluidez do ligante a temperaturas tão elevadas. O ligante irá então preencher mais vazios, diminuindo assim a porosidade da laje. A excessiva compactação destas lajes poderá causar problemas de resistência à deformação permanente.

Quando se baixa a temperatura de compactação para valores mais baixos, 120 °C, a porosidade vai aumentar para valores mais próximos dos valores de controlo, apesar de ainda apresentar valores mais baixos que estes.

Quando a mistura é produzida e compactada a temperaturas mais baixas, esta apresenta um comportamento normal para uma mistura betuminosa, sendo que, os resultados desta mistura vão ser bastante semelhantes quer sejam compactados a 120 quer a 100°C. Com valores de porosidade na ordem dos 4%, valores esses que estão enquadrados com a mistura de controlo quando produzida a temperaturas típicas de misturas a quente.

Analisando os resultados obtidos pela mistura aditivada com Rediset®, observa-se que esta mistura apresenta resultados semelhantes aos valores obtidos pela mistura de controlo. Quando fabricada a 165°, a mistura apresenta porosidades muito próximas da porosidade da mistura de controlo. Quando compactada a 150 °C, a mistura aditivada com Rediset® apresenta uma porosidade ligeiramente superior aos valores da mistura de controlo. No entanto quando se baixa a temperatura de compactação para 120 °C esta mistura apresenta valores de porosidade inferiores aos da mistura de controlo, o que indica uma melhor compactação. Para misturas produzidas e compactadas a temperaturas típicas das misturas betuminosas temperadas (120°C), esta mistura apresenta resultados mais satisfatórios, apresentando porosidades semelhantes aos valores da mistura de controlo e com pouca variação mesmo para temperaturas de compactação diferentes.

Comparando ambas as misturas, é possível observar que apresentam um comportamento semelhante, obtendo menores porosidades quando fabricadas e compactadas a temperaturas mais elevadas. De notar também, a maior compactabilidade das misturas aditivadas com Sasobit®, que independentemente da temperatura de fabrico e compactação, apresentam sempre valores de porosidade mais baixos que as misturas aditivadas com Rediset®, demonstrando mais uma vez que este aditivo necessita de menos energia para obter uma boa compactação.

A presença destes aditivos vai permitir uma boa compactação da mistura a temperaturas mais baixas e com resultados semelhantes aos resultados obtidos com uma mistura a quente. Os resultados obtidos encontram-se no ponto I.3 do Apêndice I.

4.3 Ensaio de deformação permanente

Tal como já foi referido, o ensaio de deformação permanente foi realizado segundo o procedimento B da norma EN 12697-22 (2003)+A1(2007). Recorde-se que, foram ensaiadas duas misturas: uma mistura onde se incorporou o aditivo Sasobit® (M02); e outra onde foi

incorporado o aditivo Rediset® (M03). Ambas foram sujeitas ao mesmo ensaio, realizado em condições idênticas.

Na Figura 4.10 apresenta-se o ensaio de pista realizado com a mistura de controlo. Os valores aí apresentados estabelecem uma base de comparação, pois esta mistura não é aditivada. Esta mistura foi fabricada a 165 °C e compactada a 150 e 120 °C. Comparando os resultados, observa-se que as lajes compactadas a 150 °C (C5 e C6), apresentam uma menor deformação permanente, com deformações abaixo dos 5mm. Por sua vez as lajes compactadas a 120 °C apresentam resultados diferentes, com uma das lajes a obter uma deformação ligeiramente pior que as das misturas compactadas a 150 °C, enquanto a outra laje apresenta um mau resultado, com deformação permanente de 20 mm.

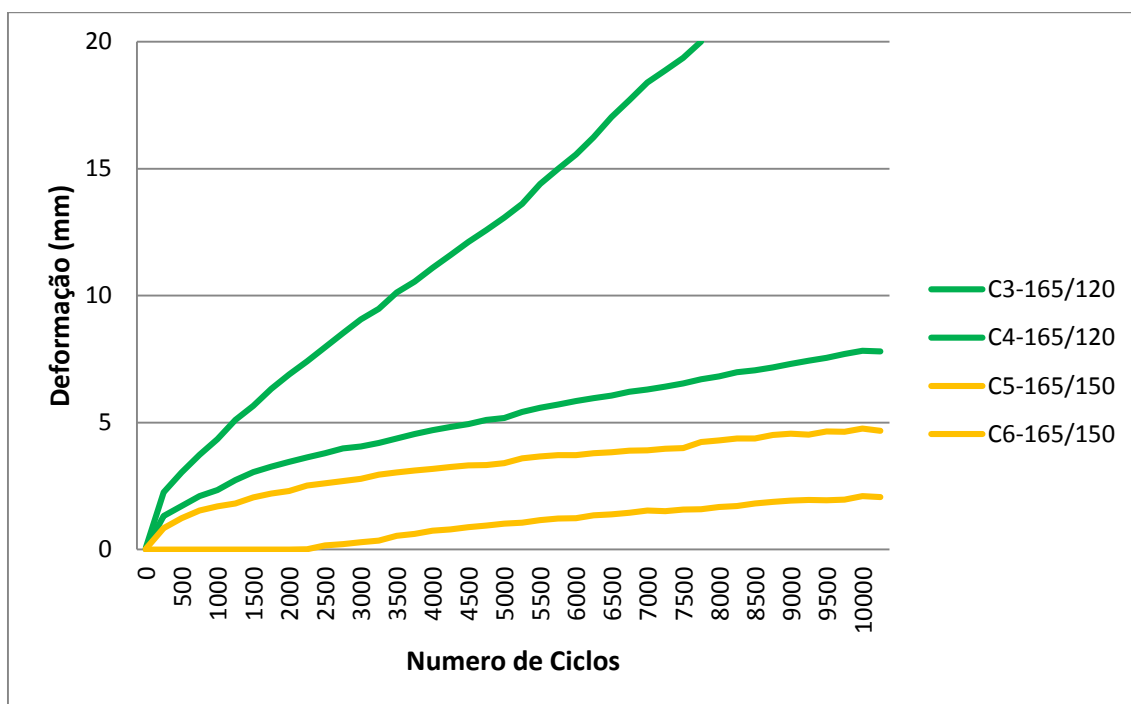


Figura 4.10- Resultados do ensaio de pista da mistura de controlo fabricada a 165 °C

Na Figura 4.11 e Figura 4.12 estão apresentados os resultados do ensaio de pista das misturas fabricadas a 165 °C. Na Figura 4.11 estão apresentados os resultados das misturas aditivadas com Sasobit® (M02), por sua vez na Figura 4.12 apresentam-se os resultados das misturas aditivadas com Rediset® (M03). Analisando ambas as figuras é evidente que as misturas aditivadas com Sasobit® apresentam deformações permanentes mais baixas. Esta mistura apresenta valores de deformação permanente, com deformações abaixo dos 5mm, apesar de um ligeiro aumento da deformação quando se baixa a temperatura de compactação para 120 °C, no entanto os valores de deformação permanente destas lajes está próximo das lajes compactadas a 150 °C. Já as misturas aditivadas com Rediset® apresentam piores resultados, com deformações permanentes muito elevadas. Tal como nas misturas aditivadas com Sasobit®, as misturas aditivadas com Rediset® apresentam melhores resultados quando compactadas a 150 °C.

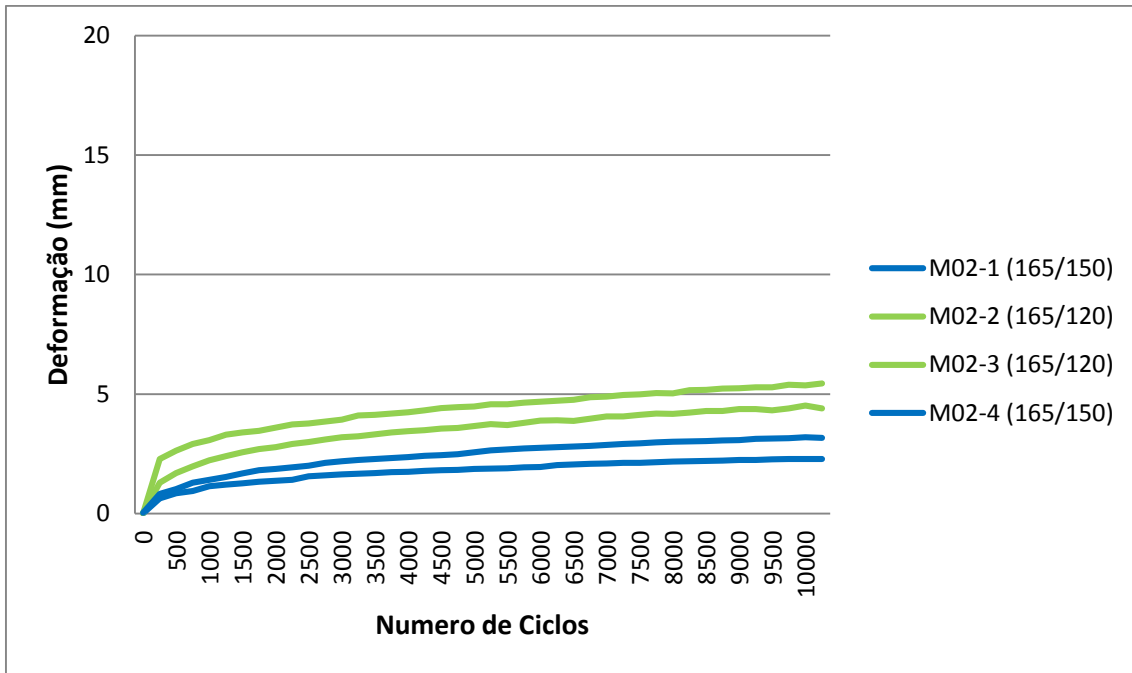


Figura 4.11- Resultado do ensaio de pista da mistura aditivada com Sasobit® e fabricada a 165 °C.

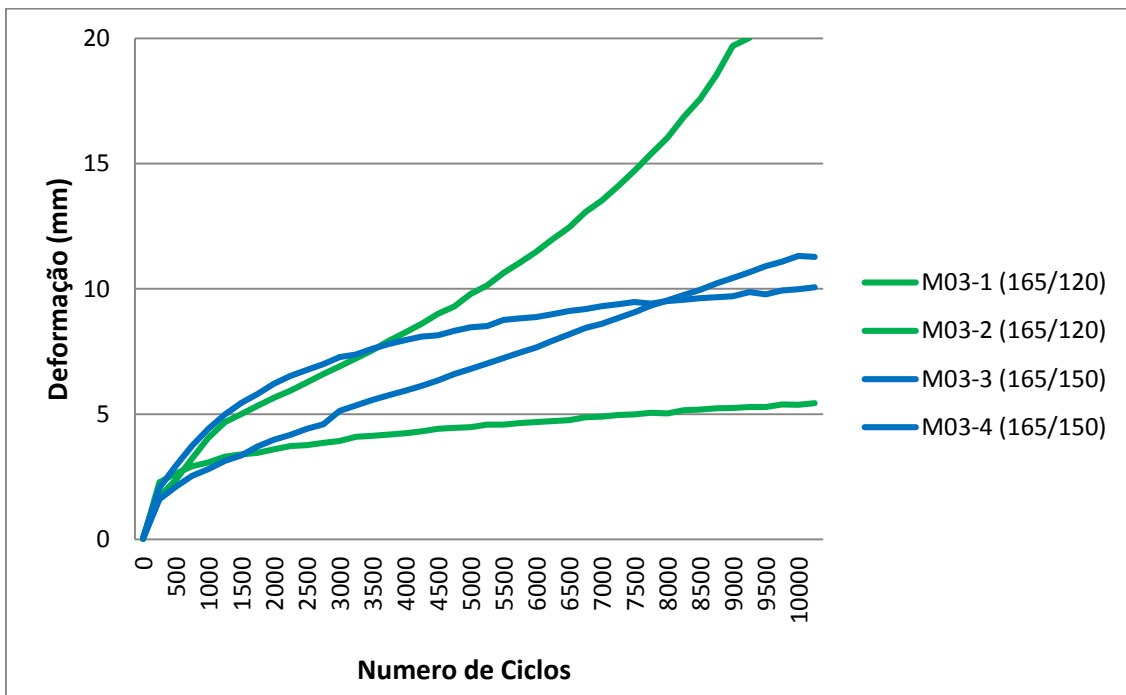


Figura 4.12- Resultado do ensaio de pista da mistura aditivada com Rediset® e fabricada a 165 °C.

Na Figura 4.13 e Figura 4.14 estão apresentados os resultados do ensaio de pista das misturas produzidas a 120 °C. Na Figura 4.13 estão apresentados os resultados das misturas aditivadas com Sasobit® (M02), e na Figura 4.14 apresenta-se os resultados das misturas aditivadas com Rediset® (M03). Analisando os resultados apresentados nas figuras anteriormente mencionadas, observa-se que as misturas fabricadas a 120 °C apresentam deformações semelhantes às misturas fabricadas a 150 °C. Ambas as misturas apresentam o mesmo comportamento, com as

misturas aditivadas com Sasobit® (M02), a apresentarem deformações permanentes baixas, e com as misturas aditivadas com Rediset® (M03) a apresentarem deformações permanentes elevadas, com várias lajes a apresentarem deformações de 20mm. Comparando os resultados das misturas produzidas a 165 °C com as misturas produzidas a 120 °C, observa-se que a temperatura de produção não é condicionante na resistência à deformação permanente de um pavimento, pois ambas as misturas apresentam resultados consistentes.

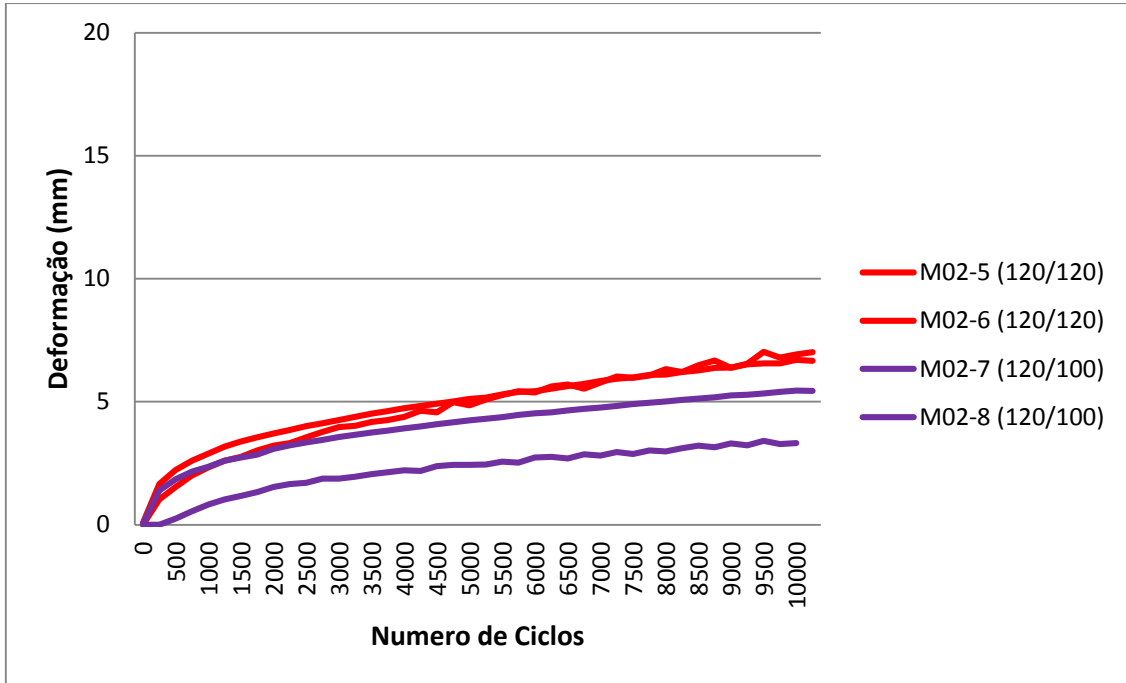


Figura 4.13- Resultado do ensaio de pista da mistura aditivada com Sasobit® e fabricada a 120 °C.

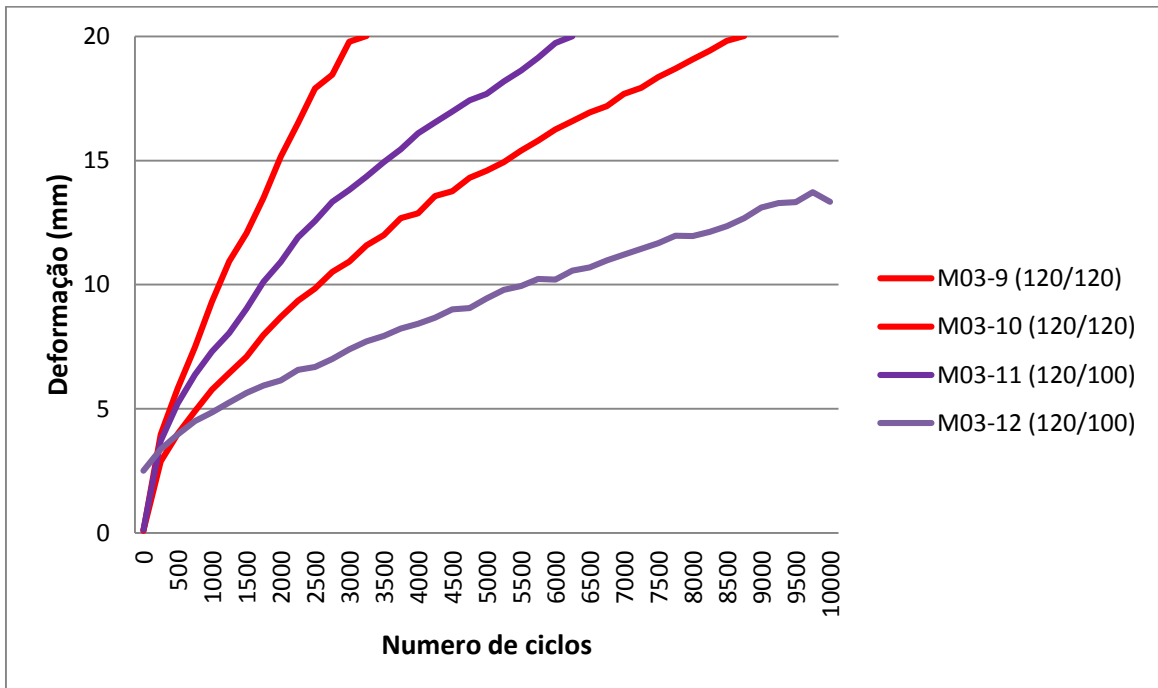


Figura 4.14- Resultado do Ensaio de pista da mistura aditivada com Rediset® e fabricada a 120 °C.

O ensaio de deformação permanente permitiu analisar o comportamento do pavimento quando sujeito a cargas permanentes. Este ensaio foi complementado com a determinação da baridade e da porosidade das lajes. Estes ensaios permitiram analisar a compactação do pavimento, tornando-se assim possível avaliar se a deformação sofrida pelo pavimento provem de uma deficiente compactação ou de alguma alteração proporcionada por algum dos aditivos. No Quadro 4.2 estão compilados os resultados obtidos nos ensaios anteriormente mencionados.

Quadro 4.2- Resumo dos resultados do Ensaio de Pista, e de Volumetria.

Mistura	Temperatura de fabrico (°C)	Temperatura de compactação (°C)	Laje	Deformação permanente (mm)	WTS (mm/10 ³)	Provete	Baridade Aparente (kg/m ³)	Porosidade (%)
M02	165	150	M02-1	2,29	0,085	1	2283,00	2,6
			2	2282,69	2,6			
		M02-4	3,17	0,123	1	2273,53	3,0	
			2	2279,45	2,7			
		120	M02-2	4,4	0,172	1	2288,90	2,3
			2	2273,96	3,0			
	M02-3	5,44	0,173	1	2253,42	3,8		
		2	2267,43	3,2				
	120	120	M02-5	6,66	0,316	1	2255,60	3,7
			2	2270,43	3,1			
		M02-6	7,02	0,412	1	2227,21	4,9	
			2	2238,17	4,4			
100		M02-7	5,44	0,844	1	2281,64	2,6	
		2	2246,76	4,1				
M02-8	3,32	0,166	1	2232,99	4,7			
	2	2249,30	4,0					
M03	165	150	M03-3	10,06	0,304	1	2205,60	5,9
			2	2222,20	5,2			
		M03-4	11,27	0,904	1	2228,02	4,9	
			2	2222,11	5,2			
		120	M03-1	20	-	1	2195,91	6,3
			2	2264,82	3,4			
	M03-2	-	-	1	2240,47	4,4		
		2	2275,62	2,9				
	120	120	M03-9	20	1,456	1	2167,48	7,5
			2	2192,29	6,4			
		M03-10	20	-	1	2224,55	5,1	
			2	2191,13	6,5			
100		M03-11	20	-	1	2223,14	5,1	
		2	2230,32	4,8				
M03-12	13,34	0,786	1	2225,00	5,1			
	2	2255,08	3,8					

Analisando os dados obtidos no ensaio de deformação permanente, é possível observar que ambas as misturas estão dependentes da temperatura de fabrico e compactação. Quando se diminui a temperatura de compactação, a deformação permanente aumenta e o grau de compactação das misturas diminui.

A análise dos resultados de WTS permite determinar qual a velocidade a que se dá a deformação da laje ensaiada. Cruzando os valores obtidos após o cálculo do WTS com os valores de deformação permanente, é possível observar que as lajes que apresentam maior deformação são as que tem valores de WTS mais elevados. As misturas compactadas a temperaturas mais elevadas apresentam uma taxa de crescimento mais baixa. De notar que as misturas aditivadas com Sasobit[®] apresentam taxas de deformação mais baixas.

As misturas M02 obtiveram deformações permanentes mais baixas quando sujeitas ao ensaio de deformação permanente. A excessiva compactação das lajes produzidas a temperaturas mais elevadas deveria condicionar os resultados no ensaio de deformação permanente. No entanto tal não sucedeu, uma vez que estas misturas (M02-1 e M02-4) apresentam resultados semelhantes às restantes lajes aditivadas com Sasobit[®].

Os melhores resultados desta mistura devem-se a um maior grau de compactação, assim como, ao aditivo Sasobit[®]. Este aditivo proporciona um aumento de rigidez à mistura após o seu arrefecimento. Este aumento de rigidez deve-se à formação de uma estrutura cristalina por parte do aditivo quando este se encontra abaixo do seu ponto de fusão, conferindo assim uma maior rigidez ao pavimento (Yi-qiu, et al., 2012). Esta mistura demonstra uma menor suscetibilidade à diminuição da temperatura de compactação, uma vez que, os resultados de deformação permanente vão ser bastante similares, tal é comprovado pelos valores obtidos na porosidade. A diminuição da temperatura de fabrico não tem uma influência significativa na compactação das misturas aditivadas com Sasobit[®], como comprovam os resultados obtidos nas misturas compactadas a 120 °C e fabricadas a temperaturas de 165°C e 120 °C. As misturas M02-2 e M02-3 fabricadas a 165 °C e compactadas a 120 °C com porosidades médias de 2.642 % e 3.538%, respetivamente. Quando comparadas com as misturas M02-5 e M02-6 com porosidades médias de 3.384% e 4.679% respetivamente, observa-se que ambas têm porosidades semelhantes. Tal comportamento indica níveis de compactação semelhante. No entanto, o comportamento no ensaio de deformação permanente das lajes fabricadas a 165 °C e compactadas a 150° não é igual às restantes lajes. Estas misturas M02-1 e M02-4 apresentam valores de porosidade bastante baixos, o que indica uma mistura muito flexível, o que durante a pavimentação pode causar problemas, pois uma mistura muito mole vai apresentar uma elevada deformação durante a sua compactação, podendo assim levar a um pavimento de baixa qualidade. A baixa porosidade também indica um excesso de compactação o que pode levar a problemas com a deformação permanente do pavimento.

As misturas M03 aditivadas com Rediset[®] apresentam resultados menos favoráveis no ensaio de deformação permanente. Por sua vez o grau de compactação destas misturas é aceitável, apresentando valores semelhantes aos obtidos pela mistura de controlo. Analisando os resultados obtidos nos ensaios de deformação permanente, é possível observar que estas misturas apresentaram maus resultados independentemente da temperatura de fabrico e de compactação.

Os maus resultados no ensaio de deformação permanente podem ser justificados com um grau de compactação mais baixo relativamente às misturas aditivadas com Sasobit[®] e com o aumento de rigidez que este proporciona à mistura. Então, a presença deste aditivo apesar de permitir o fabrico e a compactação a temperaturas baixas, não garante bons resultados no que toca à deformação permanente. Tal como nas misturas aditivadas com Sasobit[®], as misturas aditivadas com Rediset[®] apresentam resultados constantes na porosidade das lajes. O que demonstra uma influência efetiva do aditivo no grau de compactação da mistura a temperaturas mais baixas, no entanto, com valores de porosidade acima dos obtidos nas lajes da mistura M02.

Observa-se assim que ambos os aditivos têm uma influência ativa no grau de compactação da mistura e que o aumento da temperatura de fabricação não tem uma influência assinalável na compactação, nem na deformação permanente do pavimento. As misturas aditivadas com Sasobit® (M02) apresentaram porosidades e deformações permanentes inferiores às misturas aditivadas com Rediset®. A menor porosidade é um indicador de melhor compactação por parte das misturas que incorporam Sasobit® na sua constituição. Tal demonstra que estas misturas são mais trabalháveis e conseqüentemente, que é necessário menos energia para se proceder a uma correta compactação desta mistura. O grau de compactação da laje influencia diretamente os resultados dos ensaios de deformação permanente, sendo que uma laje bem compactada vai obter deformações inferiores a uma laje mal compactada. Os melhores resultados das misturas aditivadas com Sasobit® (M02), no ensaio de deformação permanente não se devem apenas a um melhor grau de compactação, mas também a um aumento de rigidez proporcionado por este aditivo.

4.4 Análise de ganhos de tempo para pavimentação

De forma a avaliar qual o ganho de tempo de compactação obtido graças ao aumento da temperatura de produção de uma MBT, recorreu-se ao modelo de cálculo desenvolvido por Alves (Alves, 2014). Este modelo de cálculo permite avaliar qual a influência que o aumento da temperatura de fabricação tem na compactação de um pavimento.

Este modelo avalia o tempo de arrefecimento de uma mistura antes de ser compactada. Também permite a determinação da temperatura da mistura para diferentes profundidades da mesma. O modelo de cálculo tem em conta a influência dos diferentes tipos de transmissão de calor e a forma como estes influenciam o arrefecimento da mistura. O arrefecimento de uma mistura ocorre por condução, convecção e radiação. Tendo em conta estes fenómenos decidiu-se manter os fatores climatéricos constantes, considerando a situação de vento moderado (6 m/s) e de dia sem nebulosidade, existindo apenas a variação da temperatura do ar. Neste modelo desenvolveram-se quatro estruturas que variam na espessura da camada de desgaste e no material da camada de desgaste e camada de base. As estruturas utilizadas apresentam as seguintes combinações:

- Estrutura 1: Camada superficial de mistura betuminosa do tipo AC (3cm) e camada de base betuminosa (20cm);
- Estrutura 2: Camada superficial de mistura betuminosa do tipo SMA (5cm) e camada de base betuminosa (20cm)
- Estrutura 3: Camada superficial de mistura betuminosa do tipo AC (8cm) e camada de base ABGE (20cm)
- Estrutura 4: Camada superficial de mistura betuminosa do tipo AC (12cm) e camada de base ABGE (20cm)

No modelo desenvolvido por (Alves, 2014), determinaram-se as características térmicas do pavimento, características essas que estão apresentadas no Quadro 4.3.

Quadro 4.3- Características geométricas e térmicas da estrutura estudada.

Material	Estrutura	λ (W/m.°C)	c (J/kg.°C)	ρ (kg/m ³)
SMA	2	1,2	921	2400
AC	1,2, 3 e 4	2,0	869	2350
ABGE	3 e 4	1,3	837	1750

A determinação da temperatura de fundação é condicionada pela temperatura do ar e foi determinada recorrendo à equação (4.1), (Branco, et al., 2011).

$$T_{mb} = (T_{mma} + 17,778) \cdot \left(1 + \frac{1}{39,37 \cdot z + 4}\right) - \frac{18,889}{39,37 \cdot z + 4} - 14,44 \quad (4.1)$$

onde:

T_{mb} - é a temperatura média mensal do betão betuminoso a uma certa profundidade, em °C;

T_{mma} - temperatura média mensal do ar, dada em °C;

z- profundidade medida a partir da superfície do pavimento, em m.

As temperaturas e espessuras utilizadas estão representadas no Quadro 4.4.

Quadro 4.4-Relação entre a temperatura do ar e a temperatura da camada de base.

Temperatura do ar (°C)	Profundidade (m)	Temperatura da camada de base (°C)
0	0,01	3,08
	0,05	3,15
	0,10	3,19
	0,20	3,24
5	0,01	9,22
	0,05	8,99
	0,10	8,82
	0,20	8,66
10	0,01	15,36
	0,05	14,82
	0,10	14,45
	0,20	14,08

Após a análise dos resultados anteriormente obtidos, optou-se por se utilizar os seguintes valores para a temperatura de base:

- 3°C quando a temperatura do ar é 0 °C;
- 9 °C quando a temperatura do ar é 5 °C;
- 14 °C quando a temperatura do ar é 10 °C.

Com os valores da temperatura do ar e da temperatura da camada de base definidos é então possível determinar o arrefecimento do pavimento recorrendo ao modelo de cálculo previamente mencionado. Foram então criados dois modelos que divergem entre si apenas na temperatura de aplicação, com um modelo a ser aplicado a 160 °C, enquanto o outro é aplicado a 120 °C. Estas temperaturas correspondem às temperaturas de fabrico da mistura betuminosa, com uma mistura a ser produzida à temperatura típica de uma MBT (120 °C) e outra a ser produzida a uma temperatura mais elevada (160 °C). Ambos os modelos são testados a diferentes temperaturas atmosféricas: 0 °C, 5 °C e 10 °C. Os resultados obtidos estão representados na Figura 4.15, na Figura 4.16 e na Figura 4.17.

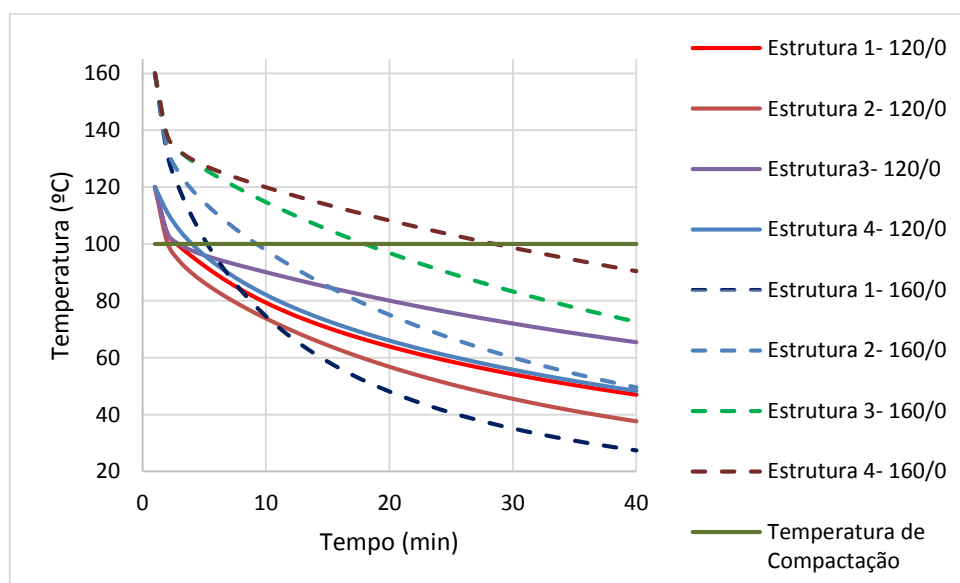


Figura 4.15- Influência do aumento da temperatura de fabrico no tempo disponível para compactação, com temperatura atmosférica de 0°C.

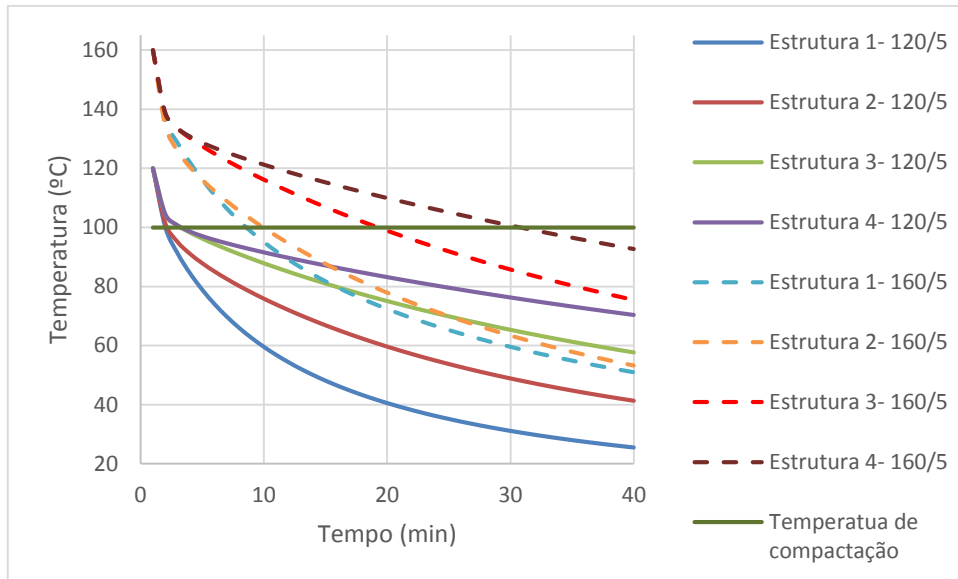


Figura 4.16- Influência do aumento da temperatura de fabrico no tempo disponível para compactação, com temperatura atmosférica de 5°C.

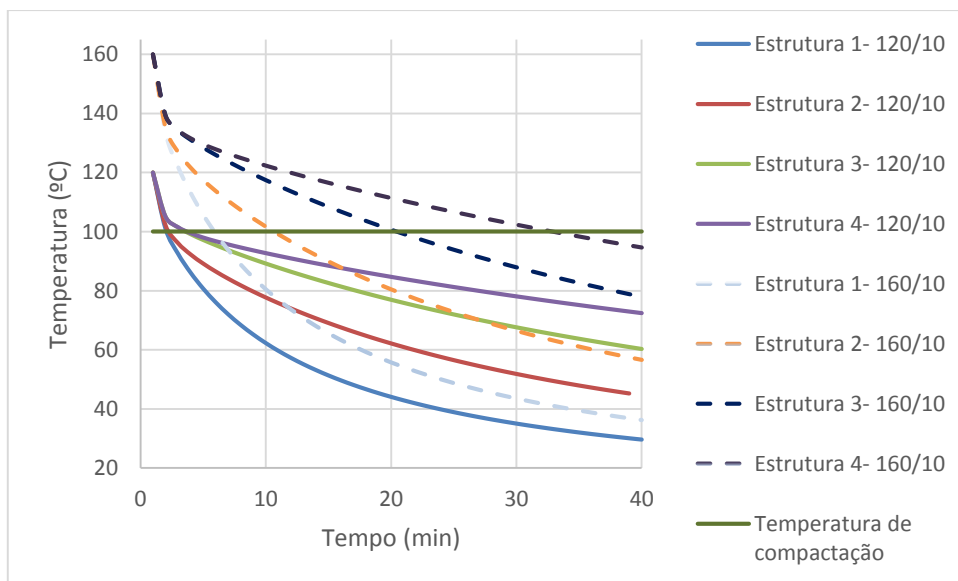


Figura 4.17- Influência do aumento da temperatura de fabrico no tempo disponível para compactação, com temperatura atmosférica de 10°C.

Analisando as figuras é possível observar que existe um certo ganho de tempo de compactação independentemente da temperatura atmosférica. Como esperado com o aumento da temperatura atmosférica existe um maior ganho de tempo disponível para a compactação. Tal deve-se a uma menor diferença de temperaturas entre a mistura e a temperatura atmosférica, que leva a um arrefecimento mais lento. Analisando as figuras 4.15, 4.16 e 4.17 é possível observar que todas as estruturas apresentam ganhos de tempo independentemente da temperatura atmosférica, no entanto as estruturas 3 e 4 apresentam maiores ganhos, tal deve-se à maior espessura destas estruturas que vai ter uma influência direta no tempo de arrefecimento. Quando a temperatura atmosférica é mais baixa, 0 °C, os ganhos temporais para as estruturas 1 e 2 é reduzido. As estruturas mais espessas, Estruturas 3 e 4, apresentam ganhos temporais significativos entre os 10 e os 20 minutos. Já para temperaturas atmosféricas de 5 e 10 °C as estruturas vão apresentar

resultados semelhantes, com as estruturas mais espessas a obterem um maior tempo de arrefecimento entre os 15 e os 25 minutos, enquanto as estruturas mais finas apresentam um ganho de tempo de aproximadamente 5 minutos.

Analisando todos os gráficos, pode afirmar-se que existe um ganho efetivo de tempo para a compactação quando se produz uma mistura temperada a temperaturas mais elevadas, sendo este ganho consistente mesmo para temperaturas atmosféricas mais baixas. Assim a produção de misturas temperadas a temperaturas mais elevadas, permite uma melhor compactação de um pavimento de maior espessura, assim como o aumento do período de pavimentação durante as estações do ano mais frias, permitindo assim um melhor aproveitamento dos recursos.

5 Conclusões e trabalhos futuros

5.1 Conclusões

Na presente dissertação desenvolveu-se um estudo laboratorial com o objetivo de avaliar o comportamento de uma mistura betuminosa temperada relativamente à variação da temperatura de produção e compactação. Estudou-se ainda a influência da temperatura de produção no aumento da distância de transporte.

Foi selecionada uma mistura do tipo AC 20 Base 35/50 (MB), onde se incorporaram os aditivos Sasobit® e Rediset®. Fabricou-se então misturas a 165 °C e 120 °C. As misturas fabricadas a 165 °C foram compactadas a 150 e 120 °C, enquanto as misturas fabricadas a 120 °C foram compactadas a 120 e 100 °C.

Foram realizados ensaios de pista e ensaios de escorrimento.

Após a análise dos ensaios de pista, concluiu-se que a temperatura de fabrico não tem influência marcante na deformação dos provetes ensaiados, por sua vez a temperatura de compactação vai ser condicionante nos resultados obtidos neste ensaio. Sendo que uma mistura compactada a temperaturas mais altas apresenta deformações mais baixas, tal é devido a uma melhor compactação a temperaturas mais elevadas. A maior dificuldade em compactar misturas a temperaturas mais baixas foi confirmada com a determinação da baridade aparente dos provetes. Após a análise destes resultados do ensaio de baridade, pode-se concluir que os provetes que apresentavam maiores deformações também apresentavam uma baridade aparente mais baixa e porosidade mais elevada, apontando assim para uma compactação menos eficaz.

Ambos os aditivos apresentaram resultados consistentes, sendo que a variação da temperatura de fabrico não irá ter um papel determinante no comportamento do pavimento. No caso da temperatura de compactação, a influência que esta vai ter no comportamento do pavimento quando sujeito a deformações permanentes vai ser mais sentida. Pavimentos compactados a temperaturas mais altas vão ter uma maior compacidade e, conseqüentemente, uma menor deformação permanente. No entanto, o comportamento das misturas é consistente, o que demonstra que ambas as misturas podem ser produzidas a temperaturas mais elevadas e compactadas a temperaturas mais baixas sem que exista uma perda de propriedades por parte do pavimento.

Apesar dos resultados obtidos para ambas as misturas serem consistentes, quando se compara as misturas constatou-se algumas diferenças. As misturas M02, aditivadas com Sasobit®, apresentam resultados substancialmente melhores que as misturas M03, aditivadas com Rediset®, sendo que, com o diminuir da temperatura de produção e compactação, as diferenças tornam-se cada vez mais evidentes. As misturas aditivadas com Sasobit® apresentam sempre melhores resultados no ensaio de deformação permanente. Tal é devido, em parte, à formação de estruturas cristalinas, quando se encontra a temperaturas inferiores ao seu ponto de fusão, estas conferem maior rigidez ao pavimento. Com a análise da baridade aparente e da porosidade das lajes ensaiadas, é possível observar-se um maior grau de compactação nas misturas realizadas com Sasobit®.

Da análise dos resultados obtidos no ensaio de escorrimento. Concluiu-se que nenhum dos aditivos fez diferenças significativas na mistura uma vez que os resultados obtidos estiveram sempre muito próximos dos resultados obtidos para a mistura sem aditivos.

Pode então concluir-se que o aumento da temperatura de produção de misturas betuminosas temperadas não vai influenciar a resposta do pavimento relativamente à deformação permanente e que esta está dependente da temperatura de compactação. Também ficou comprovado que os aditivos utilizados não têm qualquer influência no escorrimento do betume. Estes resultados

confirmam a possibilidade do aumento da temperatura de produção das misturas betuminosas temperadas de forma a aumentar a distância de transporte destas sem que haja uma perda de qualidade no pavimento.

5.2 Trabalhos futuros

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento acerca da influência do aumento da temperatura de fabrico de uma mistura temperada na distância de transporte, são propostos os seguintes trabalhos futuros:

- Avaliação da influência dos aditivos na viscosidade do betume.
- Avaliação do comportamento desta mistura à fadiga.
- Repetição dos ensaios realizados, com misturas temperadas aditivadas com outros produtos ou fabricadas com outros métodos.

6 Bibliografia

Airey, G. D. & Westwood, D., 2004. *High Temperature Viscosity of Polymer and Filler Modified Binder Systems*. Vienna, Foundation Eurasphalt, pp. 1599-608.

Alves, M. R., 2014. *Período de tempo disponível para a compactação de misturas betuminosas: análise paramétrica*, Lisboa: FCT_UNL.

Azari, H., McCuen, R. H. & Stuart, K. D., 2003. Optimum Compaction Temperature for Modified Binders. *Journal of transportation engineering*, 5 Setembro, pp. 531-537.

Banerjee, A., Smit, A. d. F. & Prozzi, J. A., 2012. The effect of long-term aging on the rheology of warm mix asphalt binders. *Fuel* 97, Fevereiro, pp. 603-611.

Branco, F., Pereira, P. & Picado, L., 2011. *Pavimentos Rodoviarios*. 4º ed. Coimbra: Almedina.

Buss, A. F., 2010. *Investigation of warm-mix asphalt using Iowa aggregates*, Iowa: Iowa State University.

Button, J. W., Estakhri, C. & Wimsatt, A., 2007. *A Synthesis of Warm Mix Asphalt*, Texas: Texas transportation institute.

Capitão, S., Picado-Santos, L. & Martinho, F., 2012. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials* 36, Agosto, pp. 1016-1024.

Capitão, S., Picado-Santos, L. & Martinho, F., 2012. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, Agosto.

D'Angelo, J. et al., 2008. *Warm-Mix Asphalt: European Practice*, Alexandria: American Trade Initiatives.

Everett Crews, 2008. *Extended season paving in New York city using EVOTERM warm mix asphalt*, North Charleston: Asphalt Inovations.

Hurley, G. C. & Prowell, B. D., 2005. *Evaluation of Sasobit for use in Warm mix Asphalt*, Auburn: National Center for Asphalt Technology.

Jamshidi, A., Hamzah, M. O. & You., Z., 2013. Performance of Warm Mix Asphalt containing Sasobi: State-of-the-art. *Construction and Building Materials* 38, 12 Outubro, pp. 530-553.

Jiménez, F. P., M.Barral, Sánchez, J. S. & Jansoro, J. N., s.d. *Effect of the nature and filler content on cohesion, adhesiveness and rheological behavior of the bituminous mastics*, s.l.: s.n.

Khodaii, A., Tehrani, H. K. & Haghshenas, H., 2012. Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*.

Khodaii, A., Tehrani, H. K. & Hahshenas, H. F., 2012. Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials* 36, 23 Junho, pp. 165-170.

León, J. A. G., Ligier, S., Grampré, L. & Barreto, G., 2011. Warm Mix Asphalts (WMAs) with chemical additives. *Europeanroads*, 20 Março, pp. 14-20.

Liu, X., Cui, Q. & Schwartz, C., 2013. Greenhouse gas emissions of alternative pavement designs: Framework development and illustrative application. *Journal of Environmental Management* 132, 10 Dezembro, pp. 313-322.

- Logaraj, S., Smith, M., James, A. & Norel., M., 2011. Development of a new Warm Mix Technology offering enhanced Asphalt Properties. *European Roads Review*, 20 Março, pp. 21-25.
- M. Carmen Rubio, G. M. L. B. F. M., 2011. Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production*.
- Martinho, F., 2014. *Misturas Betuminosas Temperadas com incorporação de subprodutos Industriais-Characterização e validação Tecnológica*, Lisboa: Instituto Superior Tecnico.
- Mo, L. et al., 2012. Laboratory investigation of compaction characteristics and performance of warm mix asphalt containing chemical additives. *Construction and Building Materials* 37, 30 Agosto, pp. 239-247.
- Newcomb, D., 2011. Warm Mix Asphalt in the U.S.. *European Roads review*, 20 Março, pp. 4-6.
- Qin, Q., Farrar, M. J., Pauli, A. T. & Adams., J. J., 2013. Morphology, thermal analysis and rheology of Sasobit modified warm mix asphalt binders. *Fuel* 115, 30 Julho, pp. 416-425.
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L. & Moreno, F., 2011. Warm mix asphalt: an overview. *Journal of Cleaner Production* 24, 28 Novembro, pp. 76-84.
- Sargand, S., Nazzal, M. D., Al-Rawashdeh, A. & Powers, D., 2011. Field Evaluation of Warm-Mix Asphalt Technologies. *Journal of Materials in Civil*.
- Sargand, S., Nazzal, M. D., Al-Rawashdeh, A. & Powers, D., 2012. Field Evaluation of Warm-Mix Asphalt Technologies. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 November, pp. 1343-1349.
- Silva, H. M., Oliveira, J. R., Peralta, J. & Zoorob., S. E., 2010. Optimization of warm mix asphalts using different blends of binders and synthetic paraffin wax contents. *Construction and Buildings Materials* 24, 15 Março, pp. 1621-1631.
- Smith, K., 2013. *Durability is crucial while warm mix technology can help disaster recovery*. [Online]
Available at: <http://www.worldhighways.com/categories/materials-production-supply/features/durability-is-crucial-while-warm-mix-technology-can-help-disaster-recovery/>
[Acedido em 15 Janeiro 2015].
- Sundaran, L. & Almeida, A., 2010. *Surface-active bitumen additive for warm mis asphalt with adhesion promoting properties*, Amesterdão: Akzo Nobel.
- Wang, C., Hao, P., Ruan, F. & Adhikari, X., 2013. Determination of the production temperature of warm mix asphalt by workability test. *Construction and Building Materials* 48, 26 Agosto, pp. 1165-1170.
- Wright, P. H. & Dixon, K. K., 2004. *Highway Engineering*. 7º ed. Michigan: Wiley International Edition.
- Yi-qiu, T., Lei, Z., Wei-qiang, G. & Meng, G., 2012. Investigation of the effects of wax additive on the properties of asphalt binder. *Construction and Building Materials* 36, 7 Julho, pp. 578-584.
- Zaumanis, M. et al., 2012. Laboratory evaluation of organic and chemical warm mix asphalt technologies for SMA asphalt. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, Volume VII, pp. 191-197.

Apêndices

Apêndice I-Volumetria

I.1 Baridade Aparente

Quadro I-6.1.1 Baridade aparente das misturas de controle.

Provete		Massa seca (g)	Massa em água (g)	Massa do provete saturado com superfície seca (g)	Baridade Aparente (kg/m ³)
C3	C31	3094,2	1773,7	3168,85	2210,729
	C32	2904,8	1649,85	2987,35	2164,863
C4	C41	2399,2	1381,4	2454,6	2228,403
	C42	2900,35	1673,6	2961,6	2244,619
C5	C51	2411,05	1380,9	2461,75	2224,564
	C52	2403,4	1379,55	2453,45	2231,856
C6	C61	2806	1618,3	2858,75	2254,844
	C62	2512	1432,45	2563,8	2213,251

Quadro I-1.2 Baridade aparente das misturas aditivadas com Sasobit®.

Provete		Massa seca (g)	Massa em água (g)	Massa do provete saturado com superfície seca (g)	Baridade Aparente (kg/m ³)
M021	M211	2998,5	1740,6	3049,8	2283,001
	M212	2760,85	1611,95	2817,55	2282,693
M022	M221	2945,85	1717,65	3000,55	2288,895
	M222	3018,9	1756,15	3079,5	2273,956
M023	M231	3080,7	1782,45	3145,2	2253,415
	M232	2561,55	1481,25	2607,35	2267,43
M024	M241	2902,7	1677,55	2950,2	2273,533
	M242	2067,35	1189,65	2093,7	2279,447
M025	M0251	2813,95	1618,95	2862,5	2255,595
	M0252	2295,6	1319,95	2327,8	2270,431
M026	M0261	2842,55	1620,35	2892,55	2227,208
	M0262	2578	1474	2622,15	2238,166
M027	M0271	2491,9	1450,1	2539,25	2281,639
	M0272	2157,65	1241,15	2198,85	2246,754
M028	M0281	2778,45	1600,6	2841,45	2232,993
	M0282	2866,85	1648,05	2919,1	2249,295

Quadro I-1.3 Baridade aparente das misturas aditivadas com Rediset®.

Provete		Massa seca (g)	Massa em água (g)	Massa do provete saturado com superfície seca (g)	Baridade Aparente (kg/m ³)
M031	M311	2605,55	1484,7	2667,45	2195,91
	M312	2447,15	1411,3	2488,35	2264,815
M032	M321	2812,5	1613,25	2864,55	2240,47
	M322	3460,45	2000,6	3516,4	2275,615
M033	M331	2752,35	1562,3	2806,2	2205,597
	M333	2793,8	1584	2837,2	2222,199
M034	M341	2741,1	1566,4	2792,75	2228,017
	M342	2626,6	1505,7	2683,95	2222,105
M039	M0391	2891,35	1630,25	2960,55	2167,48
	M0392	3239,9	1833,8	3307,6	2192,285
M0310	M03101	2443,05	1397,2	2492,4	2224,554
	M03102	2922,9	1655,4	2985,7	2191,131
M0312	M03121	2980,35	1712,15	3047,95	2224,999
	M03122	3057,95	1756,8	3109,1	2255,077
M0311	M03111	2638,45	1494,45	2678	2223,137
	M03112	3221,3	1839,45	3279,8	2230,32
Densidade da água (kg/m ³)					
26°C	996,8				
24,5°C	997,25				

I.2 Baridade Máxima Teórica

Quadro I-2.1 Baridade máxima teórica da mistura.

Mistura	Temperatura (°C)	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	ρ_w (kg/m ³)	Volume do Picnómetro (m ³)	Baridade máxima Teórica (kg/m ³)
M02	3	5765	8537	21012	996800	0,014	2331,47
M03	26,2	5766	8186	20815	996600	0,014	2343,34

I.3 Porosidade

Quadro I-3.1 Porosidade da mistura de controle.

Temperatura de fabrico (°C)	Temperatura de compactação (°C)	Provete	ρ_{bssd} (kg/m ³)	V _m (%)	
165	120	C3	C31	2210,73	5,18
			C32	2164,86	7,15
		C4	C41	2228,40	4,42
			C42	2244,62	3,72
	150	C5	C51	2224,56	4,59
			C52	2231,86	4,27
C6	C61	2254,84	3,29		
	C62	2213,25	5,07		

Quadro I-3.2 Porosidade das misturas aditivadas com Rediset® e Sasobit®.

Temperatura de fabrico (°C)	Temperatura de compactação (°C)	Provete	ρ_{bssd} (kg/m ³)	Vm (%) EN12697-8
165	150	M021 M211	2283,00	2,57
		M212	2282,69	2,59
		M024 M241	2273,53	2,98
		M242	2279,45	2,73
	120	M022 M221	2288,89	2,32
		M222	2273,96	2,96
		M023 M231	2253,42	3,84
		M232	2267,43	3,24
		M031 M311	2195,91	6,29
		M312	2264,82	3,35
	150	M032 M321	2240,47	4,39
		M322	2275,61	2,89
		M033 M331	2205,60	5,88
		M333	2222,20	5,17
	150	M034 M341	2228,02	4,92
		M342	2222,10	5,17
120	120	M025 M0251	2256,61	3,70
		M0252	2271,46	3,07
		M026 M0261	2228,21	4,91
		M0262	2239,18	4,45
	100	M027 M0271	2281,64	2,63
		M0272	2246,75	4,12
		M028 M0281	2232,99	4,71
		M0282	2249,29	4,01
	120	M039 M0391	2167,48	7,50
		M0392	2192,29	6,45
		M0310 M03101	2224,55	5,07
		M03102	2191,13	6,50
100	M0311 M03121	2223,14	5,13	
	M03122	2230,32	4,82	
	M0312 M03121	2225,00	5,05	
	M03122	2255,08	3,77	

Apêndice II-Ensaio de Escorrimento

Quadro II-1.1-Ensaio de escorrimento.

	w1 (g)	w2 (g)	B (g)	Material escorrido (%)
C1	222	222	50	0,000
C2	222	222	50	0,000
M021	221,45	221,6	50	0,013
M021	224,15	224,15	50	0,000
M031	221,15	221,35	50	0,017
M032	223,6	223,7	50	0,009