



**Joel Duarte Laranjeira
Marques**

**Misturas betuminosas densas – Influência da
temperatura de fabrico na atividade de um
contaminante argiloso**



**Joel Duarte Laranjeira
Marques**

**Misturas betuminosas densas – Influência da
temperatura de fabrico na atividade de um
contaminante argiloso**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

*“A persistência é o caminho do êxito” – Charles Chaplin
À Gabi e à minha família.*

o júri

presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

arguente

Doutor Luís Francisco Amaral Silva
Supervisor de Infraestruturas, Egis Road Operation Portugal

orientador

Prof. Doutor Agostinho António Rocha Correia e Almeida da Benta
Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Doutor Agostinho Benta, um titânico obrigado pela orientação científica, pelos conhecimentos transmitidos, empenho e dedicação dispensados ao longo da realização deste trabalho, bem como pelas palavras de ânimo e incentivo e confiança.

Expresso o meu agradecimento à empresa Urbimabe, S.A., por ter disponibilizado o betume para a realização dos trabalhos experimentais.

Agradeço à EUROCÁLCIO - Calcários e inertes, S.A. por todo o material disponibilizado para a realização deste trabalho.

À Engenheira Maria Carlos e ao Senhor Vítor, Técnico do Laboratório do Departamento de Engenharia Civil, pela ajuda imprescindível prestada na realização de grande parte dos trabalhos experimentais, pela dedicação e encorajamento.

À Gabi, por ter estado sempre ao meu lado ao longo desta árdua caminhada, mesmo nos dias mais difíceis. Por ter sempre uma palavra de encorajamento e também por saber criticar quando era necessário, sempre fazendo-me acreditar que conseguiria chegar ao fim desta etapa. Obrigado por todo o amor, carinho e compreensão.

À minha família, em particular aos meus pais e irmã, assim como à D. Luísa, que sempre estiveram ao meu lado. Sem todo o seu esforço e amor nunca seria possível chegar até onde estou hoje. Não existem palavras suficientes para agradecer tudo o que fizeram e continuam a fazer por mim.

A todos os meus amigos principalmente àqueles que fizeram grande parte desta caminhada comigo, nomeadamente Pina, Telmo, Vidal, Diogo, Zero, Flávio, Fred, Rocha, Princesa, Inês, Nélia, Emanuel e Fábio Simões, pelos momentos bem passados, por toda a força que me transmitiram, pela ajuda e incentivo, mesmo quando estive mais ausente.

Por fim, agradeço a todos os docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Civil, assim como à Universidade de Aveiro e à própria cidade de Aveiro por terem feito parte do meu percurso académico.

A todos, o meu muito obrigado!

palavras-chave

agregados, agregados calcários, materiais rodoviários, fabrico de misturas betuminosas, pavimentos rodoviários.

resumo

Nas últimas décadas, o aumento progressivo do volume de tráfego nas infraestruturas de transporte suscitou a necessidade de produzir materiais de elevada qualidade na utilização de técnicas de pavimentação que conduzissem a menores impactos ambientais e sociais. A utilização de temperaturas inferiores oferece vantagens tais como: um menor custo de produção, redução das emissões e odores e um menor consumo energético durante o processo de fabrico. Este trabalho teve como objetivos principais: estudar a influência das temperaturas de fabrico no desempenho das misturas betuminosas densas (MBD) e verificar o desempenho das misturas betuminosas perante a presença de um contaminante argiloso. Para tal, utilizaram-se agregados de calcário e foi usada uma argila, como contaminante, para produzir um tipo de mistura betuminosa designada como AC 20 reg 50/70 (MBD). Para a produção dos provetes betuminosos foram definidas três temperaturas de aquecimento dos agregados (110 °C, 130 °C e 170 °C) e três diferentes percentagens de contaminante (0 %, 2 % e 3 %), sem recurso a qualquer tipo de aditivo. A percentagem de contaminante definida é referente à massa do pó de calcário existente na mistura. Esta substituição de contaminante por pó de calcário é feita para cada valor diferente da temperatura de aquecimento dos agregados. A produção dos provetes betuminosos foi conduzida através do método de Marshall para assim ser possível analisar o seu comportamento e caracterizar as propriedades relacionadas com o seu desempenho. Os resultados obtidos por Marshall afirmam que existiram problemas de controlo da temperatura de fabrico que podem ter encoberto possíveis efeitos que o contaminante poderia ter na mistura betuminosa.

keywords

aggregates, limestone aggregates, road materials, manufacture of bituminous mixtures, road pavements.

abstract

In the last decades, the progressive increase in the volume of traffic in transport infrastructures has raised the need to produce high quality materials in the use of paving techniques that lead to lower environmental and social impacts. The use of lower temperatures offers advantages such as lower production costs, reduction of emissions and odors and lower energy consumption during the manufacturing process. The main objectives of this work were: to study the influence of manufacturing temperatures on the performance of dense bituminous mixtures (MBD) and to verify the performance of bituminous mixtures in the presence of a clay contaminant. Thus, limestone aggregates were used and a clay, as a contaminant, was used to produce a type of bituminous mixture designated as AC 20 reg 50/70 (MBD). To produce bituminous samples, three heating temperatures (110°C, 130°C and 170°C) and three different percentages of contaminants (0%, 2% and 3%) were defined, without using any type of additive. The percentage of contaminant defined is relative to the mass of limestone dust in the mixture. This replacement of contaminant by limestone dust is done for each value different from the heating temperature of the aggregates. The production of the bituminous samples was conducted using the Marshall method in order to be able to analyse their behaviour and to characterize the properties related to their performance. The results obtained by Marshall affirm that there were problems of control of the temperature of manufacture that may have covered possible effects that the contaminant could have in the bituminous mixture.

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS	XXI
1. INTRODUÇÃO	3
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL DO TEMA	3
1.2 OBJETIVO E METODOLOGIAS.....	4
1.3 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
2. MISTURAS BETUMINOSAS.....	9
2.1 ESTRUTURA DE UM PAVIMENTO RODOVIÁRIO.....	9
2.2 COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS	12
<i>2.1.1 Agregados.....</i>	<i>13</i>
<i>2.1.2 Ligantes betuminosos</i>	<i>15</i>
<i>2.1.3 Espaços vazios.....</i>	<i>16</i>
2.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS MISTURAS BETUMINOSAS.....	17
2.4 A TEMPERATURA NO FABRICO DAS MISTURAS BETUMINOSAS	19
<i>2.4.1 Misturas betuminosas a frio</i>	<i>20</i>
<i>2.4.2 Misturas betuminosas semi-temperadas.....</i>	<i>20</i>
<i>2.4.3 Misturas betuminosas temperadas</i>	<i>21</i>
<i>2.4.4 Misturas betuminosas a quente</i>	<i>21</i>
2.5 INFLUÊNCIA DA REDUÇÃO DA TEMPERATURA DE FABRICO DAS MISTURAS BETUMINOSAS.....	23
3. MATERIAIS E INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL.....	29
3.1 MATERIAIS.....	29
<i>3.1.1 Agregados.....</i>	<i>29</i>
<i>3.1.2 Betume.....</i>	<i>30</i>
<i>3.1.3 Fíler.....</i>	<i>30</i>

3.2	TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	31
3.2.1	<i>Análise granulométrica.....</i>	<i>31</i>
3.2.2	<i>Determinação da massa volúmica</i>	<i>34</i>
3.2.3	<i>Determinação da baridade e do volume de vazios.....</i>	<i>35</i>
3.2.4	<i>Equivalente de areia</i>	<i>36</i>
3.2.5	<i>Azul de Metileno.....</i>	<i>40</i>
3.2.6	<i>Limites de Consistência.....</i>	<i>44</i>
3.3	PRODUÇÃO LABORATORIAL DAS MISTURAS BETUMINOSAS.....	47
3.3.1	<i>Fuso Adotado e Granulometria da mistura</i>	<i>47</i>
3.3.2	<i>Determinação da percentagem de betume</i>	<i>49</i>
3.3.3	<i>Baridade dos provetes.....</i>	<i>50</i>
3.4	ENSAIO DE MARSHALL.....	52
4.	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
	ANEXO I – FICHA TÉCNICA DO FÍLER	69
	ANEXO II – SUPLEMENTOS AOS TESTES DE CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS	71
	ANEXO III – SUPLEMENTO À PRODUÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS.....	77
	ANEXO IV – BARIDADES DOS PROVETES BETUMINOSOS	79
	ANEXO V – GRÁFICOS DA ANÁLISE AO MÉTODO DE MARSHALL	81

Índice de Figuras

Figura 1 - Exemplo de uma estrutura de um pavimento rodoviário flexível (Barbosa, 2012).....	10
Figura 2 - Composição volumétrica de uma mistura betuminosa (adaptado de Silva, 2005).....	12
Figura 3 - Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa (Silva, 2005).....	12
Figura 4 – Classificação das misturas betuminosas em função da temperatura de produção (adaptado de Barbosa, 2012).....	19
Figura 5 - Emissões de gases e fumos no momento da descarga de misturas betuminosas: a) MBQ; b) MBT (Ferreira, 2009).....	23
Figura 6 - Aspeto dos agregados: a) Brita 11/22; b) Brita 8/14; c) Brita 4/8; d) Pó de Calcário 0/4; e) Contaminante I; f) Contaminante II	29
Figura 7 – Aspeto do fíler com a designação RC 480.....	30
Figura 8 - Sequência de peneiros desde a base, em baixo, até ao peneiro de maior abertura, em cima	32
Figura 9 - Curvas granulométricas de todos os agregados estudados	33
Figura 10 - a) Solução de lavagem; b) Representação de h_1 ; c) Pormenor do valor de h_1	36
Figura 11 - Resultados dos valores de equivalente de areia dos dois contaminantes.....	38
Figura 12 - Valores de SE do pó de calcário contaminado: a) pelo contaminante I; b) pelo contaminante II.....	39
Figura 13 -Ensaio do azul de metileno: a) antes de qualquer incremento; b) após alguns incrementos; c) final do ensaio	40
Figura 14 - Valores de azul de metileno dos contaminantes a diferentes temperaturas de secagem	41
Figura 15 - Valores de MB do pó de calcário contaminado pelo contaminante I.....	43
Figura 16 - Valores de MB do pó de calcário contaminado pelo contaminante II.....	43
Figura 17 - Concha de Casagrande utilizada no ensaio.....	44
Figura 18 - Aspeto das amostras: a) antes do ensaio; b) após o ensaio.....	45
Figura 19 - Limite de Liquidez do contaminante I a diferentes temperaturas de secagem	45
Figura 20 - Limite de Liquidez do contaminante II a diferentes temperaturas de secagem.....	46

Figura 21 - Limites do fuso granulométrico do CEEP, curva teórica da mistura e curva do provete granulométrico	48
Figura 22 - Aspeto dos 108 provetes produzidos	48
Figura 23 – Influência da temperatura nas características das misturas betuminosas: a) Baridade; b) Força de rotura; c) VMA; d) Porosidade; e) Deformação	54

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (adaptado de Branco et al., 2005).....	10
Tabela 2 - Classes e aplicação de betumes em Portugal	16
Tabela 3 - Propriedades que afetam as misturas betuminosas (adaptado de Silva, 2005)	18
Tabela 4 - Designação das misturas betuminosas (adaptado de EP, 2014).....	22
Tabela 5 - Resultados dos ensaios relativos à determinação da massa volúmica	34
Tabela 6 - Resultado obtidos referentes à determinação da baridade e respetiva percentagem de volume de vazios.....	35
Tabela 7 - Classificação dos solos em função do valor do equivalente de areia (adaptado de Branco et al., 2005).....	37
Tabela 8 - Valores obtidos pelo ensaio de equivalente de areia dos agregados	37
Tabela 9 - Valores de SE para o pó de calcário com diferentes percentagens de contaminante a diferentes temperaturas de secagem.....	38
Tabela 10 - Classificação de solos de acordo com o valor de azul de metileno.....	41
Tabela 11 - Valores obtidos pelo ensaio de azul de metileno dos agregados.....	41
Tabela 12 - Valores de MB para o pó de calcário com diferentes percentagens de contaminante a diferentes temperaturas de secagem.....	42
Tabela 13 - Resultados do ensaio de determinação dos limites de consistência a diferentes temperaturas de secagem.....	46
Tabela 14 - Superfície específica dos agregados e percentagem de betume	50
Tabela 15 - Distribuição dos provetes pelos ensaios.....	50
Tabela 16 - Determinação da baridade máxima teórica	51
Tabela 17 - Valores de força de rotura e da deformação a partir de Marshall	53
Tabela 18 - Resultados do ensaio de Marshall para as diferentes temperaturas.....	53

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

ABGE	Agregado Britado de Granulometria Extensa
AC	<i>Asphalt Concrete</i>
BMT	Baridade Máxima Teórica
CEEP	Caderno de Encargos das Estradas de Portugal
CEN	Comité Europeu de Normalização
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
EN	Norma Europeia
EP	Estradas de Portugal
InIR	Instituto de Infraestruturas Rodoviárias
IP	Índice de Plasticidade
IPQ	Instituto Português da Qualidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MB	Valor do azul de metileno
MBD	Mistura Betuminosa Densa
MBF	Mistura Betuminosa Fria
MBQ	Mistura Betuminosa Quente
MBST	Mistura Betuminosa Semi-Temperada
MBT	Mistura Betuminosa Temperada
NP	Norma Portuguesa
SE	Valor do equivalente de areia
VMA	Volume de vazios no esqueleto do agregado

1

INTRODUÇÃO

1. Introdução

A rede rodoviária representa um papel fundamental no desenvolvimento económico e social de uma região, aumentando a acessibilidade e ajudando a atenuar os desequilíbrios territoriais. Assim sendo, a qualidade e a durabilidade das estradas e redes rodoviárias devem ser asseguradas (*Pasandín e Pérez, 2017*). Nas últimas décadas, o aumento progressivo do volume de tráfego nas infraestruturas de transporte (por exemplo, estradas e aeroportos) suscitou a necessidade de produzir materiais de elevada qualidade para a construção, reabilitação e manutenção destas infraestruturas (*Toraldo e Mariani, 2014*).

A infraestrutura rodoviária, e em particular a pavimentação rodoviária, é um setor de intensivo consumo de recursos, dado que requer uma elevada quantidade de materiais e energia durante a construção, manutenção e reabilitação de pavimentos (*Lastra-González et al., 2017*). Deste modo, um dos maiores desafios da engenharia de pavimentos em todo o mundo é atender à crescente procura de recursos económicos e físicos relacionados com a construção e manutenção de estradas, usando tecnologias ambientalmente sustentáveis (*Farina et al., 2017*). Na atualidade, as misturas betuminosas são um dos principais materiais incorporados nos pavimentos das infraestruturas rodoviárias de transportes (*Silva, 2014*).

1.1 Enquadramento geral do tema

As misturas betuminosas são essencialmente materiais compostos por agregados, betume e ar que preenche os vazios (*Neves, 2005*). Os processos de fabrico e de compactação das misturas betuminosas possuem uma elevada relevância na execução do pavimento rodoviário, dado que estes são responsáveis pela qualidade da mistura betuminosa e consequentemente do pavimento rodoviário. Por sua vez, estes processos são influenciados pela temperatura do betume e por conseguinte pela viscosidade. Assim, a temperatura é uma variável fundamental conferindo ao betume a viscosidade necessária para que este envolva adequadamente os agregados e atue de maneira a que as partículas de agregado constituam uma estrutura compacta, resistente, durável e coesa (*Micaelo, 2008; Santos, 2011*).

Uma das principais misturas betuminosas aplicadas tradicionalmente nas camadas dos pavimentos fabricadas a quente, é a mistura betuminosa densa (MBD), sendo muito utilizada em camadas de regularização, contribuindo assim para a capacidade de carga do pavimento (*Neves, 2005*). Segundo *D'Angelo et al. (2008)* há uma estreita relação entre a

temperatura de produção das misturas betuminosas e a libertação de fumos e gases, sendo que estas emissões são mais veementes quando a temperatura de fabrico é mais elevada.

Em sintonia com as ambições ambientais mundiais para este novo século houve um crescente interesse na utilização de técnicas de pavimentação que conduzissem a menores impactos ambientais e sociais (Micaelo *et al.*, 2016). Com a implementação do Protocolo de Quioto em 2005, prolongado até 2020, e do Acordo de Paris em 2015, que entra em vigor em 2020, os países aderentes têm de adotar medidas para reduzir as emissões atmosféricas. O desenvolvimento de novas técnicas e o uso de materiais alternativos podem reduzir significativamente o impacto ambiental das misturas betuminosas (Lastra-González *et al.*, 2017). A utilização de temperaturas inferiores oferece vantagens tais como: um menor custo de produção, redução das emissões e odores, melhoria das condições de trabalho no local de aplicação, distâncias de transporte mais longas, menor envelhecimento do ligante e um menor consumo energético durante o processo de fabrico (Micaelo *et al.*, 2016; Rubio *et al.*, 2012).

1.2 Objetivo e Metodologias

O presente trabalho tem como objetivo principal estudar a influência das temperaturas de aquecimento dos agregados durante o processo de fabrico, no desempenho das MBD. Para tal utilizou-se um dos principais tipos de agregados para produzir misturas betuminosas em Portugal que é o caso dos agregados de calcário. É de salientar que os agregados de calcário têm impurezas, como é o caso da argila, que contaminam a mistura betuminosa, como tal designou-se a argila como “contaminante”. Neste estudo, é pretendido utilizar dois contaminantes com características diferentes. Os agregados e dois tipos de contaminantes, I e II, foram caracterizados de acordo com as normas Europeias, tendo em vista a sua aplicação em misturas betuminosas, através da análise granulométrica, equivalente de areia, azul metileno, limites de consistência e determinação das densidades. A caracterização dos contaminantes permite prever qual o contaminante com maior atividade na mistura, sendo escolhido o contaminante que tem mais impacto na mistura para a produção dos provetes betuminosos.

A mistura betuminosa a estudar é atualmente, segundo a Norma Europeia transposta para Portugal, designada como AC 20 reg 50/70 (MBD), designação também adotada pelo Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (CEEP) (EP, 2014).

Para a produção dos provetes betuminosos foi definida uma temperatura constante de aquecimento do betume a 150 °C e três temperaturas de aquecimento dos agregados (110 °C, 130 °C e 170 °C). Assim, para esta MBD foram produzidas três misturas com diferentes percentagens de contaminante (0 %, 2 % e 3 %) que substituiu a fração fina de calcário para cada valor diferente da temperatura de aquecimento dos agregados, sem recurso a qualquer tipo de aditivo.

A produção dos provetes betuminosos foi conduzida através do método de Marshall para assim ser possível analisar o seu comportamento e caracterizar as propriedades relacionadas com o seu desempenho.

1.3 Organização e estrutura da dissertação

O presente trabalho divide-se em cinco capítulos. Após um primeiro capítulo de descrição e enquadramento do tema de trabalho bem como da definição dos objetivos, das metodologias e da própria organização do trabalho, segue-se um segundo capítulo onde é feita uma pequena apresentação das misturas betuminosas, referindo como podem ser classificadas, caracterizadas e compostas.

O terceiro capítulo é destinado a todo o trabalho laboratorial realizado e aos resultados obtidos. O início do capítulo é reservado à identificação dos materiais a utilizar, assim como aos ensaios de caracterização laboratorial dos agregados e dos possíveis contaminantes que compõem a mistura betuminosa estudada neste trabalho. Ao longo deste capítulo serão comentados os resultados obtidos nos ensaios propostos visando a formulação da mistura a estudar, sendo também explicado o processo de produção dos provetes betuminosos. Por fim, neste capítulo são apresentados e analisados todos os resultados provindos dos ensaios realizados aos provetes betuminosos através do método de Marshall, caracterizando desta maneira o comportamento das misturas e estudando as propriedades relacionadas com o seu desempenho.

No quarto e último capítulo expõem-se as principais conclusões deste trabalho e propõem-se trabalhos a serem desenvolvidos futuramente e que poderão complementar este estudo.

MISTURAS BETUMINOSAS

2. Misturas betuminosas

2.1 Estrutura de um pavimento rodoviário

A função essencial de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento ou de desgaste que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante o período de vida do pavimento, sob a ação das ações do tráfego e nas condições climáticas a que está sujeito (*Branco et al., 2005*).

Desta forma, os pavimentos rodoviários devem responder a duas exigências, a funcional e a estrutural. Se por um lado, a primeira está relacionada com a segurança e o conforto dos utilizadores, a segunda está relacionada com a capacidade do pavimento em suportar as cargas aplicadas pelos veículos. Entre as exigências funcionais destacam-se a regularidade geométrica, a aderência, a capacidade de drenagem de águas superficiais e o ruído induzido pela circulação dos veículos. Em termos estruturais interessa que os pavimentos apresentem características tais como a integridade, a regularidade e o desempenho da superfície, manifestadas pela ausência de fendas, de deformações permanentes e de desagregações. O pavimento deve suportar as cargas dos veículos sem sofrer alterações para além de determinados valores limite, garantindo-se, desta forma, que não se atinge a condição de ruína estrutural (*Barbosa, 2012; Branco et al., 2005*).

Um pavimento rodoviário é um sistema multicamada composto por várias camadas de espessura finita, apoiadas numa fundação constituída por terreno natural que pode ter um coroamento de qualidade melhorada (*Branco et al., 2005*).

De acordo com *Branco et al. (2005)*, a associação de camadas constituídas por diferentes materiais resultam em diferentes tipos de pavimentos e, por conseguinte, em comportamentos diferentes quando sujeitos às ações dos veículos e às condições climáticas. Assim sendo, estes autores sugerem que, dependendo do tipo de materiais e a deformabilidade, um pavimento rodoviário pode ser classificado como flexível, rígido e semirrígido, conforme está esquematizado na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade (adaptado de Branco et al., 2005)

Tipo de Pavimento	Materiais (ligante)	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonados e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semirrígido	Hidrocarbonados, hidráulicos e granulares	Reduzida

Segundo os autores referidos, os pavimentos flexíveis contêm as camadas superiores com misturas betuminosas, isto é, por materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados, seguidas inferiormente por uma ou duas camadas de material granular. Os pavimentos rígidos são facilmente identificáveis por terem uma camada superior constituída por betão de cimento, ou seja, por material granulado estabilizado com ligantes hidráulicos (cimento portland), com uma ou duas camadas granulares inferiormente podendo ser estabilizadas com ligante hidráulico (Branco et al., 2005).

Por fim, os pavimentos semirrígidos apresentam características dos dois tipos de pavimentos acima mencionados, contendo na sua estrutura uma ou duas camadas superiores de misturas betuminosas, seguidas por uma camada constituída por agregado estabilizado com ligante hidráulico, podendo ainda conter uma camada granular na sub-base (Branco et al., 2005).

A mistura betuminosa a estudar está presente nos pavimentos flexíveis (Figura 1), sendo desta maneira dada maior importância à explicação deste tipo de pavimentos.

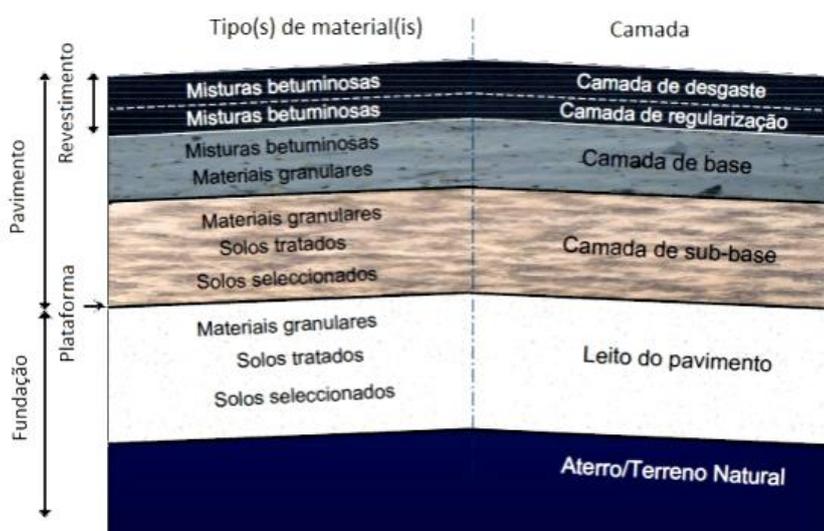


Figura 1 - Exemplo de uma estrutura de um pavimento rodoviário flexível (Barbosa, 2012)

Nas camadas do pavimento distinguem-se os estratos a partir das funções que cada um desempenha. A camada de desgaste tem a função de assegurar as exigências funcionais e estruturais atrás referidas como a contribuição para a circulação com conforto e segurança e com qualidade estrutural. Esta camada também tem a importante função de impermeabilizar o pavimento evitando a entrada de água exterior para as camadas inferiores e para o solo de fundação (*Branco et al., 2005*), e também de distribuir as tensões induzidas pelo tráfego (*InIR, 2011-b*).

Abaixo da camada de desgaste temos o corpo do pavimento, sendo o principal responsável pela capacidade do pavimento em suportar as cargas do tráfego e pode compreender camadas estabilizadas com ligantes, betuminosos ou hidráulicos, e também camadas granulares (*Branco et al., 2005*). Este subdivide-se na camada de regularização, camada de base e camada de sub-base sendo que cada uma delas têm em comum a função de assegurar apoio para a realização da camada sobrejacente (*Branco et al., 2005*).

A camada de regularização tem como função garantir uma boa regularidade superficial para a execução da camada de desgaste. Visa ainda impermeabilizar as camadas subjacentes e transmitir as cargas à camada de base (*Barbosa, 2012*). É nesta camada que se situam as MBD, mistura estudada neste trabalho.

A camada de base tem como principal função a transmissão de cargas para as camadas inferiores, degradando as cargas vindas das camadas superiores (*InIR, 2011-b*). Nos casos em que as vias apresentam tráfego intenso, utilizam-se materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos ou betuminosos nas camadas de base, permitindo, desta forma, aumentar a sua capacidade de suporte (*Barbosa, 2012*).

A camada de sub-base, tal como a camada de base, tem como função a degradação das cargas. Para além disso também tem funções de drenagem interna do pavimento sendo que protege a camada de base da subida das águas capilares. Este estrato também é resistente à erosão e protege as camadas inferiores aquando da fase construtiva sendo geralmente composto por materiais granulares (*InIR, 2011-b*).

2.2 Composição das misturas betuminosas

A maior parte das camadas dos pavimentos rodoviários de todo o mundo têm as misturas betuminosas como principal material na sua estrutura. Desta maneira, é possível referir que o estudo da composição das misturas betuminosas é fundamental para que estas tenham um desempenho adequado em serviço. De facto, o comportamento das misturas betuminosas no pavimento depende, para além das características dos seus componentes, da sua composição volumétrica (Figura 2). Para uma melhor compreensão dos vários parâmetros volumétricos de uma mistura betuminosa é apresentada uma representação mais pormenorizada na Figura 3.

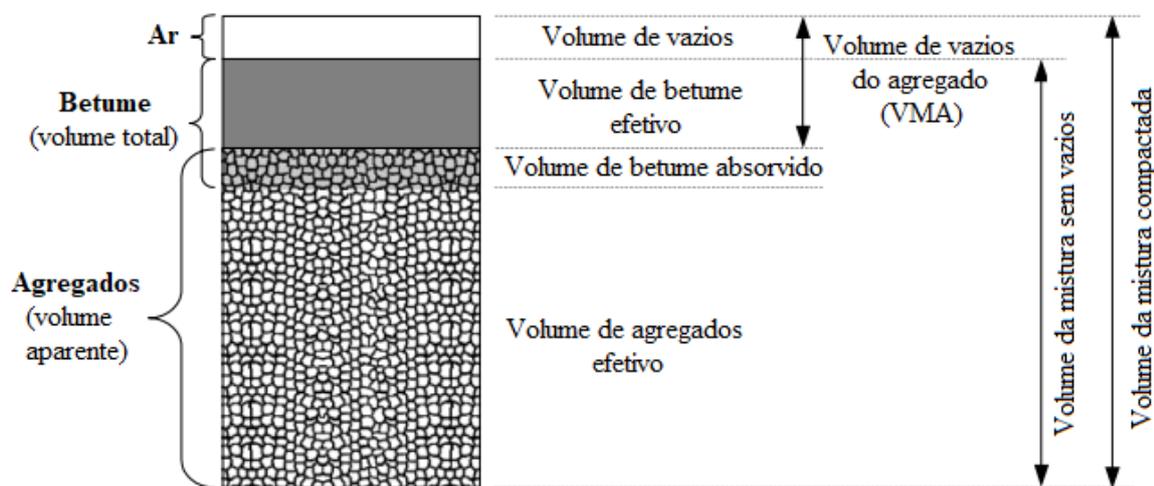


Figura 2 - Composição volumétrica de uma mistura betuminosa (adaptado de Silva, 2005)

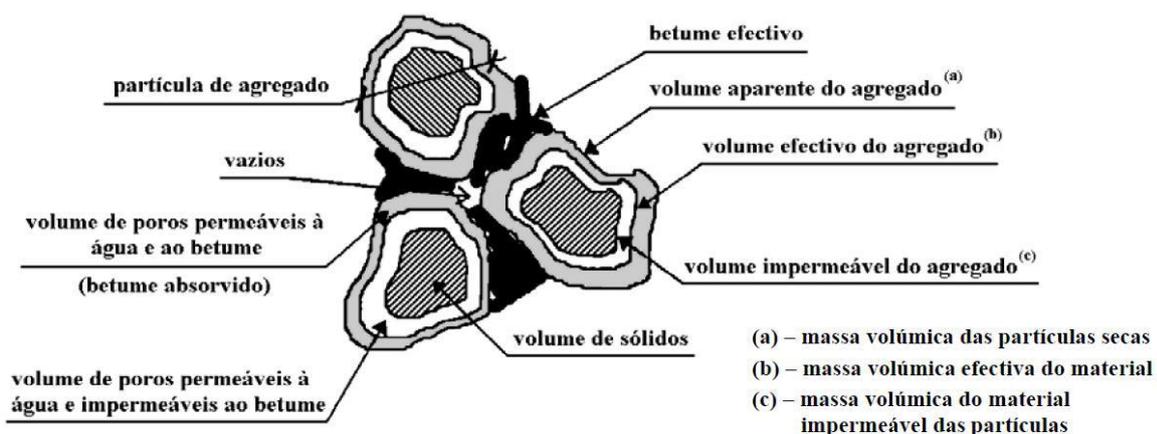


Figura 3 - Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa (Silva, 2005)

Nas Figuras 2 e 3, como já foi referido anteriormente, pode-se constatar que as misturas betuminosas são essencialmente compostas por agregados, betume e ar (Neves, 2005), sendo misturados de forma uniforme e em proporções adequadas, de modo a formar uma massa homogénea. Inclusivamente, existe sempre algum volume da mistura betuminosa compactada que é ocupado por ar, designado como volume de vazios.

Existem diversos tipos de misturas betuminosas sendo que estas variam consoante o tipo de agregado utilizado, a dosagem de agregado, o tipo de betume utilizado, a percentagem de betume, o grau de compactação e a temperatura de fabrico e de aplicação e, por vezes, a utilização de aditivos para melhorar certas características das misturas betuminosas.

2.1.1 Agregados

Os agregados correspondem geralmente entre 90 a 95% do peso de uma mistura betuminosa, correspondendo a valores de 75 a 85 % do seu volume (Almeida-Costa e Benta, 2016; Branco et al., 2005). Estes podem ser classificados como naturais, artificiais ou reciclados tendo em conta a sua origem. Agregados de granulometria extensa, grossos, finos ou fíleres mediante a sua dimensão e como leves, normais ou pesados consoante a sua massa volúmica (EP, 2014; InIR, 2011-a; Salgueiro, 2011).

Os agregados naturais são agregados de origem mineral que foram sujeitos a processamento mecânico. Os artificiais são agregados de origem mineral resultante de um processamento industrial compreendendo modificações térmicas ou outras. Os agregados reciclados são agregados que provém do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção (EP, 2014).

Relativamente à dimensão dos agregados, a NP EN 13043 – “Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação”, classifica como grossos os agregados que têm uma dimensão inferior ou igual a 45 mm e superior ou igual a 2 mm, como finos os agregados de dimensões compreendidas entre os 0,063mm e os 2 mm e como fíleres as partículas cuja maior parte passa no peneiro 0,063 mm. O “agregado britado de granulometria extensa” (ABGE) é o mais correntemente utilizado em pavimentação rodoviária em que consiste numa mistura de agregados finos e grossos.

No que diz respeito à massa volúmica dos agregados, são considerados leves os agregados de origem mineral que não exceda os 2,00 Mg/m³, com valores de massa volúmica normal os agregados que tenham o seu valor não inferior a 2,00 Mg/m³ mas inferior a 3,00 Mg/m³ e pesados aqueles que tenham o valor da massa volúmica superior a 3,00 Mg/m³ (*InIR, 2011-a*).

Os agregados devem ser caracterizados geométrica, física e mecanicamente. Assim, devem ser efetuados ensaios para avaliar as suas propriedades, de modo a caracterizar o seu comportamento durante os processos de fabrico e compactação das misturas betuminosas, e mais tarde em serviço no pavimento. Segundo *Lopes (2009)*, os ensaios tradicionalmente usados para a caracterização dos agregados são:

- Análise granulométrica;
- Determinação da resistência ao esmagamento;
- Determinação da resistência ao choque e abrasão na máquina de *Los Angeles*;
- Determinação do coeficiente de polimento acelerado usando o pêndulo britânico;
- Determinação da absorção de água;
- Determinação da massa volúmica;
- Determinação do equivalente de areia;
- Determinação do azul-de-metileno;
- Determinação da baridade aparente.

A granulometria dos agregados é uma das principais características responsáveis no desempenho e comportamento das misturas betuminosas.

Silva (2005) sugere que os agregados grossos desempenham as seguintes funções na mistura betuminosa: garantir estabilidade à mistura betuminosa (resistência às deformações permanentes); aumentar a resistência mecânica das misturas betuminosas (aumento dos módulos de rigidez das misturas betuminosas) e assegurar rugosidade superficial suficiente para a circulação dos veículos (capacidade da mistura betuminosa de garantir a aderência pneu-pavimento).

O mesmo autor refere que os agregados finos permitem que as misturas betuminosas obtenham estabilidade e compacidade (propriedade relacionada com o arranjo estrutural dos agregados, controlada pelo valor do volume de vazios no esqueleto do agregado - VMA).

Os fíleres são grãos minerais que representam 5 a 10% dos agregados, em peso, em toda a mistura betuminosa sendo que a principal função deste mineral é preencher os vazios no esqueleto do agregado para criar uma mistura mais densa (*Melotti et al., 2013*), sendo também responsável pela compacidade e impermeabilidade da mistura betuminosa (*Choudhary et al., 2018*). Materiais como pó de pedra, cal hidratada e cimento são tradicionalmente usados como fíler (*Choudhary et al., 2018*). O fíler também modifica os processos de envelhecimento, podendo atuar como um agente anti decapante, evitando o dano por humidade (*Melotti et al., 2013*).

2.1.2 Ligantes betuminosos

Segundo *E.P. (2014)*, o ligante betuminoso é um material adesivo contendo betume que se pode apresentar sob a forma de não modificado, modificado ou emulsionado. O betume é um material praticamente não volátil, adesivo e impermeável à água, derivado do petróleo bruto que é completamente ou quase todo solúvel em tolueno, muito viscoso e quase sólido à temperatura ambiente.

O betume é um material termoplástico cuja viscosidade diminui com o aumento da temperatura. Quando se encontra à temperatura ambiente apresenta-se, habitualmente, num estado semissólido, sendo necessário sujeita-lo a temperaturas superiores e, assim, fluidifica-lo por forma a permitir a produção das misturas betuminosas e a trabalhabilidade das mesmas (*Barbosa, 2012*).

E.P. (2014) refere ainda que os ligantes betuminosos compreendem os seguintes tipos: betumes de pavimentação, betumes modificados, betumes duros, betumes borracha e emulsões betuminosas. Cada um destes tipos de ligante tem que obedecer a certos requisitos indicados no CEEP, tais como: penetração a 25 °C, temperatura de amolecimento, viscosidade cinemática, resistência ao endurecimento, entre outros, para poderem ser utilizados nas misturas betuminosas, sendo que é a partir destes requisitos que se obtém uma classificação para todos estes ligantes betuminosos.

Em Portugal, é muito comum identificar os betumes pela sua gama de penetração, sendo os betumes de pavimentação 50/70 e 35/50 os mais utilizados no fabrico das misturas betuminosas convencionais. A Tabela 2 apresenta algumas das classes mais utilizadas no nosso país, assim como a sua aplicação.

Tabela 2 - Classes e aplicação de betumes em Portugal

Tipo de betume (penetração)	Aplicação em Portugal
10/20	Misturas de alto módulo de deformabilidade
20/30	Misturas de alto módulo de deformabilidade
35/50	Camadas de desgaste e de base
50/70	Camadas de desgaste e de base
70/100	Camadas de base em zonas mais frias e com aplicação a temperaturas mais baixas
160/220	Emulsões betuminosas Revestimentos superficiais Penetrações betuminosas

O betume ocupa uma parte do volume de vazios no esqueleto mineral da mistura betuminosa e há ainda uma determinada quantidade de betume absorvido pelos agregados, a qual depende da porosidade destes. O betume permite a ligação entre os agregados, de modo a que a mistura betuminosa tenha resistência à tração, garanta flexibilidade à mistura betuminosa (resistência ao fendilhamento sob a ação das cargas), assegura impermeabilidade e durabilidade à mistura betuminosa (resistência à ação dos agentes climáticos) e confira trabalhabilidade à mistura betuminosa, garantindo condições adequadas de produção em central e compactação *in situ* (Silva, 2005).

2.1.3 Espaços vazios

Os espaços vazios apesar de não serem um material “palpável”, desempenham igualmente um papel importante nas misturas betuminosas. De facto, as misturas betuminosas com um volume de vazios elevado são mais permeáveis, com menor durabilidade e têm uma resistência inferior às deformações permanentes que ocorrem devido à pós-compactação exercida pelo tráfego. As exceções são as misturas betuminosas porosas e drenantes, que utilizam aditivos e técnicas construtivas adequadas para anular ou diminuir os efeitos negativos do elevado volume de vazios. Quando o volume de vazios é demasiado baixo (inferior a 3 %), surgem problemas de estabilidade da mistura betuminosa, havendo uma forte aptidão para a ocorrência de deformações permanentes e para a exsudação do ligante (Silva, 2005).

2.3 Características gerais das misturas betuminosas

As misturas betuminosas são constituídas geralmente por um conjunto de materiais granulares doseados de uma forma ponderal ou volumétrica e misturados numa central com uma quantidade de ligante previamente determinada. Depois de misturados, esses materiais são transportados, espalhados e compactados constituindo uma camada de pavimento (*Branco et al., 2005*).

Silva (2005) sugere que devem ser escolhidos ensaios de caracterização apropriados, em função das condições específicas em que a mistura betuminosa vai funcionar em serviço. Consoante o tipo de camada a construir, pode pretender-se o uso de misturas em que as boas características mecânicas sejam a principal exigência ou, por outro lado, usar misturas que, fundamentalmente, apresentem aptidão para o desempenho de funções relacionadas com a segurança e o conforto dos utentes da via. Em qualquer dos casos devem ser garantidos determinados critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução (*Branco et al., 2005*).

Desta maneira *Silva (2005)* sugere que, em termos gerais, são exigidas às misturas betuminosas as seguintes características: flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga, resistência à derrapagem, impermeabilidade e trabalhabilidade. A Tabela 3 apresenta algumas considerações destas propriedades.

Tabela 3 - Propriedades que afetam as misturas betuminosas (adaptado de Silva, 2005)

Propriedades	Definição	Variáveis que afetam as propriedades das misturas betuminosas
Flexibilidade	Aptidão da mistura em se adaptar às deformações das camadas subjacentes	- Granulometria - Teor em betume - Rigidez do betume
Estabilidade	Resistência às deformações plásticas (usualmente a altas temperaturas e longos tempos de carga)	- Textura da superfície do agregado - Granulometria - Teor em betume
Durabilidade	Resistência às ações climáticas (ar e água) e à ação abrasiva do tráfego	- Granulometria - Teor em betume - Grau de compactação - Sensibilidade à água
Resistência à fadiga	Aptidão da mistura em resistir a esforços de flexão repetidos sem fendilhar	- Granulometria - Teor em betume - Rigidez do betume - Grau de compactação
Resistência à derrapagem	Aptidão da mistura para proporcionar um adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado	- Tipo e textura do agregado - Resistência do agregado ao polimento - Granulometria
Impermeabilidade	Aptidão da mistura em impedir o acesso da água às camadas inferiores	- Granulometria - Teor em betume - Grau de compactação
Trabalhabilidade	Facilidade para realizar as operações de fabrico, colocação e compactação	- Granulometria - Teor em betume - Tipo de betume e de agregado

Com base na tabela apresentada, é de salientar que a granulometria tem um papel importante em todas as características apresentadas de uma mistura betuminosa. De uma forma geral, verifica-se que um aumento do teor em betume leva ao aumento da resistência ao fendilhamento, da trabalhabilidade, da impermeabilidade e da durabilidade, mas, em contrapartida, diminui a resistência às deformações permanentes e na aderência pneu-pavimento (Silva, 2005). Segundo o mesmo autor, uma mistura adequada de elementos finos, médios e grossos, com uma densidade elevada, é aquela que permite obter melhores características de comportamento para a mistura betuminosa.

2.4 A temperatura no fabrico das misturas betuminosas

Como já foi salientado, a dosagem de agregados é uma das formas de classificar as misturas betuminosas. Outra das formas que existe para classificar as misturas betuminosas é de acordo com a divisão relativamente ao intervalo de temperaturas a que são produzidas, sendo este o aspeto que mais importa no contexto deste trabalho. Embora não existam valores concretos de referência para esses intervalos de temperatura, vários autores defendem a existência de quatro tipos de misturas betuminosas classificadas quanto à sua temperatura: misturas betuminosas a frio, semi-temperadas, temperadas e quentes (*Carvalho e Barreno, 2013; D'Angelo et al., 2008; EAPA, 2014*). Para interpretar melhor o que foi referido, a Figura 4 representa graficamente estas classificações mediante a sua temperatura de produção.

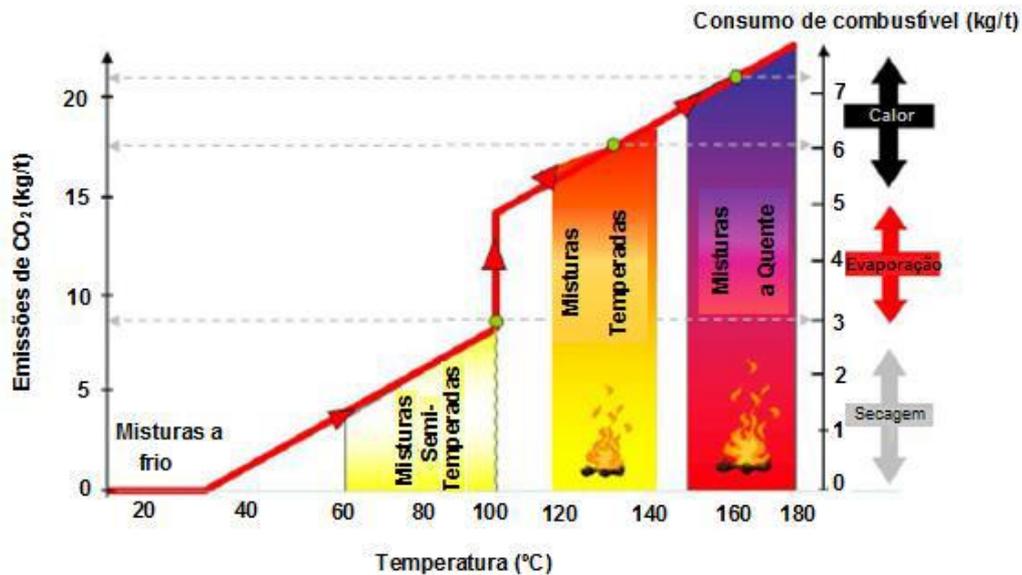


Figura 4 – Classificação das misturas betuminosas em função da temperatura de produção (adaptado de Barbosa, 2012)

De acordo com a Figura 4, as misturas betuminosas quentes são tradicionalmente mais utilizadas e necessitam de temperatura mais elevada. Para ser possível atingir esta gama de valores de temperatura é necessário um maior consumo de energia, neste caso de combustível, que por sua vez liberta maiores quantidades de emissões de gases para a atmosfera. De seguida, faz-se uma breve caracterização sobre cada uma destas misturas.

2.4.1 Misturas betuminosas a frio

As misturas betuminosas a frio (MBF) são fabricadas à temperatura ambiente sem recorrer ao aquecimento dos agregados e utiliza emulsões betuminosas ou espuma de betume (EAPA, 2014), apresentando à partida menores custos energéticos associados à sua aplicação e fabrico, evidenciando também uma maior rapidez de aplicação (Fernandes, 2017).

Estas misturas são habitualmente aplicadas como revestimentos de pavimentos de baixo ou médio volume de tráfego, pois admite-se que não são estruturalmente tão resistentes quanto as misturas a quente, para poderem ser utilizadas em camadas de revestimento de vias de tráfego elevado (Branco, 2013).

As MBF podem ser aplicadas sob quaisquer tipos de condições climáticas, apresentando tempos de execução e custos associados ao equipamento e mão-de-obra reduzidos, sendo deste modo amplamente utilizadas por parte das autoridades rodoviárias e autarquias em trabalhos de conservação de emergência, sobretudo em reparações pontuais (Fernandes, 2017).

Relativamente à durabilidade, as MBF de reparação rápida podem apresentar durabilidades elevadas. No entanto não atingem durabilidades tão satisfatórias como as misturas convencionais a quente quando aplicadas em reparações pontuais em condições climáticas favoráveis, devido sobretudo ao facto de não apresentarem iguais níveis de compactação (Fernandes, 2017).

2.4.2 Misturas betuminosas semi-temperadas

Nas misturas betuminosas semi-temperadas (MBST) utiliza-se como ligante as emulsões betuminosas ou o processo de formação de espuma de betume, tendo ou não o auxílio de aditivos, sendo que a temperatura de produção das MBST situa-se abaixo da linha de evaporação da água (100 °C) e os agregados são aquecidos a uma temperatura de mistura entre os 60 e os 100 °C (Afonso, 2014; Branco, 2013). A energia consumida é menor do que nas MBQ, porque os agregados grossos não estão totalmente secos e a sua humidade é aproveitada para melhorar o processo de mistura, através do aumento do volume por parte da água, aquando o aquecimento da mistura, facilitando o envolvimento dos agregados com o betume (Afonso, 2014).

Embora exista grande aproveitamento energético, ainda existem várias preocupações relacionadas com o desempenho mecânico destas misturas a médio-longo prazo e também com a durabilidade destas misturas (*Lizárraga et al., 2018*).

2.4.3 Misturas betuminosas temperadas

As misturas betuminosas temperadas (MBT) são produzidas a temperaturas entre os 100 e os 140 °C e utilizam, geralmente, um betume asfáltico como ligante tal como nas MBQ. *EAPA (2014)* refere que estas misturas têm propriedades e desempenho que são equivalentes a uma MBQ convencional. Esta entidade indica também que como estas misturas são produzidas acima de 100 °C, a quantidade de água existente na mistura é muito reduzida e assim são usadas várias técnicas para reduzir o efeito da viscosidade do betume permitindo o envolvimento e a compactação da mistura em temperaturas mais baixas. Segundo *EAPA (2014)*, as técnicas mais comuns são através da junção de um aditivo químico ou orgânico ou através da utilização de um processo de fabrico que possibilite a formação de espuma de betume. Em qualquer uma destas técnicas é possível uma redução de temperatura entre 20 a 40 °C em comparação com as MBQ.

2.4.4 Misturas betuminosas a quente

São consideradas MBQ 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. Estas misturas são produzidas entre os 150 e os 200 °C e compactadas entre os 120 e os 140 °C, estando estas temperaturas dependentes do tipo de betume e do tipo de compactador a utilizar. Estas dão lugar a 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 (*EAPA, 2014; Lopes, 2015*).

Produzida a mistura, é necessário mantê-la a temperaturas suficientemente elevadas de modo a que esta apresente uma consistência adequada ao seu espalhamento e compactação em obra (*Barbosa, 2012*). O aquecimento do betume e dos agregados é um

processo onde os gastos de energia e as emissões de gases para a atmosfera não são uma preocupação, apesar de atualmente existir cada vez mais uma maior consciencialização para os problemas ambientais.

As MBQ são misturas com melhor qualidade em comparação com as fabricadas a frio, e por isso, tradicionalmente são utilizadas em pavimento com maior tráfego. As MBQ podem ser fabricadas com diversos tipos de granulometria e de betume, consoante os níveis de tráfego, garantindo-se boa resistência e durabilidade. As que são habitualmente utilizadas em Portugal nas obras de pavimentação, definidas no CEEP, estão discriminadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Designação das misturas betuminosas (adaptado de EP, 2014)

Camada	Designação anterior	Designação atual
Base	Macadame Betuminoso Fuso B	AC 32 base ligante (MB)
	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 base ligante (MB)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)
Ligação	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 bin ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 bin ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 bin ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso	AC 14 bin ligante (BB)
Regularização	Argamassa Betuminosa com Betume Modificado	AC 4 bin ligante (AB)
	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 reg ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD)
	Betão Betuminoso	AC 14 reg ligante (BB)
Desgaste	Argamassa Betuminosa com Betume Modificado	AC 4 reg ligante (AB)
	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso (micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr) AC 10 surf ligante (mBBr)

AC – designação do produto, cujo termo em inglês é “Asphalt Concrete”;

ligante – classe do ligante a definir;

base – referente à camada de base, cujo termo em inglês é similar “base course”;

bin – referente à camada de ligação, cujo termo em inglês é “binder course”, de espessura constante;

reg – referente à camada de regularização, cujo termo em inglês é “regulating course”, de espessura variável;

surf – referente à camada de desgaste, cujo termo em inglês é “surface course”.

2.5 Influência da redução da temperatura de fabrico das misturas betuminosas

A produção de MBQ, ditas convencionais, são responsáveis por um elevado consumo de energia e consequente emissão de gases poluentes dado que essa energia é produzida através da queima de combustíveis fósseis. Tal como foi referido no ponto anterior, quanto maior for a temperatura de produção da mistura, maior será consumo de combustíveis e consequentemente maior a emissão de gases poluentes. Desta maneira, torna-se evidente a importância da diminuição da temperatura de produção na mitigação dos aspetos negativos acima referidos (*Barbosa, 2012*).

Perante tal cenário é inevitável não referir as MBT pois são misturas produzidas a temperaturas mais baixas que as MBQ e é neste tipo de produção de misturas betuminosas que se têm focado vários estudos para ser possível perceber os prós e os contras da redução da temperatura de fabrico, sendo a análise deste ponto baseada em bibliografia relacionada com as MBT.

Vários autores referem que o efeito imediato ao reduzir a temperatura é a redução de emissão de gases poluentes (*Almeida-Costa e Benta, 2016; Capitão et al., 2012; D'Angelo et al., 2008*). De facto, estudos realizados em vários países europeus referem que ao reduzir a temperatura de fabrico à volta de 40 °C que existe uma redução de emissões na ordem dos 30 a 40 % de dióxido de carbono e de dióxido de enxofre, 50 % de compostos orgânicos voláteis, 10 a 30 % de monóxido de carbono, 60 a 70 % de óxidos de azoto e 20 a 25 % para poeiras (*D'Angelo et al., 2008*). Como exemplo, a Figura 5 apresenta a diferença das emissões de gases na descarga de MBQ e MBT para o camião.



Figura 5 - Emissões de gases e fumos no momento da descarga de misturas betuminosas: a) MBQ; b) MBT (*Ferreira, 2009*)

Outra das vantagens em reduzir a temperatura será uma redução do gasto de energia que por sua vez apresenta um menor custo de produção (*Rubio et al., 2012*). Existem relatos de estudos que conseguiram uma poupança no custo de produção na ordem dos 25 a 50 % e de poupança de combustível acima dos 50 %, dependendo da técnica de MBT usada (*D'Angelo et al., 2008; EAPA, 2014*).

A melhoria das condições de trabalho no local de aplicação é outro ponto a favor da redução da temperatura de produção. Em *D'Angelo et al. (2008)* é mencionada a existência de informações obtidas na Europa que mostram reduções significativas da exposição aos fumos dos trabalhadores da pavimentação. Estas reduções situam-se entre os 30 e os 50 % comparativamente às misturas convencionais. Como resultado desta prática, são melhoradas as condições de trabalho dos operários e as condições ambientais a nível global para a sociedade (*D'Angelo et al., 2008; EAPA, 2014*). A melhoria do ambiente de trabalho pode ser uma das causas responsáveis por um aumento de produtividade em obra, quando executadas misturas betuminosas de baixa temperatura. Neste sentido, torna-se importante para a indústria criar boas condições de ambiente de trabalho na produção e na aplicação de misturas betuminosas, pois estas favorecem não só os trabalhadores, mas também a qualidade e rentabilidade do trabalho (*Ferreira, 2009*).

Apesar de o betume ser um material termoplástico e precisar de ser bem aquecido para ser trabalhado, de acordo com *Branco (2013)*, as altas temperaturas têm efeitos negativos sobre os betumes e são capazes de causar alterações reológicas substanciais no ligante, ou seja, a utilização de menores temperaturas de fabrico permite um menor envelhecimento do ligante.

Como as MBT são produzidas a temperaturas mais baixas, a sua taxa de arrefecimento é bastante menor em relação a uma MBQ. A taxa de arrefecimento é dada pela diferença de temperatura entre a mistura betuminosa e o meio ambiente, logo as MBT possuem menor gradiente térmico. Além disso, em climas frios, ao aplicar técnicas de MBT com betume mais duro, como a mistura betuminosa de alto módulo, a trabalhabilidade do material é melhor, pois a viscosidade do ligante rígido diminui e a descida da temperatura com o tempo é menos importante. Isto também permite maiores distâncias de transporte, reduz o risco de problemas de compactação e possibilita uma abertura para o tráfego mais rápida ou para colocar a próxima camada de pavimento. Como a temperatura de operação e as emissões são menores, é mais fácil permitir que as centrais betuminosas estejam próximas

às áreas urbanas pois não representam tanto um perigo para a saúde humana (*Branco, 2013; Button, 2007; Capitão et al., 2012; Ferreira, 2009*).

Na verdade, a redução da temperatura no processo de produção também tem as suas limitações que podem ter um grande impacto em vários níveis. Em primeiro lugar, no caso das MBT e consoante o tipo de técnica a utilizar, o processo de produção é altamente modificado comparativamente às misturas convencionais, ou seja, seria necessário reformular todo o processo de fabrico o que exigiria naturalmente um forte investimento inicial para os equipamentos necessários para o fabrico das MBT (*EAPA, 2014*).

Por ser uma tecnologia recente, existe escassez de resultados no desempenho mecânico a longo prazo, assim como em análises qualitativas e quantitativas dos ciclos de vida das misturas betuminosas, o que põe em causa a sustentabilidade deste tipo de misturas que por sua vez provoca um certo receio no investimento e na utilização das MBT (*Rubio et al., 2012*).

No processo de produção, o facto de se reduzir a temperatura poderá causar uma secagem incompleta dos agregados que aumentam o risco de aparecimento de danos por humidade na mistura betuminosa. A temperatura mais baixa provoca problemas de revestimento do betume nos agregados dado que certos agregados não ficam revestidos pelo betume, indicando desta maneira possíveis problemas de adesividade (*Rubio et al., 2012*).

Tanto as MBT como as MBQ, são misturas em que é possível obter resultados bastante satisfatórios no seu desempenho, desde que estejam bem formuladas e tendo em conta o contexto em que são utilizadas.

MATERIAIS E INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

3. Materiais e Investigação Experimental

3.1 Materiais

3.1.1 Agregados

Devido ao facto de ser produzida uma MBD para camada de regularização e por serem agregados com melhor adesividade ao betume, neste estudo usaram-se agregados de calcário e seleccionaram-se dois tipos de argila vermelha (componente plástica da *terra rossa*) como contaminante (*contaminante I* e *contaminante II*) dado que estas têm propensão em aparecer nos agregados de calcário. Os agregados de calcário e os contaminantes I e II provieram de pedreiras da zona de Leiria. Todos estes agregados foram seleccionados para subsequente caracterização com vista à posterior utilização em misturas betuminosas. A Figura 6 apresenta o aspeto de todos os agregados relativos a esta caracterização.

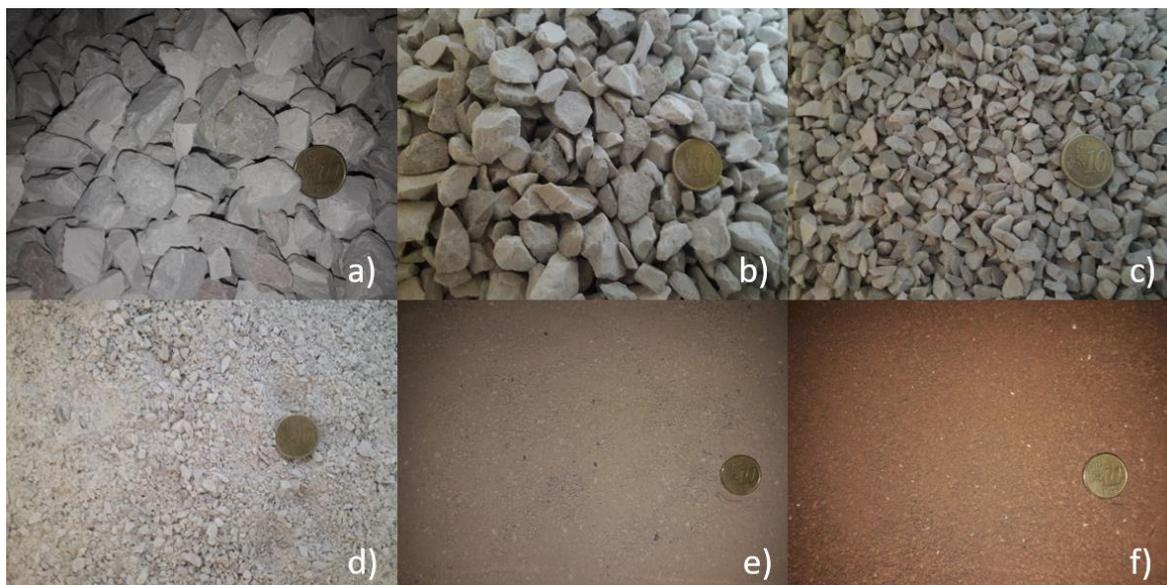


Figura 6 - Aspeto dos agregados: a) Brita 11/22; b) Brita 8/14; c) Brita 4/8; d) Pó de Calcário 0/4; e) Contaminante I; f) Contaminante II

3.1.2 Betume

O betume utilizado é proveniente de uma instalação industrial da zona de Albergaria-a-Velha tendo sido escolhido um betume para pavimentação de penetração nominal 50/70 devido ao facto de este ser menos viscoso que o betume de penetração nominal 35/50 que é tradicionalmente usado nas misturas betuminosas a quente em Portugal. A viscosidade do betume foi tida em conta porque este estudo trabalha com temperaturas de produção inferiores às convencionais e o envolvimento dos agregados com o betume torna-se mais fácil com um betume menos viscoso.

3.1.3 Fíler

A designação fíler é atribuída a todo o agregado cuja maior parte passa no peneiro de 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades (EP, 2014).

Nas misturas betuminosas, o fíler é um agregado que tem a finalidade de preencher o maior número de vazios que os agregados mais grossos não conseguem preencher, assim como ajudar no processo de produção em que ajuda na ligação entre os agregados de maior granulometria e o betume.

Para o estudo em questão foi utilizado um fíler comercial de natureza calcária com a respetiva marcação CE, proveniente da mesma pedreira dos agregados de calcário, sendo o aspeto deste material representado na Figura 7. A ficha técnica do fíler comercial foi fornecida pela empresa em questão e está disponibilizada no Anexo I, tendo sido utilizada como consulta para valores que fossem necessários para este trabalho.



Figura 7 – Aspeto do fíler com a designação RC 480

3.2 Testes de caracterização dos agregados

Para se conhecer melhor os materiais utilizados nas misturas betuminosas foram realizados ensaios a fim de avaliar algumas propriedades tais como:

- análise granulométrica;
- determinação da massa volúmica;
- determinação da baridade e volume de vazios;
- determinação do equivalente de areia;
- determinação do valor do azul de metileno na fração fina dos agregados;
- limites de consistência, no caso de existir suspeitas de plasticidade.

Os agregados não devem ter impurezas (argila, matéria orgânica, etc.) na sua composição pois podem reduzir o atrito entre os grãos das partículas, havendo a possibilidade de ocorrerem variações volumétricas na presença de água ou de dificultar o envolvimento com os ligantes. A limpeza mede-se pela realização do ensaio de equivalente de areia ou pelo ensaio de determinação do azul-de-metileno (*Branco et al., 2005*).

É importante referir que devido ao facto de este trabalho ter como objetivo o estudo da influência da variação da temperatura e da presença de diferentes percentagens de contaminante no fabrico da mistura betuminosa, nesta fase da caracterização dos agregados foram consideradas estas duas variáveis.

3.2.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica dos agregados foi feita pelo método da peneiração, seguindo a norma NP EN 933-1 (2000) e a norma NP EN 933-2 (1999).

Apesar de as britas de calcários já se apresentarem previamente separadas geometricamente, isso não invalida a necessidade de uma análise granulométrica mais detalhada em laboratório.

Esta peneiração foi feita após lavagem num peneiro apropriado com uma abertura de 63 μm e secagem em estufa até massa constante, sendo de salientar que a análise às partículas inferiores a esta medida é feita por sedimentação. O material é passado por uma sequência de peneiros organizados por uma ordem de abertura progressivamente decrescente, conforme é ilustrado na Figura 8, de forma a que à medida que a abertura da malha do peneiro

diminui, o material vá ficando retido consoante a sua geometria, através da ajuda da vibração da máquina de peneiração.



Figura 8 - Sequência de peneiros desde a base, em baixo, até ao peneiro de maior abertura, em cima

Após a peneiração, o material retido em cada um dos peneiros é pesado e a percentagem de material retido está intimamente relacionado com a massa da amostra inicial. Através da percentagem cumulativa de material retido é possível obter a percentagem cumulativa de material passado de forma a obter a curva granulométrica. A curva granulométrica é fundamental para identificar rapidamente algumas deficiências em determinadas frações granulométricas, permitindo assim corrigir este aspeto se for considerado determinante. Para este ensaio é importante referir que a diferença entre a massa total da amostra de agregados após a peneiração e a massa seca da amostra após a lavagem deve ser inferior a 1 %, de modo a salvaguardar a perda de material durante o ensaio. Para uma consulta mais detalhada, os valores obtidos neste ensaio são apresentados no Anexo II. Na Figura 9, estão representadas as curvas granulométricas respetivas de cada agregado que foram estudados nesta fase do trabalho.

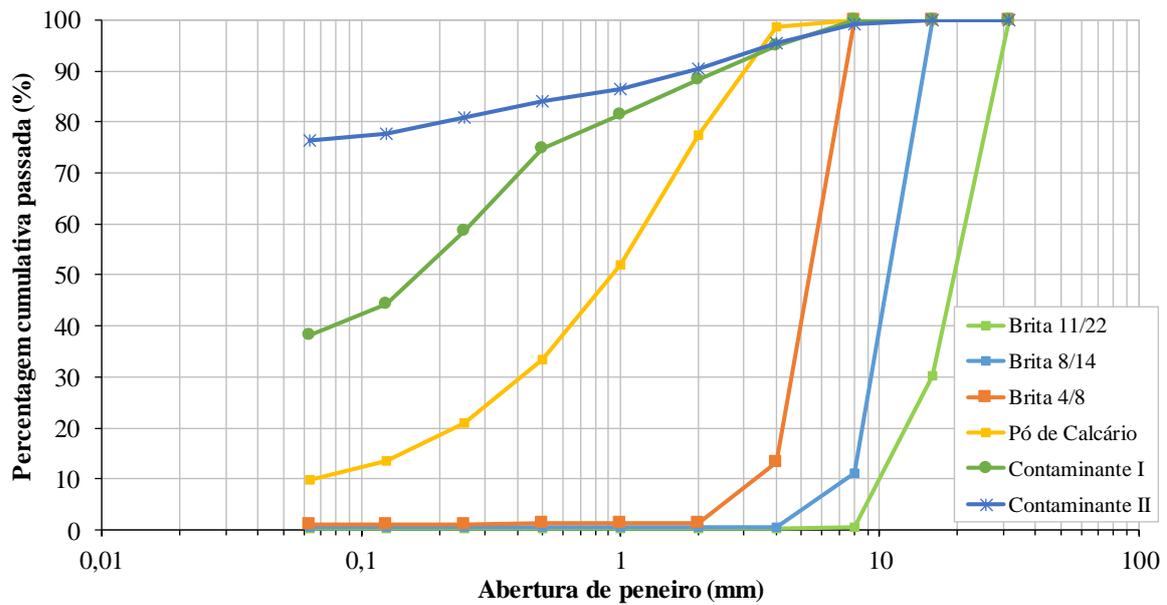


Figura 9 - Curvas granulométricas de todos os agregados estudados

A figura anterior sugere que existe uma diferença considerável entre as curvas dos agregados mais grossos dos agregados mais finos, sendo que é possível observar que as três britas apresentam uma granulometria uniforme e o pó de calcário juntamente com os dois contaminantes apresentam uma granulometria extensa ou bem graduada. Assim sendo, os resultados permitem concluir que existe uma certa homogeneidade em cada um dos agregados e que não existe nenhuma falta de material em qualquer fração de todos os agregados.

Tendo em vista a sua aplicação nas misturas betuminosas, os resultados são bastante satisfatórios porque uma mistura betuminosa procura sempre um equilíbrio na mistura entre agregados finos e grossos.

Apesar de importante, não se considerou muito relevante obter a curva granulométrica do fíler devido ao facto de ser maioritariamente composto por partículas que passam no peneiro de 63 μm e para isso teria de ser analisado por sedimentação, além de que o fíler é produzido em separado segundo um processo bastante controlado pela instalação industrial, existindo valores granulométricos na sua ficha técnica que foram adotados posteriormente para a realização deste trabalho.

3.2.2 Determinação da massa volúmica

A determinação da massa volúmica dos agregados foi realizada através de dois métodos, pelo método do cesto da rede metálica e pelo método do picnómetro, mediante o tamanho da partícula de cada tipo de agregado, descritos no anexo A pela norma NP EN 1097-6 (2003).

O princípio deste ensaio é determinar a massa e o volume do provete elementar e calcular a massa volúmica das partículas (razão entre a massa e volume). A massa é obtida a partir da pesagem do provete elementar após secagem em estufa. O volume é determinado a partir do peso do volume de água deslocado pelas partículas secas, quer pela redução de peso num cesto de rede metálica ou num picnómetro de volume conhecido (IPQ, 2003).

A Tabela 5 apresenta muito sucintamente os valores da massa volúmica dos agregados sendo que os restantes resultados deste ensaio estão presentes no Anexo II deste documento.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios relativos à determinação da massa volúmica

<i>Método do ensaio</i>	<i>Identificação da amostra</i>	<i>Massa Volúmica (Mg/m³)</i>
Método do cesto da rede metálica	Brita 11/22	2,71
	Brita 8/14	2,71
	Brita 4/8	2,70
Método do picnómetro	Pó de Calcário	2,71
	Contaminante I	2,70
	Contaminante II	2,65

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que os valores da massa volúmica entre os agregados são muito semelhantes, o que está de acordo com o facto de serem provenientes da mesma frente de desmonte.

3.2.3 Determinação da baridade e do volume de vazios

A determinação dos valores da baridade e do volume de vazios foi efetuada segundo a norma NP EN 1097-3 (2002).

A massa seca dos agregados, preenchendo um dado recipiente, é determinada por pesagem e a baridade correspondente é calculada. O volume de vazios calcula-se a partir da baridade e da massa volúmica real (*IPQ, 2002-a*).

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos na determinação dos valores da baridade e do volume de vazios. Para uma observação mais detalhada deste ensaio, os resultados obtidos estão presentes no Anexo II devidamente identificados.

Tabela 6 - Resultado obtidos referentes à determinação da baridade e respetiva percentagem de volume de vazios

<i>Identificação da amostra</i>	<i>Baridade (Mg/m³)</i>	<i>Volume de vazios (%)</i>
Brita 11/22	1,39	48,64
Brita 8/14	1,37	49,53
Brita 4/8	1,35	50,09
Pó de Calcário	1,60	40,74
Contaminante I	1,51	44,23

Perante os valores apresentados na Tabela 6, é de salientar que os valores da baridade andam muito próximos entre as britas, sendo que os agregados mais finos têm valores superiores aos das britas. Relativamente ao volume de vazios, as britas têm diversos valores próximos entre si, o que já não acontece com o pó de calcário e o contaminante I pois os valores são inferiores. Estes resultados sugerem que como a sua granulometria é menor, as partículas conseguem ocupar os espaços entre si mais facilmente, diminuindo desta maneira o volume de vazios existentes na amostra ensaiada.

3.2.4 Equivalente de areia

A determinação do valor do equivalente de areia dos agregados de fração fina foi obtida pela norma NP EN 933-8 (2002). Segundo esta norma, o princípio deste ensaio passa por colocar numa proveta cilíndrica graduada um provete de areia e uma pequena quantidade de solução flocculante (Figura 10a) sendo agitados de modo a libertar as camadas de argila das partículas de areia do provete. De seguida, é adicionada mais solução flocculante para “lavar” a amostra e para forçar as partículas mais pequenas em entrar em suspensão acima da areia. Passados 20 minutos, o valor de equivalente de areia (SE) é calculado pela altura de sedimento (h_2) expressa como uma percentagem da altura total do material flocculado (h_1) (Figura 10b e 10c) na proveta cilíndrica (IPQ, 2002-b), tal como está expresso em (1).

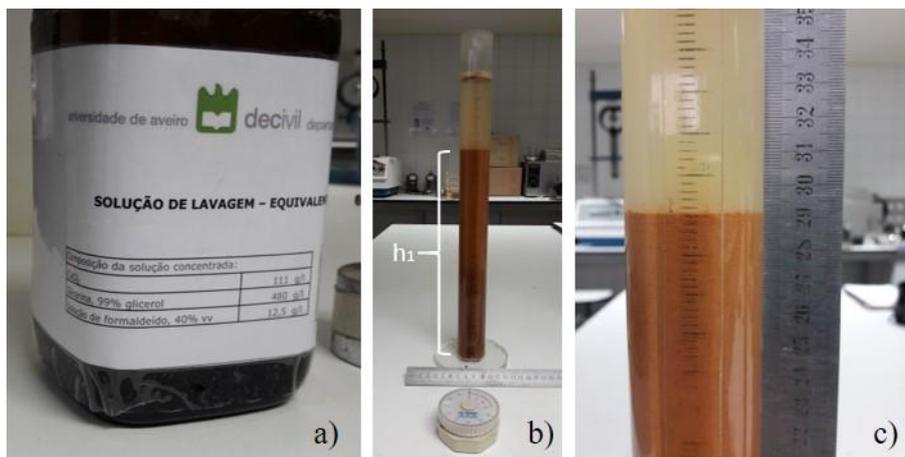


Figura 10 - a) Solução de lavagem; b) Representação de h_1 ; c) Pormenor do valor de h_1

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (1)$$

A partir da fórmula do equivalente de areia é possível concluir que o valor pode variar entre 0 e 100, valores limites que correspondem a uma argila e uma areia limpa, respetivamente. Segundo Branco *et al.* (2005) a classificação dos solos segundo o valor do equivalente de areia pode ser atribuída conforme consta na Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação dos solos em função do valor do equivalente de areia (adaptado de Branco et al., 2005)

<i>SE (%)</i>	<i>Classificação</i>
SE < 20	Solo plástico
20 ≤ SE ≤ 30	Ensaio não conclusivo
SE > 30	Solo não plástico

Branco et al. (2005) sugerem que quando o valor do equivalente de areia for inferior a 20, este ensaio deixa de ter grande significado, sendo necessário realizar ensaios específicos, como a determinação do valor de azul-de-metileno ou os limites de consistência. O autor refere também que este ensaio por ser pouco fiável tende a entrar em desuso sendo substituído pelo valor de azul-de-metileno.

Apesar de na norma ser possível fazer o ensaio sobre a fração 0/4 mm, foi adotada a fração 0/2 mm para o processo de lavagem ser mais facilitado. Para uma consulta mais detalhada, todos os valores deste ensaio estão apresentados no Anexo II, sendo que aqui apresentam-se apenas os valores de SE. Na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos para o pó de calcário e para os dois contaminantes secos a diferentes temperaturas.

Tabela 8 - Valores obtidos pelo ensaio de equivalente de areia dos agregados

<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Pó de Calcário (%)</i>	<i>Contaminante I (%)</i>	<i>Contaminante II (%)</i>
110	64,6	18,8	9,9
130	64,9	17,0	10,4
170	53,6	17,8	17,0

Apesar de este ensaio não ser muito fiável, segundo a classificação dos solos a partir do valor do equivalente de areia apresentada anteriormente, em qualquer uma das temperaturas de aquecimento, o pó de calcário é classificado como um solo não plástico e os dois contaminantes como solos plásticos, o que seria de prever pois ambos são argilas vermelhas.

Para uma melhor interpretação dos valores de equivalente de areia dos contaminantes, a Figura 11 está representada com os valores de ambos para facilitar o seu entendimento.

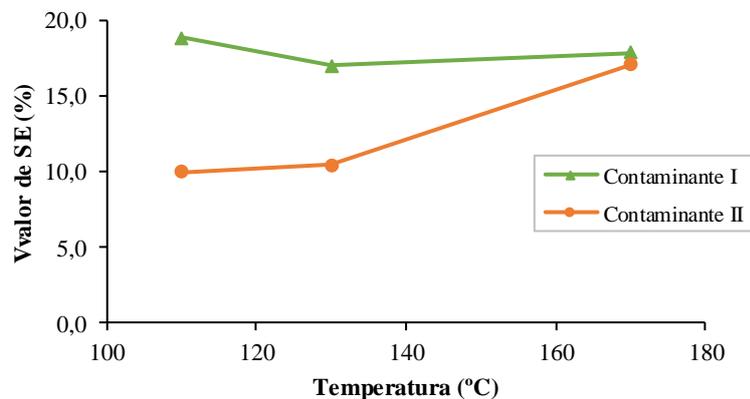


Figura 11 - Resultados dos valores de equivalente de areia dos dois contaminantes

Perante a facilidade de interpretar graficamente, é possível através deste ensaio referir que entre os dois contaminantes, o contaminante II é um solo mais plástico que o contaminante I, apesar de a 170 °C os seus valores andarem muito próximos.

Como foi referido anteriormente, este trabalho para além da temperatura ser uma variável, a percentagem de contaminante na fração fina do agregado de calcário também é outra variável a considerar. Para isso considerou-se que o pó de calcário fosse contaminado com 0 %, 2 % e 3 % de contaminante. Como o equivalente de areia estuda o comportamento dos finos, foi feito um estudo com variação da temperatura de secagem e da percentagem de contaminante, assim como o próprio contaminante.

Na Tabela 9 estão representados todos os valores que foram obtidos no estudo, relembando que os resultados do pó de calcário sem contaminante (0 %), já foram apresentados anteriormente na Tabela 8.

Tabela 9 - Valores de SE para o pó de calcário com diferentes percentagens de contaminante a diferentes temperaturas de secagem

Temperatura (°C)	Contaminante I (%)		Contaminante II (%)	
	Pó c/ 2 %	Pó c/3 %	Pó c/ 2%	Pó c/ 3%
110	63,2	60,2	58,1	43,5
130	58,5	59,0	57,1	44,1
170	49,8	47,9	46,1	43,9

A Figura 12, ilustra todos os valores de SE da Tabela 9, assim como os valores do pó de calcário sem contaminante.

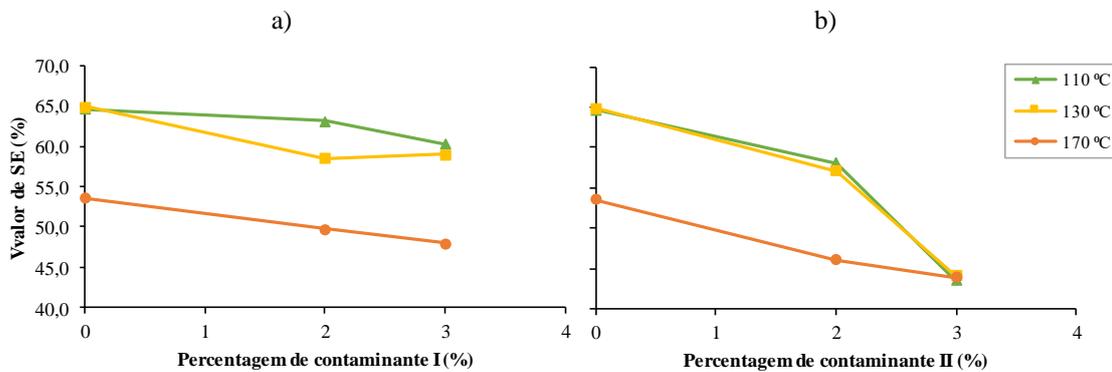


Figura 12 - Valores de SE do pó de calcário contaminado: a) pelo contaminante I; b) pelo contaminante II

Os resultados da Tabela 9, representados na Figura 12, sugerem que apesar de não verificar em todos os valores e não ser uma descida linear, à medida que a temperatura aumenta, os valores de equivalente de areia diminuem, principalmente entre os 130 °C e os 170 °C mas tal não deveria de acontecer pois os finos perdem a sua atividade com o aumento da temperatura. Desta maneira é possível afirmar que o ensaio de equivalente de areia não é um bom ensaio para correlacionar com a atividade dos finos, quando estes estão presentes em pequena quantidade, como é este caso. Após esta comparação de resultados, também é possível referir que o contaminante II confirma a sua posição de ser um solo mais plástico que o contaminante I, isto porque apesar de as percentagens que contaminam o pó de calcário serem pequenas, os valores diminuem bastante quando se trata do contaminante II. Uma curiosidade a retirar deste estudo relativo ao equivalente de areia, é que o pó de calcário com apenas 2% de contaminante II é considerado um solo mais plástico que o pó de calcário com 3% de contaminante I. Desta observação podemos concluir que o contaminante II é mais ativo que o contaminante I. A nível da variação da percentagem de contaminante na amostra, os resultados são os esperados pois à medida que a percentagem de contaminante aumenta, o valor de SE diminui, o que refere que a amostra se torna “menos limpa”.

3.2.5 Azul de Metileno

A determinação do valor do azul de metileno é calculada seguindo a norma NP EN 933-9 (2002).

O ensaio baseia-se em adicionar incrementos de uma solução de azul de metileno a uma suspensão em água do provete de ensaio, sendo que após a adição de cada incremento, a adsorção da solução corante é verificada pela realização de um ensaio de manchas em papel de filtro de modo a detetar a presença de corante livre. Quando existe essa confirmação, obtemos o valor de azul de metileno (MB) (IPQ, 2002-c). A Figura 13 ilustra alguns dos passos do procedimento do ensaio para obter MB.

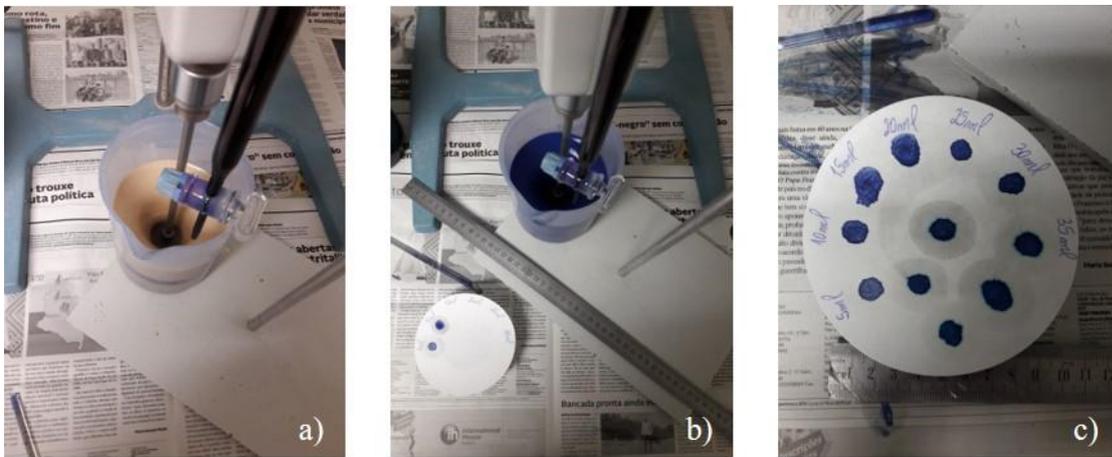


Figura 13 -Ensaio do azul de metileno: a) antes de qualquer incremento; b) após alguns incrementos; c) final do ensaio

Segundo Branco *et al.* (2005), o valor MB é um valor que define de forma eficaz a maior ou menor sensibilidade à água, ou seja, no caso de agregados, o maior ou menor grau de limpeza ou existência de materiais sensíveis à água no seio do agregado. O mesmo autor sugere também uma classificação de solos de acordo com os valores obtido através deste ensaio representada na Tabela 10.

Tabela 10 - Classificação de solos de acordo com o valor de azul de metileno.

MB (g/kg)	Classificação
MB ≤ 1	Solos insensíveis à água
1 < MB ≤ 2	Solos muito pouco sensíveis à água
2 < MB < 15	Solos com sensibilidade à água
MB = 15	Valor que distingue os solos areno-siltosos dos areno-argilosos
MB = 25	Valor que distingue os solos siltosos pouco plásticos dos medianamente plásticos
MB = 60	Valor que distingue os solos siltosos dos argilosos
MB = 80	Valor que distingue os solos argilosos dos solos muito argilosos

Para esta classificação dos agregados, todos os ensaios de azul de metileno foram efetuados sobre a fração 0/2 mm. Todos os valores obtidos neste ensaio estão disponíveis no Anexo II. Iniciou-se apenas por avaliar cada agregado separadamente nas diversas temperaturas de secagem, com o intuito de os poder classificar. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 11 sendo que os valores dos contaminantes estão representados na Figura 14.

Tabela 11 - Valores obtidos pelo ensaio de azul de metileno dos agregados

Temperatura (°C)	Pó de Calcário (g/kg)	Contaminante I (g/kg)	Contaminante II (g/kg)
110	1,3	6,8	41,7
130	1,5	7,5	36,7
170	1,4	7,0	31,7

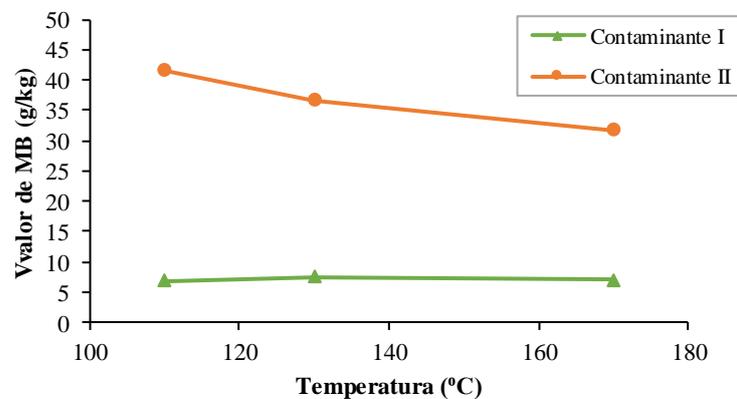


Figura 14 - Valores de azul de metileno dos contaminantes a diferentes temperaturas de secagem

Após a exibição dos valores experimentais, verifica-se que o pó de calcário é considerado um material muito pouco sensível à água, o que já não acontece com os contaminantes. O contaminante I que pelo equivalente de areia é considerado um material plástico, pela classificação de acordo com o valor de azul de metileno é um material com sensibilidade à água. O contaminante II é um material medianamente plástico independente da temperatura a que foi aquecido. O fator temperatura no azul de metileno já tem alguma importância, isto porque apesar de no contaminante I não haver grande variação ao longo da temperatura, o contaminante II tende a ficar menos sensível à água à medida que a temperatura de aquecimento aumenta.

Tal como aconteceu no ponto anterior com os ensaios de equivalente de areia, foi necessário realizar o estudo da variação da temperatura de aquecimento dos agregados assim como da variação da percentagem de contaminante quanto aos valores de MB. Para isso considerou-se que o pó de calcário fosse contaminado com 0 %, 2 %, 3 % e, no caso do contaminante II, 4 % de contaminante e aquecido às temperaturas anteriormente referidas.

No caso do contaminante II, foi realizada uma mistura de pó de calcário com 4 % de contaminante, apenas para confirmar se o comportamento desta mistura perante este ensaio se mantinha ao aumentar a sua percentagem de contaminante.

Na Tabela 12 estão representados todos os valores em falta que foram obtidos para o estudo, lembrando que os resultados do pó de calcário sem contaminante (0 %), já foram apresentados anteriormente na Tabela 11.

Tabela 12 - Valores de MB para o pó de calcário com diferentes percentagens de contaminante a diferentes temperaturas de secagem

Temperatura (°C)	Contaminante I		Contaminante II		
	Pó c/ 2% (g/kg)	Pó c/3% (g/kg)	Pó c/ 2% (g/kg)	Pó c/ 3% (g/kg)	Pó c/ 4% (g/kg)
110	1,5	1,8	2,5	3,3	3,8
130	1,5	1,5	2,5	3,0	3,3
170	1,5	1,5	2,3	2,8	3,0

As Figuras 15 e 16, representam todos os valores de MB da Tabela 12, assim como os valores do pó de calcário sem contaminante.

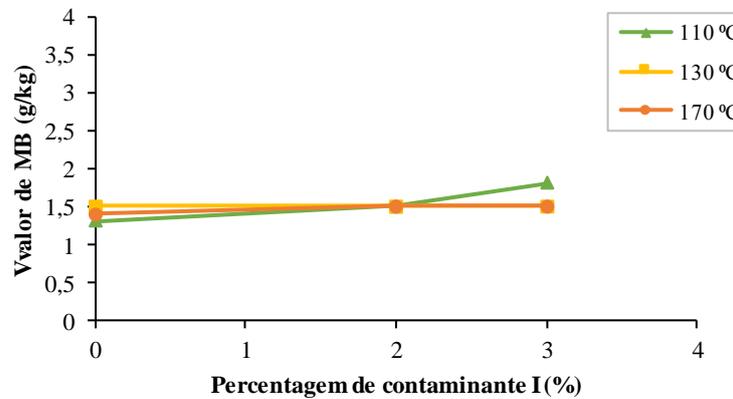


Figura 15 - Valores de MB do pó de calcário contaminado pelo contaminante I

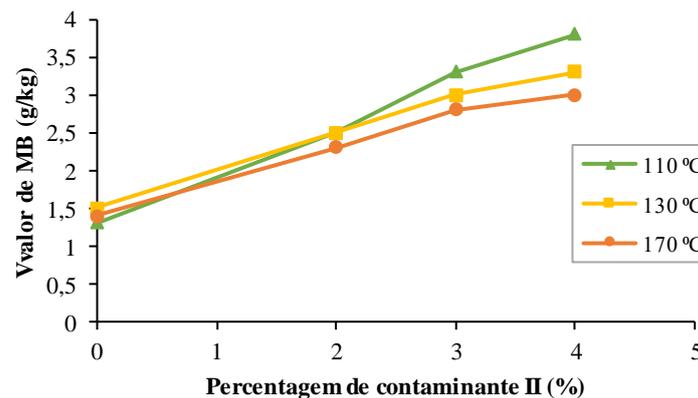


Figura 16 - Valores de MB do pó de calcário contaminado pelo contaminante II

Estes resultados sugerem que os provetes de ensaio misturados com o contaminante I não permitem concluir qualquer relação entre os valores de MB com a variação de contaminante na mistura qualquer que seja o valor da temperatura de secagem. Apenas é possível afirmar que a 110 °C, à medida que a percentagem de contaminante aumenta, o valor de MB também aumenta apesar de ser um crescimento pequeno e não linear enquanto que as retas das outras temperaturas não acompanharam o mesmo comportamento que a reta dos 110 °C do contaminante I. Relativamente ao contaminante II, há uma tendência linear crescente em todas as retas das temperaturas em função da percentagem de contaminante existente no provete de ensaio, existindo um comportamento semelhante entre as retas de

todas as temperaturas. Apesar de tudo, neste contaminante é de salientar que o comportamento das misturas a 110 °C apresenta um crescimento no valor de MB um pouco mais elevado em relação às outras temperaturas. Como já foi mencionado anteriormente, o provete com 4% de contaminante foi efetuado para confirmar se existia ou não esta tendência de resultados, e perante os resultados obtidos a 4%, foi possível confirmar este comportamento. É de realçar também que cada percentagem de contaminante existente na amostra representa apenas 2 g de contaminante que substitui o pó de calcário neste ensaio. Perante esta interpretação de resultados referente ao contaminante II, é possível concluir que quanto mais contaminante existir na amostra do pó de calcário, maior vai ser o valor de MB, logo amostras mais sensíveis à água, sendo a sua atividade bastante mais elevada que a existente no contaminante I.

3.2.6 Limites de Consistência

A determinação dos limites de consistência é calculada seguindo a norma NP 143 (1969). Esta norma é subdividida na determinação do limite de liquidez e no limite de plasticidade. Nestes dois ensaios é utilizada a fração 0/0,425 mm dos dois contaminantes.

O limite de liquidez (LL) de uma amostra de solo é o teor em água correspondente a 25 pancadas, obtido por interpolação numa curva que relaciona o teor em água de cada um dos quatro provetes da amostra com o número de pancadas para o qual os bordos inferiores de um sulco aberto num provete se unem numa extensão de 1 cm utilizando a concha de Casagrande (Figura 17) (IGPAI, 1969).

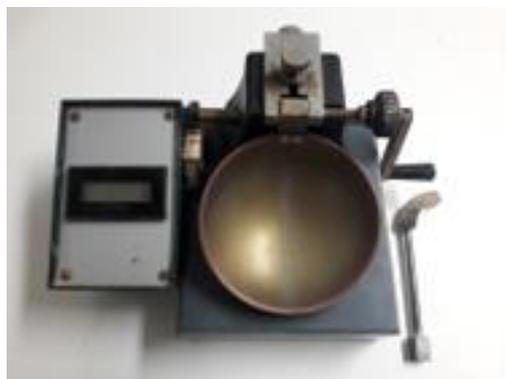


Figura 17 - Concha de Casagrande utilizada no ensaio

O limite de plasticidade (LP) de uma amostra de solo é a média dos teores em água de quatro provetes da amostra a ensaiar, cada um dos quais é o maior teor em água com que rompe cada provete ao pretender-se transformá-lo num filamento cilíndrico com cerca de 3 mm de diâmetro, por rolagem entre a palma da mão e uma placa de vidro (Figura 18) (IGPAI, 1969).



Figura 18 - Aspeto das amostras: a) antes do ensaio; b) após o ensaio

Todos os valores obtidos para a determinação destes dois limites estão disponibilizados para consulta no Anexo II. As Figuras 19 e 20, apresentam a comparação do comportamento dos dois contaminantes estudados, quanto à sua consistência, quando testados na concha de Casagrande, para a determinação do LL nas diferentes temperaturas de secagem estudadas. Nas equações apresentadas nestas figuras, o valor de x representa o número de pancadas e o valor de y a percentagem do teor em água.

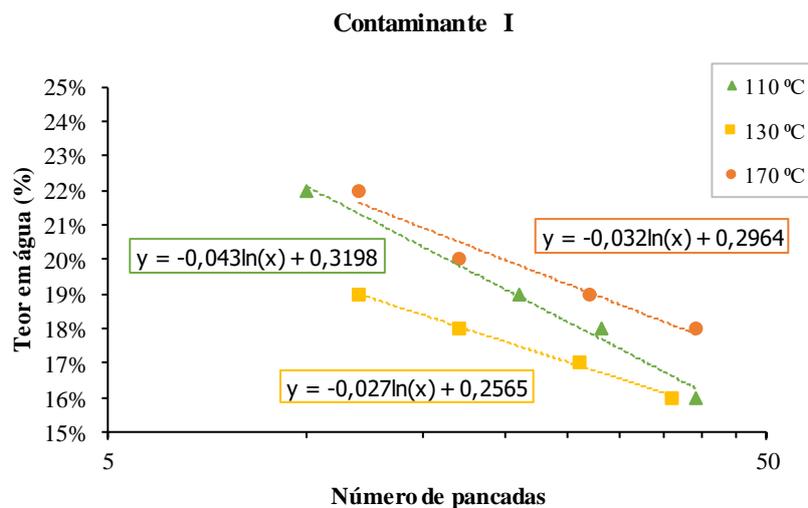


Figura 19 - Limite de Liquidez do contaminante I a diferentes temperaturas de secagem

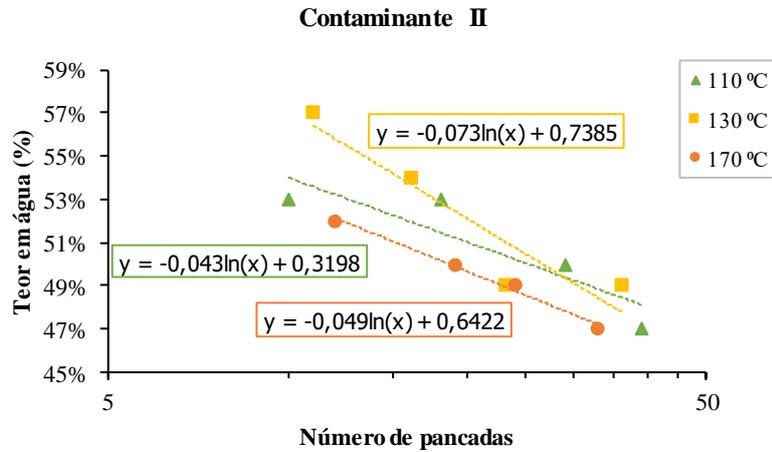


Figura 20 - Limite de Liquidez do contaminante II a diferentes temperaturas de secagem

Na Tabela 13, estão apresentados os resultados relativos aos limites de consistência obtidos a partir dos quatro provetes de cada ensaio para cada temperatura diferente de secagem, tendo sido calculado o Índice de Plasticidade (IP) para cada caso.

Tabela 13 - Resultados do ensaio de determinação dos limites de consistência a diferentes temperaturas de secagem

<i>Amostra</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>LL (%)</i>	<i>LP (%)</i>	<i>IP (%)</i>
Contaminante I	110	18	16	2
	130	17	14	3
	170	19	15	4
Contaminante II	110	50	23	27
	130	50	23	27
	170	48	24	24

Dos resultados, é possível concluir que os resultados obtidos não variam muito com as diferenças de temperaturas. No entanto, é notória a diferença de resultados nos valores do LL e, por conseguinte, nos valores de IP entre os dois contaminantes. A partir da classificação unificada de solos (ASTM D 2487-85), o contaminante I é classificado como SC – areia argilosa e o contaminante II é designado como CL – argila magra.

3.3 Produção laboratorial das misturas betuminosas

Neste ponto é explicado resumidamente o processo de produção dos provetes betuminosos para análise. Convém referir que se trata de mistura betuminosa designada como AC 20 reg 50/70 (MBD), tendo sido adotado um teor de betume de 5,0 %, sendo este aquecido entre 150 a 160 °C e os agregados a diferentes temperaturas de secagem (110 °C, 130 °C e 170 °C). O contaminante que foi usado nos provetes betuminosos foi o contaminante II por ter apresentado uma maior atividade nos ensaios de caracterização realizados.

Sendo a temperatura o fator chave deste trabalho, foi tido em conta o controlo da temperatura da mistura assim como da percentagem de contaminante existente em cada provete, não sendo produzidos no mesmo dia provetes em que diferisse a percentagem de contaminante ou a temperatura.

A ordem de trabalhos passou pela produção de 12 provetes de cada série, isto é, 12 provetes para cada temperatura de secagem por cada percentagem de contaminante presente na mistura betuminosa, onde 4 desses 12 provetes foram direcionados para o ensaio de Marshall e os restantes 8 provetes para o cálculo da resistência conservada por Marshall. No total teremos 108 provetes betuminosos que provêm das várias combinações possíveis de 3 temperaturas de secagem com 3 percentagens de contaminante diferentes.

3.3.1 Fusão Adotado e Granulometria da mistura

Para a mistura betuminosa deste trabalho, o CEEP indica um fuso granulométrico com limites superior e inferior a serem cumpridos. A partir da análise granulométrica efetuada anteriormente neste trabalho e respeitando o fuso granulométrico para uma mistura betuminosa AC 20 reg 50/70 (MBD), foi possível calcular as percentagens de cada agregado de forma a obter a curva teórica da mistura: **17 %** da Brita 11/22, **20 %** da Brita 8/14, **12 %** da Brita 4/8, **48 %** do Pó de Calcário e **3 %** de Fíler. A Figura 21 apresenta os limites do fuso granulométrico para uma MBD pertencente à camada de regularização, a curva teórica da mistura e a curva de um provete granulométrico experimental.

Os cálculos mais pormenorizados da curva teórica da mistura, assim como do provete granulométrico experimental, estão apresentados no Anexo III.

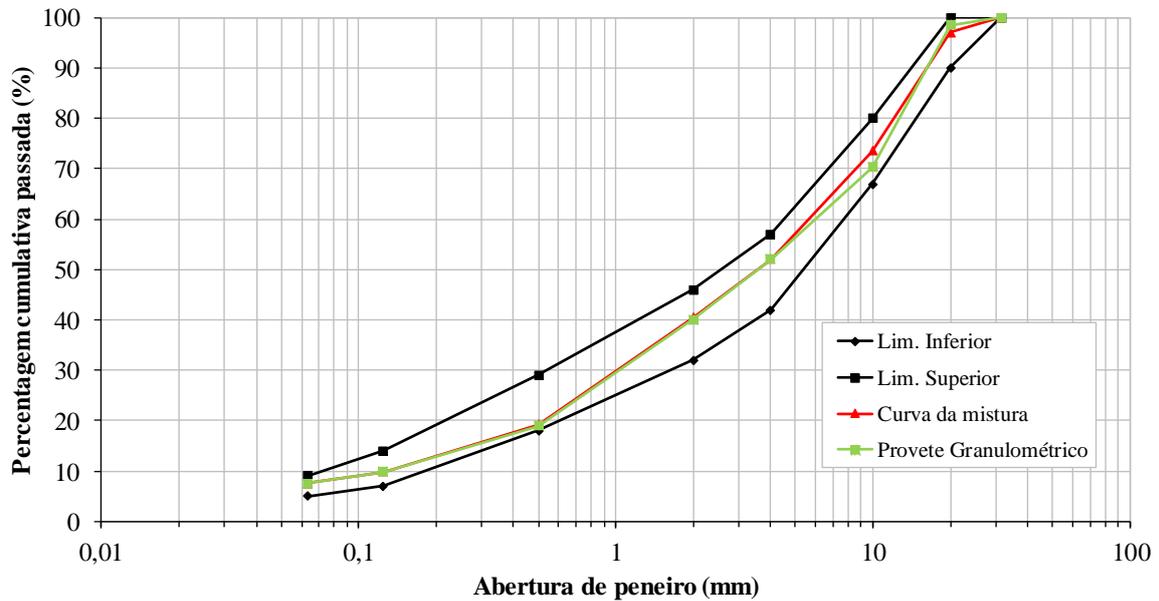


Figura 21 - Limites do fuso granulométrico do CEEP, curva teórica da mistura e curva do provete granulométrico

A Figura 22 apresenta o aspeto de todos os provetes necessários para fazer este trabalho, sendo que os provetes estão organizados em 3 grupos que representa cada temperatura de fabrico (da esquerda para a direita: 110 °C, 130 °C e 170 °C) e em cada grupo estão presentes as 3 percentagens de contaminante (da esquerda para a direita: 0 %, 2 % e 3 %).



Figura 22 - Aspeto dos 108 provetes produzidos

3.3.2 Determinação da percentagem de betume

A título de curiosidade, e apesar de se ter escolhido um teor de betume de 5,0 % para a produção dos provetes betuminosos, foi realizado uma pequena análise com base no método de Duriez (2).

$$P_b = \alpha \times K \times \sqrt[5]{\Sigma} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{2,65}{\rho_a} \quad (3)$$

em que,

P_b – percentagem de betume;

ρ_a – massa volúmica dos agregados, em g/cm³;

K – módulo de riqueza em betume;

Σ - Superfície específica dos agregados, em m²/kg.

$$\Sigma = \frac{0,25 \times G + 2,3 \times S + 12 \times s + 150 \times f}{100} \quad (4)$$

em que,

G – proporção ponderal de elementos superiores a 6,3 mm;

S – proporção ponderal de elementos compreendidos entre 6,3 e 0,315 mm;

s – proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,250 e 0,063 mm;

f – proporção ponderal de elementos inferiores a 0,063 mm.

Segundo o CEEP, o módulo de riqueza de uma camada de regularização, varia entre 3,3 e 3,8. Assim sendo, calculamos para os dois para comparar se estamos dentro desse intervalo. A Tabela 14, através das equações (2), (3) e (4), permite identificar as várias proporções da mistura em estudo, assim como dos valores da superfície específica dos agregados e da percentagem de betume.

Tabela 14 - Superfície específica dos agregados e percentagem de betume

Amostra	G	S	s	f	Σ	K	P _b (%)
MBD	39,7	46,9	5,9	7,5	13,14	3,3	5,4
						3,8	6,2

Com base no método de Duriez, o teor de betume a utilizar seria de 5,4 % para um módulo de riqueza de 3,3. Se esse módulo fosse maior, a percentagem chega a atingir os 6,2 %.

3.3.3 Baridade dos provetes

A determinação da baridade dos provetes betuminosos foi obtida segundo a norma EN 12697-6 (2003). Esta norma contém quatro métodos para calcular as baridades, sendo que para o interesse deste trabalho só será necessária a baridade calculada pelo método A, pois é por este método que se vão escolher os provetes que serão ensaiados pela resistência conservada pois a norma exige dois grupos com a baridade média o mais semelhante possível. Todos os cálculos das baridades estão disponíveis no Anexo IV. Na Tabela 15 é apresentada a distribuição dos provetes pelos ensaios a realizar.

Tabela 15 - Distribuição dos provetes pelos ensaios

110 °C	0%	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	2%	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	3%	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
130 °C	0%	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
	2%	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
	3%	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
170 °C	0%	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
	2%	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
	3%	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108

Ensaio Marshall

Resistência Conservada
30 min

Resistência Conservada
24h

A determinação da baridade máxima teórica (BMT) dos provetes betuminosos foi obtida segundo a norma EN 12697-5 (2002), mais precisamente pelo procedimento C, que é o procedimento matemático (5).

$$\rho_{mc} = \frac{100}{(p_{a1}/\rho_{a1}) + (p_{a2}/\rho_{a2}) + \dots + (p_b/\rho_b)} \quad (5)$$

em que,

ρ_{mc} – baridade máxima teórica, em g/cm³;

p_{ai} – percentagem do agregado i ;

ρ_{ai} – massa volúmica do agregado i , em g/cm³;

p_b – percentagem de betume;

ρ_b – massa volúmica do betume, em g/cm³;

Tabela 16 - Determinação da baridade máxima teórica

Agregados	Mistura 0 %		Mistura 2 %		Mistura 3 %	
	%	ρ	%	ρ	%	ρ
Brita 11/22	16,2	2,71	16,2	2,71	16,2	2,71
Brita 8/14	19,0	2,71	19,0	2,71	19,0	2,71
Brita 4/8	11,4	2,70	11,4	2,70	11,4	2,70
Pó de calcário	45,6	2,71	44,7	2,71	44,2	2,71
Contaminante	0,0	2,65	0,9	2,65	1,4	2,65
Fíler	2,9	2,69	2,9	2,69	2,9	2,69
Betume	5,0	1,02	5,0	1,02	5,0	1,02
BMT (g/cm³)	2,497		2,497		2,497	

Apesar de existirem três misturas neste trabalho, como a percentagem de contaminante na própria mistura é tão irreduzível, acaba por não ter grande reflexão nos valores da baridade máxima teórica.

3.4 Ensaio de Marshall

Por ser o ensaio de caracterização de misturas betuminosas mais utilizado atualmente em Portugal, descreve-se em seguida o ensaio Marshall cujos procedimentos estão especificados pela NP 142 (1968). Esta norma fornece indicações sobre a resistência que oferece uma mistura betuminosa à compressão e à deformação pela aplicação de forças, sendo aplicado a misturas com agregados de dimensão igual ou inferior a 25 mm.

Para este ensaio foram realizados quatro provetes para cada temperatura por cada percentagem de contaminante, o que perfaz um total de 36 provetes. As misturas betuminosas foram misturadas com a ajuda de uma misturadora sendo de seguidas compactadas com um martelo de um compactador de impacto através de 50 pancadas em cada um dos lados do provete. De seguida foram imersos em água à temperatura de 40 °C durante dois minutos e por fim desmoldados.

Com as baridades já calculadas, os provetes foram colocados num banho de água a 60 °C durante 20 minutos. Após ter sido retirado da água e aplicado na máquina num curto intervalo de tempo, é imposta uma deformação vertical de compressão à velocidade de 50 mm/min até os provetes atingirem a sua rotura.

Para ser mais fácil obter os resultados, um software de aquisição de dados foi aplicado para gravar todos os dados referentes à estabilidade e deformação de todos os provetes.

Após a recolha foi feita uma análise desses dados, tendo sido obtidos gráficos de estabilidade em função da deformação para cada provete betuminoso. Estes gráficos estão disponíveis no Anexo V e foi a partir destes gráficos que foi possível retirar os valores da força de rotura e da deformação de todos os provetes, conforme constam na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores de força de rotura e da deformação a partir de Marshall

Contam.	110 °C			130 °C			170 °C		
	Provete	Força de Rotura (kN)	Deformação (mm)	Provete	Força de Rotura (kN)	Deformação (mm)	Provete	Força de Rotura (kN)	Deformação (mm)
0%	P3	13,1	5,0	P38	10,9	5,6	P73	11,6	4,2
	P6	14,1	5,4	P39	13,4	5,9	P76	10,3	4,6
	P10	14,1	4,2	P44	14,6	4,3	P80	10,1	3,4
	P12	11,6	5,3	P46	11,3	6,4	P84	11,2	3,9
2%	P13	13,7	4,6	P51	15,5	4,4	P87	13,9	4,4
	P16	15,0	4,5	P52	16,7	4,2	P91	11,7	4,1
	P19	14,3	5,4	P56	15,7	5,2	P95	11,7	4,0
	P23	14,6	4,7	P59	14,3	4,8	P96	12,5	4,2
3%	P25	14,3	3,7	P61	9,1	3,8	P97	11,9	3,7
	P29	11,7	4,0	P65	9,9	4,2	P100	9,2	4,4
	P31	12,0	4,5	P70	10,1	4,5	P104	12,6	4,2
	P34	11,7	5,4	P72	10,4	4,1	P106	9,2	3,5

A partir dos resultados obtidos da tabela anterior, foram calculados os valores médios da estabilidade, deformação, baridade, porosidade e volume de vazios no agregado para as diferentes misturas, organizadas por temperaturas.

Estes valores são apresentados na Tabela 18 e representados graficamente na Figura 23.

Tabela 18 - Resultados do ensaio de Marshall para as diferentes temperaturas

Temp. (°C)	Contam. (%)	Força de Rotura (kN)	Deformação (mm)	Baridade (g/cm ³)	n (%)	VMA (%)
110	0	13,2	5,0	2,39	4,3	16,1
	2	14,4	4,8	2,39	4,3	16,1
	3	12,5	4,4	2,37	5,1	16,8
130	0	12,5	5,5	2,36	5,5	17,1
	2	15,6	4,7	2,37	5,1	16,8
	3	9,9	4,1	2,42	3,1	15,0
170	0	10,8	4,0	2,45	1,9	14,0
	2	12,5	4,2	2,4	3,9	15,7
	3	10,7	4,0	2,43	2,7	14,7

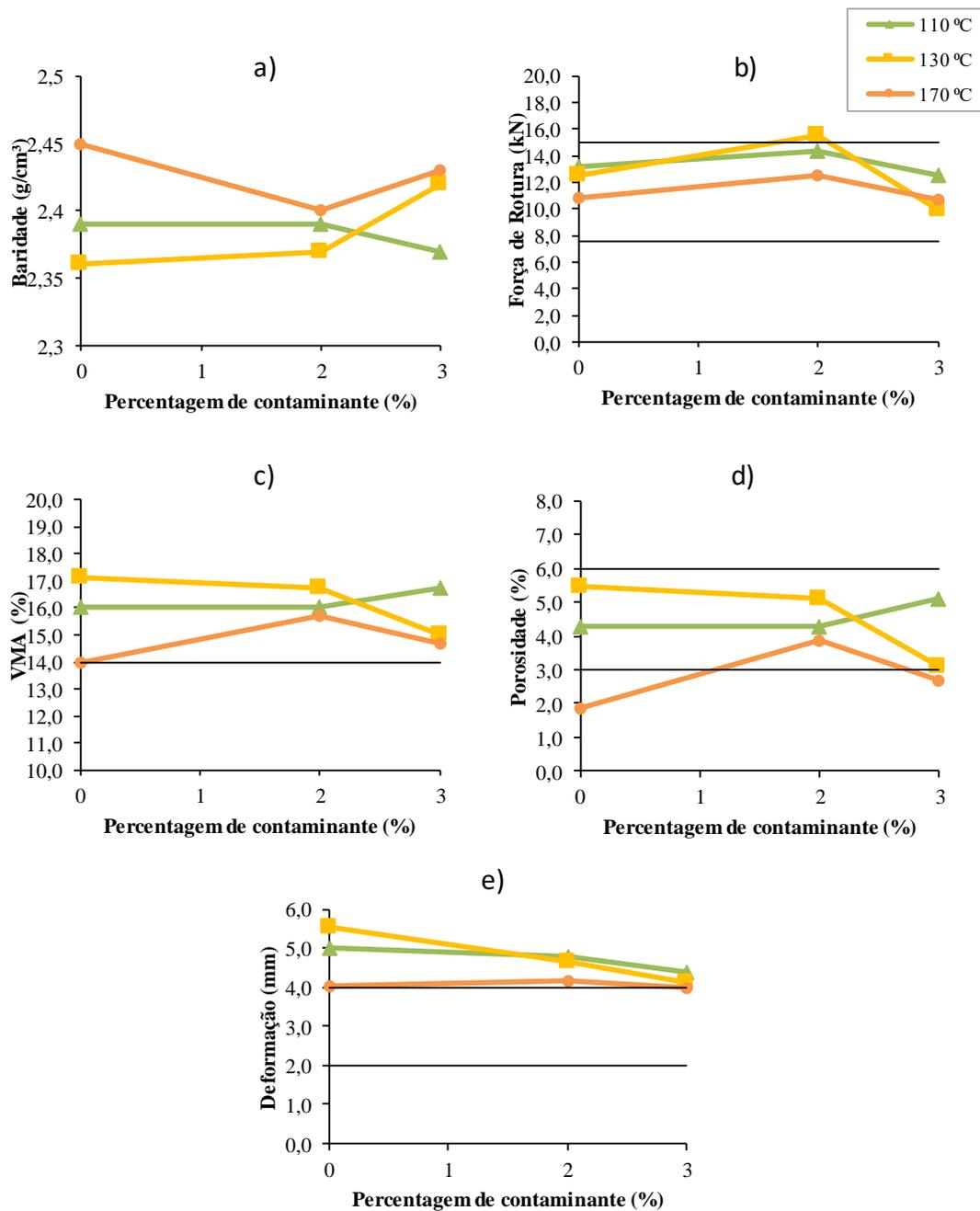


Figura 23 – Influência da temperatura nas características das misturas betuminosas: a) Baridade; b) Força de ruptura; c) VMA; d) Porosidade; e) Deformação

A partir de todos estes resultados relativos ao ensaio de Marshall é possível verificar que os valores da baridade não estão em conformidade com o esperado, isto porque à medida que a percentagem do contaminante aumenta o valor da baridade deveria diminuir, e no caso da temperatura os valores da baridade com temperatura de secagem superior haveriam de ser maiores do que os valores da baridade com temperatura de secagem inferior, o que nem sempre acontece.

Os valores da estabilidade têm o seu comportamento semelhante em qualquer uma das temperaturas de secagem estudadas, existindo uma pequena curiosidade de que existe um pequeno aumento em todas as temperaturas quando a mistura contém 2 % de contaminante, no qual um dos pontos está acima do valor máximo aconselhado pelo CEEP, mas o mesmo já não acontece para os 3 % de contaminante, sendo estes valores inferiores às misturas sem contaminante.

Relativamente ao volume de vazios, os seus valores não apresentam grande variação, mas em qualquer uma das situações, o valor de VMA é sempre igual ou superior a 14, conforme consta nos requisitos das misturas betuminosas densas no CEEP.

Em relação à porosidade, as temperaturas mais baixas respeitam sempre os limites inferiores e superiores impostos pelo Caderno de Encargos, sendo que a temperatura superior só respeita na mistura com 2 % de contaminante, e por fim em relação à deformação, apesar de existir uma pequena tendência decrescente do valor da deformação à medida que a percentagem de contaminante aumenta, o mesmo já não se pode dizer das temperaturas. É de salientar que os valores da deformação, apesar de existirem misturas que registam valores chegados ao limite superior, apenas dois pontos cumprem este requisito porque tomam o valor máximo de 4 mm.

Estes resultados apresentados nos diferentes gráficos permitem concluir que o efeito do contaminante nas misturas betuminosas produzidas não é visível. Isto pode dever-se ao facto do contaminante ser um elemento argiloso, e as argilas só se tornam problemáticas na presença de humidade. O método de Marshall não é um ensaio em que a argila esteja em contacto com muita humidade a não ser nas partículas superficiais presentes no provete betuminoso.

Por fim, estes resultados também permitem concluir que existem problemas de controlo da temperatura no fabrico pois as linhas das temperaturas apresentadas nos diferentes gráficos apresentam um comportamento desordenado.

4

CONCLUSÕES

4. Conclusões e considerações finais

Este trabalho teve como principal objetivo estudar a influência das temperaturas de aquecimento dos agregados durante o processo de fabrico, no desempenho das misturas betuminosas densas. Foi selecionado um dos principais tipos de agregados para produzir misturas betuminosas em Portugal que é o caso dos agregados de calcário e caracterizado de acordo com a normativa europeia, na perspetiva da aplicação destes agregados em misturas betuminosas. Como este trabalho tinha como objetivo observar a atividade de um contaminante numa mistura betuminosa foram também selecionadas duas argilas para serem caracterizadas a fim de escolher a que apresentaria maior atividade na mistura. A estes materiais foram realizados os seguintes ensaios – análise granulométrica, densidade das partículas, equivalente de areia, azul de metileno e limites de consistência.

Dos resultados obtidos em relação à caracterização de agregados finos, o ensaio de equivalente de areia apresentou algumas fragilidades na hora dos resultados, isto porque apesar do efeito da percentagem de contaminante existente na amostra ser algo visível nos valores de SE, o mesmo não se aplica para o efeito da temperatura de secagem. Os resultados obtidos mostraram que à medida que a temperatura subia, o valor do equivalente de areia descia quando na verdade os finos com temperaturas mais altas acabam por perder a sua atividade e ficam mais “limpos”, logo o valor de equivalente de areia deveria de subir. Isto pode ter sido devido ao facto de os ensaios apresentarem percentagens muito pequenas nas misturas com o pó de calcário. Desta maneira, e perante os resultados obtidos neste trabalho, é possível concluir que o ensaio de equivalente de areia é pouco fiável na identificação de finos plásticos.

Em contrapartida, o azul de metileno, por ser também um ensaio mais mecânico e químico, onde não existe tanta manipulação do ser humano, torna-se um ensaio mais confiável e onde é detetado mais facilmente a presença dos contaminantes nos agregados, sendo cada vez mais um ensaio de registo fiável ao contrário do ensaio de equivalente de areia que começa a entrar em total desuso. Os seus resultados permitiram concluir que o contaminante II é a argila com maior atividade, mesmo quando está presente em pequenas quantidades numa amostra de pó de calcário para qualquer temperatura de secagem.

Os resultados obtidos nos limites de consistência apresentam a diferença existente entre os dois contaminantes, tendo o contaminante II valores maiores de limite de liquidez e

de plasticidade comparativamente ao contaminante I. Foi concluído também pela classificação unificada de solos que o contaminante I foi classificado como SC – areia argilosa e o contaminante II como CL – argila magra.

Após a caracterização dos agregados e dos contaminantes, foi definido que o contaminante II iria ser utilizado como impureza nas misturas betuminosas por ter apresentado maior atividade na sua caracterização. Assim sendo, foram produzidas três misturas de percentagem de contaminante diferentes, em que o contaminante, quando usado, servia para substituir parte do pó de calcário das misturas betuminosas.

A partir dos resultados obtidos pelo método de Marshall, não é detetada qualquer tipo de atividade do contaminante nas misturas betuminosas ensaiadas, o que faz prever que seria necessário fazer um ensaio onde a longo prazo se verificasse o efeito da humidade no provete, pois em termos teóricos, o contaminante acabou por se comportar como se tivesse existido substituição da fração do pó de calcário. Isto pode ser uma possível razão para não se conseguir grandes diferenças de valores do ensaio de Marshall com ou sem a presença do contaminante nas misturas betuminosas.

Por fim, os resultados também permitem concluir que existem problemas de controlo da temperatura no fabrico e que para o estudo da atividade de contaminantes nas misturas é necessário um rigoroso controlo das condições de fabrico dos provetes, caso contrário os efeitos das variações de compacidade das misturas (variações de baridade) encobrem os possíveis efeitos dos contaminantes

A proposta para trabalhos futuros rege-se simplesmente à continuação da realização deste trabalho através do estudo pela resistência conservada, estudo que estava em vista realizar neste trabalho, a fim de conseguir resultados que possam dissipar algumas das dúvidas existentes relativas aos valores obtidos pelo ensaio de Marshall.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referências Bibliográficas

- Afonso, M. I. L. (2014). *Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas com Betumes Temperados* (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Universidade da Beira Interior, Covilhã. Disponível em <http://hdl.handle.net/10400.6/5470>
- Almeida-Costa, A., e Benta, A. (2016). Economic and environmental impact study of warm mix asphalt compared to hot mix asphalt. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2308–2317. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.077>
- ASTM D 2487-85. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). American Society for Testing and Materials
- Barbosa, F. C. A. T. (2012). *Contribuição para o estudo do desempenho de misturas betuminosas temperadas* (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. Disponível em <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395143063960/Tese.pdf>
- Branco, D. T. F. (2013). *Estudo de Misturas Betuminosas Semi-temperadas por Injeção de Água* (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Minho, Guimarães. Disponível em <http://hdl.handle.net/1822/30717>
- Branco, F., Pereira, P., e Santos, L. P. (2005). *Pavimentos Rodoviários*. Coimbra: Almedina.
- Button, J. W., Estakhri, C., e Wimsatt, A. (2007). *A synthesis of warm-mix asphalt* (No. FHWA/TX-07/0-5597-1). Texas, EUA. Retrieved from <https://static.tti.tamu.edu/tti.tamu.edu/documents/0-5597-1.pdf>
- Capitão, S. D., Picado-Santos, L. G., e Martinho, F. (2012). Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 1016–1024. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>
- Carvalho, T., e Barreno, I. P. (2013). Ligantes betuminosos temperados. Em *7º Congresso Rodoviário Português - “Novos Desafios para a Atividade Rodoviária”* (p. 10). Lisboa, Portugal. Disponível em http://www.crp.pt/docs/A45S121-50_Art_T5_7CRP_2013.pdf
- CEN. (2002). Bituminous Mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density - EN 12697-5.
- CEN. (2003). Bituminous Mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens - EN 12697-6.
- Choudhary, J., Kumar, B., & Gupta, A. (2018). Application of waste materials as fillers in bituminous mixes. *Waste Management*, 78, 417–425. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.009>
- D’Angelo, J., Harm, E., Bartoszek, J., Baumgardner, G., Corrigan, M., Cowser, J., ... Yeaton, B. (2008). *Warm-Mix Asphalt: European Practice* (No. FHWA-PL-08-007). *American Trade Initiatives*. Alexandria, EUA. Retrieved from <https://international.fhwa.dot.gov/pubs/pl08007/pl08007.pdf>

- EAPA. (2014). The Use of Warm Mix Asphalt. EAPA - Position paper. Disponível em [http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/EAPA paper - Warm Mix Asphalt - version 2014.pdf](http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/EAPA%20paper%20-%20Warm%20Mix%20Asphalt%20-%20version%202014.pdf)
- EP. (2014). Caderno de Encargos Tipo Obras: 14.03 - Pavimentação, Características dos materiais. Disponível em https://www.infraestruturasdeportugal.pt/sites/default/files/cet/14_03_set_2014.pdf
- Farina, A., Zanetti, M. C., Santagata, E., & Blengini, G. A. (2017). Life cycle assessment applied to bituminous mixtures containing recycled materials: Crumb rubber and reclaimed asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 117, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.015>
- Fernandes, D. (2017). *Avaliação da Qualidade de Misturas Betuminosas para a Reparação Rápida a Frio de Pavimentos* (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa. Disponível em https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/281870113703703/Dissertacao_MBF_DF_versaofinal.pdf
- Ferreira, C. I. G. (2009). *Avaliação do Desempenho de Misturas Betuminosas Temperadas* (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Minho, Guimarães. Disponível em <http://hdl.handle.net/1822/10536>
- IGPAI. (1968). Misturas betuminosas. Ensaio de compressão Marshall - NP-142:1968. Lisboa
- IGPAI. (1969). Solos. Determinação dos limites de consistência - NP-143:1969. Lisboa
- InIR. (2011-a). Construção e Reabilitação de Pavimentos - Agregados. Disponível em <http://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/DivulgaoTcnica/ConstrucaoReabilitacaoPavimentosAgregados.pdf>
- InIR. (2011-b). Directivas para a concepção de pavimentos - Critérios de Dimensionamento de Pavimentos. Disponível em <http://www.inir.pt/portal/LinkClick.aspx?fileticket=bG6BRyvYJBA%3D&tabid=116&mid=487&language=pt-PT>
- IPQ. (1999). Ensaio para determinação das características geométricas dos agregados, Parte 2: Determinação da distribuição granulométrica - NP EN 933-2:1999. Lisboa
- IPQ. (2000). Ensaio das propriedades geométricas dos agregados, Parte 1: Análise granulométrica - NP EN 933-1:2000. Lisboa
- IPQ. (2002-a). Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 3: Determinação da baridade e do volume de vazios - NP EN 1097-3:2002. Lisboa
- IPQ. (2002-b). Ensaio das propriedades geométricas dos agregados, Parte 8: Determinação do teor de finos - Ensaio do equivalente de areia - NP EN 933-8:2002. Lisboa
- IPQ. (2002-c). Ensaio das propriedades geométricas dos agregados, Parte 9: Determinação do teor de finos - Ensaio do azul de metileno - NP EN 933-9: 2002. Lisboa

- IPQ. (2003). Ensaios das propriedades mecânicas e físicas em agregados, Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água - NP EN 1097-6:2003. Lisboa
- Lastra-González, P., Calzada-Pérez, M., Castro-Fresno, D., Vega-Zamanillo, Á., e Indacoechea-Vega, I. (2017). Porous asphalt mixture with alternative aggregates and crumb-rubber modified binder at reduced temperature. *Construction and Building Materials*, 150, 260–267. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.008>
- Lizárraga, J. M., Ramírez, A., Díaz, P., Marcobal, J. R., & Gallego, J. (2018). Short-term performance appraisal of half-warm mix asphalt mixtures containing high (70%) and total RAP contents (100%): From laboratory mix design to its full-scale implementation. *Construction and Building Materials*, 170, 433–445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.051>
- Lopes, Ó. M. M. (2009). *Misturas Betuminosas – Determinação das Características para o Cálculo dos Pavimentos* (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. Disponível em <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/57510/1/000142410.pdf>
- Lopes, R. S. C. (2015). *Fabrico e compactação de misturas betuminosas temperadas* (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. Disponível em https://run.unl.pt/bitstream/10362/16373/1/Lopes_2015.pdf
- Melotti, R., Santagata, E., Bassani, M., Salvo, M., & Rizzo, S. (2013). A preliminary investigation into the physical and chemical properties of biomass ashes used as aggregate fillers for bituminous mixtures. *Waste Management*, 33(9), 1906–1917. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.015>
- Micaelo, R. A. L. B. (2008). *Compactação de misturas betuminosas: ensaios de campo e modelação numérica* (Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto. Disponível em <http://hdl.handle.net/10216/60388>
- MIL-STD-620A:1966 - Test methods for bituminous paving materials
- Micaelo, R., Lopes, R., Neves, J., e Jesus, A. (2016). Requisitos para o fabrico e compactação de misturas betuminosas temperadas. In *8º Congresso Rodoviário Português* (pp. 1–10). Lisboa. Disponível em http://www.crp.pt/docs/A48S177-8_CRP_T5_010.pdf
- Neves, J. M. C. das. (2005). Betumes, ligantes e misturas betuminosas. In *Materiais de Construção - Guia de Utilização* (pp. 28–49). Disponível em https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779572139525/GuiaMateriais_Parte2.pdf
- Pasandín, A. R., & Pérez, I. (2017). Fatigue performance of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates and waste tire rubber. *Construction and Building Materials*, 157, 26–33. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.090>
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm Mix Asphalt: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 24, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>
- Salgueiro, A. M. S. (2011). *Controlo de qualidade de agregados finos de misturas betuminosas* (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Universidade de Aveiro, Aveiro. Disponível em <http://hdl.handle.net/10773/8821>

Santos, A. (2011). *Temperaturas de fabrico e compactação de misturas betuminosas com betumes modificados* (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. Disponível em <http://hdl.handle.net/10362/6007>

Silva, A. (2014). *Formulação de misturas betuminosas a quente : análise comparativa da aplicação de métodos empíricos e volumétricos* (Dissertação de mestrado em Engenharia Civil). Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra. Disponível em <http://hdl.handle.net/10400.26/14097>

Silva, H. (2005). *Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado-mastique* (Dissertação de doutoramento em Engenharia Civil). Universidade do Minho, Guimarães. Disponível em <http://hdl.handle.net/1822/5981>

Toraldo, E., & Mariani, E. (2014). Effects of polymer additives on bituminous mixtures. *Construction and Building Materials*, 65, 38–42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.108>

ANEXOS

Anexo I – Ficha técnica do filer



DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO (DECLARATION OF PERFORMANCE) N.º 01-FILER-EC



- Código de identificação único do produto-tipo: RC 480
(Unique identification code of the product type)
- Utilização ou utilizações previstas do produto de construção, tal como previsto pelo fabricante (intended use of the construction product as provided by the manufacturer): Betão para edifícios; Misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação; Argamassa para edifícios, estradas e outros trabalhos de engenharia civil. (buildings in the manufacture of precast concrete products in roads, For bituminous mixtures and surface treatments for roads, airfields and other trafficked areas; Mortar for buildings, roads and other civil engineering work.)
- Nome, designação comercial ou marca comercial registada e endereço de contacto do fabricante: (Name, trade name or registered trade mark and contact address of the manufacturer) EUROCÁLCIO – Calcários e Inertes, SA. Vale de Ourém - S. Mamede, Apartado 96, 2496-908 Fátima
- Sistema ou sistemas de avaliação e verificação da regularidade do desempenho do produto de construção tal como previsto no anexo V: (System or systems of assessment and verification of constancy of performance of construction product as set out in Annex V) Sistema 2+ (system 2+)
- No caso de uma declaração de desempenho relativa a um produto de construção abrangido por uma norma harmonizada: (In the case of a declaration of performance concerning a construction product covered by a harmonized standard): EN 12620:2002+A1:2008; EN 13139:2002 + EN 13139/AC:2004; EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004

Organismo notificado: A SGS ICS – Serviços Internacionais de Certificação, notificado com o n.º 1029, emitiu os certificados de conformidade do CPF nº: CCPF 1029-CPR-PT05/01472; CCPF 1029-CPR-PT06/01944; CCPF 1029-CPR-PT05/01473 (SGS ICS – Serviços Internacionais de Certificação, notified with n.º 1029, issued certificates of conformity of the CPF: CCPF 1029-CPR-PT05/01472; CCPF 1029-CPR-PT06/01944; CCPF 1029-CPR-PT05/01473)

6. Desempenho Declarado (declared performance)

Características essenciais (Essential Features)	Especificações técnicas harmonizadas (Harmonized technical specifications)			
	EN 12620:2002+A1:2008	EN 13043:2002 + EN 13043:2002/AC:2004	EN 13139:2002 + EN 13139/AC:2004	
Tipo de agregado (Type Aggregate)	Filer (Filer)	Filer (Filer)	Filer (Filer)	
Qualidade dos Fios – Azul metileno Fines Quality - Methylene blue	MB4 2g/kg (VI)	MB.10 (C)	NR	
REQUISITOS FÍSICOS (PHYSICAL REQUIREMENTS)	Massa Volumica das partículas (Particle Density)	2,69±0,05 Mg/m ³ (VD)	2,69±0,05 Mg/m ³ (VD)	2,69±0,05 Mg/m ³ (VD)
	Teor de Humidade (Water content)	NA	<0,5 (VL)	NA
	Vazios do filer seco compactado (Rigden) (Voids of dry compacted filer (Rigden))	NA	NPD	NA
	"Variação da temperatura anel e bola" (Delta ring and ball of filer aggregate)	NA	NPD	NA
	Solubilidade na Água (Water solubility)	NA	NPD	NA
	Susceptibilidade a Água (Water susceptibility)	NA	NPD	NA
	"Número de betume" Bitumen number of added filer	NA	NPD	NA
	Superfície Específica - Método Blaine Blaine specific surface	NA	NPD	NA
	Durabilidade- Reactividade Alcali-Silica Alkali-silica reactivity	0,01% (VI)	NA	0,01% (VI)
	Resistência ao gelo-dégelo Resistance to freezing and thawing	NA	NA	NA
	Estabilidade Volumétrica (Volum stability)	<0,075% (VL)	NA	NA
	REQUISITOS QUÍMICOS (CHEMICAL REQUIREMENTS)	Teor de Cloretos Chlorides	<0,001% (VL)	NA
Sulfatos solúveis em ácido Acid soluble sulfates		AS ₂ (C)	NA	AS ₂ (C)
Enxofre total (Total Sulfur)		<0,04% (VL)	NA	<0,04% (VL)
Teor de humus Constituents which alter the rate of setting and hardening of mortar		*mais claro (VD) Pale	NA	*mais claro (VD) Pale
Teor de Carbonato (Calcium carbonate content)		CO ₂	44±1% (VI)	NA
	CaCO ₃	97±3% (VI)		

GRANULOMETRIA DECLARADA (declared grading)

Abertura do Peneiro (mm) (Sieve)	Valor Declarado (Declared Value) (%)	Valor Mínimo (%) (Minimum Value)	Valor Máximo (%) (Maximum Value)
2	100	100	100
0,125	99	98	100
0,063	83,5	78,5	88,5

Descrição Petrográfica (Petrographic Description)

Calcário, com forma subprismático a subdiscoidal, muito anguloso a subanguloso, de superfície rugosa
(Limestone, subprismatic and subdiscoidal, Winkler)



DECLARAÇÃO DE DESEMPENHO
(DECLARATION OF PERFORMANCE)
N.º 01-FILER-EC



GLOSSÁRIO (glossary)

* mais claro (pale) – se a solução for mais clara que a solução padrão, o agregado não contém teor considerável de húmus. (The solution is lighter than the standard solution, the aggregate does not contain considerable content of humus)

NPD – Desempenho não determinado (No performance determined)

(C) – Categoria (category)

(VD) – Valor declarado (declared value)

(VL) – Valor limite aceitação/rejeição (Limit Value of acceptance/rejection)

(NA) – Não aplicável (no applicable)

(NR) – Não requerida (no required)

(VI) – Valor Inicial (Initial Value)

7. O desempenho do produto identificado acima está em conformidade com o conjunto de desempenhos declarados. A presente declaração de desempenho é emitida, em conformidade com o regulamento (UE) nº305/2011, sob a exclusiva responsabilidade do fabricante identificado acima. (The performance of the above-identified product complies with the set of declared performances. This declaration of performance is issued in accordance with Regulation (UE) No 305/2011, under the sole responsibility of the manufacturer identified above)

Assinado por e em nome do fabricante por:

Signed for and on behalf of the manufacturer by

Anabela Lopes Figueiredo

(nome e cargo)
(name and position)
name and position

São Mamede, 15 de Dezembro de 2016

(local e data de emissão)
(place and date of issue)

(assinatura)
(Signature)
signature

Anexo II – Suplementos aos testes de caracterização de agregados

➤ Análise Granulométrica

Peneiro (mm)	Brita 11/22			Brita 8/14			Brita 4/8			Pó de Calcário 0/4			Contaminante I			Contaminante II			
	M1 (g)	M2 (g)	M1-M2 (g)	M1 (g)	M2 (g)	M1-M2 (g)	M1 (g)	M2 (g)	M1-M2 (g)	M1 (g)	M2 (g)	M1-M2 (g)	M1 (g)	M2 (g)	M1-M2 (g)	M1 (g)	M2 (g)	M1-M2 (g)	
	Retido (g)	%	ass. Acum %	Retido (g)	%	ass. Acum %	Retido (g)	%	ass. Acum %	Retido (g)	%	ass. Acum %	Retido (g)	%	ass. Acum %	Retido (g)	%	ass. Acum %	
2500	2494,7	5,3		2000	1992,3	7,7	525	520,2	4,8	300	270,4	29,6	1664,7	1032,9	631,8	222,0	52,9	169,1	
31,5	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	
16	1746,4	69,86	30,14	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	
8	741,8	29,67	0,47	1778,9	88,95	11,06	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	0,0	0,00	100,00	1,5	0,68	99,32	
4	4,5	0,18	0,29	210,9	10,55	0,51	455,8	86,82	13,18	4,2	1,40	98,60	83,4	5,01	94,99	8,7	3,92	95,41	
2	0,2	0,01	0,28	0,0	0,00	0,51	61,9	11,79	1,39	63,2	21,07	77,53	110,8	6,66	88,33	10,7	4,82	90,59	
1	0,2	0,01	0,28	0,2	0,01	0,50	0,4	0,08	1,31	76,3	25,43	52,10	114,2	6,86	81,47	9,0	4,05	86,53	
0,5	0,2	0,01	0,27	0,3	0,02	0,48	0,3	0,06	1,26	56,3	18,77	33,33	112,4	6,75	74,72	5,6	2,52	84,01	
0,25	0,2	0,01	0,26	0,5	0,03	0,46	0,5	0,10	1,16	36,9	12,30	21,03	266,0	15,98	58,74	6,9	3,11	80,90	
0,125	0,3	0,01	0,25	0,5	0,03	0,43	0,6	0,11	1,05	22,2	7,40	13,63	240,9	14,47	44,27	7,0	3,15	77,75	
0,063	0,3	0,01	0,24	0,4	0,02	0,41	0,5	0,10	0,95	11,1	3,70	9,93	102,3	6,15	38,13	3,0	1,35	76,40	
P	0,2	0,01	0,23	0,3	0,02	0,40	0,1	0,02	0,93	0,1	0,03	9,90	2,1	0,13	38,00	0,4	0,18	76,22	
f	0,22%			0,40%			0,93%			9,90%			38,08%			76,35%			
Total	2494,3	99,77	0,23	1992	99,60	0,40	520,1	99,07	0,93	270,3	90,10	9,90	1032,1	62,00	38,00	52,8	23,78	76,22	
Erro	0,016%	OK		0,015%	OK		0,019%	OK		0,037%	OK		0,077%	OK		0,189%	OK		OK

➤ **Determinação da massa volúmica**

Método do cesto da rede metálica

	Simb.	Unid.	B 11/22	B 8/14
Cesto + agregado imerso e suspenso	M ₂	(g)	983,6	994,3
Recipiente vazio		(g)	322,1	303,1
Recipiente + agregado que sai da estufa	m ₄	(g)	1720,6	1682,2
Agregado seco em estufa	M ₁	(g)	1398,5	1379,1
Cesto imerso e suspenso	M ₃	(g)	100,9	123,9
Massa volúmica da água	ρ_w	(Mg/m ³)	0,9988	
Massa volúmica das partículas pré-secas	ρ_p	(Mg/m³)	2,71	2,71

Método do picnómetro

	Simb.	Unid.	B 4/8	Pó 0/4	Cont. I
Picnómetro vazio	M ₁	(g)	220,2	220,3	220,3
Picnómetro + agregado seco	M ₂	(g)	505,3	583,7	619,8
Picnómetro + agregado + água	M ₃	(g)	1074,3	1124,2	1146,9
Picnómetro + água		(g)	894,6	895,1	895,1
Volume do picnómetro	V	(g)	674,4	674,8	674,8
Massa volúmica da água	ρ_w	(Mg/m ³)	1		
Massa volúmica das partículas secas	ρ_p	(Mg/m³)	2,70	2,71	2,70

➤ **Determinação da baridade e do volume de vazios**

	Simb.	Unidade	B 11/22	B 8/14	B 4/8	Pó 0/4	Cont. I
Recipiente vazio	m ₁	(g)	104,5	104,5	104,5	25,1	104,5
Recipiente + Agregado	m ₂	(g)	1512	1487,6	1470,7	431,1	1631
Recipiente + água		(g)	1116,5	1116,5	1116,5	278,3	1116,5
Volume de água	V	(L)	1,012	1,012	1,012	0,253	1,012
Baridade*	ρ_b	(Mg/m³)	1,39	1,37	1,35	1,60	1,51
Massa Volúmica Real	ρ_p	(Mg/m ³)	2,71	2,71	2,70	2,71	2,70
Percentagem de vazios	v	%	48,64	49,53	50,09	40,74	44,23

➤ Equivalente de areia

Contaminante I

Temperatura	Material	Provete	h1	h2	SE	Diferença	OK?	SE médio
110 °C	Pó c/ 0%	Nº1	13,2	8,5	64,4	0,4	OK	64,6
		Nº2	12,8	8,3	64,8			
	Pó c/ 2%	Nº1	13,4	8,2	61,2	3,9	OK	63,2
		Nº2	12,9	8,4	65,1			
	Pó c/ 3%	Nº1	13,5	8,4	62,2	3,9	OK	60,2
		Nº2	13,9	8,1	58,3			
	Contaminante	Nº1	25,5	4,9	19,2	0,9	OK	18,8
		Nº2	25,1	4,6	18,3			
130 °C	Pó c/ 0%	Nº1	12,8	8,5	66,4	3,0	OK	64,9
		Nº2	13,1	8,3	63,4			
	Pó c/ 2%	Nº1	13,9	8,2	59,0	1,1	OK	58,5
		Nº2	14,5	8,4	57,9			
	Pó c/ 3%	Nº1	14,5	8,8	60,7	3,4	OK	59,0
		Nº2	14,5	8,3	57,2			
	Contaminante	Nº1	29,3	5,1	17,4	0,8	OK	17,0
		Nº2	32,0	5,3	16,6			
170 °C	Pó c/ 0%	Nº1	15,0	8,3	55,3	3,5	OK	53,6
		Nº2	16,6	8,6	51,8			
	Pó c/ 2%	Nº1	17,9	8,6	48,0	3,5	OK	49,8
		Nº2	16,3	8,4	51,5			
	Pó c/ 3%	Nº1	18,3	8,5	46,4	3,0	OK	47,9
		Nº2	17,2	8,5	49,4			
	Contaminante	Nº1	30,5	5,4	17,7	0,2	OK	17,8
		Nº2	30,2	5,4	17,9			

Contaminante II

Temperatura	Material	Provete	h1	h2	SE	Diferença	OK?	SE médio
110 °C	Pó c/ 0%	Nº1	13,2	8,5	64,4	0,4	OK	64,6
		Nº2	12,8	8,3	64,8			
	Pó c/ 2%	Nº1	15,2	8,7	57,2	1,7	OK	58,1
		Nº2	15,1	8,9	58,9			
	Pó c/ 3%	Nº1	20,1	8,5	42,3	2,4	OK	43,5
		Nº2	18,7	8,5	44,7			
	Contaminante	Nº1	29,3	2,8	9,6	0,8	OK	9,9
		Nº2	29,1	3	10,3			
130 °C	Pó c/ 0%	Nº1	12,8	8,5	66,4	3,0	OK	64,9
		Nº2	13,1	8,3	63,4			
	Pó c/ 2%	Nº1	15,0	8,5	56,7	0,8	OK	57,1
		Nº2	15,3	8,8	57,5			
	Pó c/ 3%	Nº1	20,1	8,5	42,3	3,7	OK	44,1
		Nº2	18,7	8,6	46,0			
	Contaminante	Nº1	29,2	2,9	9,9	1,0	OK	10,4
		Nº2	29,3	3,2	10,9			
170 °C	Pó c/ 0%	Nº1	15,0	8,3	55,3	3,5	OK	53,6
		Nº2	16,6	8,6	51,8			
	Pó c/ 2%	Nº1	18,9	8,6	45,5	1,2	OK	46,1
		Nº2	18,2	8,5	46,7			
	Pó c/ 3%	Nº1	21,1	8,9	42,2	3,4	OK	43,9
		Nº2	19,3	8,8	45,6			
	Contaminante	Nº1	27,6	4,6	16,7	0,7	OK	17,0
		Nº2	29,4	5,1	17,3			

➤ Azul de metileno

Contaminante I

Temperatura	Material	M1	V1	MB
110 °C	Pó c/ 0%	200	25	1,3
	Pó c/ 2%	200	30	1,5
	Pó c/ 3%	200	35	1,8
	Contaminante	200	135	6,8
130 °C	Pó c/ 0%	200	30	1,5
	Pó c/ 2%	200	30	1,5
	Pó c/ 3%	200	30	1,5
	Contaminante	200	150	7,5
170 °C	Pó c/ 0%	200	27	1,4
	Pó c/ 2%	200	30	1,5
	Pó c/ 3%	200	30	1,5
	Contaminante	200	140	7

Contaminante II

Temperatura	Material	M1	V1	MB
		g	ml	g/kg
110 °C	Pó c/ 0%	200	25	1,3
	Pó c/ 2%	200	50	2,5
	Pó c/ 3%	200	65	3,3
	Pó c/ 4%	200	75	3,8
	Contaminante	30	125	41,7
130 °C	Pó c/ 0%	200	30	1,5
	Pó c/ 2%	200	50	2,5
	Pó c/ 3%	200	60	3
	Pó c/ 4%	200	65	3,3
	Contaminante	30	110	36,7
170 °C	Pó c/ 0%	200	27	1,4
	Pó c/ 2%	200	45	2,3
	Pó c/ 3%	200	55	2,8
	Pó c/ 4%	200	60	3
	Contaminante	30	95	31,7

➤ Limites de Consistência

Contaminante I

Temperatura	Ensaio	Provete	m r.v.	m r.+ a.h.	m r.+ a.s.	Pancadas	a.h.	a.s.	peso água	w (%)	LL / LP	IP
110 °C	Limite Liquidez	L1	106,9	126,0	123,3	39	19,1	16,4	2,7	16%	18%	2%
		L2	101,5	123,2	119,9	28	21,7	18,4	3,3	18%		
		L3	106,3	127,7	124,3	21	21,4	18,0	3,4	19%		
		L4	104,0	131,4	126,5	10	27,4	22,5	4,9	22%		
	Limite Plasticidade	P1	69,7	71,9	71,6		2,2	1,9	0,3	16%	16%	
		P2	68,2	69,8	69,6		1,6	1,4	0,2	14%		
		P3	61,8	65,7	65,2		3,9	3,4	0,5	15%		
		P4	73,0	75,8	75,4		2,8	2,4	0,4	17%		
130 °C	Limite Liquidez	L1	106,9	128,6	125,6	36	21,7	18,7	3,0	16%	17%	3%
		L2	101,5	123,9	120,7	26	22,4	19,2	3,2	17%		
		L3	106,3	130,2	126,5	17	23,9	20,2	3,7	18%		
		L4	104,0	136,9	131,7	12	32,9	27,7	5,2	19%		
	Limite Plasticidade	P1	69,7	74,0	73,5		4,3	3,8	0,5	13%	14%	
		P2	68,2	72,2	71,7		4,0	3,5	0,5	14%		
		P3	61,8	65,2	64,8		3,4	3,0	0,4	13%		
		P4	73,0	76,3	75,9		3,3	2,9	0,4	14%		
170 °C	Limite Liquidez	L1	88,1	100,7	98,8	39	12,6	10,7	1,9	18%	19%	4%
		L2	67,7	80,8	78,7	27	13,1	11,0	2,1	19%		
		L3	73,1	84,9	82,9	17	11,8	9,8	2,0	20%		
		L4	69,9	83,4	81,0	12	13,5	11,1	2,4	22%		
	Limite Plasticidade	P1	69,7	75,8	75,0		6,1	5,3	0,8	15%	15%	
		P2	68,2	74,0	73,2		5,8	5,0	0,8	16%		
		P3	73,0	80,5	79,6		7,5	6,6	0,9	14%		
		P4	61,8	68,1	67,3		6,3	5,5	0,8	15%		

Contaminante II

Temperatura	Ensaio	Provete	m r.v.	m r.+ a.h.	m r.+ a.s.	Pancadas	a.h.	a.s.	peso água	w (%)	LL / LP	IP
110 °C	Limite Liquidez	L1	48,2	62,3	57,4	10	14,1	9,2	4,9	53%	50%	27%
		L2	48,5	60,0	56,0	18	11,5	7,5	4,0	53%		
		L3	50,6	61,4	57,8	29	10,8	7,2	3,6	50%		
		L4	46,4	58,9	54,9	39	12,5	8,5	4,0	47%		
	Limite Plasticidade	P1	27,2	39,4	37,0		12,2	9,8	2,4	24%	23%	
		P2	28,5	38,6	36,8		10,1	8,3	1,8	22%		
		P3	27,1	38,3	36,2		11,2	9,1	2,1	23%		
		P4	27,2	39,4	37,3		12,2	10,1	2,1	21%		
130 °C	Limite Liquidez	L1	48,2	61,8	57,3	36	13,6	9,1	4,5	49%	50%	27%
		L2	48,5	60,7	56,7	23	12,2	8,2	4,0	49%		
		L3	50,6	61,4	57,6	16	10,8	7,0	3,8	54%		
		L4	46,4	59,4	54,7	11	13,0	8,3	4,7	57%		
	Limite Plasticidade	P1	110,2	114,0	113,3		3,8	3,1	0,7	23%	23%	
		P2	108,5	111,9	111,3		3,4	2,8	0,6	21%		
		P3	115,4	119,2	118,5		3,8	3,1	0,7	23%		
		P4	110,6	115,7	114,7		5,1	4,1	1,0	24%		
170 °C	Limite Liquidez	L1	27,2	37,8	34,4	33	10,6	7,2	3,4	47%	48%	24%
		L2	28,5	38,9	35,5	24	10,4	7,0	3,4	49%		
		L3	27,1	38,2	34,5	19	11,1	7,4	3,7	50%		
		L4	27,2	38,3	34,5	12	11,1	7,3	3,8	52%		
	Limite Plasticidade	P1	109,4	115,1	114,0		5,7	4,6	1,1	24%	24%	
		P2	101,5	106,8	105,8		5,3	4,3	1,0	23%		
		P3	68,8	74,1	73,0		5,3	4,2	1,1	26%		
		P4	70,2	76,0	74,9		5,8	4,7	1,1	23%		

Anexo III – Suplemento à produção das misturas betuminosas

➤ Curva teórica da mistura

Peneiro (mm)	Brita 11/22		Brita 8/14		Brita 4/8		Pó de Pedra		Filler		Fuso Adotado		Curva de Mistura %	
	Gran.	Usado	Gran.	Usado	Gran.	Usado	Gran.	Usado	Gran.	Usado	Inferior	Superior		
	%	17%	%	20%	%	12%	%	48%	%	3%	%	%		
31,5	100,00	17,0	100,00	20,0	100,00	12,0	100,00	48,0	100,0	3,0	100	100	100,0	OK
20	82,21	14,0	100,00	20,0	100,00	12,0	100,00	48,0	100,0	3,0	90	100	97,0	OK
10	1,46	0,2	51,09	10,2	100,00	12,0	100,00	48,0	100,0	3,0	67	80	73,5	OK
4	0,29	0,0	0,51	0,1	13,18	1,6	98,60	47,3	100,0	3,0	42	57	52,1	OK
2	0,28	0,0	0,51	0,1	1,39	0,2	77,53	37,2	100,0	3,0	32	46	40,5	OK
0,5	0,27	0,0	0,48	0,1	1,26	0,2	33,33	16,0	100,0	3,0	18	29	19,3	OK
0,125	0,25	0,0	0,43	0,1	1,05	0,1	13,63	6,5	99,0	3,0	7	14	9,8	OK
0,063	0,24	0,0	0,41	0,1	0,95	0,1	9,93	4,8	83,5	2,5	5	9	7,5	OK

➤ Provede granulométrico

Peneiro (mm)	Provede Granulométrico			Massa Inicial
	Retido		Pass. Acum.	
	g	%	%	1140,0
31,5	0,0	0,00	100,0	OK
20	17,2	1,51	98,5	OK
10	321,4	28,19	70,3	OK
4	208,1	18,25	52,0	OK
2	137,1	12,03	40,0	OK
0,5	240,3	21,08	18,9	OK
0,125	103,6	9,09	9,9	OK
0,063	25,9	2,27	7,6	OK

Anexo IV – Baridades dos provetes betuminosos

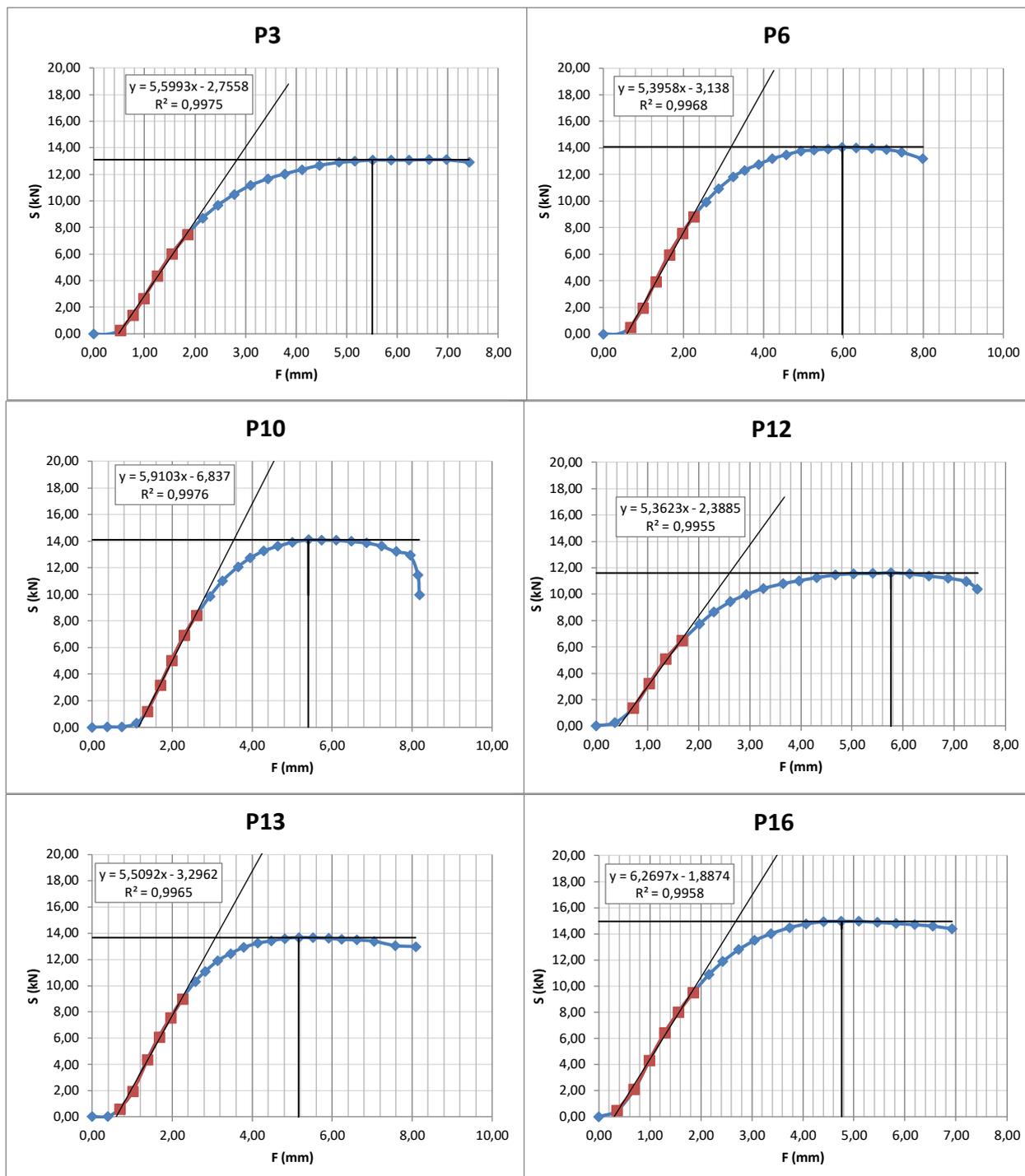
Símb.	Unid.	110°C												3%																								
		0%												2%												3%												
Altura média	h	62,4	62,8	63,2	63,1	62,9	62,9	63,2	62,7	61,6	62,3	63,7	63,6	63,1	63,3	61,8	63,8	62,4	63,6	63,4	63,5	63,5	63,2	63,2	62,4	62,6	62,6	63,4	63,1	63,1	63,2	63,5	64,2	63,5	63,7			
Diâmetro médio	d	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0				
Massa do provete seco	m _s	1196,5	1198,2	1196,0	1192,0	1196,9	1201,4	1196,3	1194,0	1196,0	1187,2	1195,1	1194,8	1196,4	1195,2	1195,4	1187,3	1198,8	1194,9	1194,7	1194,6	1195,2	1197,0	1196,3	1194,6	1189,8	1195,3	1194,1	1196,1	1194,6	1194,9	1192,1	1194,7	1197,5	1196,2	1195,5	1197,2	
Massa do provete imerso	m _i	697,6	699,6	694,5	694,8	696,6	701,3	696,6	695,5	697,6	696,9	699,6	694,3	695,0	693,4	692,9	696,7	696,1	697,6	696,6	694,1	693,1	694,0	697,3	692,5	695,0	697,5	697,4	695,9	690,8	692,1	690,6	692,4	693,6	688,6	694,3	691,6	
Massa do provete imerso	m _{i,30}	699,5	701,4	696,8	696,8	698,5	703,4	701,2	698,6	698,9	698,4	700,9	694,7	697,3	696,5	697,0	698,5	697,8	699,1	696,3	696,6	695,6	696,7	699,9	695,8	697,6	700,5	700,1	698,7	694,7	695,4	695,7	696,4	697,0	693,1	697,2	694,9	
Massa do provete saturado	m _{s,30}	1199,3	1201,3	1200,0	1196,7	1199,5	1203,7	1199,4	1198,5	1198,9	1189,3	1197,6	1200,0	1199,9	1199,1	1200,1	1189,4	1203,2	1197,4	1199,3	1198,1	1199,0	1200,3	1198,8	1198,3	1192,8	1198,4	1198,2	1199,7	1200,3	1199,4	1197,7	1198,9	1203,2	1204,0	1200,1	1201,5	
Densidade água a 21°C	ρ _a	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	
Método A	ρ _{prov}	2993,7	2998,6	2980,3	2992,9	2987,8	2999,1	2990,6	2995,1	2991,1	2996,8	2986,3	2981,6	2987,3	2977,3	2974,4	2985,2	2998,2	2996,3	2992,3	2995,9	2997,2	2992,8	2992,8	2987,4	2990,0	2986,2	2995,6	2987,2	2992,0	2997,6	2993,9	2997,9	2992,1	2980,7	2980,7	2986,4	
Método B	ρ _{prov,30}	2989,4	2992,3	2973,3	2979,9	2984,5	2996,8	2986,7	2983,9	2987,5	2981,3	2980,5	2980,0	2975,9	2973,5	2973,6	2982,4	2993,4	2993,4	2990,5	2987,5	2986,7	2993,3	2987,8	2987,4	2986,0	2982,6	2991,6	2986,1	2992,8	2985,6	2987,0	2986,5	2987,0	2986,2	2986,9	2985,7	2985,7
Método D	ρ _{prov,d}	2946,6	2935,0	2915,9	2911,8	2921,3	2937,5	2927,6	2912,0	2934,4	2958,6	2947,6	2954,2	2902,1	2918,0	2911,1	2951,2	2999,5	2948,5	2989,3	2905,9	2909,4	2906,9	2935,0	2913,2	2929,7	2944,2	2934,4	2938,3	2905,9	2917,5	2912,0	2913,4	2907,9	2980,2	2984,0	2980,0	2980,0

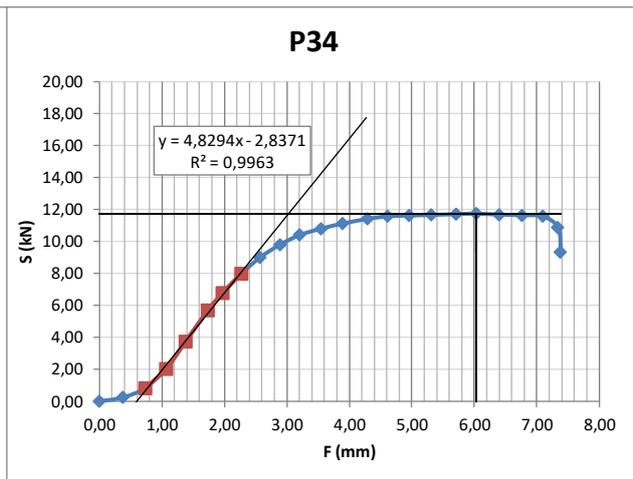
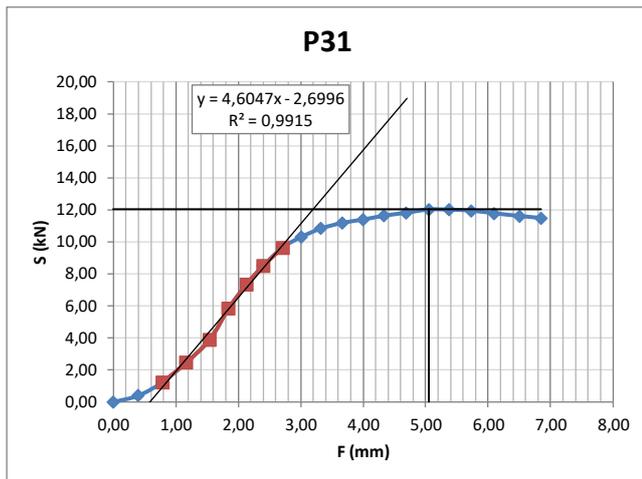
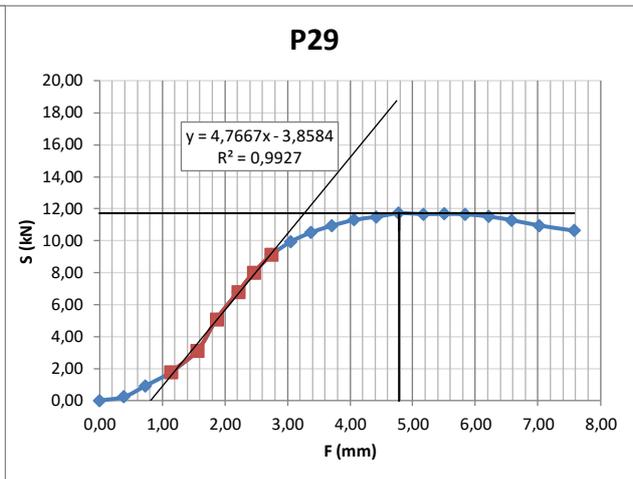
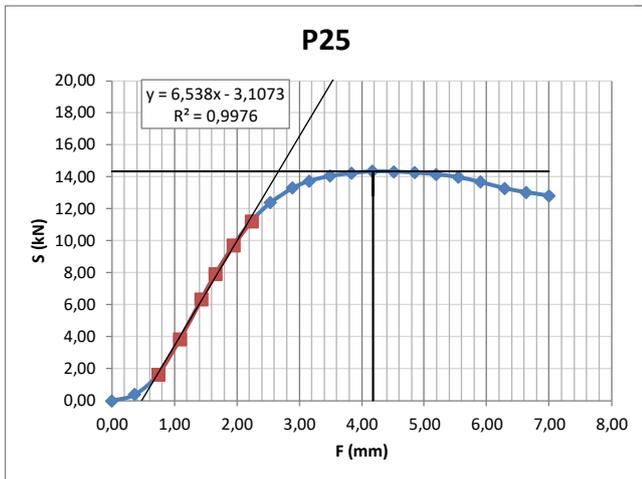
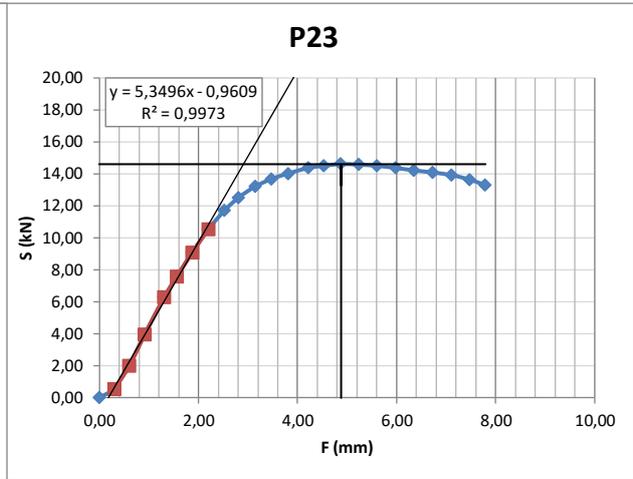
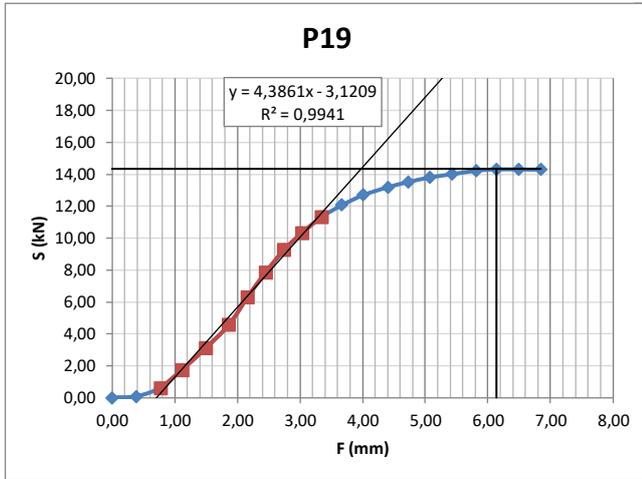
Símb.	Unid.	130°C												3%																									
		0%												2%												3%													
Altura média	h	62,1	63,7	63,5	62,9	63,4	62,9	63,6	62,5	63,1	65,2	62,6	62,7	62,3	62,9	63,0	62,9	62,8	63,9	62,6	63,5	63,2	62,9	62,2	62,2	61,8	62,2	61,8	62,2	61,6	61,9	60,8	61,8	62,5	61,6	61,4	62,0		
Diâmetro médio	d	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	
Massa do provete seco	m _s	1187,8	1195,5	1195,2	1195,1	1195,1	1191,9	1195,0	1195,4	1195,4	1196,8	1193,8	1195,3	1189,0	1189,1	1194,7	1195,2	1196,3	1194,9	1193,1	1194,8	1194,0	1195,3	1195,0	1192,4	1189,6	1194,1	1193,0	1192,0	1189,8	1194,1	1190,8	1193,2	1192,0	1195,5	1190,3	1193,6	1193,6	
Massa do provete imerso	m _i	696,2	692,3	694,9	695,2	693,4	695,6	693,5	697,3	696,3	695,7	696,9	696,5	691,2	689,8	695,2	695,7	693,9	696,3	695,1	687,9	695,4	693,5	695,1	693,0	694,4	699,2	700,6	696,7	698,0	702,3	704,1	700,0	698,7	701,7	702,0	698,1		
Massa do provete imerso	m _{i,30}	698,7	696,3	698,2	698,4	696,9	698,1	696,8	699,7	698,6	699,0	699,9	694,3	692,5	698,4	698,9	696,7	699,4	693,1	699,0	696,8	698,2	696,8	696,9	696,9	696,9	696,9	701,7	703,1	699,5	700,2	704,5	705,9	702,1	701,2	704,2	703,8	700,7	
Massa do provete saturado	m _{s,30}	1193,7	1201,0	1199,5	1198,7	1201,3	1195,5	1201,0	1198,0	1200,1	1207,7	1197,9	1199,6	1193,1	1192,6	1197,3	1198,7	1201,3	1198,5	1194,4	1201,5	1197,9	1200,0	1200,1	1196,5	1191,6	1195,9	1195,0	1194,1	1191,8	1195,7	1193,9	1194,4	1193,8	1197,4	1191,5	1195,4	1195,4	
Densidade água a 21°C	ρ _a	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1
Método A	ρ _{prov}	2411,6	2371,3	2384,4	2366,1	2377,6	2397,0	2378,3	2395,4	2383,9	2368,1	2392,6	2391,8	2380,0	2377,0	2387,2	2388,2	2371,9	2392,0	2396,3	2352,6	2390,2	2372,8	2385,9	2385,1	2397,7	2408,2	2418,2	2402,0	2414,7	2423,4	2442,0	2414,7	2411,8	2416,4	2433,0	2404,9	2404,9	
Método B	ρ _{prov,30}	2422,4	2369,6	2381,3	2378,0	2368,4	2410,8	2368,2	2391,6	2383,0	2328,8	2390,9	2386,5	2398,8	2385,4	2391,5	2371,0	2371,2	2389,6	2404,1	2343,5	2391,1	2374,3	2379,0	2386,1	2400,5	2414,1	2422,9	2413,7	2425,4	2428,0	2448,2	2422,2	2426,4	2420,8	2446,6	2415,5	2415,5	
Método D	ρ _{prov,d}	2340,8	2295,9	2302,5	2325,2	2307,8	2320,8	2301,2	2340,7	2318,4	2268,1	2333,8	2332,1	2335,6	2314,5	2319,8	2325,4	2295,6	2324,8	2330,6	2387,4	2336,1	2302,7	2314,0	2330,0	2342,4	2350,4	2364,4	2345,3	2365,8	2361,8	2397,9	2363,8	2335,0	2374,1	2374,4	2351,1	2351,1	

Símb.	Unid.	170°C												3%																										
		0%												2%												3%														
Altura média	h	60,0	61,6	61,3	61,5	61,7	61,5	61,6	61,5	61,7	60,8	61,5	62,0	61,0	61,9	66,9	61,9	62,0	62,6	60,3	61,1	61,2	60,8	61,1	61,0	60,9	60,9	61,3	63,3	60,4	61,6	61,6	61,2	61,0	61,6	61,1	60,6	61,3		
Diâmetro médio	d	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	102,0	
Massa do provete seco	m _s	1175,3	1193,4	1190,7	1193,6	1193,6	1193,6	1193,6	1193,6	1193,6	1194,0	1188,6	1196,1	1189,0	1189,0	1189,0	1195,3	1195,3	1193,6	1182,6	1193,0	1191,6	1194,7	1189,6	1191,8	1181,9	1192,0	1192,0	1190,5	1194,6	1192,2	1189,4	1191,7	1189,6	1193,3	1156,3	1189,0	1192,7	1192,7	
Massa do provete imerso	m _i	697,4	703,0	703,9	705,0	702,1	704,4	704,2	703,6	703,0	702,2	704,6	702,4	701,8	701,9	750,8	702,2	702,0	699,5	699,7	704,8	701,4	707,3	702,6	702,8	696,2	703,1	702,9	690,5	706,9	698,0	702,9	702,3	702,7	670,4	705,1	703,4	703,4		
Massa do provete imerso	m _{i,30}	698,0	704,0	702,7	706,4	703,9	705,6	705,5	704,4	704,6	702,9	703,4	703,3	703,3	703,8	753,0	703,8	703,3	701,1	706,3	703,6	708,4	703,9	704,3	697,2	704,1	704,1	704,1	691,8	707,9	698,9	703,9	703,3	703,9	671,7	705,8	704,7	704,7		
Massa do provete saturado	m _{s,30}	1175,9	1194,8	1191,6	1194,6	1195,0	1196,7	1194,6	1194,3	1195,2	1189,5	1197,3	1195,2	1190,5	1197,3	1238,0	1197,3	1195,7	1199,1	1183,7	1194,2	1193,5	1195,6	1190,9	1193,2	1183,2	1193,0	1193,0	1191,7	1196,3	1193,3	1190,6	1192,7	1190,7	1194,6	1157,9	1190,0	1193,9		
Densidade água a 21°C	ρ _a	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	998,1	
Método A	ρ _{prov}	2454,6	2428,9	2431,3	2438,3	2429,5	2442,1	2435,4	2432,2	2427,2	2437,2	2439,0	2428,9	2444,9	2435,8	2418,0	2400,1	2419,4	2425,4	2405,9	2444,3	2439,0	2426,2	2446,5	2438,1	2428,8	2435,2	2439,9	2465,9	2465,9	2465,9	2465,9	2465,9	2465,9	2465,9	2465,9	2465,9	2465,9	2465,9	2465,9
Método B	ρ _{prov,30}	2498,9	2436,7	2441,7	2437,0	2432,6	2441,7	2432,6	2433,2	2435,2	2427,4	2444,9	2444,9	2445,0	2451,0	2417,3	2390,1	2401,3	2405,9	2470,8	2443,8	2432,6	2452,2	2451,8	2438,8	2428,8	2435,2													

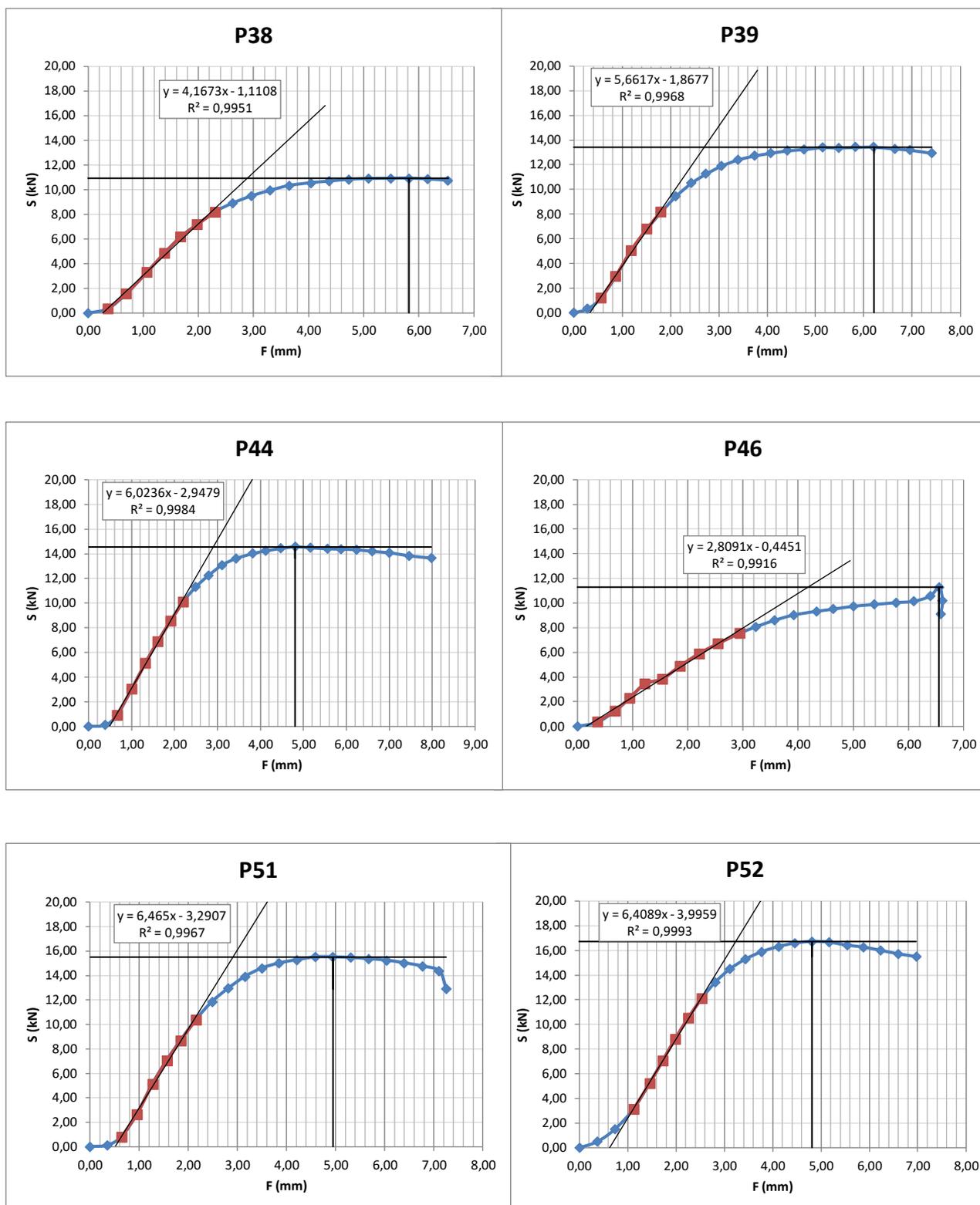
Anexo V – Gráficos da análise ao método de Marshall

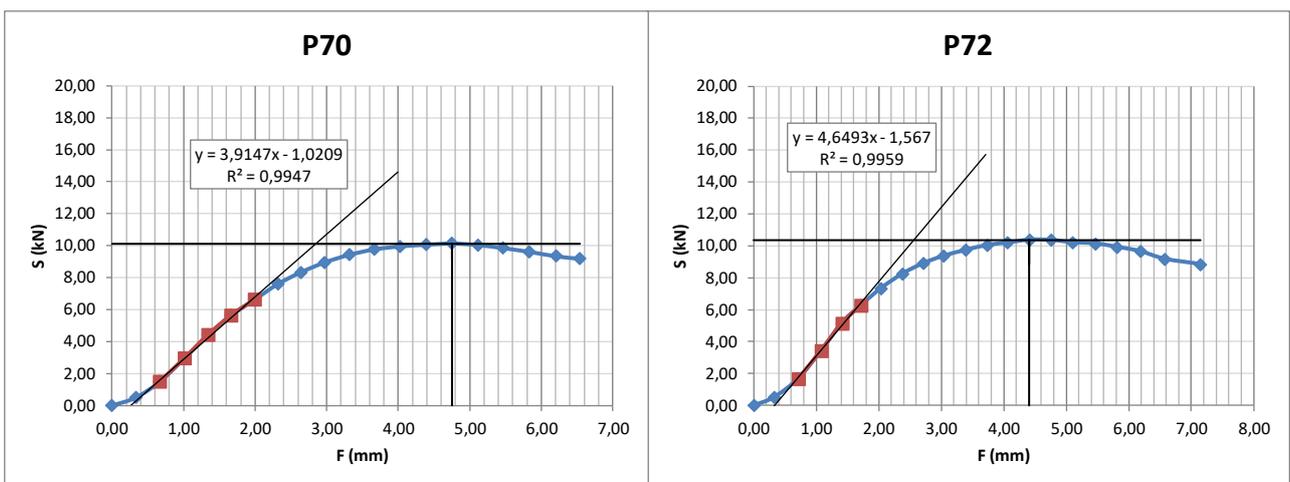
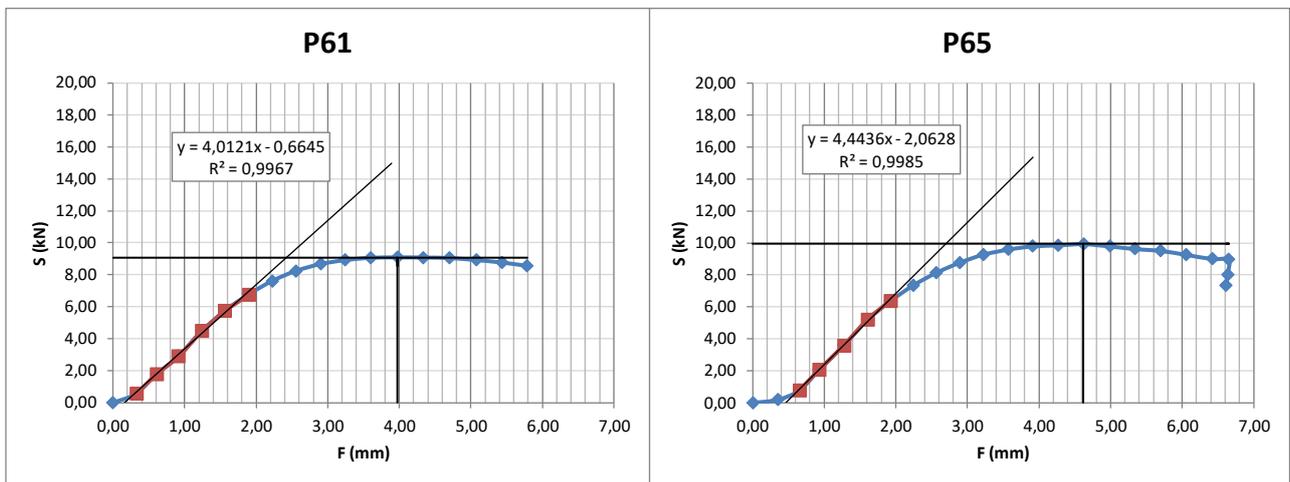
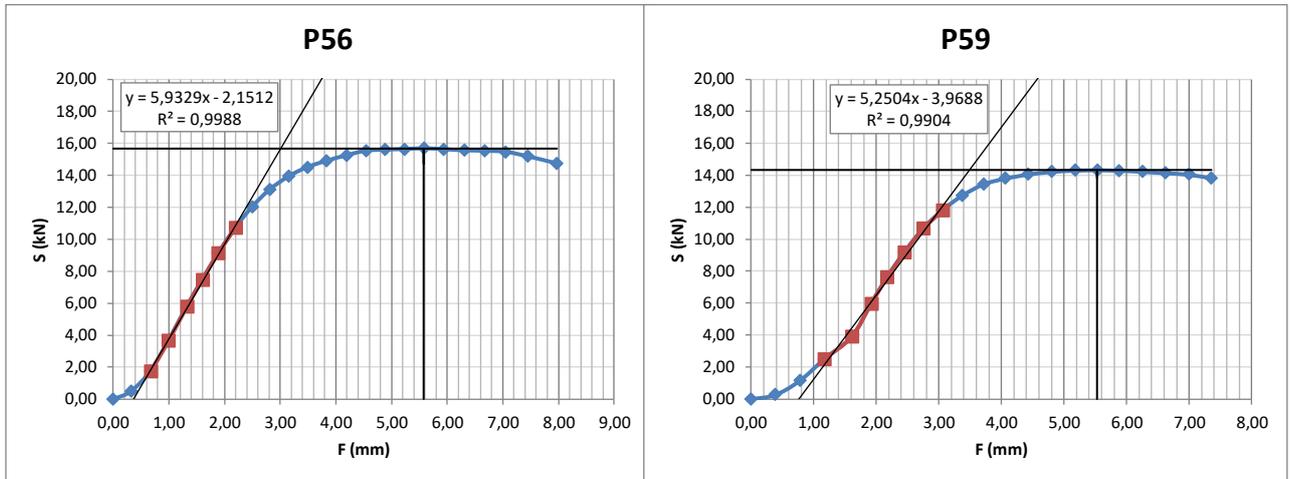
Representação gráfica da deformação (F) em função da carga a que o provete estava sujeito (S), onde P3, P6, P10 e P12 (0 % de contaminante a 110 °C); P13, P16, P19 e P23 (2 % de contaminante a 110 °C) e P25, P29, P31 e P34 (3 % de contaminante a 110 °C).





Representação gráfica da deformação (F) em função da carga a que o provete estava sujeito (S), onde P38, P39, P44 e P46 (0 % de contaminante a 130 °C); P51, P52, P56 e P59 (2 % de contaminante a 130 °C) e P61, P65, P70 e P72 (3 % de contaminante a 130 °C).





Representação gráfica da deformação (F) em função da carga a que o provete estava sujeito (S), onde P73, P76, P80 e P84 (0 % de contaminante a 170 °C); P87, P91, P95 e P96 (2 % de contaminante a 170 °C) e P97, P100, P104 e P106 (3 % de contaminante a 170 °C).

