



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Caracterização física e química de fíleres para fabrico de misturas betuminosas

Bruno Alberto Barroso dos Santos



Instituto Superior de Engenharia do Porto

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

Caracterização física e química de fíleres para fabrico de misturas betuminosas

Bruno Alberto Barroso dos Santos

1021073

*Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizada sob a orientação do Doutor José Augusto Fernandes, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP e a coorientação do Eng.º Adriano Teixeira, Professor Adjunto Convidado do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*

Júri

Presidente

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José Augusto de Abreu Peixoto Fernandes

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Doutor José António Ganilho Lopes Velho

Professor Associado com Agregação, Universidade de Aveiro

Mestre Adriano Manuel da Silva Teixeira

Professor Adjunto Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção Civil e Obras Públicas do Norte (CICCOPN)

A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente (MEGG)** foi defendida em prova pública, pelo Licenciado Bruno Alberto Barroso dos Santos, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 08 de Novembro de 2013 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **15 (quinze) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta.

O Director do MEGG|ISEP

*"É no segredo da educação que assenta o grande segredo do
aperfeiçoamento da sociedade."*

(Emanuel Kant)

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado marca o fim de uma importante etapa na minha vida, e a sua realização só foi possível graças à colaboração e ao contributo, de forma direta ou indireta, de várias pessoas e instituições, às quais gostaria de endereçar algumas palavras de agradecimento e profundo reconhecimento, em particular:

Ao Professor Doutor José Augusto Fernandes, por ter aceite o desafio de ser o meu orientador neste trabalho, por toda a disponibilidade e apoio incessante, pela partilha constante da sua experiência e conhecimento, assim como conselhos deveras importantes.

Ao Engenheiro Adriano Teixeira pela coorientação deste trabalho e disponibilidade ao longo da realização do mesmo.

Ao CICCOPN, na pessoa do Engenheiro Adriano Teixeira, todo o apoio prestado pela sua equipa técnica, na realização dos ensaios, assim como na sua análise e compreensão. Agradeço também, todas as condições de trabalho proporcionadas e constante disponibilidade, esclarecimento, e acolhimento dedicados durante o período de realização do estudo.

Ao Diretor do Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (LGMC), do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP, Prof. Doutor José Fernandes, pela facilidade de utilização dos materiais e dos equipamentos necessários para a realização dos ensaios. Agradeço, também, aos técnicos pela ajuda preciosa, em especial ao Eng.º Rogério Pinheiro pela forma amigável e prestável na grande colaboração da parte experimental deste trabalho.

À Diretora do Laboratório do Departamento de Engenharia Química do ISEP, Prof.ª Doutora Maria Teresa Sena Esteves, pela facilidade de utilização dos materiais e dos equipamentos necessários para a realização dos ensaios de caracterização química. Agradeço, também, aos técnicos pela ajuda preciosa, em especial ao Doutor José Tomás de Albergaria pela forma prestável na grande colaboração da parte experimental deste trabalho.

Aos fornecedores de amostras de fíler Amândio Carvalho, MonteAdriano, Lusical e Secil, sem a sua colaboração não seria possível a obtenção de um vasto leque de objetos de estudo.

Aos amigos Ricardo Morais, Inês Queirós, Inês Madail, André Martins, que me acompanharam ao longo de todos estes anos e que juntos ultrapassamos os mais variados obstáculos que foram surgindo neste percurso académico, sempre com a sagacidade, astúcia e sacrifícios necessários.

À Lara, pela sua infindável paciência, compreensão, carinho, e pelo seu constante apelo ao otimismo e capacidade invulgar de persuasão sobre as minhas capacidades.

Aos meus irmãos, pelas palavras de estímulo e de preocupação constantes manifestadas em todos os momentos.

Aos meus pais, por me terem proporcionado a hipótese de frequentar o ensino superior, de me mostrarem o caminho a seguir, ensinar os princípios fundamentais de educação, e terem-me ajudado a formar como Homem. Recordando uma passagem do teu livro favorito papá, “O verdadeiro Homem mede a sua força, quando se defronta com o obstáculo”. (Antoine de Saint-Exupéry).

Obrigado!

Palavras-chave

Fíler, misturas betuminosas, pavimentos rodoviários, caracterização físico-química.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo contribuir para uma melhor percepção da influência das propriedades físicas e químicas do fíler, utilizado na composição das misturas betuminosas, garantindo desta forma que o seu comportamento seja o mais adequado. O fíler desempenha um papel de relevo no comportamento das misturas, contribuindo para os preenchimentos dos vazios entre os agregados grossos, rigidificando as misturas betuminosas e alterando as propriedades dos ligantes.

No presente trabalho é feita uma breve referência aos diferentes tipos de pavimento e degradações, características e métodos de formulação das misturas betuminosas, bem como os métodos e critérios de caracterização dos fíleres.

Desta forma, como base do estudo, e de acordo com a norma NP EN 13043, realizaram-se diversos ensaios, que permitiram uma caracterização dos requisitos geométricos, físicos, químicos, e para a regularidade de produção do fíler, nos seguintes tipos de fíler: A) Fíler calcário RC 480, B) Fíler calcário RC 590, C) Fíler recuperado pó calcário, D) Fíler recuperado pó granítico, E) Fíler calcário C100, F) Fíler recuperado de pó granítico, G) Cal hidratada e H) Cal hidráulica.

Por último, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos fíleres, retirando as conclusões sobre os méritos relativos de cada uma das amostras analisadas. Propõe-se ainda, uma metodologia de análise e são definidas linhas para a prossecução dos estudos realizados.

Para os fíleres estudados, a determinação do índice de vazios do fíler seco compactado, revelou ser o ensaio que melhor os caracteriza, apresentando inclusive uma forte correlação com o número do betume e variação da temperatura de amolecimento anel e bola, permitindo caracterizar o fíler quando ao seu poder rigidificante. Porém, há uma necessidade de alargar o leque de estudo, diversificando a origem dos fíleres em termos petrográficos e geográficos.

Keywords

Filler, bituminous mixtures, physical chemical characterization, road pavements

Abstract

This work aims to contribute to a better perception of the influence of physical and chemical properties of the filler, used in the composition of bituminous mixtures, ensuring that their behavior is the more appropriate. The filler performs an important role in the behavior of mixtures, contributing to fill the voids between the coarse aggregates, bituminous mixtures get tough and changing the properties of the ligands.

In the present work is made a short reference to the different types of road surface and degradations, characteristics and methods of formulation of bituminous mixtures, as well as the methods and criteria for characterization of fillers.

In this way, and in accordance with the standard NP EN 13043, were performed several tests that allowed a characterization of the geometrical requirements, physical, chemical, and regularity of production filler, the following types of filler: A) Limestone filler RC 480, B) Limestone filler RC 590, C) Recovered limestone filler, D) Recovered granite filler, E) Limestone filler C100, F) Recovered granite filler, G) hydrated lime and H) hydraulic lime.

Finally we present and discuss the results obtained in the laboratory characterization of fillers, withdrawing conclusions on the relative merits of each one of the analyzed samples, propose an analysis methodology and lines are defined for further studies.

For the fillers studied, the determination of the voids of dry compacted filler, proved to be the best test that characterizes them, presenting a strong correlation with the number of bitumen and temperature variation of ring and ball method, allowing to characterize in respect to the rigid power. However is needed to extend the range of the studies, diversifying the source of petrographic and geographic fillers.

Índice

1. Introdução	- 3 -
1.1. Enquadramento Geral.....	- 3 -
1.2. Objetivos e metodologias	- 4 -
1.3. Estrutura do trabalho.....	- 5 -
2. Estado da Arte	- 9 -
2.1. Pavimentos Rodoviários.....	- 9 -
2.1.1. Pavimentos flexíveis.....	- 10 -
2.1.2. Pavimentos Rígidos	- 12 -
2.1.3. Pavimentos Semi-rígidos	- 14 -
2.2. Tipos de Degradações	- 14 -
2.2.1. Fendilhamento	- 17 -
2.2.2. Deformações	- 19 -
2.2.3. Arranque de materiais	- 20 -
2.2.4. Movimento de materiais.....	- 21 -
2.3. Características das misturas betuminosas.....	- 22 -
2.3.1. Estabilidade	- 23 -
2.3.2. Durabilidade	- 24 -
2.3.3. Flexibilidade	- 24 -
2.3.4. Resistência à fadiga	- 24 -
2.3.5. Aderência	- 25 -
2.3.6. Impermeabilidade	- 25 -
2.3.7. Trabalhabilidade.....	- 25 -
2.3.8. Rigidez	- 25 -
2.3.9. Resistência às deformações permanentes.....	- 26 -
2.4. Principais constituintes das misturas betuminosas	- 26 -
2.4.1. Agregados.....	- 26 -
2.4.1.1. Requisitos dos agregados para misturas betuminosas e revestimentos superficiais... -	29 -
2.4.1.2. Requisitos dos fíleres para misturas betuminosas e revestimentos superficiais.....	- 31 -
2.4.2. Ligantes betuminosos	- 35 -
2.4.2.1. Betumes duros.....	- 36 -
2.4.2.2. Betumes de pavimentação	- 36 -
2.4.2.3. Betumes modificados	- 36 -
2.4.2.4. Emulsões betuminosas	- 37 -
2.4.3. Ligantes Hidráulicos	- 37 -
2.4.3.1. Cimento.....	- 37 -
2.4.3.2. Cal hidráulica.....	- 38 -

2.4.4.	Ligantes aéreos	- 38 -
2.4.4.1.	Cal hidratada e Cal viva	- 38 -
2.5.	Métodos de formulação de misturas betuminosas.....	- 39 -
2.6.	Marcação CE	- 43 -
2.6.1.	Requisitos da Norma Portuguesa EN 13108-1.....	- 44 -
2.6.2.	Abordagens em Portugal	- 45 -
3.	Caracterização física e química dos fíleres.....	- 49 -
3.1.	Fíleres	- 49 -
3.2.	Caracterização das amostras de fíler.....	- 51 -
3.3.	Avaliação das características físico químicas das amostras	- 54 -
3.3.1.	Ensaio para determinação da granulometria do fíler (peneiração por jato de ar).....	- 54 -
3.3.2.	Ensaio para determinação da qualidade dos finos – Azul de Metileno.....	- 56 -
3.3.3.	Ensaio para determinação da massa volúmica do fíler	- 58 -
3.3.4.	Ensaio para determinação do índice de vazios do fíler seco compactado	- 59 -
3.3.5.	Ensaio para determinação da baridade do fíler em querosene.....	- 60 -
3.3.6.	Ensaio para determinação da variação de amolecimento anel bola	- 61 -
3.3.7.	Ensaio para determinação da superfície específica (Método Blaine).....	- 62 -
3.3.8.	Ensaio para determinação da viscosidade aparente (Número do betume)	- 62 -
3.3.9.	Ensaio de análise química por espectrometria de fluorescência de Raios X.....	- 63 -
3.3.10.	Ensaio para determinação da solubilidade em água	- 65 -
3.3.11.	Ensaio para determinação da suscetibilidade à água	- 67 -
3.3.12.	Ensaio para determinação do conteúdo em hidróxido de cálcio	- 69 -
3.3.13.	Ensaio para determinação do conteúdo em carbonato de cálcio	- 70 -
4.	Análise e discussão de resultados	- 75 -
4.1.	Determinação da granulometria do fíler (peneiração por jato de ar).....	- 75 -
4.2.	Determinação da qualidade dos finos – Ensaio Azul de Metileno	- 76 -
4.3.	Determinação da massa volúmica do fíler	- 78 -
4.4.	Determinação do índice de vazios do fíler seco compactado	- 78 -
4.5.	Determinação da massa volúmica aparente em querosene	- 80 -
4.6.	Determinação da variação da Temperatura de amolecimento Anel e Bola.....	- 81 -
4.7.	Determinação da viscosidade aparente (Número do betume)	- 82 -
4.8.	Análise química por espectrometria de fluorescência de Raios X.....	- 83 -
4.9.	Determinação da solubilidade em água	- 85 -
4.10.	Determinação da suscetibilidade à água.....	- 86 -
5.	Conclusões	- 91 -
6.	Bibliografia	- 95 -

Índice de Figuras

Figura 1 Pavimento rodoviário: constituição e ações (Santos <i>et al</i> , 2011).....	- 9 -
Figura 2 Pavimento flexível: constituição.....	- 11 -
Figura 3 Pavimento rígido: constituição.....	- 12 -
Figura 4 Pavimentos rígidos: diferentes tipos (Santos <i>et al</i> , 2011)	- 13 -
Figura 5 Pavimento semi-rígido: constituição	- 14 -
Figura 6 Fendas longitudinais: exemplos	- 17 -
Figura 7 Fenda transversal: exemplo.....	- 18 -
Figura 8 Fendilhamento tipo pele de crocodilo: exemplos	- 18 -
Figura 9 Deformações: exemplos (Estradas de Portugal, 2008).....	- 19 -
Figura 10 Arranque de materiais: diferentes tipos (Estradas de Portugal, 2008)	- 20 -
Figura 11 Movimento de materiais: exemplo (Estradas de Portugal, 2008)	- 21 -
Figura 12 Central de misturas betuminosas (www.fazvia.com, 2013).....	- 49 -
Figura 13 Amostras de fíler	- 51 -
Figura 14 Carta Geológica de Portugal (LNEG, 2013)	- 52 -
Figura 15 Localização das amostras de fíler (www.almariada.blogspot.pt, 2013).....	- 54 -
Figura 16 Tecnologia AS 200 JET (www.retsch.pt)	- 55 -
Figura 17 Equipamento de peneiração por jato de ar.....	- 55 -
Figura 18 Teste da mancha.....	- 56 -
Figura 19 Equipamento de ensaio azul de metileno	- 57 -
Figura 20 Massa volúmica	- 58 -
Figura 21 Equipamento compactador	- 59 -
Figura 22 Provetes em processo de sedimentação	- 60 -
Figura 23 Aquecimento dos anéis	- 61 -
Figura 24 Pistão e cápsula cilíndrica.....	- 62 -
Figura 25 Secagem das amostras em estufa Peneiração das amostras	- 64 -
Figura 26 Copo de amostra com um círculo de filme de polipropileno	- 64 -
Figura 27 Compactação da amostra Amostras fechadas e identificadas	- 64 -
Figura 28 Espectrómetro de Fluorescência de Raio X (Niton XL3t).....	- 65 -
Figura 29 Pesagem das amostras Colocação das amostras no balão Erlenmeyer.....	- 65 -
Figura 30 Fíleres misturas com água Agitação mecânica das amostras de fíler.....	- 66 -
Figura 31 Processo de filtragem Amostra após ser submetida a processo de filtragem.....	- 66 -
Figura 32 Processo de secagem do papel de filtro Amostras após processo de secagem na estufa	- 66 -
Figura 33 Betume 50/70 em banho de água Mistura de betume e fíler	- 67 -
Figura 34 Mástique betuminoso	- 68 -
Figura 35 Preparação da solução.....	- 69 -
Figura 36 Esquematização do ensaio (EN 196-2:2005)	- 71 -

Índice de Tabelas

Tabela 1 Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade.....	10 -
Tabela 2 Pavimento flexível: camadas constituintes e suas características (Santos, 2009)	11 -
Tabela 3 Pavimento rígido: camadas constituintes e suas características (Santos, 2009).....	13 -
Tabela 4 Famílias e tipo de degradações (Miranda <i>et al</i> , 1999)	15 -
Tabela 5 Classificação das relações entre as degradações e os fatores de degradação (Santos <i>et al</i> , 2011)-	16 -
-	
Tabela 6 Designação das misturas betuminosas (NP EN 13108-1:2011)	23 -
Tabela 7 Síntese dos requisitos dos agregados para misturas betuminosas (NP EN 13043:2004).....	30 -
Tabela 8 Requisitos da granulometria para o fíler comercial (adaptado de NP EN 13043:2004).....	31 -
Tabela 9 Categorias para os valores máximos de azul de metileno (adaptado de NP EN 13043:2004)	31 -
Tabela 10 Categorias para os valores de vazios do fíler seco compactado (adaptado de NP EN 13043:2004) ..-	32 -
Tabela 11 Categorias para a variação de amolecimento temperatura anel e bola	32 -
Tabela 12 Categorias para o número de betume do fíler adicionado (adaptado de NP EN 13043:2004) ...	33 -
Tabela 13 Categorias para valores máximos da solubilidade em água (adaptado de NP EN 13043:2004) .-	34 -
Tabela 14 Categorias para valores mínimos do teor em carbonato de cálcio	34 -
Tabela 15 Categorias para valores mínimos do teor em hidróxido de cálcio (adaptado de EN13043:2004)-	35 -
-	
Tabela 16 Categorias de métodos de formulação e respetivos critérios (Luminari & Fidato, 1998)	40 -
Tabela 17 Características e requisitos para as misturas betuminosas (adaptado de NP EN 13108-1:2008)-	46 -
-	
Tabela 18 Síntese dos materiais submetidos a ensaio.....	51 -
Tabela 19 Resultados da Análise Granulométrica.....	75 -
Tabela 20 Resumo das categorias e conformidade das exigências para os valores obtidos	77 -
Tabela 21 Resumo das categorias e conformidade das exigências para os valores obtidos	79 -
Tabela 22 Resumo das categorias e conformidade das exigências para os valores obtidos	80 -
Tabela 23 Resumo das categorias correspondentes aos valores de ensaio obtidos	81 -
Tabela 24 Resumo das categorias correspondentes aos valores de ensaio obtidos	83 -
Tabela 25 Resultados médios da análise das amostras em (%)	85 -
Tabela 26 Resumo das categorias correspondentes aos valores de ensaio obtidos	86 -
Tabela 27 Resumo dos resultados obtidos para caracterização físico química dos fíleres.....	87 -

Índice de Equações

Equação 1 Valor de Azul de Metileno	- 57 -
Equação 2 Índice de Vazios do fíler	- 58 -
Equação 3 Massa Volúmica do fíler	- 60 -
Equação 4 Baridade	- 61 -
Equação 5 Número do Betume	- 63 -
Equação 6 Solubilidade em Água	- 67 -
Equação 7 Suscetibilidade em Água	- 68 -
Equação 8 Teor de Óxido de Cálcio	- 70 -
Equação 9 Teor de Dióxido de Carbono	- 72 -

Índice de Gráficos

Gráfico 1 Percentagem de passados no peneiro de abertura 0,063 mm	- 76 -
Gráfico 2 Teor de Azul de Metileno	- 77 -
Gráfico 3 Massa volúmica dos fíleres.....	- 78 -
Gráfico 4 Percentagem de vazios do fíler	- 79 -
Gráfico 5 Baridade	- 80 -
Gráfico 6 Variação da temperatura de amolecimento anel e bola	- 81 -
Gráfico 7 Número do Betume	- 82 -
Gráfico 8 Variação do teor de CaO nas amostras de fíler	- 84 -
Gráfico 9 Variação do teor de SiO ₂ nas amostras de fíler	- 84 -
Gráfico 10 Solubilidade em água	- 86 -
Gráfico 11 Correlação entre índice vazios do fíler e variação da temperatura anel e bola	- 88 -
Gráfico 12 Correlação entre índice vazios do fíler e número do betume	- 88 -
Gráfico 13 Correlação entre número do betume e variação da temperatura anel e bola	- 88 -

Lista de Abreviaturas

AGE – Agregado Granulometria Extensa

CICOPN – Centro de Formação Profissional da Indústria da Construção e Obras Públicas do Norte

cm – Centímetro

EDTA – Ácido Etilenodiaminotetracético

EN – Norma Europeia

FRX – Fluorescência de Raios-X

FRXP – Fluorescência de Raios-X Portátil

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

g – Grama

Kg – Quilograma

LGMC – Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

Mg – Miligrama

ml – Mililitros

mm – Milímetros

m² – Metro quadrado

m³ – Metro cúbico

NP – Norma Portuguesa

PMB – Betume Modificado com Polímero

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1. Introdução

1.1. Enquadramento Geral

Em consequência do desenvolvimento económico e social, as necessidades de mobilidade evoluíram e cresceram de forma exponencial nos últimos anos, tendo inclusive os seus padrões sofrido alterações significativas nas últimas décadas, com maior relevância para o caso particular das áreas urbanas. Resultado de um aumento do êxodo urbanístico residencial e da descentralização de algumas atividades empresarias e serviços prestados, a mobilidade afigura-se como um requisito primordial naquilo que se designa como qualidade de vida.

As regiões metropolitanas são hoje uma realidade muito diversificada e complexa, marcadas essencialmente por uma utilização massiva de transporte individual, resultado da ineficiência da rede de transportes coletivos, podendo eventualmente provocar efeitos nefastos nas gerações vindouras, a nível de exposição ao ruído, agravamento das condições de sustentabilidade energética e poluição atmosférica. Os transportes representam um sector, que apresentam o maior índice de aumento das emissões de gases poluentes como o dióxido de carbono assim como do consumo de combustíveis fósseis, que por sua vez contribui para o aquecimento global. A substituição dos combustíveis fósseis por fontes de energias alternativas, irá oferecer uma alternativa mais segura, fiável e barata de todas as nossas necessidades de energia, poderá inclusive fornecer tudo o que combustível de fóssil atualmente oferece, mas sem a poluição. Em várias cidades portuguesas já existem diversos projetos pioneiros, com autocarros ecológicos, movidos a hidrogénio e a energia elétrica (www.bcsdportugal.org, 2013).

A rede rodoviária nacional é constituída por itinerários principais, itinerários complementares, estradas nacionais, estradas regionais e autoestradas, tendo no pavimento a sua infraestrutura de maior relevância, por se encontrar sujeita a ações mais severas, particularmente do tráfego e do clima. Por tal razão, grande parte do investimento realizado na construção é dirigido para esta componente da rede rodoviária, conservação e reabilitação, assim como em investigação fundamental e aplicada para redução desses mesmos investimentos e otimização do dimensionamento.

Em Portugal, nas duas últimas décadas, registou-se um elevado investimento na ampliação da rede rodoviária nacional, a qual tem vindo a estagnar em consequência da atual crise financeira que o país atravessa, provocando um acentuado decréscimo na construção e um consequente aumento de trabalhos de conservação e reabilitação (Pereira *et al*, 2007).

Os pavimentos rodoviários são dimensionados para responderem às solicitações do tráfego e do clima durante um determinado período de vida (20 a 40 anos), numa perspetiva de sustentabilidade técnica-económica-ambiental e definidos determinados padrões de qualidade, estrutural e funcional. A sua conservação tem como objetivo promover uma melhoria das suas características (essencialmente estruturais), face a novas solicitações para um novo período de vida, nomeadamente com um tráfego mais elevado que o considerado para o período anterior. É frequentes os pavimentos necessitarem de intervenções, não previstas, antes do final do período de vida para os quais foram projetados e construídos, com custos significativos quer para a respetiva administração rodoviária, quer em particular para os utentes, ou até ambientais (Morais, 2001).

Neste contexto, a estrada deverá ser uma infraestrutura que permita circular com segurança, conforto e tendo em linha de conta a redução dos impactos ambientais, contribuindo diretamente para o aumento da qualidade de vida.

1.2. Objetivos e metodologias

Esta dissertação tem como objetivos primordiais, a análise e caracterização de diferentes tipos de fíleres, com base em conhecimentos existentes e estudos já realizados anteriormente. Visa também, determinar a influência do tipo de fíler a utilizar nas misturas betuminosas, a aplicar em pavimentos, sem que o seu desempenho e durabilidade das camadas que integra sejam comprometidos.

As principais tarefas a desenvolver no presente estudo são as seguintes:

Pesquisa bibliográfica: no âmbito da referida tarefa será efetuada uma recolha bibliográfica relativa ao tema apresentado, nomeadamente tipologia de pavimentos, características primordiais das misturas betuminosas, principais métodos de ensaio adequados para caracterização dos fíleres utilizados nas misturas betuminosas.

Definição e realização do estudo experimental: definição do estudo experimental, com seleção dos procedimentos laboratoriais adequados a desenvolver e respetivas condições de ensaio a adotar. Determinação dos requisitos físicos, geométricos, químicos dos materiais, produção de fíler e características rigidificantes. Concretização do estudo experimental com a realização de ensaios para caracterização da fração mais fina dos agregados, provenientes da britagem (fíleres).

Análise de resultados: avaliação das metodologias de ensaio e correspondentes técnicas de interpretação desenvolvidas. Apresentação e análise dos resultados obtidos. Obtenção dos parâmetros necessários à utilização dos fíleres em misturas betuminosas.

1.3. Estrutura do trabalho

A estrutura do trabalho encontra-se subdividida em cinco capítulos sendo que este primeiro, pretende indicar os principais objetivos do trabalho e a respetiva organização, tendo em vista a concretização dos objetivos propostos.

O segundo capítulo descreve e sintetiza os conhecimentos existentes sobre o características das misturas betuminosas, principais constituintes, características mecânicas, fatores que influenciam o seu comportamento mecânico, propriedades fundamentais, bem como respetivos métodos de dimensionamento, por forma a estabelecer uma correta compreensão das temáticas a abordar.

No terceiro capítulo é efetuada a descrição e contextualização do caso de estudo adotado no âmbito deste trabalho, caracterização das amostras de fíler que irão ser alvo de estudo, assim como a metodologia empregue nos ensaios realizados para caracterização dos fíleres.

No capítulo quarto são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios realizados, e respetivas correlações.

No último capítulo, são apresentadas as conclusões de maior relevo obtidas com a realização dos ensaios, nomeadamente a caracterização dos fíleres utilizados e proposta de futuras linhas de investigação a desenvolver com base nas principais conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2. Estado da Arte

2.1. Pavimentos Rodoviários

No enquadramento do presente trabalho é de extrema relevância efetuar a contextualização da tipologia de pavimentos rodoviários utilizados nas respetivas infraestruturas.

Um pavimento define-se relativamente à sua constituição, como um sistema multi-estratificado, constituído por várias camadas de estrutura finita, apoiadas numa fundação constituída pelo terreno natural (maciço semi-indefinido), o qual se pode melhorar em termos de qualidade com a realização de um coroamento (leito do pavimento). A um pavimento exige-se o correto desempenho de dois tipos de funções essenciais: estruturais e funcionais.

- Funções estruturais – capacidade resistência do pavimento para suportar as solicitações de que são alvo (carga dos veículos), para níveis compatíveis com a resistência da estrutura.
- Funções funcionais – criação de uma superfície regular, com superfície rugosa e resistência ao desgaste, capaz de garantir a segurança, economia e comodidade de circulação.

A Figura 1 representa, sob a forma esquemática a constituição de um pavimento, assim como a indicação das principais ações a que se encontra sujeito, sendo possível constatar, além da fundação, uma clara definição das duas primordiais componentes do pavimento, uma primeira constituída essencialmente por materiais granulares (britas e areias) estabilizados com ligantes, designada por conjunto de “camadas ligadas”, colocadas na parte superior do pavimento e uma outra constituída por materiais inertes, britados ou naturais, colocadas na parte inferior do pavimento. As principais ações a que o pavimento se encontra sujeito, são consequência do tráfego e do clima, sendo a primeira traduzida pelas cargas exercidas pelos veículos e a segunda por variações de temperatura e água (Santos *et al*, 2011).

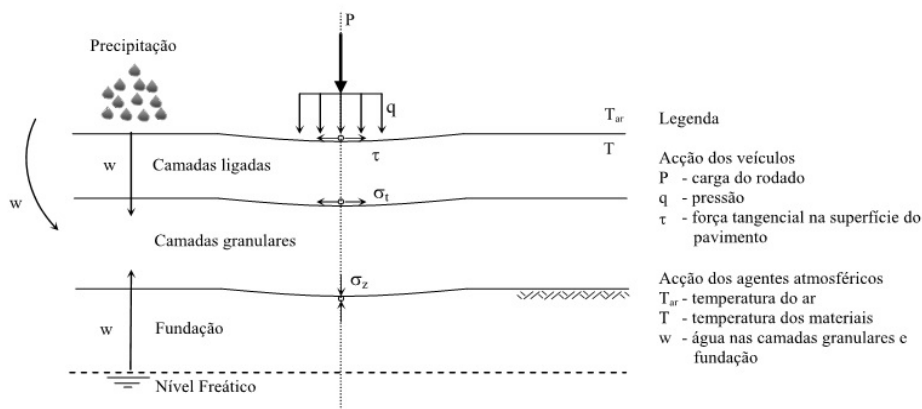


Figura 1 Pavimento rodoviário: constituição e ações (Santos *et al*, 2011)

Os pavimentos rodoviários classificam-se geralmente em três categorias: flexíveis, rígidos e semirrígidos (Tabela 1). A sua distinção é alicerçada na respetiva estrutura, visto que cada um destes pavimentos apresenta uma constituição diferente, com uma sequência de camadas diferenciadas, relativamente a características geométricas e mecânicas. Contudo, existem outros tipos de pavimentos que não se integram de forma linear nos anteriormente referenciados, tendo apenas como princípio idêntico, o comportamento como um todo, porém a resposta de cada uma das camadas que os constituem é distinta.

Tabela 1 Tipos de pavimentos em função dos materiais e da deformabilidade

(Adaptado de Santos *et al*, 2011)

Tipo de Pavimento	Material (ligante)	Deformabilidade
Flexível	Hidrocarbonados e granulares	Elevada
Rígido	Hidráulicos e granulares	Muito reduzida
Semi-rígido	Hidrocarbonados, hidráulicos e granulares	Reduzida

2.1.1. Pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis são constituídos nas camadas superiores por misturas betuminosas, ou seja por materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados, comumente o betume asfáltico, seguidas inferiormente de uma ou duas camadas compostas por material granular.

A estrutura que os constitui pode ser muito diversa, variando de acordo com fatores, tais como: intensidade do tráfego, resistência do solo de fundação e características dos materiais disponíveis, os quais, por sua vez, estão dependentes das condições climáticas.

Desta forma, quando o tráfego é pouco agressivo e se dispõe de materiais granulares de boa qualidade a custo favorável, podem ser projetados e construídos pavimentos onde é preponderante a componente granular.

No caso de situações de tráfego intenso, numa região com diminutos recursos de materiais granulares de qualidade, e face a uma fundação de reduzida capacidade de suporte será necessário considerar um pavimento incluindo várias camadas betuminosas, com espessura total significativa (Santos *et al*, 2011).

Na Figura 2 está representada a constituição de um pavimento flexível, com os diferentes tipos de materiais constituintes e camadas.

	Tipo de Material	Tipo de Camada
Pavimento	Misturas Betuminosas	Camada de Desgaste
	Misturas Betuminosas	Camada de Regularização
	Misturas Betuminosas Materiais Granulares	Camada de Base
	Materiais Granulares Solos Tratados Solos Seleccionados	Camada de Sub-Base
Fundação	Materiais Granulares Solos Tratados Solos Seleccionados	Leito do Pavimento
	Aterro Terreno Natural	

Figura 2 Pavimento flexível: constituição

Na Tabela 2 apresenta-se uma descrição sucinta das camadas constituintes de um pavimento flexível, principais características e espessuras das camadas.

Tabela 2 Pavimento flexível: camadas constituintes e suas características (Santos, 2009)

Camadas	Características	Espessura (cm)
Desgaste	Superfície lisa, regular, impermeabilizante, não derrapante e resistente ao desgaste produzido pelo tráfego, proporcionando condições de segurança economia e comodidade aos utilizadores. Constituída por material betuminoso com agregados de alta resistência (com dimensões geralmente reduzidas – diâmetro médio de 3 a 4 cm). Os agregados têm como função resistir ao desgaste imposto pelas solicitações, suportar e transmitir as cargas provenientes do tráfego para a camada base. O betume tem como função ligar os agregados, beneficia as características de adesão e de resistência global.	4 – 6
Regularização	Superfície regular, desempenada para garantir a boa execução da camada de desgaste. Constituída por mistura betuminosa com materiais mais pobres. Tem como função receber as cargas proveniente do tráfego e transmitidas pela camada de regularização, uniformizar as tensões e posteriormente transmitir para a camada de base.	5 – 12
Base	Camada constituída por agregado granulometria extensa (AGE) compactado, produzido artificialmente em pedra. Na estrutura deste tipo de pavimento perfila-se como o elemento mais preponderante e tem como função receber as cargas transmitidas pela camada de regularização, uniformizar as tensões e posteriormente transmitir para a camada sub-base.	15 – 30
Sub-base	Constituída por material granular em material britado sem recomposição (“tout venant”) ou com recomposição em central. Tem como funcionalidade reduzir a espessura da base e receber os esforços provenientes da camada base, redistribuir os esforços para a fundação, drenar infiltrações provenientes das camadas superiores e impedir ascensão da água por capilaridade as camadas nobres do pavimento.	15 – 20

2.1.2. Pavimentos Rígidos

Os pavimentos rígidos apresentam uma camada superior constituída por uma laje de betão de cimento, ou seja, material granular estabilizado com ligantes hidráulicos, geralmente o cimento Portland, compactado por vibração, que se encontra apoiada numa camada de sub-base, constituída por uma ou duas camadas inferiores constituídas também por material granular estabilizado com ligante hidráulico e/ou apenas constituídas por material granular. A composição do pavimento indica-nos um modo de funcionamento, bem diferente dos pavimentos flexíveis. Na Figura 3 está representada a constituição de um pavimento rígido, com os diferentes tipos de materiais constituintes e camadas.

	Tipo de Material	Tipo de Camada
Pavimento	Betão de Cimento Portland	Camada de Desgaste
	Betão Pobre Solo-Cimento Materiais Granulares estabilizados com cimento	Camada de Sub-Base
Fundação	Materiais Granulares Solos Tratados Solos Seleccionados	Leito do Pavimento
	Aterro Terreno Natural	

Figura 3 Pavimento rígido: constituição

A laje de betão de cimento apresenta-se como ponto fundamental, desempenhando o papel de camada de desgaste e de camada de base. Devido à sua elevada resistência à flexão, evita que o pavimento sofra deformações acentuadas, mesmo quando submetido a condições severas de tráfego pesado, intenso e lento, e a elevadas temperaturas.

O mecanismo de degradação considerado para efeito de dimensionamento neste tipo de pavimento é o fendilhamento por fadiga da laje de betão, contudo não é o tipo de degradação mais frequente, mas sim as degradações de superfície, as quais estão associadas ao estado das juntas, ao estado da superfície do betão e aos deslocamentos entre lajes. Relativamente à conservação, um pavimento rígido requer reduzidas intervenções, ao longo do seu ciclo de vida (Santos *et al*, 2011).

Na Tabela 3 apresenta-se uma descrição sucinta das camadas constituintes de um pavimento rígido, principais características e espessuras das camadas.

Tabela 3 Pavimento rígido: camadas constituintes e suas características (Santos, 2009)

Camadas	Características	Espessura (cm)
Betão de Cimento	Superfície regular, adequada à circulação de veículos em condições de conforto, economia e segurança. Tem como função suportar, redistribuir e transferir para a camada inferior as tensões induzidas pelos rodados dos veículos e representa a camada de desgaste e camada de base, com características de impermeabilização. Constituída por uma laje de betão de cimento compactado por vibração.	20 – 25
Sub-base	Camada regular de modo a permitir execução da laje em boas condições e resistente à erosão, assegura a uniformização de assentamentos, apresenta características drenantes, suporta, redistribui e transfere para a fundação as tensões transmitidas ao nível da camada superior. Constituída por material granular (agregado de granulometria extensa estabilizado com cimento) ou betão pobre ou solo-cimento (material granular estabilizado com ligante hidráulico no caso de tráfego intenso).	15 – 20

No que se refere à tipologia (Figura 4), os pavimentos rígidos podem agrupar-se em cinco diferentes tipos de categorias (Kraemer *et al*, 1996), que se distinguem nomeadamente pelo modo como é controlado o fendilhamento por retração (Santos *et al* 2011):

- Pavimentos de betão não armado, com juntas transversais e longitudinais, dotadas ou não de barras de transferência de carga (passadores);
- Pavimentos de betão armado contínuo (B.A.C.);
- Pavimentos de betão pré-esforçado;
- Pavimentos formados por elementos prefabricados.

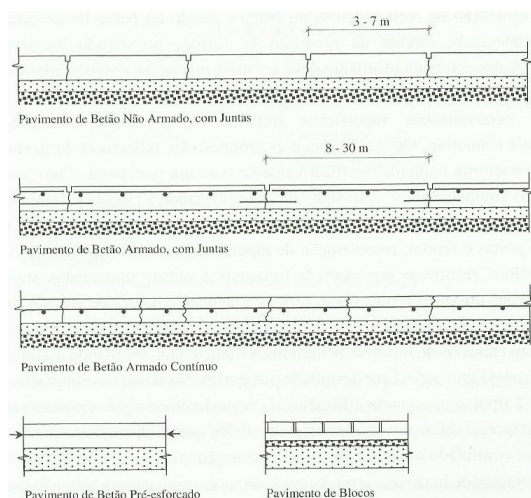


Figura 4 Pavimentos rígidos: diferentes tipos (Santos *et al*, 2011)

2.1.3. Pavimentos Semi-rígidos

Os pavimentos semi-rígidos apresentam características comuns aos dois tipos de pavimentos mencionados anteriormente: com uma ou duas camadas superiores constituídas por misturas betuminosas, seguidas de uma camada constituída por agregado estabilizado com ligante hidráulico, podendo dispor de uma camada granular de sub-base. As camadas betuminosas superiores (camada de desgaste e camada de regularização) têm constituição idêntica à dos pavimentos flexíveis, sendo a camada de base a que diferencia este tipo de pavimento, dado que é constituída por material granular estabilizado com ligante hidráulico, usualmente betão pobre cilindrado, enquanto a camada de sub-base, é constituída por material granular estabilizado mecanicamente (material de granulometria extensa), como podemos verificar no exemplo da Figura 5. Neste padrão de pavimentos a camada de base, por consequência da sua elevada rigidez, absorve em larga escala os esforços verticais, reduzindo de forma significativa, as tensões transmitidas ao solo de fundação. Em certos casos, as camadas betuminosas conforme a sua espessura, perfila-se como uma relevante contribuição estrutural (Santos *et al*, 2011).

	Tipo de Material	Tipo de Camada
Pavimento	Misturas Betuminosas	Camada de Desgaste
	Misturas Betuminosas	Camada de Regularização
	Materiais Granulares ligados com cimento Portland	Camada de Base
	Materiais Granulares Solos Tratados Solos Seleccionados	Camada de Sub-Base
Fundação	Materiais Granulares Solos Tratados Solos Seleccionados	Leito do Pavimento
	Aterro Terreno Natural	

Figura 5 Pavimento semi-rígido: constituição

2.2. Tipos de Degradações

Para um melhor entendimento do comportamento dos pavimentos, podemos subdividir em dois grupos de fatores, dos quais dependem a sua degradação:

- Fatores ativos – diretamente responsáveis pela degradação, provocados pelas ações do tráfego e do clima.
- Fatores passivos – características das propriedades do pavimento, tais como: materiais usados, espessura das camadas, qualidade de construção.

A conjugação dos referidos fatores, retarda de um modo mais ou menos eficiente a sua degradação, e conseqüente correto desempenho funcional e estrutural do pavimento. A evolução das degradações que se verificam nos pavimentos e alteração de comportamento resultam de um complexo processo que decorre da evolução natural dos mesmos, pois cada ação provoca alterações específicas em cada material constituinte do pavimento. Com o progresso de degradação e atingindo um estado de deterioração em que as condições de utilização já não são aceitáveis, importa aplicar ações e conservação adequada, por forma a repor ou aumentar o nível de qualidade admissível para o determinado pavimento.

Para que seja realizada uma seleção de uma estratégia de conservação mais eficiente, é essencial conhecer o estado atualizado do pavimento, obtido por uma avaliação objetiva do mesmo, sendo que antes do início da inspeção/avaliação, é necessário conhecer as famílias de degradações mais comuns em pavimentos rodoviários. Na Tabela 4 é possível observar as quatro famílias e tipos de degradação de um pavimento (Miranda *et al*, 1999).

Tabela 4 Famílias e tipo de degradações (Miranda *et al*, 1999)

Famílias de Degradações	Tipos de Degradações
Deformações	Abatimento <ul style="list-style-type: none"> ▪ longitudinal berma, eixo ▪ transversal Deformações localizadas Ondulação Rodeiras <ul style="list-style-type: none"> ▪ grande raio (camadas inferiores) ▪ pequeno raio (camadas superiores)
Fendilhamento	Fendas <ul style="list-style-type: none"> ▪ fadiga ▪ longitudinais eixo, berma ▪ transversais ▪ parabólicas Pele de crocodilo <ul style="list-style-type: none"> ▪ malha fina (≤ 40 cm) ▪ malha larga (>40 cm)
Desagregação da camada de desgaste	Desagregação superficial Cabeça de gato Pelada Ninhos (covas)
Movimento de materiais	Exsudação Subida de finos

A sistemática observação de pavimentos em serviço, assim como a análise detalhada do comportamento de trechos experimentais, permite estabelecer relações “causa - efeito”, podendo traduzir-se sob a forma de uma matriz como a apresentada na Tabela 5. Nesta tabela estabelece-se uma ponderação da relação entres os diferentes tipos de degradação (“efeitos”) e os vários fatores de degradação (“causas”), através de um determinado número de asteriscos, sendo que uma relação “causa-efeito” mais forte é classificada com três asteriscos (*). Esta classificação pretende apenas dar uma indicação aproximada daquelas relações. Entretanto, o diagnóstico de casos reais deve resultar sempre de uma observação “*in situ*” das condições envolventes de qualquer patologia em estudo (Santos *et al*, 2011).

Tabela 5 Classificação das relações entre as degradações e os fatores de degradação (Santos *et al*, 2011)

DEGRADAÇÕES	FATORES DE DEGRADAÇÃO									
	Condições de drenagem	Sub-dimensões da camada de desgaste	Sub-dimensões das camadas inferiores	Capacidade de suporte da fundação	Qualidade dos materiais	Deficiências de fabrico e execução	Ligação entre camada de base e de desgaste	Agressividade do tráfego	Ações climáticas	Camadas estruturais de reduzida compacidade
Deformações	***	*	**	***	*	**		*	*	***
Rodeiras	***	*	**	***	**	*		**	**	***
Fendas	**	**	**	**	***	**	**	***	***	***
Fenda parabólicas	*	**			**	**	***	***	***	**
Pele de crocodilo	**	**	**	**	***	**	**	***	***	***
Pelada		***	*		**	**	***	***	**	**
Ninhos		**	*		***	***	**	**	**	***
Cabeça de gato					***	**		***	*	**
Desagregação superficial					***	***		**	***	**
Exsudação					***	**		***	***	

*** – Muito importante; ** – Importante; * – Pouco importante;

De modo a compreender as diferentes famílias de degradação, iremos realizar uma ligeira descrição do fenómeno e os fatores que as originam.

2.2.1. Fendilhamento

Destaca-se como a família de degradações, mais frequente em pavimentos flexíveis, resultado na maioria dos casos, da fadiga dos materiais das camadas betuminosas, devido à repetição dos esforços de tração por flexão desta camada, sendo de uma forma geral um dos primeiros sinais de manifestação na redução da qualidade estrutural de um pavimento e preponderante no aparecimento de outras degradações. Este tipo de degradação contribui para um enfraquecimento das camadas granulares do pavimento e do solo de fundação com possibilidade de ocorrência de entrada de água pelas fendas (Santos, 2009). De seguida vamos apresentar uma breve descrição dos tipos de fendilhamento e fatores responsáveis pela sua degradação.

▪ Fendas por Fadiga

Descrição: fendas irregulares localizadas na zona de passagem dos rodados dos veículos, geralmente orientadas na direção longitudinal, progredindo na direção transversal e noutras direções irregulares.

Fatores de degradação: fadiga das camadas betuminosas, falta de capacidade de suporte das camadas granulares e do solo de fundação, camada de superfície demasiado rígida em relação às restantes camadas, e qualidade deficiente dos materiais.

▪ Fendas Longitudinais

Descrição: desenvolvem-se longitudinalmente, junto da berma ou ao eixo da via.

Fatores de degradação: deficiência da junta longitudinal de construção, drenagem deficiente, originando diferencial de capacidade de suporte junto à berma, misturas betuminosas muito rígidas originando abertura de fendas por retração. Na Figura 6 é possível observar um exemplo do tipo de fendilhamento.



Figura 6 Fendas longitudinais: exemplos

- **Fendas Transversais**

Descrição: desenvolvem-se perpendicularmente ao eixo da via.

Fatores de degradação: deficiência da junta transversal de construção, retração térmica da camada de desgaste, capacidade de suporte diferencial da fundação. Na Figura 7 é possível observar um exemplo do tipo de fendilhamento.



Figura 7 Fenda transversal: exemplo

- **Pele de crocodilo**

Descrição: fendas de fadiga localizadas inicialmente na zona de passagem dos veículos, formando uma malha de dimensão variável, abrangendo progressivamente toda a largura da via de tráfego.

Fatores de degradação: fadiga das camadas betuminosas, falta de capacidade de suporte das camadas granulares e fundação, camada de superfície demasiado rígida em relação às restantes camadas, qualidade deficiente dos materiais. Na Figura 8 é possível observar um exemplo do tipo de fendilhamento.



Figura 8 Fendilhamento tipo pele de crocodilo: exemplos

2.2.2. Deformações

As deformações, na grande maioria dos casos têm como causa principal um comportamento anômalo das camadas do pavimento e do solo de fundação, sob a ação conjunta de tráfego intenso e de condições climáticas adversas, influenciando na regularidade geométrica da estrada, condicionando inclusive as condições de circulação em segurança (Santos, 2002). Na Figura 9 é possível observar alguns exemplos.

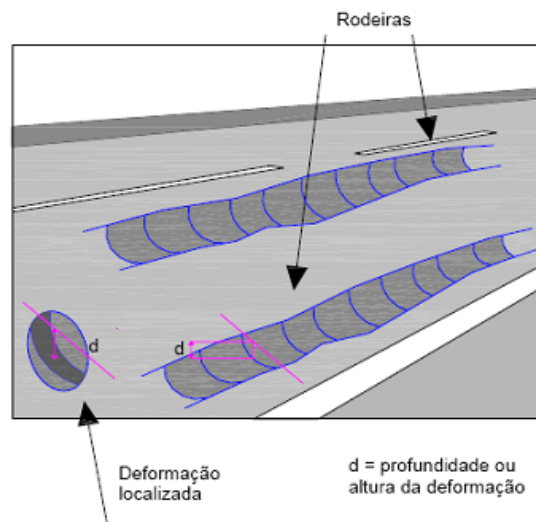


Figura 9 Deformações: exemplos (Estradas de Portugal, 2008)

▪ Deformações localizadas

Descrição: formação de depressões de forma arredondada, podendo surgir isoladamente em diferentes pontos do pavimento.

Fatores de degradação: deficiente capacidade em zonas pontuais do pavimento (camadas granulares), falta de capacidade do solo de fundação (bolsada de argila, drenagem deficiente), contaminação localizada das camadas granulares (Figura 9).

▪ Rodeiras

Descrição: depressão transversal localizada na zona de passagem dos rodados dos veículos, podendo ser de pequeno ou de grande raio.

Fatores de degradação: capacidade de carga insuficiente (deformações permanentes no solo e camadas granulares), misturas betuminosas com reduzida resistência à deformação plástica (incorreto dimensionamento e escolha dos materiais), insuficiente compactação das camadas (Figura 9).

2.2.3. Arranque de materiais

O arranque de materiais é devido a um desgaste célere do betuminoso envolvente do agregado de maiores dimensões, deixando-os à vista originando uma macrotextura.

▪ Peladas

Descrição: destacamento da camada de desgaste relativamente à camada inferior.

Fatores de degradação: deficiente ligação da camada de desgaste à camada inferior, qualidade dos materiais e espessura insuficiente da camada de desgaste, zona localizada submetida a elevados esforços tangenciais (Figura 10).

▪ Ninhos

Descrição: cavidades localizadas na camada de desgaste, podendo progredir para as camadas inferiores.

Fatores de degradação: evolução de outras degradações (em particular, fendilhamento e pele de crocodilo), deficiente qualidade dos materiais da camada de desgaste, zona localizada com deficiente capacidade de suporte. Na Figura 10 é possível observar vários exemplos, dos diferentes tipos de arranque de materiais.

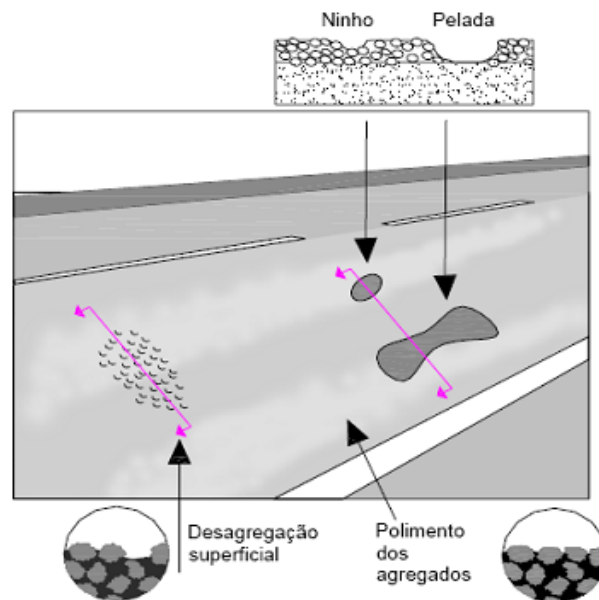


Figura 10 Arranque de materiais: diferentes tipos (Estradas de Portugal, 2008)

2.2.4. Movimento de materiais

O movimento de materiais está associado, habitualmente, a deficiências construtivas, na Figura 11 é feita uma descrição a este tipo de degradação e apresentados os fatores de aparecimento da mesma.

▪ Exsudação

Descrição: ascensão de ligante betuminoso na camada de desgaste, em particular na zona de passagem dos rodados dos veículos, conferindo-lhe um aspeto negro e brilhante de textura lisa.

Fatores de degradação: camada de desgaste com elevado teor de ligante, contaminação por rega e colagem excessiva, ligante de reduzida viscosidade, mistura betuminosa de reduzida estabilidade (agregados e dosagem em ligante inadequados), submetida a tráfego intenso e temperaturas elevadas

▪ Subida de finos

Descrição: manchas de cor esbranquiçada devidas à presença de finos, inicialmente junto de fendas da camada de desgaste, que evoluem para toda a superfície da camada, provenientes das camadas granulares e do solo de fundação

Fatores de degradação: drenagem deficiente do pavimento, promovendo a ascensão da água através do solo de fundação e das camadas granulares, e das camadas betuminosas fendilhadas, arrastando finos.

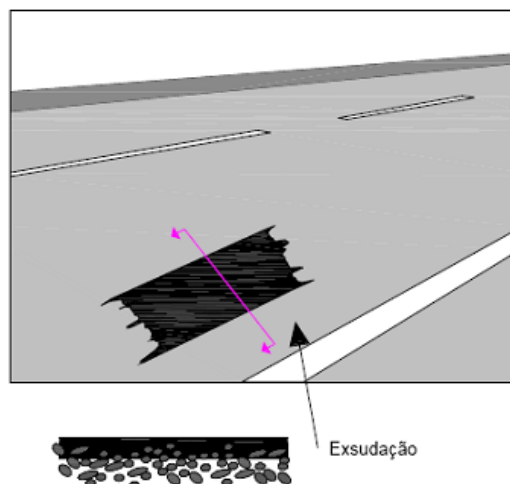


Figura 11 Movimento de materiais: exemplo (Estradas de Portugal, 2008)

2.3. Características das misturas betuminosas

As misturas betuminosas são geralmente aplicadas em camadas de pavimentos rodoviários, tanto em pavimentos flexíveis como em semi-rígidos. Para o desenvolvimento deste trabalho, torna-se imprescindível conhecer as suas principais características, assim como o seu comportamento mecânico, quando sujeitas a cargas e variações de temperatura. Como foi anteriormente referido no ponto 2.1, o dimensionamento de um pavimento consiste na definição de uma estrutura, que assegure a função estrutural e funcional definida de acordo com os padrões de qualidade estabelecidos para cada pavimento. Desta forma, o seu dimensionamento obriga a uma avaliação das propriedades das misturas betuminosas utilizadas na estrutura do pavimento, nomeadamente o módulo da rigidez, resistência à fadiga e às deformações permanentes.

O conhecimento dessas propriedades assume particular importância ao nível da formulação das misturas betuminosas e também quando se pretende dimensionar um pavimento rodoviário flexível ou estabelecer uma adequada solução numa obra de reabilitação dum pavimento (Santos *et al*, 2011). Existem vários tipos de misturas betuminosas que podem ser aplicadas, segundo a função estrutural que desempenham nas diferentes camadas dos pavimentos. Com base na norma NP EN 13108-1:2011, que define os requisitos para as misturas betuminosas do grupo do betão betuminoso, produzidas a quente e de acordo com o caderno de encargos tipo obra, da empresa Estradas de Portugal (2012), as misturas betuminosas podem ter diferentes designações (Tabela 6). As misturas são constituídas por um conjunto de materiais granulares doseados de uma forma ponderal ou volumétrica, os quais são misturados numa central ou betoneira, com uma quantidade de ligante previamente definida.

Após a realização da mistura, o material é transportado para o local de aplicação, sendo espalhado e compactado, constituindo uma camada de pavimento. Conforme o tipo de camada a construir, podemos definir como principal exigência, a utilização de uma mistura que apresenta boas características mecânicas, ou que apresentem funções relacionadas com a segurança e conforto, tendo sempre em linha de conta critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução (Santos *et al*, 2011).

De uma forma geral, são exigidas as seguintes características às misturas betuminosas: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade, trabalhabilidade, rigidez e resistência às deformações permanentes, pelo que iremos apresentar algumas considerações, referente a cada uma delas.

Tabela 6 Designação das misturas betuminosas (NP EN 13108-1:2011)

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)
	Argamassa Betuminosa com betume modificado	AC 4 ligante (AB)
Regularização	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 reg ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD)
	Betão Betuminoso	AC 14 reg ligante (BB)
	Argamassa Betuminosa com betume modificado	AC 4 reg ligante (AB)
Desgaste	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr)
	(micro) Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (BBr)
AC – designação do produto ligante – classe a definir base – referente à camada de base bin – referente à camada de ligação surf – referente à camada de desgaste reg – referente à cama de regularização		

2.3.1. Estabilidade

A estabilidade consiste em alcançar uma mistura adequada, capaz de resistir às deformações produzidas pelas cargas a que fica sujeita em serviço, dependendo essencialmente da fricção interna dos materiais e da sua coesão. A fricção interna irá depender da textura dos materiais, granulometria dos agregados, forma das partículas, densidade da mistura e da quantidade e tipo de betume. Trata-se de um facto que resulta da combinação do atrito e do arranjo entre os grãos de agregado que constitui a mistura. O atrito aumenta com a rugosidade das partículas de agregado e também com a área de contacto. O imbricamento ou ajuntamento depende fundamentalmente da forma dos agregados. Apesar do agregado utilizado, a estabilidade aumenta com a compacidade do material, sendo necessário usar granulometrias que possibilitem obter materiais de densidade adequada, e proceder a uma adequada compactação da mistura. O

excesso de ligante pode lubrificar as partículas de agregado, reduzindo a fricção interna. A coesão, ligação entre partículas, é assegurada com a introdução de betume no fabrico das misturas (Santos *et al*, 2011).

2.3.2. Durabilidade

A durabilidade de uma mistura betuminosa pretende caracterizar a sua resistência à desintegração, motivada pelas solicitações climáticas e pelo tráfego. Geralmente, quanto maior for a quantidade de betume utilizada maior será a durabilidade da mistura, assim como a utilização de materiais de granulometria contínua e bem compactados, que resultem em misturas impermeáveis. Por vezes utilizam-se maiores percentagens de betume com o intuito de obter uma película mais espessa de ligante a envolver os agregados, retardando o envelhecimento. Uma maior percentagem de betume na mistura, também origina uma redução do tamanho dos vazios, tornando mais difícil a entrada de ar e água para o interior da mistura.

Para que a ação abrasiva do tráfego não provoque o arrancamento dos materiais, a quantidade de betume usada em cada mistura para camada de desgaste deve ser suficiente para agregar convenientemente os materiais granulares, preenchendo por completo os vazios da mistura de agregados com betume, porém, há que estabelecer um compromisso, mantendo a percentagem de betume elevada, de modo a que não prejudique a estabilidade da mistura (Santos *et al*, 2011).

2.3.3. Flexibilidade

A flexibilidade de uma mistura betuminosa está relacionada com a sua capacidade de adaptação gradual aos movimentos do seu suporte. Ocorrem pontualmente, assentamentos diferenciais dos aterros, assim como, algumas zonas do pavimento tendem a comprimir-se sob a ação do tráfego, ocorrendo também assentamentos, daí a necessidade de produzir misturas com razoável flexibilidade. O aumento da percentagem de betume, uma fração arenosa do agregado com forma mais arredondada e a utilização de agregados de granulometria relativamente aberta, aumenta a flexibilidade das misturas (Santos *et al*, 2011).

2.3.4. Resistência à fadiga

A resistência à fadiga de uma mistura betuminosa pode ser definida como sendo a sua capacidade em responder à aplicação de cargas repetidas provenientes da ação do tráfego, para determinadas condições de velocidade de tráfego e de temperatura, sem atingir a rotura (Teixeira, 2000). Uma mistura betuminosa resiste à fadiga tanto melhor quanto maior for a respetiva durabilidade. Os principais fatores que afetam a resistência à fadiga das misturas betuminosas são a percentagem de betume e a porosidade da mistura betuminosa, ou seja,

quanto maior for a percentagem de betume e menor a porosidade, maior é a capacidade da mistura betuminosa resistir à fadiga (Pais *et al*, 2000).

As misturas densas têm um melhor desempenho que as misturas abertas, sendo conveniente a utilização de materiais bem graduados, mas que permitam a utilização de elevadas percentagens em betume sem que ocorra exsudação do ligante e sem prejudicar a estabilidade e a flexibilidade (Santos *et al*, 2011).

2.3.5. Aderência

Nas épocas particulares de ocorrência de pluviosidade, as superfícies dos pavimentos devem apresentar excelentes características de aderência, as quais são conseguidas sem que haja uma utilização excessiva de betume e com uma escolha de agregados com textura superficial rugosa e boa resistência ao desgaste, de maneira a manterem essa rugosidade. De salientar, que é de extrema importância, promover uma boa e rápida drenagem superficial (Santos *et al*, 2011).

2.3.6. Impermeabilidade

Uma mistura betuminosa deve apresentar uma resistência à passagem de água e do ar através das camadas do pavimento. A quantidade de vazios é uma boa indicação da impermeabilidade de uma mistura betuminosa compactada, pese embora a interligação dos vazios e o seu contacto com a superfície do pavimento possuam uma maior relevância na apreciação daquela característica (Santos *et al*, 2011).

2.3.7. Trabalhabilidade

Para além da produção de um material com características pretendidas é primordial que esse material possa ser colocado e compactado com facilidade. Por norma, uma adequada utilização dos equipamentos, assim como uma correta formulação da mistura, permite a resolução das questões relativas à trabalhabilidade dos materiais. Por vezes, a utilização de alguns agregados com a finalidade de melhorar a estabilidade, dificultam a colocação das misturas, sendo que, estes problemas, aquando detetados no início aplicação, podem solucionar-se procedendo-se a um ajuste da formulação da mistura (Santos *et al*, 2011).

2.3.8. Rigidez

As misturas betuminosas apresentam na sua constituição um esqueleto pétreo de comportamento elástico e um ligante betuminoso com comportamento visco-elástico (Mendes, 2011). Devido a essas características visco-elásticas do betume, a relação entre as tensões aplicadas e as extensões medidas não é um valor constante, sendo função da temperatura, da

frequência de carregamento, forma de carregamento, das características dos materiais constituintes e da sua composição. Desta forma o seu valor deve vir sempre acompanhado do método de ensaio e das condições de ensaio utilizadas na sua determinação (Teixeira, 2000).

A rigidez elástica, a que correspondem os valores mais elevados, é utilizada para caracterização da mistura betuminosa para dimensionamento enquanto a rigidez viscosa é fundamental para a previsão das deformações permanentes. A rigidez elástica de uma mistura betuminosa é função da rigidez elástica do betume e da composição volumétrica da mistura betuminosa (Pais *et al*, 2000). No que se refere ao coeficiente de Poisson, este é arbitrado entre o valor entre 0,30 e 0,50, conforme a frequência e a temperatura de ensaio, contudo, o valor mais habitual de coeficiente de Poisson nas misturas betuminosas é de 0,35 (Santos *et al*, 2011).

2.3.9. Resistência às deformações permanentes

As deformações permanentes podem ocorrer nas camadas betuminosas, quer nas camadas granulares ou no solo de fundação, resultam da aplicação repetida de cargas, provocando depressões longitudinais ao longo das rodeiras dos veículos, acompanhadas normalmente por elevações nas zonas laterais adjacentes. Ocorrem geralmente quando sujeitas a temperaturas elevadas, sendo que quanto mais alta for a temperatura, menor é a resistência das misturas às deformações permanentes. Para avaliação do seu comportamento, é comum o recurso a ensaios de cargas repetidas realizadas a altas temperaturas, por forma a simular condições agressivas a que as camadas se encontram sujeitas.

Foi desenvolvido um estudo em Portugal (Freire, 2003), referente à temperatura mais adequada para realização de ensaios de caracterização do comportamento às deformações permanentes, no qual foram obtidos valores entre 50°C a 60°C. De salientar que o processo de compactação, quer seja realizado em laboratório ou em obra, ao influenciar a estrutura mineral da mistura betuminosa, também afecta o comportamento à deformação permanente. Sendo que a redução da porosidade de uma mistura betuminosa aumenta a resistência à deformação permanente, desde que os valores de porosidade sejam superiores a 3% (Freire, 2003).

2.4. Principais constituintes das misturas betuminosas

2.4.1. Agregados

Os agregados constituem entre 75% a 85% do volume total das misturas betuminosas, o que constitui o maior valor percentual na sua composição, assumindo desta forma uma vital preponderância no comportamento das misturas. Devem ser submetidos a uma análise

petrográfica, para que assim seja conhecida a constituição do seu esqueleto pétreo, e efetuada caracterização: geométrica, física e mecânica.

Os agregados utilizados nas misturas betuminosas devem obedecer aos requisitos da Norma Europeia EN 13043:2004 “*Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estrada, aeroportos e outras áreas de circulação*”, que especifica as propriedades e os métodos de ensaios apropriados para a sua caracterização.

O material utilizado no fabrico das misturas betuminosas a utilizar nas camadas de base, regularização, ligação ou desgaste devem apresentar homogeneidade e ser completamente desprovidos de matéria orgânica, a qual pode originar uma alteração de comportamento nas misturas.

Tendo como base as seguintes Normas Europeias EN 12620, EN 13043, EN 13055-1, EN 13055-2, EN 13139 e EN 13242, podemos abarcar as principais definições que se aplicam aos agregados.

- Agregado: material granular utilizado na construção. O agregado pode ser natural, artificial ou reciclado.
- Agregado natural: agregado de origem mineral que foi sujeito apenas a processamento mecânico.
- Agregado artificial: agregado de origem mineral resultante de um processo industrial compreendendo modificações térmicas ou outras.
- Agregado reciclado: agregado resultante do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção.
- Agregado de massa volúmica normal: agregado de origem mineral tendo uma massa volúmica das partículas não inferior a 2,00 Mg/m³ mas inferior a 3,00 Mg/m³.
- Agregado leve: agregado de origem mineral com uma massa volúmica das partículas que não exceda os 2,00 Mg/m³ ou com uma baridade não superior a 1,20 Mg/m³.
- Dimensão do agregado: designação do agregado em termos das aberturas do peneiro inferior (d) e do superior (D), expressa como d/D.

Nota: Esta designação admite a presença de algumas partículas retidas no peneiro superior (sobretamanho) e de algumas partículas que passam no peneiro inferior (subtamanho). A dimensão d, pode ser zero.

- Subtamanho: parte do agregado que passa no peneiro de menor dimensão utilizado na definição da dimensão do agregado.
- Sobretamanho: parte do agregado que fica retida no peneiro de maior dimensão utilizado na definição da dimensão do agregado.

- Agregado fino (EN 12620 e EN 13139): designação dada aos agregados com partículas de menores dimensões em que D é menor ou igual a 4 mm.
- Agregado fino (EN 13043): designação dada aos agregados com partículas de menores dimensões em que D é menor ou igual a 2 mm e em que a maior parte das partículas fica retida no peneiro 0.063mm.
- Agregado fino (EN 13242): designação dada aos agregados de menores dimensões em que d é igual a 0 e D é menor ou igual a 6,3mm (Tabela 9).

Nota: O agregado fino pode ser produzido a partir da desintegração natural da rocha ou do seixo e/ou da sua britagem, ou do tratamento dos agregados artificiais.

- Agregado grosso (EN 12620 e EN 13139): designação dada aos agregados de maiores dimensões em que D é maior ou igual a 4 mm e d é maior ou igual a 2 mm.
- Agregado grosso (EN 13043): designação dada aos agregados de maiores dimensões em que D é menor ou igual a 45 mm e d é maior ou igual a 1 mm e D é maior ou igual a 2 mm.
- Agregado grosso (EN 13242): designação dada aos agregados de maiores dimensões em que d é maior ou igual a 1 mm e D é maior que 2 mm.
- Agregado de granulometria extensa (EN 12620, EN 13043 e EN 13242): agregado que consiste numa mistura de agregados grossos e finos.

Nota: pode ser produzido sem separação das frações grossa e fina ou pela mistura de agregados grossos e agregados finos.

- Agregado fino: designação dada aos agregados com partículas de menores dimensões em que D é menor ou igual a 4 mm e d=0.
- Agregado natural 0/8 mm: designação dada ao agregado de origem fluvial ou glacial em que D é menor ou igual a 8 mm.

Nota: este agregado pode ser produzido pela mistura de agregados processados.

- Finos: fração do agregado que passa no peneiro de 0,063 mm.
- Fíler: agregado cuja maior parte passa no peneiro com 0,063mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades.
- Fíler aditivado: fíler de origem mineral ao qual foi adicionado hidróxido de cálcio.
- Fíler comercial: fíler de origem mineral que foi produzido separadamente.
- Categoria: nível de uma propriedade de um agregado expresso por um intervalo de valores ou por um valor limite. Não existe qualquer relação entre as categorias das diferentes propriedades.
- Lote: quantidade de produção, quantidade parcialmente fornecida (carga de um vagão de comboio, camião ou navio) ou um pilha de material produzido de uma única vez em condições que se presumem uniformes.

Nota: em produção contínua, convém que a quantidade produzida durante um certo período seja tratada como um lote.

- Granulometria: distribuição dimensional das partículas que passam numa série especificada de peneiros, expressa pelas percentagens em massa.

As características dos agregados podem dividir-se em dois grupos principais, as características independentes do processo de produção (químicas, físicas, mecânicas e relativas à alterabilidade), e as características dependentes do processo de produção (relativas à forma das partículas e ao estado de limpeza do agregado) (Gomes, 2005).

2.4.1.1. Requisitos dos agregados para misturas betuminosas e revestimentos superficiais

Das características dos agregados especificadas na norma NP EN 13043:2004, consideram-se relevantes no âmbito das misturas betuminosas para camadas de base, regularização, ligação e desgaste as características especificadas na Tabela 7.

Nos quadros 14.03.2c (Camadas de misturas betuminosas a quente - Camada de base), 14.03.2f (Camadas de misturas betuminosas a quente - Camada de ligação), 14.03.2i (Camadas de misturas betuminosas a quente - Camada de regularização) e 14.03.2m (Camadas de misturas betuminosas a quente - Camada de desgaste), do Caderno de Encargos Tipo Obra – Pavimentação (Estradas de Portugal), podem ser avaliados os requisitos dos agregados para camadas de misturas betuminosas a quente com características de base, ligação, regularização, e desgaste.

Esses requisitos dos agregados, foram sintetizados na Tabela 7, de acordo com a Norma Portuguesa NP EN 13043, cuja sua aplicação é dirigida aos agregados obtidos a partir do processamento de materiais naturais para utilização em misturas betuminosas. Para além das exigências referidas na NP EN 13043:2004, a composição granulométrica das misturas betuminosas tem que ser obtida, no mínimo, a partir de três frações granulométricas distintas (Estradas de Portugal, 2012).

Tabela 7 Síntese dos requisitos dos agregados para misturas betuminosas (NP EN 13043:2004)

	Propriedades	Norma de ensaio	Unidade	Nota
Requisitos Geométricos	Granulometria	NP EN 933 - 1	-	Tolerância Categoria
	Qualidade dos finos	NP EN 933 - 9	g / Kg	Categoria (M _{Bf})
	Forma dos agregados grossos e das frações grossas (≥ 4 mm) dos agregados de granulometria extensa	NP EN 933-3 (Índice de achatamento)	-	Categoria (FI)
		NP EN 933-4 (Índice de forma)	-	Categoria (SI)
	Porcentagem de partículas esmagadas e partidas dos agregados grossos e das frações grossas (≥4 mm) dos agregados de granulometria extensa	NP EN 933 - 5	%	Categoria (C)
Requisitos Físicos	Resistência à fragmentação do agregado grosso, coeficiente Los Angeles	NP EN 1097-2 (secções 5)	%	Categoria (LA)
	Resistência ao desgaste por atrito, através do coeficiente micro-Deval	NP EN 1097-1	%	Categoria (M _{De})
	Resistência ao polimento acelerado do agregado grosso, para as misturas betuminosas a aplicar em camadas de desgaste	NP EN 1097-8	%	Categoria (PSV)
	Massa volúmica	NP EN 1097-6 (secções 7,8 ou 9)	Mg/m ³	Valor declarado
	Absorção de água	NP EN 1097-6 (secções 7,8 ou 9)	%	Valor declarado
	Baridade	NP EN 1097-3	Mg/m ³	Valor declarado
	Resistência ao gelo-degelo	NP EN 1367-1 NP EN 1367-2	%	Categoria (F)
	Resistência ao choque térmico	NP EN 1367-5	%	Valor declarado
	Afinidade aos ligantes betuminosos	EN 12697-11	-	Valor declarado
Sonennbranddos basaltos	EN 1367-3 e EN 1097-2	%	Categoria (SB)	
Requisitos Químicos	Desintegração do silicato bicálcico das escórias de alto-forno arrefecidas ao ar	NP EN 1744-1 secção 19.1	-	Aceitação / rejeição
	Desintegração do ferro das escórias de alto-forno arrefecidas ao ar	NP EN 1744-1 secção 19.2	-	Aceitação / rejeição
	Estabilidade volumétrica dos agregados de escória de aciaria	NP EN 1744-1 secção 19.3	-	Categoria (V)

2.4.1.2. Requisitos dos fileres para misturas betuminosas e revestimentos superficiais

No caso das características dos fileres utilizados nas misturas betuminosas para camadas de base, regularização e ligação consideram-se relevantes as seguintes:

Granulometria

A granulometria dos fileres, deve ser determinada pelo método de ensaio especificado pela norma NP EN 933-10 e os requisitos satisfazerem os valores apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 Requisitos da granulometria para o filer comercial (adaptado de NP EN 13043:2004)

Dimensão do peneiro (mm)	% de passados, em massa	
	Limites inferiores e superiores para resultados individuais	Amplitude máximo da Granulometria declarada pelo Produtor ^(a)
2	100	–
0,125	85 – 100	10
0,063	70 – 100	10

Nota ^(a) – amplitude da granulometria é baseada nos últimos 20 valores (Quadro B.4, linha 1 da, da norma NP EN 13043) observados no controlo de produção em fábrica. 90 % dos resultados declarados devem estar dentro deste limite, mas todos os resultados devem estar dentro dos limites inferiores e superiores da granulometria referidos na coluna 2 (norma NP EN 13043).

Azul de metileno

Quando solicitada a argiliosidade dos fileres, a sua avaliação é realizada através do ensaio de azul de metileno, MB_F, de acordo com procedimento definido na norma EN 933-9, sendo que os resultados devem ser declarados pela categoria correspondente, apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 Categorias para os valores máximos de azul de metileno (adaptado de NP EN 13043:2004)

Valor de azul de metileno da fração 0/0,125 mm (MB _F) g/Kg	Categoria MB _F
–	MB _F NT ^(a)
≤ 10	MB _F 10
≤ 25	MB _F 25
> 25	MB _F Declarado
Não requerido	MB _F NR

Nota ^(a) – a categoria MB_FNT significa que não são necessários ensaios porque f <3%

Massa volúmica e absorção de água

A massa volúmica das partículas dos fíleres deve ser determinada de acordo com a norma EN 1097-7 e os resultados devem ser declarados.

Tabela 10 Categorias para os valores de vazios do fíler seco compactado (adaptado de NP EN 13043:2004)

Percentagem em volume		Categoria v
Limites inferiores e superiores para resultados individuais	Amplitude máxima dos valores declarados pelo produtor ^(a)	
28 – 38	4	V 28/38
38 – 45	4	V 38/45
28 – 45	4	V 28/45
44 – 55	4	V 44/55
Não requerido	Não requerido	V NR

Nota ^(a) – amplitude da granulometria é baseada nos últimos 20 valores, devendo 90 % dos resultados declarados estar dentro deste limite, e 100% dos resultados devem estar dentro dos limites inferiores e superiores da granulometria referidos na coluna 1.

Variação da temperatura de amolecimento anel e bola

A variação da temperatura anel e bola do fíler, é determinada de acordo com a norma EN 13179-1, devendo os resultados ser declarados através de uma das categorias apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 Categorias para a variação de amolecimento temperatura anel e bola (adaptado de NP EN 13043:2004)

Variação da temperatura anel e bola °C	Categoria $\Delta_{R\&B}$
8 – 16	$\Delta_{R\&B}8/16$
17 – 25	$\Delta_{R\&B}17/25$
8 – 25	$\Delta_{R\&B}8/25$
>25	$\Delta_{R\&B}25$
Não requerido	$\Delta_{R\&B}NR$

Vazios do fíler seco compactado

Os vazios do fíler seco compactado (Rigden), são determinados de acordo com a norma EN 1097-4, devendo os resultados ser declarados através de uma das categorias apresentadas na Tabela 10, em função da aplicação específica.

Teor de água

O teor de água do fíler comercial, deve ser determinado de acordo com a norma EN 1097-5, não devendo ser superior a 1% em massa.

Regularidade da produção

A regularidade da produção de fíler deve ser determinada, pelas seguintes características:

- Número do betume do fíler comercial, propriedade relacionada com as características rigidificantes, determinada de acordo com a norma EN 13179-2 e declarada através das categorias apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 Categorias para o número de betume do fíler adicionado (adaptado de NP EN 13043:2004)

Percentagem em volume		Categoria BN
Limites inferiores e superiores Para resultados individuais	Amplitude máxima do número de betume Declarado pelo produtor ^(a)	
28 – 39	6	BN _{28/39}
40 – 52	6	BN _{40/52}
53 – 62	6	BN _{53/62}
Declarado	Declarado	BN _{Declarado}
Não requerido	Não requerido	BN _{NR}

Nota a - amplitude do número do betume é baseada nos últimos 20 valores, devendo 90 % dos resultados declarados estar dentro deste limite, e 100% dos resultados devem estar dentro dos limites inferiores e superiores da granulometria, referidos na coluna 1.

- Perda ao fogo das cinzas volantes de carvão pulverizado utilizadas como fíler, determinada de acordo com a secção 17, especificada na norma EN 1744-1 e o seu resultado declarado pelo produtor com uma amplitude que não deve ultrapassar os 6%, em massa. No caso dos agregados, conterem componentes oxidáveis não voláteis, (escórias de alto-forno), a perda ao fogo deve ser corrigida de acordo com a norma EN 196-2.
- A massa volúmica das partículas do fíler comercial, determinada de acordo com a norma EN 1097-7 e declarada pelo produtor com uma amplitude que não deve ultrapassar os 0,2 Mg/m³.

- A massa volúmica aparente em querosene, determinada de acordo com o Anexo B da norma EN 1097-3 e declarada pelo produtor com uma amplitude que se deve situar entre $0,5 \text{ Mg/m}^3 - 0,9 \text{ Mg/m}^3$.
- A superfície específica pelo ensaio Blaine, é determinada de acordo com a norma EN 196-6 e declarada pelo produtor com uma amplitude que não deve ser superior a $140 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Solubilidade em água

A solubilidade em água é determinada de acordo com a norma EN 1744-1, e declarada através da categoria apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 Categorias para valores máximos da solubilidade em água (adaptado de NP EN 13043:2004)

Solubilidade em água Percentagem em massa	Categoria WS
≤10	WS ₁₀
>10	WS _{Declarado}
Não requerido	WS _{NR}

Teor de carbonato de cálcio do filer calcário

O teor de carbonato de cálcio é determinado de acordo com a norma EN 196-21, determinada de acordo com a norma EN 13179-2 e declarada através da categoria correspondente, apresentada na Tabela 14.

Tabela 14 Categorias para valores mínimos do teor em carbonato de cálcio
(adaptado de NP EN 13043:2004)

Teor de carbonato de cálcio Percentagem em massa	Categoria CC
≥90	CC ₉₀
≥80	CC ₈₀
≥70	CC ₇₀
Não requerido	CC _{NR}
Nota – na norma EN 196-21, o resultado do ensaio é expresso em termos de teor de dióxido de carbono. Para a determinação do teor de carbonato de cálcio, o teor de dióxido de carbono é multiplicado por um fator de 2,2742.	

Suscetibilidade à água

A suscetibilidade à água é determinada de acordo com a norma EN 1744-4, e os resultados devem ser declarados.

Teor de hidróxido de cálcio do fíler aditivado

O teor de hidróxido de cálcio do fíler aditivado é determinado de acordo com a norma EN 459-2, e declarado através da categoria correspondente para os valores mínimos do teor, apresentada na Tabela 15.

Tabela 15 Categorias para valores mínimos do teor em hidróxido de cálcio (adaptado de EN13043:2004)

Teor de hidróxido de cálcio Porcentagem em massa	Categoria Ka
≥25	Ka25
≥20	Ka20
≥10	Ka10
<10	Ka _{Declarado}
Não requerido	KaNR

Nota – na norma EN 459-2, o resultado do ensaio é descrito em termos do teor de óxido de cálcio. Para a determinação do teor de hidróxido de cálcio, o teor de óxido de cálcio é multiplicado por um fator igual a 1,3213.

Com base no caderno de Encargos Tipo Obra – Pavimentação (Estradas de Portugal), os fíleres a incluir no fabrico de misturas betuminosas a quente para camadas de desgaste deverão cumprir os requisitos expressos nesse mesmo caderno, apresentados no quadro 14.03.0-3a (Requisitos granulométricos para o fíler) e no quadro 14.03.0-3b (Requisitos químicos e físicos para o fíler) e de igual modo encontrar-se em conformidade com os requisitos gerais dos fíleres da norma NP EN 13043, descritos anteriormente no ponto 2.4.1.2.

No caso do fíler recuperado a incluir nas misturas betuminosas não satisfazer os requisitos do Quadro 14.03.0-3b, particularmente os vazios do fíler seco compactado (Rigden) deverá ser adicionada a quantidade de fíler comercial necessária para que a composição fíler recuperado/fíler comercial satisfaça os requisitos pretendidos (Estradas de Portugal, 2008).

2.4.2. Ligantes betuminosos

Os ligantes betuminosos são um material adesivo que contem betume que pode estar sob a forma de não modificado, modificado ou emulsionado, ocupam entre 10% a 15% do volume de uma mistura betuminosa, que apesar de ser inferior ao valor dos agregados que compõem a

mistura, não deixa de se assumir como um componente essencial, que realiza as ligações entre os agregados, fornecendo coesão e estabilidade. As principais definições aplicadas a ligantes betuminosos derivados do petróleo, estão descritas de acordo com a norma NP EN 12597 – (Ligantes betuminosos – Terminologia). O betume é um material praticamente não volátil, adesivo e impermeável à água, derivado de um petróleo bruto que é quase na sua totalidade solúvel em tolueno (líquido incolor, com odor semelhante ao benzeno e ocorre na forma natural no petróleo) muito viscoso e quase sólido à temperatura ambiente (Estradas de Portugal, 2012)

Os ligantes que betuminosos podem ser utilizados na composição das misturas betuminosas, abrangem os seguintes tipos:

2.4.2.1. Betumes duros

Os betumes duros são aplicados em misturas betuminosas de alto módulo fabricadas a quente, e são obtidos por destilação direta do petróleo bruto. As suas características do betume deverão estar de acordo com a Norma Europeia EN 13924, respeitando as especificações referidas na Tabela 35. A sua classificação é efetuada de acordo, com os valores obtidos no ensaio de penetração, que permite avaliar indiretamente a viscosidade ou dureza do betume a uma determinada temperatura. Os valores do ensaio de penetração, variam entre 10/20 (betumes muito duros) até 180/220 (betumes muito fluidos), sendo que os betumes mais utilizados em Portugal são os betumes de classe 10/20 para misturas de alto módulo, 35/50 e 50/70 para as misturas mais comuns (Miranda, 2008).

2.4.2.2. Betumes de pavimentação

Os betumes de pavimentação são empregues essencialmente em misturas betuminosas fabricadas a quente, sendo obtidos por processos de refinação do petróleo bruto, os quais devem cumprir os requisitos impostos na Norma Europeia EN 12591 “*Bitumen and bituminous binders– Specifications for paving grade bitumens*”, onde são especificadas as propriedades e os métodos de ensaio adequados para a caracterização deste tipo de betumes. Os betumes de pavimentação 35/50 e 50/70 são os mais utilizados no fabrico das misturas betuminosas convencionais.

2.4.2.3. Betumes modificados

As características deste betume, devem-se apresentar em consonância com a norma NP EN 14023 - Betumes e ligantes betuminosos, que apresenta um quadro de especificações das características e dos métodos de ensaio adequados. Este tipo de betume apresenta propriedades reológicas modificadas durante o fabrico pela utilização de um ou mais agentes químicos.

Os betumes modificados: PMB10/40-70, PMB25/55-65, PMB45/80-60, PMB45/80-65, PMB45/80-75 a empregar, nas diferentes misturas que solicitem a utilização de um betume modificado, por exemplo, misturas de alto módulo, misturas descontínuas (incluindo as rugosas), misturas abertas (incluindo as misturas drenantes), argamassas betuminosas com/sem função de retardação de fissuras, etc., deve ser indicado no projeto o tipo de betume a utilizar (Estradas de Portugal, 2012).

2.4.2.4. Emulsões betuminosas

As emulsões betuminosas são aplicadas em misturas betuminosas fabricadas a frio, e são compostas por uma mistura de água, betume e emulsionante. Deverão estar de acordo com Norma Europeia EN 13808 *Bitumen and bituminous binders, Framework for specifying cationic bituminous emulsions*, que especifica os requisitos técnicos e classes de desempenho.

As características mais importantes das emulsões betuminosas catiónicas, são particularmente, a carga das partículas, o teor nominal em ligante, o tipo de ligante e o índice de rotura. O seu sistema de armazenamento deve provir meios, que garantam a sua estabilidade e evitem a sedimentação das partículas de betume. As emulsões podem dividir-se em clássicas e modificadas.

2.4.3. Ligantes Hidráulicos

Os ligantes hidráulicos misturados com a água produzem reações exotérmicas e hidratação resultando uma pasta que endurece ao ar ou dentro da água e a pasta endurecida, com ou sem outros materiais adicionados, sendo resistentes à água. Nas misturas com utilização de ligantes hidráulicos, os mais usados em Portugal são o cimento e a cal hidráulica. Aplicam-se em situações que não exijam resistência mecânica elevada.

2.4.3.1. Cimento

O cimento assume-se como o principal ligante hidráulico, e segundo a norma NP EN 206-1: 2007 é caracterizado como um “material inorgânico finamente moído que, quando misturado com água, forma uma pasta que faz presa e endurece em virtude das reações e processos de hidratação e que, depois de endurecer, mantém a sua resistência e estabilidade mesmo debaixo de água”.

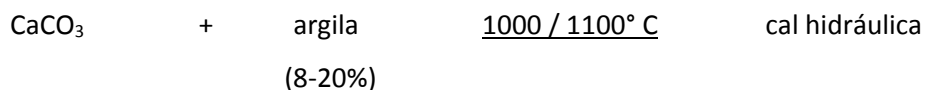
A sua composição resulta de uma combinação química entre cálcio, argila, sílica, ferro e alumínio. O seu fabrico decorre da conjugação de três etapas: a mistura e moagem da matéria-prima (calcário, margas e argila), produção do clínquer, moagem do clínquer e mistura com gesso, podendo classificar-se como cimentos naturais ou cimentos artificiais. Para a sua aplicação na

construção de pavimentos rodoviários foi normalizado a designação CEM e os cimentos agrupados em cinco tipos principais:

1. CEM I – Cimento Portland
2. CEM II – Cimento Portland composto
3. CEM III – Cimento de alto-forno
4. CEM IV – Cimento pozolânico
5. CEM V – Cimento composto

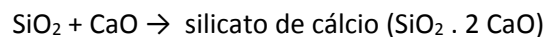
2.4.3.2. Cal hidráulica

A pedra calcária (CaCO_3) que contenha elevado teor de argila entre 8% a 20%, tratada termicamente a uma temperatura de 1000°C , dá origem à cal hidráulica que é um produto que endurece tanto na água como no ar. A cal hidráulica é constituída por silicatos ($\text{SiO}_2 \cdot 2 \text{CaO}$) e aluminatos de cálcio ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$) que hidratando-se endurecem na água ou no ar e também por óxido de cálcio (CaO) que hidratando-se endurecem na água ou ao ar e também por óxido de cálcio (CaO) – pelo menos 3%, que continua livre e que vai endurecer por carbonatação.



A preparação da cal hidráulica é feita em fornos, verificando-se as seguintes fases:

- a) 500°C a 700°C → desidratação da argila
- b) 850°C → decomposição do calcário ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$)
- c) 1000°C – 1100°C → Reação da sílica e alumina de argila com o óxido de cálcio, originando silicatos e aluminatos.



2.4.4. Ligantes aéreos

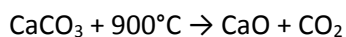
Os ligantes aéreos, são ligantes que misturados com a água forma uma pasta que endurece ao ar, sendo que, a pasta endurecida, com ou sem outros materiais incorporados, não é resistente à água.

2.4.4.1. Cal hidratada e Cal viva

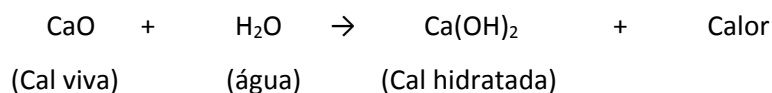
A cal apresenta-se como um dos ligantes artificiais mais conhecidos, sendo que resulta da cozedura dos calcários, constituídos sobretudo por CaCO_3 , referido anteriormente no ponto 2.4.3.2. Segundo a norma NP EN 459-1, “cal é um material que abrange qualquer forma física e

química sob a qual pode aparecer o óxido de cálcio e/ou magnésio (CaO e MgO) e/ou os hidróxidos (Ca(OH)₂ e Mg(OH)₂)”.

A cal viva ou óxido de cálcio (CaO) é um composto químico, obtido pela decomposição de materiais como o calcário, que contém carbonato de cálcio (CaCO₃ - mineral calcite), após ser submetido a temperaturas elevadas (900° C), em fornos adequados para o efeito, num processo de calcinação ou queima da cal, que consiste em libertar uma molécula de dióxido de carbono (CO₂), deixando a cal. A cal virgem não é estável e, quando arrefece, irá espontaneamente reagir com o CO₂ do ar até que, após algum tempo, é completamente convertido de volta para o carbonato de cálcio. Esta operação origina a seguinte reação química (calcinação):



A cal hidratada, resulta da reação entre a cal viva e a água, ou seja, sofre um processo de hidratação de forma controlada, que ao entrar em contacto com a água, transforma-se em cal hidratada Ca(OH)₂, exemplificado na reação química seguinte:



Existem diversos tipos de cal possíveis de usar, que a norma define, tais como: cal aérea, cal viva, cal hidratada, cal cálcica, cal dolomítica semi-hidratada e hidratada, cal hidráulica natural e cal hidráulica.

A normalização da cal em Portugal, encontra-se definida segundo a norma NP EN 459-1:2002, que está subdividida em três partes:

1. NP EN 459-1:2002 Cal de construção Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade.
2. NP EN 459-2:2002 Cal de construção Parte 2: Métodos de ensaio.
3. NP EN 459-3:2002 Cal de construção Parte 3: Avaliação da conformidade.

2.5. Métodos de formulação de misturas betuminosas

A formulação da composição volumétrica da mistura betuminosa, consiste num conjunto de procedimentos e ensaios que devem ser realizados ao pormenor, para que possa ter um

desempenho mais adequado em serviço. Os métodos de formulação utilizados têm como objetivo selecionar o tipo de agregados, curva granulométrica, o tipo e teor em betume e o tipo e quantidade de aditivos da mistura betuminosa, de modo que se obtenha um material de pavimentação, que conjugue o ponto de vista económico com as características desejadas, em suma, uma mistura betuminosa de fácil fabrico e colocação, e que suporte os efeitos das cargas e do clima ao longo do tempo que estiver em serviço. No entanto, a complexidade deste tipo de ensaios origina um aumento de tempo e custos associados ao processo de formulação.

Os métodos de formulação podem ser reunidos em diferentes categorias: i) tipo “receita”, ii) empíricos, iii) analíticos, iv) volumétricos, v) relacionados com o comportamento das misturas betuminosas e vi) baseados no comportamento das misturas betuminosas. Segundo Luminari & Fidato (1998), foram considerados nove critérios para classificar as diferentes categorias de métodos de formulação (Tabela 16).

Tabela 16 Categorias de métodos de formulação e respetivos critérios (Luminari & Fidato, 1998)

Categorias de métodos de formação	Critérios em que se baseia a formulação								
	Baseado em experiência com misturas de composição conhecida	Produção e compactação de provetes	Critérios Volumétricos	Análise e Composição Volumétrica	Compactação de provetes reproduz o processo <i>in situ</i>	Utilização de Ensaios Empíricos	Utilização de Ensaios de Simulação	Utilização de Ensaios Fundamentais	Modelo de previsão do comportamento no pavimento
Tipo “receita”	X								
Empíricos		X	X			X			
Analíticos		X	X	X		X			
Volumétricos		X	X	X	X		X		
Relacionados com o comportamento das misturas betuminosas		X	X	X	X		X	X	
Baseados no comportamento das misturas betuminosas		X	X	X	X		X	X	X

▪ **Métodos empíricos**

Os métodos empíricos surgiram como complemento natural dos métodos, não recorrendo a qualquer tipo de ensaio mecânico, o que tornava impraticável avaliar, ainda que com recurso a ensaios simples e económicos, a qualidade das misturas *in situ* quando os seus constituintes se afastavam das especificações. Estes métodos têm por objetivo a determinação do teor em betume de modo a otimizar diversas variáveis obtidas em ensaios, respeitando os limites estabelecidos na experiência acumulada e incluindo os limites determinados pela análise. As grandezas avaliadas ao longo do processo não são medidas diretas do comportamento mecânico do material formulado.

As variáveis estão compreendidas entre parâmetros volumétricos (baridade, porosidade) e outros obtidos através de ensaios mecânicos empíricos, em provetes preparados através de um processo de produção e compactação, que não reproduz as condições existentes *in situ*. Da análise efetuada às diversas variáveis (estabilidade, deformação, porosidade, baridade), obtidas em provetes com diferentes teores em betume, procede-se à escolha do teor ótimo em betume que irá otimizar o valor das variáveis (Freire, 2003).

O método de Marshall (mais conhecido) que se baseia na utilização de um ensaio de compressão diametral ou tração indireta, método de Duriez, que utiliza um ensaio de compressão uniaxial desenvolvido em França, e o método de Hveem, que utiliza um ensaio triaxial desenvolvido nos Estados Unidos, são alguns dos exemplos que podem ser incluídos na classe dos métodos empíricos.

▪ **Métodos analíticos**

Os métodos analíticos consistem no cálculo volumétrico da composição da mistura betuminosa, tendo em conta, a proporção das frações dos agregados utilizados, teor em betume e volume de vazios, sendo que estes métodos não incluem a preparação de quaisquer provetes. Assim, a composição da mistura betuminosa é determinada com base em fórmulas analíticas resultantes das composições volumétricas obtidas entre os componentes da mistura.

A principal vantagem do processo, consiste na obtenção da composição base das misturas betuminosas sem ser necessário a produção de provetes, no entanto é necessário um ensaio para verificação experimental, para que a composição seja considerada o resultado final da formulação (Freire, 2003).

▪ **Método Tipo “Receita”**

Os métodos tipo “receita” têm como base, a utilização de misturas betuminosas comuns, com conhecimento da sua composição, seu comportamento após período de aplicação,

comportamento para certas condições de tráfego e clima, e que apresentaram desempenhos suficientes.

A determinação da mistura betuminosa, é definida de acordo com a granulometria dos agregados, o teor em betume, tipo de betume, espessura da camada a colocar, condições de fabrico na central, colocação e compactação. Neste método, não é exigível a preparação de provetes para ensaio ou análise. A utilização deste método, assume-se a forma de especificações pouco rigorosas, no que se refere a determinadas características da mistura e dos seus componentes.

Assim, este método de formulação continua a ser indicado e aplicado, mesmos em países onde já se utilizam métodos mais rigorosos, fundamentalmente em estradas com tráfego pouco intenso.

▪ **Métodos volumétricos**

Os métodos volumétricos são determinados através da análise das proporções volumétricas do betume, dos agregados e dos vazios, usando um equipamento de ensaio, que simula as condições de compactação *in situ*, que se designa por compactador de corte giratório (CGG).

A composição da mistura betuminosa obtém-se, com base nas suas propriedades medidas em provetes compactados em laboratório de modo a reproduzirem, as condições de compactação usadas *in situ*, as quais devem cumprir determinadas exigências especificadas, tendo como principal exigência a obtenção de uma porosidade igual a 4%. Tal como acontece nos métodos analíticos, há necessidade de realizar ensaios adicionais para verificar as composições resultantes dos cálculos.

Este método deve apenas ser utilizado, em estradas com um tráfego pouco intenso, dado que não é necessário determinar as propriedades mecânicas das misturas betuminosas, uma vez que o cumprimento das exigências relativas às propriedades volumétricas garante um desempenho mecânico adequado dessas misturas. Na base dos mais recentes métodos de formulação relacionados com o comportamento ou alicerçados no comportamento das misturas betuminosas, estão os métodos volumétricos (Lopes, 2009).

▪ **Métodos relacionados com o comportamento das misturas betuminosas**

A formulação de misturas betuminosas relacionada com o seu comportamento visa a obtenção, através de ensaios mecânicos (determinação das propriedades relevantes para os métodos de dimensionamento: módulo de deformabilidade, resistência ao fendilhamento por fadiga e resistência às deformações permanentes), da composição que garante determinado nível de comportamento desejado para a mistura betuminosa.

Os métodos de formulação relacionados com o comportamento das misturas betuminosas, produzem inicialmente misturas betuminosas com base na composição volumétrica, sendo estas sujeitas a ensaios, que avaliam as propriedades do comportamento mecânico da mistura betuminosa no pavimento. Dos resultados obtidos nos ensaios, será definida uma composição ótima da mistura betuminosa, que garanta que todas as propriedades avaliadas sejam superiores a um mínimo desejado ou determinado.

- **Métodos baseados no comportamento das misturas betuminosas**

Nos métodos de formulação baseados no comportamento, a mistura betuminosa, inicialmente otimizada através dum dos métodos de formulação anteriormente citados, é avaliada através de ensaios baseados no comportamento das misturas betuminosas em serviço, cujos resultados servem como dados de entrada num sistema de avaliação integrado (Freire, 2003), permitindo uma interação entre a formulação das misturas e o dimensionamento do pavimento.

Os provetes utilizados nos ensaios, são compactados aplicando procedimentos que permitam representar corretamente a compactação *in situ*.

No sistema informático de avaliação integrado são aplicados os seguintes modelos para previsão do comportamento das misturas betuminosas: propriedades das misturas, efeitos climáticos, resposta do pavimento e degradação do pavimento. Com base nestes modelos e nos dados do projeto (estrutura do pavimento, tráfego e clima) e dos resultados dos ensaios realizados é possível prever o comportamento das misturas betuminosas utilizadas no pavimento e estimar a evolução dos diferentes tipos de degradação ao longo do período de vida do pavimento (Freire, 2003). O desenvolvimento dos métodos de formulação, baseados no comportamento das misturas betuminosas, ocorreram nos Estados Unidos, sendo que a primeira proposta para o referido método foi a indicada nos níveis 2 e 3 do método de formulação Superpave (formulação das misturas betuminosas realizada através das suas propriedades volumétricas, determinadas em provetes produzidos num compactador giratório, não tendo como base qualquer ensaio de determinação de propriedades mecânicas das misturas) para tráfego médio e elevado (Lopes, 2009).

2.6. Marcação CE

No que concerne à marcação CE foram criadas normas europeias para as misturas betuminosas, designadamente a Norma Europeia EN13108, a qual permite assegurar a conformidade de um produto tendo em conta as exigências estabelecidas em diretivas comunitárias.

A norma EN13108 “*Bituminous mixtures – Material specifications*” é formada por diferentes partes e reúne as especificações para os diversos tipos de misturas betuminosas, assim como as especificações referentes ao controlo de produção industrial e ao tipo de ensaios a realizar. Cada parte da norma EN13108 é composta por requisitos gerais, requisitos empíricos e requisitos fundamentais. Esses mesmos requisitos são divididos em classes de acordo com os valores das propriedades em causa, correspondendo às propriedades da mistura betuminosa.

As misturas betuminosas aplicadas em Portugal, na sua maioria, estão abrangidas pela Norma Europeia NP EN 13108-1:2008 Misturas Betuminosas – Especificações de materiais – Parte 1: Betão betuminoso, EN 13108-2:2006 *Bituminous Mixtures – Material Specification Part 2 – Asphalt concrete for very thin layers* (ACVTL), EN 13108-6:2006 *Bituminous Mixtures – Material Specification Part 6 – Mastic asphalt*, EN 13108-7:2006 *Bituminous Mixtures – Material Specification Part 7 – Porous asphalt* e EN 13108-8:2005 *Bituminous Mixtures – Material Specification Part 8 – Reclaimed asphalt*. As normas EN 13108-20 e EN13108-21, definem os critérios impostos aos materiais utilizados e o seu sistema de produção (Ensaio Tipo Inicial e Controlo de Produção em Fábrica).

As Normas Portuguesas NP EN 13108-20:2008 Misturas betuminosas – Especificações dos materiais - Parte 20: Ensaio de Tipo e NP EN 13108-21:2008 Misturas betuminosas – Especificações dos materiais - Parte 21: Controlo da Produção em Fábrica, são parte fundamental do sistema de avaliação da conformidade das misturas betuminosas. No Anexo ZA da norma europeia EN 13108:2008 Misturas Betuminosas – Especificações de materiais – Parte 1: Betão betuminoso, encontram-se estabelecidos os critérios para a avaliação da conformidade, contendo o Controlo de Produção em Fábrica e as normas em que assentam o Guia para a marcação CE e os Ensaio do Tipo Inicial. O controlo de produção em fábrica é um sistema de qualidade em que o fabricante é obrigado a instituir um plano de qualidade concreto com uma periodicidade que está sujeita, entre outros fatores, ao número de conformidades adquiridas.

Por outro lado, o ensaio do tipo inicial tem de definir e incluir um número mínimo de ensaios de comprovação da mistura, tal como os seus componentes. O Anexo A da EN 13108-20:2008 compila as propriedades e os métodos de ensaio, para os materiais constituintes, em que os dados a ensaiar são fornecidos para apontar a conformidade com os requisitos especificados.

2.6.1. Requisitos da Norma Portuguesa EN 13108-1

Segundo os materiais mais utilizados em Portugal, a norma NP EN 13108-1:2008 é a mais representativa, como já foi referido e descrito no ponto 2.3. Os requisitos que definem as misturas betuminosas têm duas hipóteses de atuação, sendo definidas por requisitos empíricos, em que a fórmula da mistura betuminosa deve satisfazer os requisitos gerais e os requisitos

empíricos, ou são definidos pelos requisitos fundamentais, em que a fórmula da mistura betuminosa satisfaz os requisitos gerais e os requisitos fundamentais.

- Requisitos gerais: granulometria e composição, porosidade, revestimento e homogeneidade, sensibilidade à água, resistência à abrasão provocada por pneus pitonados, resistência à deformação permanente, reação ao fogo, resistência aos combustíveis para aplicação em aeroportos, resistência aos fluidos descongelantes para aplicação em aeroportos, temperatura de mistura e durabilidade.
- Requisitos empíricos: composição, granulometria, percentagem de ligante e aditivos, valores Marshall para aplicação em aeroportos, vazios preenchidos com betume, vazios na mistura de agregados e porosidade após 10 giros.
- Requisitos fundamentais: granulometria, percentagem de ligante, rigidez, resistência à deformação permanente num ensaio de compressão triaxial e resistência a fadiga

2.6.2. Abordagens em Portugal

Tal como é descrito na Norma Europeia EN 13108-1:2008 Misturas Betuminosas – Especificações de materiais – Parte 1: Betão betuminoso, o objetivo é particularizar o betão betuminoso em termos de propriedades fundamentais apoiadas no desempenho. Portanto, na EN 13108-1, são definidas duas abordagens para explicar o betão betuminoso: a empírica, que consiste na definição do betão betuminoso em termos de “receitas” de composição e requisitos para matérias constituintes, em associação com requisitos adicionais baseados em ensaios relacionados com o desempenho; e a abordagem fundamental, que define o betão betuminoso em termos de requisitos apoiados no desempenho, em associação com reduzida prescrição da composição e dos materiais constituintes (Alves, 2011). Segundo o Anexo Nacional da NP EN 13108-1 e o atual estado da arte em Portugal, a abordagem seguida em Portugal é a empírica. Todavia, prevê-se que Portugal adquira brevemente experiência na abordagem fundamental. As propriedades fundamentais do betão betuminoso estão sujeitas a um conjunto de fatores, uns relacionados às solicitações e outros agregados à composição das misturas. Portanto, os resultados aferidos em laboratório dependem das condições de ensaio adotadas, nomeadamente temperatura, frequência, tipo de carregamento e estado de tensão. O ligante para as misturas especificadas tanto pela abordagem empírica como pela fundamental deve ser betume de pavimentação, betume modificado ou betume duro de pavimentação, que deve estar em conformidade com as devidas Normas Europeias nomeadamente, o betume de pavimentação com a EN 12591, o betume modificado com a EN 14023 e o betume duro com a EN 13924. As características e requisitos para as misturas betuminosas segundo a norma NP EN 13108-1:2008, encontram-se descritas na Tabela 17.

Tabela 17 Características e requisitos para as misturas betuminosas (adaptado de NP EN 13108-1:2008)

NP EN 13108-1		Características dos materiais constituintes			Requisitos gerais					Requisitos empíricos						
Capítulo da Norma		4.2	4.4	4.5	5.2.1		5.2.2	5.2.4	5.2.6	5.2.10	5.2.1.2 e 5.3.1.2	5.3.1.3				
Designação anterior	Designação actual	Ligante	Mistura betuminosa recuperada	Aditivos	Composição, granulometria e percentagem de ligante	Série de peneiros	D (mm)	Porosidade, V min. a V máx. (%) (Compactador Impacto 75 pancadas) ^a	Sensibilidade à água (ITSR) (Compactador Impacto 75 pancadas) ^b	Resistência à deformação permanente (Wheel Tracking) (60°C equipamento pequeno, Método B, ao ar, compactador de rolos)	Temperatura de fabrico da mistura betuminosa	Granulometria (Intervalo % por massa Fuso)	Percentagem em betume, B _{min} (%)			
Macadame Betuminoso 0/37,5	AC 32 base ligante (MB)	Tipo e classe a declarar	A declarar	A declarar	A declarar	Série Base + Série 2	31,5	NR	NR	A categoria deve ser declarada	A categoria deve ser declarada	Consoante ligante	Ver Quadro 2 deste Anexo	A declarar (ver secção 5.2 deste Anexo)		
Macadame Betuminoso 0/25	AC 20 base ligante (MB) AC 20 bin ligante (MB)						20	3,0-6,0	20						3,0-6,0	
Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD) AC 20 bin ligante (MBD)						20	3,0-6,0	20						3,0-6,0	
Mistura de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM) AC 16 reg ligante (MBAM) AC 16 bin ligante (MBAM)						20	2,0-6,0	16						2,0-5,0	
Betão Betuminoso Subjacente	AC 14 reg ligante (BBsb) AC 14 bin ligante (BBsb)						14	3,0-5,0	14						3,0-6,0	
Betão Betuminoso C. Desgaste	AC 14 reg ligante (BB) AC 14 surf ligante (BB)						14	3,0-5,0								
Betão Betuminoso Rugoso (micro)	AC 14 surf ligante (BBr)						14	3,0-6,0								
Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (BB)						10	3,0-6,0								NR

NR – Não requerido

Nota:

^(a) No caso do AC 10 surf ligante (BBr), para a determinação da porosidade, os provetes serão moldados com recurso ao compactador e à aplicação de 50 pancadas.

^(b) No caso do AC 10 surf ligante (BBr), para efectuar o ensaio da sensibilidade à água, aplicam-se apenas 50 pancadas.

CAPÍTULO 3

CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA DOS FÍLERES

3. Caracterização física e química dos fíleres

3.1. Fíleres

Os pavimentos rodoviários estão sujeitos a diferentes acções, as quais podem originar diversos tipos de degradações, como referido no ponto 2.2., sendo que a solução dos referidos problemas passa pelo alargamento do conhecimento dos efeitos dos fíleres, com o desenvolvimento de melhores critérios para a concepção de misturas e o controlo dos principais fatores durante a execução dos pavimentos.

As misturas betuminosas aplicadas em pavimentos rodoviários são compostas por uma fração mineral, formada por partículas de dimensões variáveis, entre 5 mm a 30 mm. Segundo o Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal (2012), atribui-se a designação de fíler a todo agregado cuja maior parte passa no peneiro 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhes conferir certas propriedades. A utilização dos fíleres nas misturas betuminosas, requer o cumprimento de diversos requisitos, anteriormente descritos no ponto 2.4.1.2, de forma a apresentarem conformidade com os requisitos gerais da norma NP EN 13043:2004 e do Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal S.A.. O fíler é utilizado como material de preenchimento dos vazios entre agregados grossos e finos, contribuindo para a conclusão da mistura, modificando características como a trabalhabilidade, resistência à água e a resistência à deterioração, consequência do tamanho reduzido das suas partículas e das suas características de superfície. O processo de fabrico do fíler, pode resultar de recuperação dos finos por meio de sistemas de filtros (extratores de poeiras) adequados (fíler recuperado) em centrais de misturas betuminosas (Figura 12), ou ser produzido em separado numa central de britagem com processo de produção controlado (fíler comercial). A natureza do fíler comercial deverá ser calcária, cimento do tipo Portland, cal hidráulica ou cinzas volantes, no que se refere ao fíler recuperado pode apresentar qualquer origem petrográfica, pois será dependente da natureza do agregado utilizado para o fabrico de mistura betuminosa.



Figura 12 Central de misturas betuminosas (www.fazvia.com, 2013)

No processo de comercialização dos fíleres, existe um conjunto de exigências estabelecidas aos quais devem obedecer, que se refere à ficha técnica do produto, e a respetiva marcação CE apresentada no ponto 2.7., indicando a conformidade do produto. No caso do fíler recuperado, se não cumprir os requisitos do ponto 2.4.1.2, em particular os vazios do fíler seco compactado (Rigden), deverá ser adicionada a quantidade de fíler comercial necessária, até que a composição fíler recuperado/fíler comercial satisfaça os requisitos pretendidos.

De acordo com Hesp *et al* (2001), a utilização de diferentes tipos de fíler em misturas betuminosas aparentemente iguais, provoca frequentemente um comportamento muito diferente dessas misturas betuminosas no pavimento.

As propriedades físicas e químicas de cada fíler têm efeito direto nas propriedades mecânicas da mistura, a alteração que cada fíler provoca ocorre por meio de mudanças nas propriedades químicas e físicas do ligante, que depende dos seguintes fatores: tipo de fíler (dimensão, forma dos grãos, etc.), natureza do fíler (atividade física e química que afeta a afinidade com o betume) e concentração do fíler na mistura (Barbosa *et al*, 1997). Devido à importância das referidas propriedades, nos diferentes tipos de fíler a utilizar nas misturas betuminosas Craus *et al* (1978), estudaram as características físico-químicas de diferentes tipos de fíler e avaliaram a sua influência no comportamento da mistura betuminosa, tendo chegado à conclusão, que a irregularidade geométrica do fíler (forma e textura superficial) tem uma função relevante nas misturas betuminosas, afectando a percentagem ótima de betume (média da soma das percentagens de betume correspondentes à máxima força de rotura, à máxima baridade e à porosidade média), as ligações fíler-betume e o comportamento reológico dos mastiques betuminosos.

Craus *et al* (1978) consideram que, entre os vários aspectos físico-químicos da interação fíler-ligante asfáltico, o mais importante fator de caracterização do fíler é a intensidade de adsorção (adesão de moléculas de um fluido a uma superfície sólida). O aumento da adsorção, origina uma maior irregularidade do fíler, obrigando a um aumento de percentagem em betume da mistura betuminosa, sem que ocorram benefícios ao nível do comportamento mecânico. Ao ocorrer um aumento significativo de betume, este tipo de fíleres tornam-se economicamente inviáveis, não devendo ser utilizados.

3.2. Caracterização das amostras de fíler

No estudo realizado pretendeu-se ensaiar uma grande diversidade de fíleres, com características petrográficas e processos de fabrico distintos, alcançando uma maior abrangência na análise pretendida (Figura 13). As amostras ensaiadas são de origem granítica (Amostras: D e F), calcária (Amostras: A, B, C e E). Para além dos materiais provenientes da britagem e recuperação nas centrais betuminosas, foram também ensaiados uma cal hidratada (Amostra: G) e uma cal hidráulica (Amostra: H). Dada a quantidade elevada de amostras, foi atribuída uma designação a cada uma delas, como podemos observar na Tabela 18, de modo a facilitar o seu reconhecimento no processo de caracterização.

Tabela 18 Síntese dos materiais submetidos a ensaio

Amostra	Designação	Origem
A	Fíler calcário RC 480	Vale Ourém – São Mamede
B	Fíler calcário RC 590	Vale Ourém – São Mamede
C	Fíler recuperado de pó calcário	Vale dos Ovos – Tomar
D	Fíler recuperado de pó granítico	Vila Verde – Vila Conde
E	Fíler calcário C100	Vale Seta – Fátima
F	Fíler recuperado pó granítico	Escudeiros – Braga
G	Cal hidratada	Alcanede – Santarém
H	Cal hidráulica	Maceira – Leiria

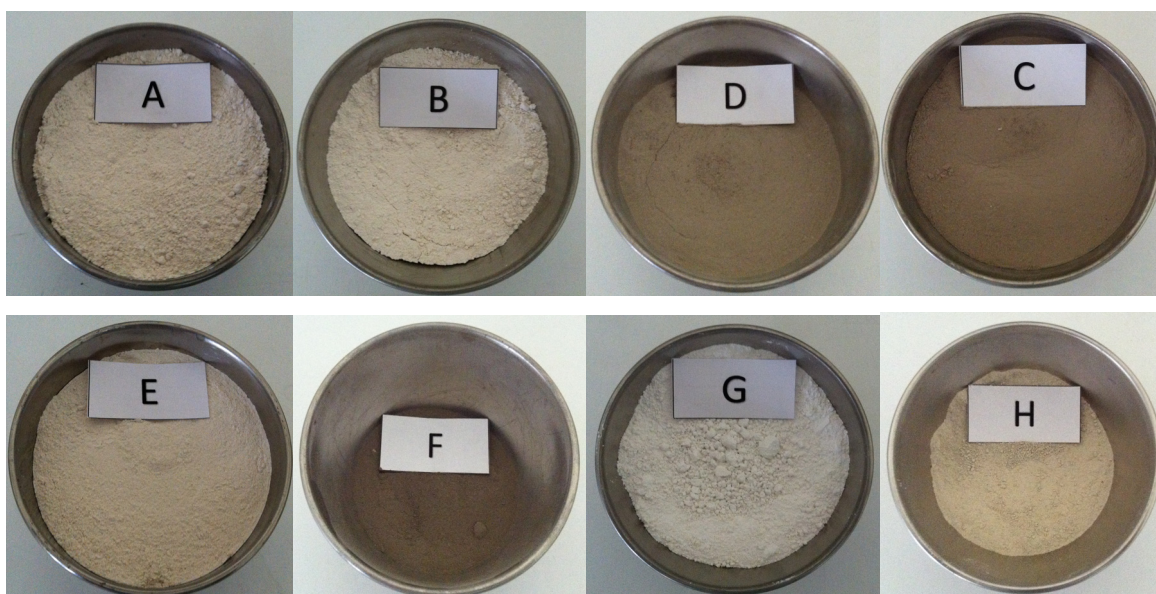


Figura 13 Amostras de fíler

▪ Enquadramento geológico e geográfico

As amostras de fíler com origens calcárias A, B, C, E, G e H, apesar de processos de obtenção distintos, têm como elemento comum na sua composição os calcários. Dos calcários existentes no território nacional, os de maior relevância e com um elevado potencial de aplicação, correspondem ao Jurássico (Figura 14), mais concretamente ao Jurássico Médio (Batoniano e Bajociano). Importa referir, que também existe calcário concernente ao Cretácico e ao Terciário, mas devido aos seus afloramentos pouco robustos, revelam-se economicamente pouco relevantes. As principais explorações de calcário, existentes nos distritos de Aveiro, Coimbra, Leiria, Santarém, Lisboa, Setúbal e Faro, localizam-se nas formações mesozoicas e do miocénico, sendo que os calcários mesozóicos derivam quer das formações do Jurássico ou do Cretácico.

Os calcários do Jurássico, devido à sua reduzida dureza e resistência ao esmagamento, que aumenta a sua trabalhabilidade, inclusive na execução de motivos ornamentais, são explorados e utilizados na construção os calcários oolíticos (brandos) do Dogger e do Batoniano. No que confere ao Jurássico Médio, os calcários também oolíticos, apresentam uma maior rigidez sendo explorados ao longo da mancha, que aflora entre Condeixa e Tomar, terminando a norte de Rio Maior. Procedentes do Jurássico Superior (Malm), os calcários da mesma natureza, apresentam uma cor mais escura, variando entre a cor quase preta, branco-amarelada ou acinzentada. No afloramento que se estende desde Rio Maior até Alcanede e Monsanto, evidenciam-se os calcários cristalinos compactos oriundos do Cretácico. Nas camadas do Miocénico (Vale de Óbidos), encontram-se calcários utilizados na construção, apesar de uns apresentarem características marinhas e outros continentais.

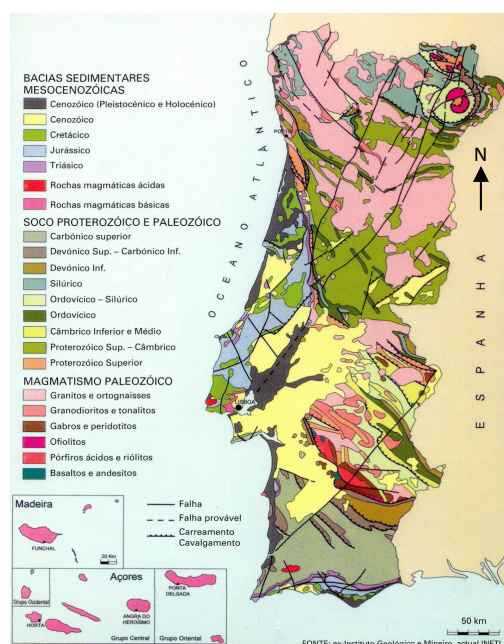


Figura 14 Carta Geológica de Portugal (LNEG, 2013)

Os afloramentos de material calcário, do qual são provenientes as amostras A,B,C,E, G e H localizam-se na região central de Portugal no maciço Calcário Estremenho (MCE), ocupa uma área de 900 km² no centro do País, a cerca de 100 km a Norte de Lisboa, datado do Período Jurássico (cerca de 160 Milhões de Anos), formou-se através da precipitação de substâncias dissolvidas na água, principalmente carbonato de cálcio (CaCO₃) e corresponde a uma espessa sequência de rochas carbonatadas mesozóicas que se apresentam estruturalmente sobrelevadas. As unidades produtivas das principais variedades ornamentais estão datadas do Jurássico Médio, mais concretamente do Batoniano e do Caloviano. No que concerne ao Batoniano, é essencialmente formado, por calcários com tendência recifal, nos quais predominam calcários oolíticos, calciclásticos e microcristalinos, sendo os géneros litológicos que constituem este andar utilizados como rocha ornamental. O Caloviano é constituído por calcário calciclástico, microcristalino e oolítico, sendo também utilizado como rocha ornamental, especialmente na área de Fátima (Manuppella *et al*, 1975). A amostra F e a amostra D (Figura 13) encontram-se integrados na unidade morfoestrutural do Maciço Hespérico, mais precisamente na unidade geotectónica distinta designada por Zona Centro Ibérica (ZCI) da cadeia Hercínica, uma das mais importantes. Sendo que, a amostra F é oriunda do distrito de Braga, concelho de Vila Nova de Famalicão com uma área de 201,85 km². O granito que aflora na respectiva zona corresponde a um monzogranito de grão médio, com tendência porfiróide, de duas micas essencialmente botítico. A amostra D procedente do noroeste de Portugal, concelho de Vila do Conde com uma área aproximada de 149 Km². Do ponto de vista geológico, o território de Vila do Conde é dominado por um vasto conjunto de formações graníticas anteriores à orogenia na cadeia Hercínica. A zona mais meridional de onde provem a amostra D, caracteriza-se pela presença de granito alcalino, de grão médio a grosseiro, leucocrata, de duas micas (granito de duas micas sintectónico). Na área de Vila Chã e do Mindelo, encontram-se também alguns afloramentos do complexo xistograuváquico ante-ordovícico e de calhaus rolados, dispersos, de praias ou terraços desmantelados. Os afloramentos rochosos das praias, a norte da ribeira das Latas, pertencem ao complexo xistograuváquico (www.amp.pt, 2013). A Figura 15 apresenta uma localização pormenorizada das amostras utilizadas neste estudo.

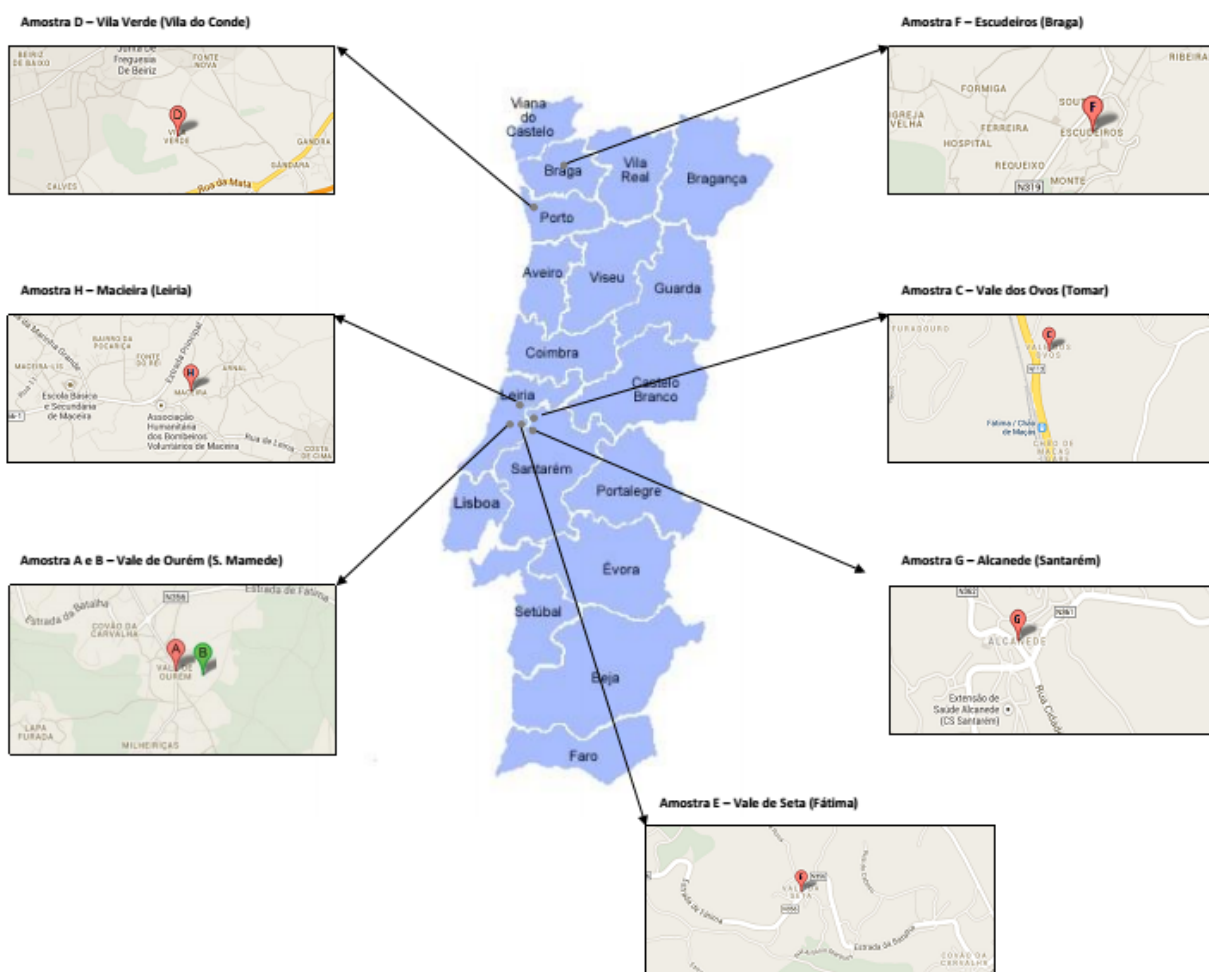


Figura 15 Localização das amostras de fíler (www.almariada.blogspot.pt, 2013)

3.3. Avaliação das características físico químicas das amostras

Neste ponto, pretende-se descrever os ensaios e procedimentos executados na campanha experimental que levaram ao estudo das características físicas, químicas e geométricas de cada um dos fíleres, muito importante para o estudo do fíler, dado que este desempenha um papel preponderante no comportamento das misturas betuminosas.

No final, é feita uma análise crítica a esta fase, na qual são abordadas e discutidas todas as considerações tomadas ao longo da campanha experimental e os principais fatores com relevância nos resultados finais

3.3.1. Ensaio para determinação da granulometria do fíler (peneiração por jato de ar)

O equipamento de peneiração por jato de ar utilizado neste trabalho e cedido pelo Laboratório de Geotecnia e Materiais de Construção (Instituto Superior de Engenharia do Porto), AS 200 jet da Retsch é particularmente adequado, entre outras aplicações, para a realização da análise granulométrica, em materiais muito finos, que requerem uma dispersão e desaglomeração

eficientes, como é o caso dos fíleres, apresenta-se como um método suave e rápido para peneiros a partir de 10 microns. O referido método preserva extremamente bem o material porque o peneiramento por jato de ar abdica de acessórios mecânicos de peneiração.

O equipamento tem um bico de abertura rotativa (processo que reduz bastante a quantidade de grãos confinados ao mesmo espaço, otimizando a precisão da separação e assegurando excelente reprodutibilidade). O peneiro e a tampa estão posicionados imediatamente por cima do bico. Um aspirador industrial acoplado gera um forte jato de ar na camara de peneiração, dispersando as partículas no peneiro através do bico da abertura. O material que passar pela malha do peneiro é conduzido ao ciclone ou ao aspirador pelo fluxo de retorno do ar. O jato de ar ajuda a desaglomerar as partículas e limpa continuamente a malha do peneiro. Por cima da malha, o jato de ar distribui-se por toda a superfície do peneiro e é aspirado em baixa velocidade através da malha. Com isso, o material fino é transportado através das malhas e sugado por um aspirador ou opcionalmente recolhido num ciclone (Figura 16).



Figura 16 Tecnologia AS 200 JET (www.retsch.pt, 2013)

A determinação da granulometria do fíler pelo método de peneiração por jato de ar (Figura 17), é realizada de acordo com a norma EN 933-10:2005. Esta técnica de peneiração a fíleres de origem natural e artificial, só é executada em partículas de dimensão nominal máxima de 2 mm.

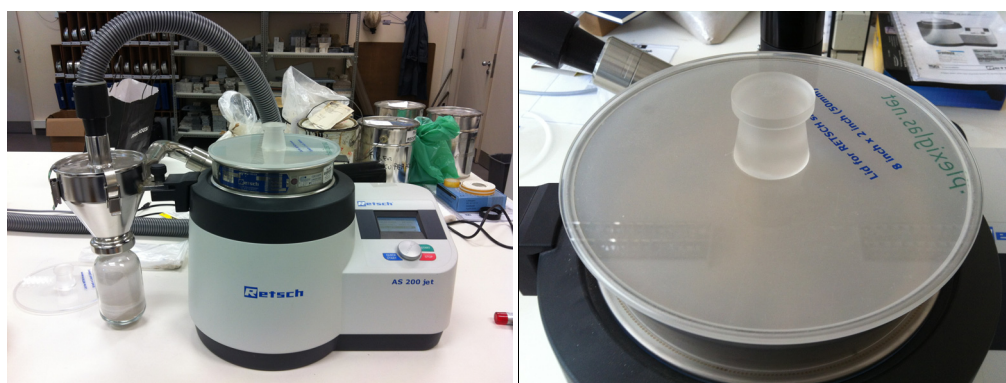


Figura 17 Equipamento de peneiração por jato de ar

A preparação das amostras exige uma especial preocupação no processo de secagem, por ser a fração mais fina dos agregados, apresentar uma tendência para aglomeração (formação de pequeno grumos) e na carga electrostática que as partículas possam deter, fatores capitais, cuja ocorrência, poderiam provocar uma peneiração deficiente.

Após o processo de secagem é colocada uma massa 50,0 ($\pm 1,0$) g de cada amostra de fíler, no peneiro de 0,063 mm, a uma pressão 3,0 ($\pm 0,5$) kPa, durante um período mínimo de 3 minutos. Na amostra de cal hidratada (Amostra G), apenas foram colocados 40,0 ($\pm 1,0$) g, desviando-nos um pouco do procedimento normativo, mas procurando obter uma massa de amostragem idêntica às outras amostras, criando condições de ensaio idênticas. O processo de peneiração ficará completo, com acréscimos de peneiração de 1 minuto, até se verificar que o material retido não altera 0,1% da massa. Repete-se o processo para os peneiros de abertura 0,125 mm, 2 mm, usando o material retido do peneiro de menor abertura. Por último, contabilizam-se as percentagens de retidos de cada peneiro, pela pesagem dos agregados. Na amostra G, foram sentidas muitas dificuldades na peneiração, sendo inclusive necessária a transferência do material que se encontrava a ser peneirado para um almofariz, de forma a desaglomerar as partículas, com a ajuda de um pilão e voltar a colocar no peneiro, obtendo uma análise granulométrica eficaz.

3.3.2. Ensaio para determinação da qualidade dos finos – Azul de Metileno

A avaliação dos finos, pelo método de ensaio do azul de metileno, executa-se de acordo com a norma NP EN 933-9:2011 (Anexo A), sendo realizada em partículas da fração granulométrica 0/0,125 mm. O ensaio consiste na introdução de quantidades de solução de azul de metileno, em doses sucessivas, até que a superfície das partículas com capacidade de adsorção fique coberta. A partir desse momento passa a existir um excesso de azul de metileno na preparação, correspondendo ao ponto de viragem que marca o fim do ensaio, e que pode ser detetado pelo teste da mancha. O ensaio da mancha consiste em retirar uma gota de suspensão com a ajuda de uma vareta de vidro e depositá-la sobre o papel de filtro, considerando-se positivo no caso de se formar uma auréola azul clara em redor do círculo central, como podemos verificar na Figura 18.

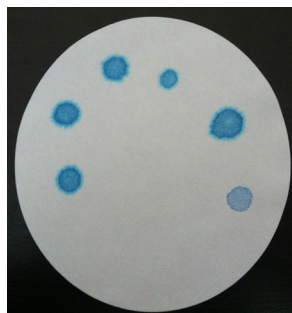


Figura 18 Teste da mancha

A presença de auréola traduz a existência de azul de metileno livre na suspensão, demonstrando que todas as partículas suscetíveis de adsorverem azul de metileno estão cobertas por uma camada de moléculas daquela substância. O referido método, avalia a superfície específica total interna e externa das partículas. O equipamento necessário à realização do ensaio é simples (Figura 19), limitando-se apenas a uma bureta graduada com suporte, agitador com velocidade de rotação variável, papel de filtro normalizado, gobelé, água destilada e solução de azul de metileno.

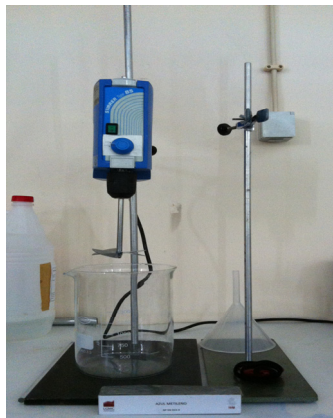


Figura 19 Equipamento de ensaio azul de metileno

Na amostra de cal hidratada (Amostra G) e mantendo o método referido na descrição da metodologia do ensaio anterior (3.2.1), devido à sua baixa densidade, utilizou-se uma massa de amostra com volume idêntica às restantes amostras, criando condições de ensaio equivalentes. Segundo a norma, que descreve o procedimento de ensaio, o valor de azul de metileno MB_F para determinação da qualidade dos finos é expresso em gramas de corante por quilograma da fração 0/0,125 mm, da seguinte forma:

$$MB_F = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad (1)$$

Legenda:

MB_F – valor de azul de metileno

M_1 – massa do provete de ensaio (gramas)

V_1 – volume total de solução de corante adicionada (mililitros)

Após a realização do referido ensaio segundo a norma, conclui-se que a introdução de 5 ml de corante na solução poderá ser excessivo e pouco adequado. A introdução de uma quantidade inferior em certas amostras, poderia ser suficiente para o aparecimento de auréola no teste da mancha, alterando o valor do teor de azul de metileno.

3.3.3. Ensaio para determinação da massa volúmica do fíler

A determinação da massa volúmica do fíler, de acordo com a norma NP EN 1097-7:2008, consiste na colocação de provetes de fíler em picnómetros de 50 ml e respetivo enchimento com um líquido que não reaja com os provetes, ou seja, não poderá ser água devido à presença da cal hidráulica (Amostra H), pelo que foi utilizado uma gasolina com uma elevada pureza. Durante um período de 35 minutos, são submetidos a vácuo a uma pressão de 3,0 (± 0,3) KPa, colocando-se posteriormente em banho de água durante 60 minutos a 25 (± 0,1) °C (Figura 20). Realiza-se a pesagem dos picnómetros (m_2) que irá permitir determinar em simultâneo com os valores da massa do picnómetro vazio (m_0) e com fíler (m_1), a massa volúmica do fíler ensaiado. Na realização do ensaio a cal hidratada sofreu um ajuste, utilizando-se uma massa de 5,0 gramas, optando-se assim por tentar obter volumetria semelhante aos restantes fíleres.



Figura 20 Massa volúmica

De acordo com a norma de ensaio, a determinação da massa volúmica é expressa em Mg/m^3 da seguinte forma:

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_l}} \quad (2)$$

Legenda:

ρ_l – massa volúmica real do fíler a 25°C (miligrama por metro cúbico)

m_0 – massa picnómetro vazio com rolha (gramas)

m_1 – massa picnómetro com rolha e o provete de fíler (gramas)

m_2 – massa picnómetro com rolhos e o provete de fíler, cheio de líquido (gramas)

V – volume do picnómetro (mililitro)

ρ_f – massa volúmica do líquido a 25°C (miligrama por metro cúbico)

3.3.4. Ensaio para determinação do índice de vazios do fíler seco compactado

Segundo Cooler *et al* (1998), o ensaio que melhor caracteriza o fíler e que apresenta uma melhor correlação com as misturas betuminosas, é o ensaio para determinação do volume de vazios de Ridgen. Referem ainda, que o volume de vazios de Ridgen modificado pode ser utilizado para caracterizar o potencial de endurecimento do fíler no mastique, quando este é medido através da temperatura de amolecimento, da viscosidade a 135 °C ou do módulo de corte.

A determinação do índice de vazios do fíler seco compactado executa-se com base na norma NP EN 1097-4:2008, estando dependente do resultado da massa volúmica do fíler, determinada de acordo com a norma NP EN 1097-7:2008, no ponto 3.3.3. Dado que material ensaiado é uma fração muito fina, é importante uma correta secagem, em estufa capaz de manter uma temperatura 110 (±5) °C, até obter uma massa constante.

Para a realização do ensaio é utilizado um equipamento compactador (Figura 21), onde é colocada uma massa de 10 gramas de fíler submetida a 100 pancadas do bloco com o pistão. Finalizado esse número de pancadas regista-se com auxílio de um paquímetro, a altura de compactação. No ensaio com a cal hidratada (Amostra G), o valor definido na norma foi ajustado para 6,0 (± 0,1) g, optando-se por seguir a mesma metodologia dos restantes ensaios, achando uma massa correspondente a uma volumetria semelhantes aos restantes fíleres.

Para o cálculo do índice de vazios, importa registar também os valores da massa do fíler seco, massa do bloco sem pistão e um papel de filtro, massa do bloco com fíler e papel de filtro. O índice de vazios deve ser calculado com a média das três determinações para cada amostra de fíler, e arredondar o resultado a 1%.



Figura 21 Equipamento compactador

Após a obtenção de todos os valores necessários, o cálculo do índice de vazios do fíler, obtém-se de acordo com seguinte equação:

$$v = \left(1 - \frac{4 * 10^3 * m_2}{\pi * \alpha^2 * \rho_f * h} \right) * 100 \quad (3)$$

Legenda:

v – volume de vazios (percentagem)

m₂ – massa do fíler compactado (gramas)

α – diâmetro interno do cilindro do pistão (milímetros)

ρ_f – massa volúmica (miligramas/metro cúbico)

h – altura do fíler compactado (milímetros)

Nota: o resultado deve apresentar uma precisão de 0,1%, como é referido no Anexo A, da norma.

3.3.5. Ensaio para determinação da baridade do fíler em querosene

A determinação da baridade do fíler em querosene realiza-se de acordo com o Anexo A (normativo) da norma NP EN 1097-3:2002. Um provete com 10 gramas de fíler é colocado inicialmente numa proveta de vidro graduada com capacidade para 50 mililitros (conformidade com ISO 4788), junta-se 25 mililitros de querosene, tapa-se e agita-se de modo a produzir a suspensão do fíler. Na amostra de cal hidratada (Amostra G), pelo facto de ser um material mais volumoso e como se pretende uma equidade no método de ensaio para todos os fíleres, ajustou-se o valor da massa para 6,0 (± 0,1) g. Concluído o processo, adiciona-se querosene até o nível ficar aproximadamente a 40 milímetros do topo.



Figura 22 Provetes em processo de sedimentação

Deixa-se em repouso 24 horas, num espaço onde não ocorram quaisquer vibrações, terminado esse período efetua-se a medição do volume de fíler sedimentado (Figura 22), através da

gradação da proveta utilizada no ensaio (Figura 22), calculando-se a baridade pela equação seguinte:

$$\text{Baridade} = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Legenda:

V – volume determinado na proveta (mililitros)

m – massa do provete (gramas)

3.3.6. Ensaio para determinação da variação de amolecimento anel bola

O ensaio de amolecimento anel e bola realiza-se de acordo com a norma NP EN 13179-1:2010 e pretende determinar o efeito rigidificante do fíler quando misturado com o betume, aplicando-se em partículas de fíler com dimensões inferiores a 0,125 mm.

Na sua execução são utilizados anéis de cobre com efeito de moldes, para colocação do betume e do mástique betuminoso, ficando com a forma de um anel. Os referidos anéis são aquecidos num banho de água a uma velocidade controlada e ao amolecer vão permitir a descida de uma esfera de aço, de forma progressiva, à medida que a temperatura de amolecimento vai aumentando. No final, regista-se a temperatura a que os discos amolecem, para induzir a queda da esfera numa distância de $25 \pm (0,4)$ mm (Figura 23). Calculam-se os valores médios da temperatura para os anéis que contém o betume e mástique. A diferença entre as médias de temperatura é registada como $\Delta_{R\&B}$, sendo $\Delta_{R\&B}$ o efeito rigidificante do fíler. Este ensaio apenas não foi possível realizar com a cal hidratada, dado que o mástique betuminoso constituído pela cal hidratada tornava-se demasiado viscoso e de difícil manuseamento.

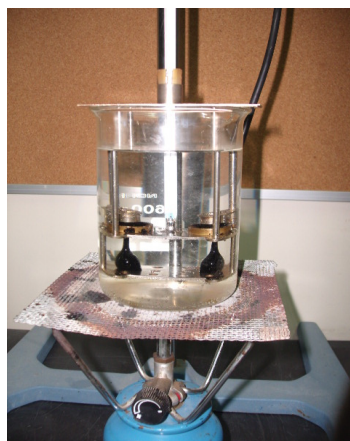


Figura 23 Aquecimento dos anéis

3.3.7. Ensaio para determinação da superfície específica (Método Blaine)

A realização do referido ensaio, não foi possível porque não dispúnhamos equipamento e local suscetível de realização, porém iremos fazer uma breve descrição do método de ensaio e aplicação. A determinação da superfície específica pelo Método de Blaine, está definida pela norma NP EN 196-6:2010. Permite medir a superfície específica por comparação com uma amostra de fíler padrão, sendo utilizado para verificar a harmonia do processo de moagem de uma determinada instalação. A sua determinação é realizada mediante o tempo que uma certa quantidade de ar demora a atravessar uma camada compactada de fíler, com dimensões e porosidade especificadas. Em condições normalizadas a superfície específica é proporcional a \sqrt{t} , onde t é o tempo necessário para que uma dada quantidade de água atravesse uma camada compactada de fíler.

3.3.8. Ensaio para determinação da viscosidade aparente (Número do betume)

A determinação da viscosidade aparente de uma mistura betuminosa de água/fíler realiza-se de acordo com a norma NP EN 13179-2:2010, tendo como aplicação a regulação do controlo de produção. Para alcançar o objetivo designado utiliza-se um penetrómetro onde um pistão de alumínio com 8 milímetros de diâmetro e 15 gramas de massa, penetra numa mistura betuminosa de fíler que se encontra numa cápsula cilíndrica (Figura 24).



Figura 24 Pistão e cápsula cilíndrica

Define-se a quantidade de água necessária a adicionar com o auxílio de uma bureta, de forma que a penetração seja entre 5 a 7 milímetros. No caso da penetração ser inferior a 5 milímetros, ou superior a 7 milímetros, deve-se repetir o ensaio.

O cálculo do número do betume, é feito de acordo com a seguinte equação:

$$BN = 2 \chi_n \quad (5)$$

Legenda:

BN – número de betume

χ_n – valor numérico do volume de água utilizado para proporcionar uma penetração entre 5,0 milímetros e 7,0 milímetros (mililitros)

3.3.9. Ensaio de análise química por espectrometria de fluorescência de Raios X

A análise química de espectrometria por Fluorescência de Raios X, é uma ferramenta dinâmica e extremamente hábil para a determinação quantitativa e qualitativa da presença de elementos químicos em diversos tipos de amostras, sendo a sua análise um processo quantitativo fundamentado na medida das intensidades dos Raios X característicos, emitidos pelos elementos que constituem a amostra, quando excitada por partículas ou ondas eletromagnéticas. Esta técnica integra fontes seladas de isótopos radioativos, que produzem Raios-X primários capazes de excitar os átomos das amostras e desencadear os processos associados à produção de fluorescência de Raios X.

Modo de teste de Minas Cu/Zn

Este modo do software de operação do FRXP é dirigido, principalmente, à detecção de concentrações de metal em matrizes leves. Todo o algoritmo de parâmetros fundamentais (PF) mede com exatidão concentrações de elementos de níveis débeis a 100%, e corrige automaticamente os efeitos “inter” elementos. Já elementos mais leves que o Magnésio, não são detetados pelo FRXP e combinações de elementos leves, como os Óxidos, Carbonatos e Silicatos são elementos de matriz comum. Para controlo detalhado de resultados, pode introduzir fatores de calibração para elementos individuais, no sentido de ajustar efeitos da influência de elementos leves. Estes fatores de calibração são correções lineares, que ajustam o cálculo PF. Todas as análises executadas com o aparelho portátil de FRX foram realizadas neste modo de operação.

A preparação das amostras neste ensaio é essencial, como tal, na sua preparação inicial, realizou-se uma secagem em estufa, a um peso constante (Figura 25). De forma a homogeneizar a amostra foi esquartelada e de seguida peneirada, até se obter quantidade suficiente com dimensão inferior a 0,125 mm (Figura 25). Após a preparação inicial, segue-se a elaboração do copo de amostra FRX, no qual se coloca um círculo de filme de polipropileno no topo, que ficou a servir de base, no fundo do copo, com o anel cortado (Figura 26).



Figura 25 Secagem das amostras em estufa | Peneiração das amostras



Figura 26 Copo de amostra com um círculo de filme de polipropileno

Colocam-se cerca de 5 gramas de amostra no copo, e compacta-se com auxílio de uma calçadeira (Figura 27), de modo que não existam espaços vazios nem camadas irregulares, finda a compactação, coloca-se um filtro sobre a amostra e encheu-se o remanescente do copo com fibras de poliéster, para evitar a movimentação da amostra, fecha-se e identifica-se (Figura 27), está pronto para ser colocado e analisado no espectrómetro (Figura 28).



Figura 27 Compactação da amostra | Amostras fechadas e identificadas



Figura 28 Espectrômetro de Fluorescência de Raio X (Niton XL3t)

Com o auxílio do programa adequado de obtenção (NDR V.6.5.2), registo e processamento informático de dados, foram identificados e quantificados uma série de elementos químicos presentes na amostra.

3.3.10. Ensaio para determinação da solubilidade em água

Este ensaio faz parte da norma NP EN 1744-1:2009, sendo empregue para determinação da solubilidade em água de um fíler. A porção testada do fíler é extraída com cinquenta vezes a sua própria massa de água. No caso da amostra de fíler conter hidróxido de cálcio adicionado, determina-se o teor de hidróxido de cálcio (K_d) de acordo com a norma EN 459-2:2001. Transfere-se o fíler para o frasco, pesa-se frasco e o conteúdo e regista-se sua massa para uma aproximação de 0,01 g (m_{11}) (Figura 29).

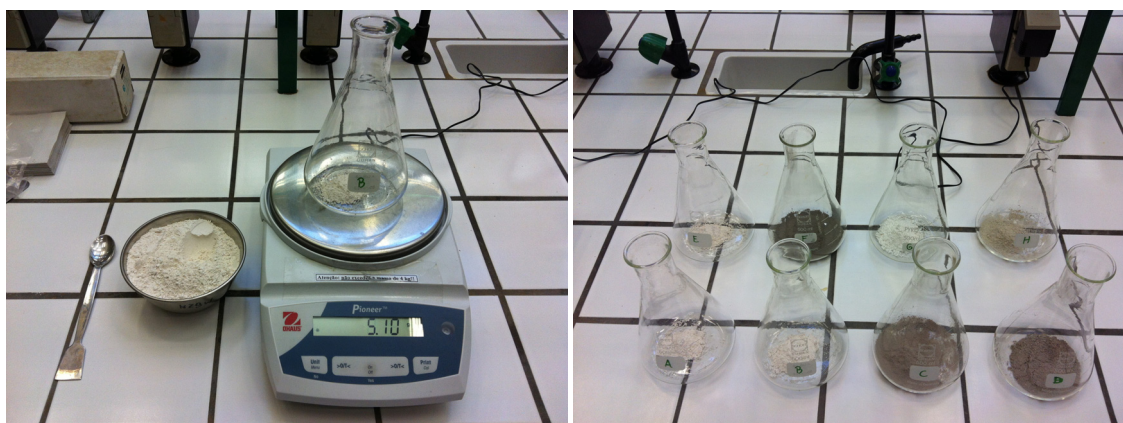


Figura 29 Pesagem das amostras | Colocação das amostras no balão Erlenmeyer

Em cada frasco, adiciona-se uma massa de água igual a cinquenta vezes a massa do corpo de prova, misturam-se os conteúdos agitando continuamente (agitador mecânico), com agitação suficiente para evitar qualquer sedimentação num prazo mínimo de 24 horas (Figura 30).

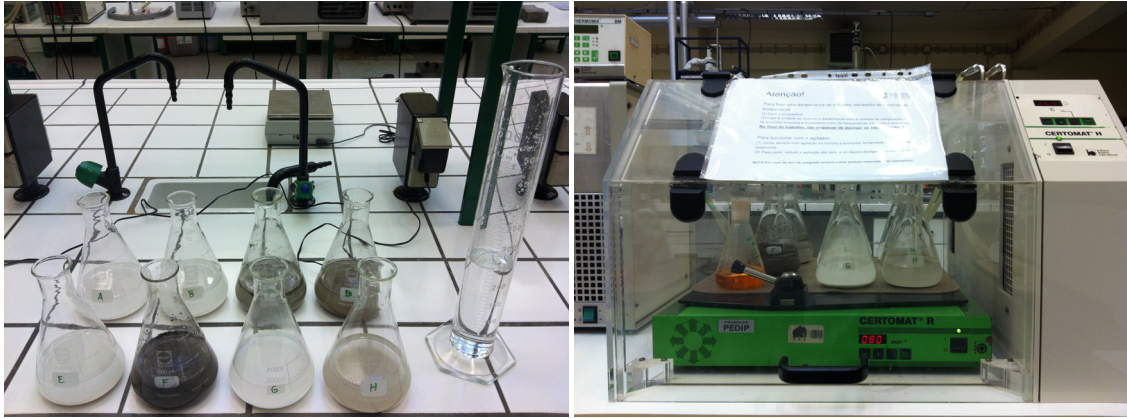


Figura 30 Fileres misturas com água | Agitação mecânica das amostras de fíler

Em seguida, filtra-se o líquido em funis de filtro de pré-doseados com papel de filtro de grau médio, deixando-se o resíduo remanescente em balões de Erlenmeyer (Figura 31).



Figura 31 Processo de filtragem | Amostra após ser submetida a processo de filtragem

Secam-se os conteúdos das amostras de filer em estufa (Figura 32), para a massa constante e peso aproximado a 0,1 g. Por último, calcula-se a massa de fíler seco subtraindo a massa do papel de filtro seco e registado antes do início da filtragem (m_{12}).



Figura 32 Processo de secagem do papel de filtro | Amostras após processo de secagem na estufa

A solubilidade em água do fíler ou fíler misturado, expressa como WS , a partir da seguinte equação:

$$WS = \frac{m_{11} - m_{12}}{m_{11}} \times 100 - K_a \text{ (in \%)} \quad (6)$$

Legenda:

m_{11} – massa do fíler antes de extração (gramas)

m_{12} – massa do fíler depois da extração (gramas)

K_a – teor de hidróxido de cálcio de um determinado fíler misturado, com um máximo de 8,4%

NOTA 1: Fíler misturado contém hidróxido de cálcio adicionado. Se o valor de hidróxido de cálcio for inferior a 8,4%, é usado o valor determinado. Para outros fíleres misturados é usado um valor de 8,4%.

NOTA 2: Para fíleres que não contém hidróxido de cálcio adicionado, $K_a = 0$. Registrar o resultado a 0,1%.

3.3.11. Ensaio para determinação da suscetibilidade à água

O ensaio de suscetibilidade à água dos fíleres, de acordo com a norma EN 1744-4:2005, pretende avaliar a maior ou menor resistência à separação do fíler de um mástique betuminoso (mistura betume mais fíler) em presença da água. As amostras de fíler, foram devidamente preparadas com base no procedimento para a preparação dos provetes descrito na norma, já referida neste ponto e removeu-se 10 ($\pm 0,1$) g e definiu-se como a toma de ensaio (m_0), exceto no que refere à amostra G e seguindo a mesma linha de execução dos ensaios anteriores apenas foram ensaiados 5,0 ($\pm 0,1$) g. Coloca-se 50,0 ($\pm 0,5$) g de solução de baixa viscosidade betume 50/70 em frascos, e adiciona-se 100 (± 5) ml de água desmineralizada para a proveta.



Figura 33 Betume 50/70 em banho de água | Mistura de betume e fíler

Coloca-se os frascos e a proveta no banho de água até uma temperatura de $60 (\pm 1^\circ) \text{ C}$, e mantém-se a esta temperatura (Figura 33). Agita-se o conteúdo do frasco para $300 (\pm 5) \text{ s}$ e, em seguida, deixa-se a mistura em repouso durante $300 (\pm 5) \text{ s}$, como é possível observar na Figura 33. Examina-se a mistura e verifica-se se o fíler não revestido se separou. Nessa situação, o fíler deve ser considerado como não sensível à água (Figura 34).

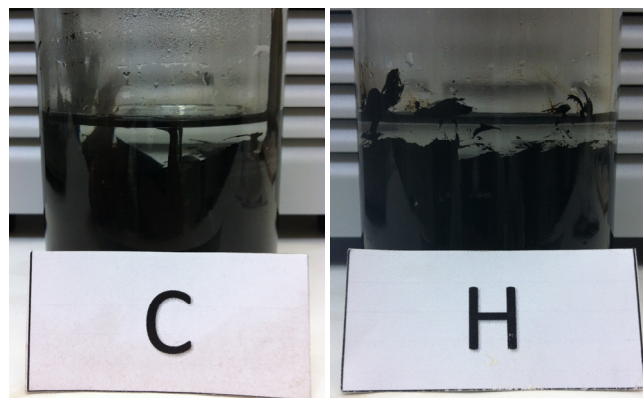


Figura 34 Mástique betuminoso

Se o material de enchimento separa, ou no caso da turbidez da água, determina-se a suscetibilidade à água, despejando a água e o material de enchimento separado da mistura por amassamento no balão com uma espátula e lava-se com água. Em seguida, deve-se despejar a água e o material de enchimento para o copo separado e repetir o processo até que a lavagem com água se torna límpida. Pesar um papel de filtro seco e registrar a massa (m_1). Filtrar o conteúdo através do papel de filtro, num funil de Buchner para um balão de vácuo. Remover os últimos vestígios de betume por lavagem com querosene. Secar o enchimento do filtro e recuperado num forno a $110 (\pm 5)^\circ \text{ C}$ até massa constante. Pesar o papel de filtro com o material de enchimento, com a aproximação de 1 mg (m_2). Apesar da descrição da metodologia neste ponto, para o caso de os fíleres apresentarem sensibilidade à água, não foi utilizada na execução do ensaio, porque todos os fíleres reagiram como não suscetíveis à água. Calcula-se a suscetibilidade água (W_s), arredondado para o mais próximo, 1% da massa, como uma percentagem em massa de material de enchimento, de acordo com a seguinte equação:

$$W_s = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100 \quad (7)$$

Legenda:

m_0 – massa do fíler (gramas)

m_1 – massa do papel de filtro (gramas)

m_2 – massa do fíler e do papel de filtro (gramas)

3.3.12. Ensaio para determinação do conteúdo em hidróxido de cálcio

Este ensaio foi realizado apenas para a amostra G. Contudo, não se utilizou a informação do ensaio por se entender que a mesma não é fiável, facto que em nosso entender parece ter resultado da inexperiência relativamente ao referido ensaio. O conteúdo em hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 em fíler aditivado com cal hidratada, determina-se de acordo com a norma NP EN 459-2:2011. Neste caso estamos a estudar duas misturas: 50% fíler D (recuperado de pó granítico) adicionado a 50% fíler G (cal hidratada) e 50% fíler F (fíler recuperado de pó granítico) adicionado a 50% fíler G (cal hidratada). Como o fíler D e F são de origem granítica não apresentam na sua composição hidróxido de cálcio, apenas se determinava no fíler G.

O óxido de cálcio é determinado numa parte alíquota da solução de ensaio por titulação complexa com uma solução EDTA num pH de 13, utilizando-se a mudança de cor dum indicador específico do cálcio para indicar o ponto final. Durante a titulação, o EDTA reage primeiro com os iões de cálcio livre e depois com os iões ligados ao indicador, provocando a mudança rápida da cor vermelha para azul. Da mesma forma, a soma de óxido de cálcio e de óxido de magnésio ($\Sigma(\text{CaO} + \text{MgO})$) é determinada num pH de 10 por titulação com EDTA utilizando Negro de Eriocromo T como indicador. Durante a titulação, o EDTA reage primeiro com os iões de cálcio e de magnésio livres e depois com os ligados ao indicador, provocando a mudança de cor do vermelho para o azul. O teor de magnésio, $c(\text{MgO})$, é determinado pela diferença entre as concentrações $c(\text{CaO} + \text{MgO})$ e $c(\text{CaO})$.

Para determinar o teor de óxido de cálcio, transfere-se 25 ml da solução (Figura 35) preparada para um copo de 400 ml, dilui-se a solução com cerca de 150 ml de água e junta-se 5 ml da solução trietanolamina. Com a solução de hidróxido de cálcio, ajusta-se o pH desta solução para $12,5 (\pm 0,5)$. Junta-se 0,1 g de indicador de ácido calconcarboxílico e titula-se com a solução EDTA agitando constantemente com o agitador magnético até a cor passar de vermelho para azul, registar o volume (V_4) da solução EDTA que se juntou.



Figura 35 Preparação da solução

Durante a titulação o pH não deve descer abaixo de 12,0. O teor de óxido de cálcio das amostras, CaO, expresso em percentagem em massa, é calculado pela Equação 8:

$$\text{CaO} = \frac{V_1 * 0,04 * 56,08 * c * V_4 * 100}{V_3 * 1000 * m_1} \quad (8)$$

Legenda:

V₁ – volume da solução (mililitros)

V₃ – volume da parte alíquota da solução V₁ tomada por titulação (mililitros)

V₄ – volume da solução EDTA utilizada para determinação de CaO (mililitros)

c – concentração da solução EDTA

m₁ – massa do provete (gramas)

Na norma NP EN 459-2, o resultado do ensaio é descrito em termos de teor de óxido de cálcio. Para a determinação do teor de hidróxido de cálcio, o teor de óxido de cálcio é multiplicado por um fator igual a 1,3213.

3.3.13. Ensaio para determinação do conteúdo em carbonato de cálcio

A realização do ensaio, não foi possível porque não dispúnhamos equipamento e local suscetível de realização, todavia iremos fazer uma breve descrição do método de ensaio e aplicação. O conteúdo em carbonato de cálcio (CaCO₃) para fileres calcários, determina-se de acordo com a norma EN 196-2:2005. Do nosso universo de amostragem, temos 6 amostras de filer nessas condições que são os pós calcários provenientes de centrais betuminosas e moagem de rocha calcária, apesar da amostra C ser um filer recuperado proveniente da recuperação de pó em central de misturas betuminosas, G é uma cal hidratada e H uma cal hidráulica, ambas resultam da cozedura do calcário e podem ter presente na sua composição carbonato de cálcio (produto não cozido). O dióxido de carbono libertado é arrastado numa corrente de gás de dióxido de carbono livre de ar ou através de uma série de tubos de absorção. Os dois primeiros removem o sulfureto de hidrogénio e a água absorvendo seguidamente o dióxido de carbono. Dois tubos de absorção, contendo, cada um deles, absorvente para o dióxido de carbono e perclorato de magnésio anidro, para reter a água formada durante a reação de absorção, são pesadas para determinar a massa de dióxido de carbono libertado.

Pesa-se, ± 0,0005 g (1,00 ± 0,05) g de cimento (m₂₇) e coloca-se num balão de destilação de 100 ml. Liga-se o balão ao aparelho, como mostrado na Figura 31, sem os dois tubos de absorção (13). Passar uma corrente de gás de dióxido de carbono livre através do aparelho durante 15 minutos a cerca de 3 bolhas por segundo (contador de bolhas), pelo tubo de ligação para (6) (ramificação em

(5), clipe de Mohr fechado). Solta-se o clipe de Mohr e remove-se o fornecimento de gás a partir do funil (4). Adiciona-se 30 ml de ácido fosfórico concentrado para o funil de adição e volta-se a ligar o fornecimento de gás para encher o funil (4).

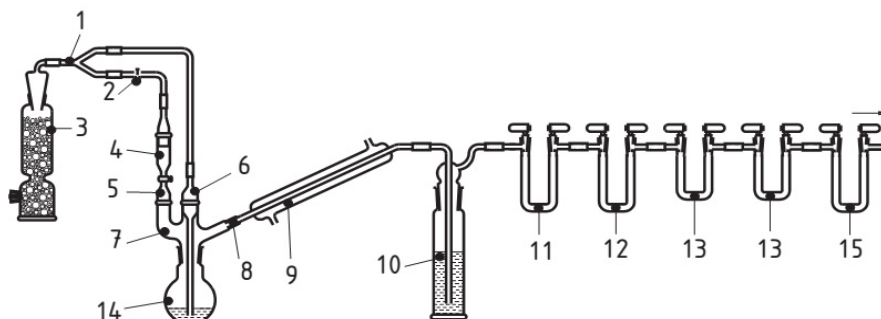


Figura 36 Esquematização do ensaio (EN 196-2:2005)

Acondiciona-se os tubos de absorção fechados (13) durante 15 minutos na caixa de equilíbrio a fim de atingir o equilíbrio da temperatura. Corta-se o fluxo de gás e fixa-se os tubos no aparelho (Figura 21).

Reabre-se o fluxo de gás e após 10 minutos fecha-se os tubos de absorção (13), remove-se, e coloca-se na caixa de equilíbrio por 15 minutos e, em seguida pesam-se separadamente. Repete-se a passagem de gás, remoção e pesagem dos tubos de absorção (13) durante o tempo que é necessário para os resultados das duas pesagens sucessivas de um tubo, de modo a não diferirem mais do que 0,0005 g.

No caso da variação da massa dos tubos de absorção (13) continuar a ser maior do que 0,0005 g, renova-se os absorventes em tubos (11) e (12). Anexar os tubos de absorção pesado (13) no aparelho (Figura 36). Abre-se a torneira de funil e permite-se que o ácido fosfórico caia no balão de destilação (14). Após a reação ter cessado, aquece-se o conteúdo do balão.

Mantem-se o fluxo de gás através do dispositivo até que o balão arrefeça à temperatura ambiente. Fecha-se os tubos de absorção (13), remove-se e coloca-se na caixa de equilíbrio por 15 minutos e, em seguida, pesa-se separadamente. O aumento de massa de cada tubo é utilizado para o cálculo do teor de dióxido de carbono.

O dióxido de carbono é quase completamente absorvido pelo primeiro tubo (13). No caso de ocorrer um aumento da massa do segundo tubo (13) e este exceder 0,0005 g, renova-se o absorvente no primeiro tubo (13) e inicia-se o teste.

Calcular o teor de dióxido de carbono como uma percentagem do cimento a partir da Equação 9.

$$CO_2 = \frac{m_{28} + m_{29}}{m_{27}} \times 100 \quad (9)$$

Legenda:

m₂₇ – massa da porção de ensaio (gramas)

m₂₈ – aumento da massa do primeiro tubo (13) após a absorção (gramas)

m₂₉ – é o aumento da massa do segundo tubo (13) após a absorção (gramas)

Se o teor de dióxido de carbono calculado a partir da equação (30) é inferior a 0,5%, repetir a determinação com 2,00 (± 0,05) g de cimento. Alternativamente, quando o cimento contém uma elevada proporção de carbonato, o tamanho da amostra deve ser diminuído de forma adequada. O desvio-padrão da repetibilidade é de 0,07%, da reprodutibilidade é de 0,10%.

Na norma NP EN 196-2, o resultado do ensaio é descrito em termos de teor de dióxido de carbono. Para a determinação do teor de carbonato de cálcio, o teor de dióxido de cálcio é multiplicado por um fator igual a 2,2742.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4. Análise e discussão de resultados

No presente capítulo pretende-se efetuar uma análise e discussão dos resultados obtidos (Anexo II) com vista à caracterização das propriedades físico químicas dos fileres. As amostras foram estudadas recorrendo às técnicas e metodologias descritas no ponto 3.3. A partir da análise dos resultados poderá constatar-se quais as variações, das características mais significativas e possíveis correlações existentes entre eles, analisando também as fichas técnicas dos produtos (Anexo I).

4.1. Determinação da granulometria do filer (peneiração por jato de ar)

A determinação experimental da composição granulométrica dos diferentes fileres, realizou-se através do método de peneiração por jato de ar, sendo os seus resultados apresentados na Tabela 19, na qual estão descritas as percentagens de passados nos peneiros de 2 mm, 0,125 mm e 0,063 mm. Verificou-se que 100% das partículas das amostras, apresentam dimensão inferior a 2 mm. A cal hidratada (Amostra G) apresenta 100% de partículas menores que 0,125 mm e 99% menores que 0,063 mm, seguida pelo filer calcário RC 590 (Amostra B) 100% menores que 0,125 mm e 90% menores que 0,063 mm, filer recuperado de pó granítico (Amostra F) 98% menores que 0,125 mm e 93% menores que 0,063 mm, filer calcário C100 (Amostra E) 98% menores que 0,125 mm e 79% menores que 0,063 mm, filer calcário RC 480 (Amostra A) 97% menores que 0,125 mm e 78% menores que 0,063 mm, cal hidráulica (Amostra H) 95% menores que 0,125 mm e 80% menores que 0,063 mm, filer recuperado de pó calcário (Amostra C) 86% menores que 0,125 mm e 67% menores que 0,063 mm, filer recuperado de pó granítico (Amostra D) 83% menores que 0,125 mm e 69% menores que 0,063 mm.

Tabela 19 Resultados da Análise Granulométrica

Amostra	% Passados 2 mm	% Passados 0,125 mm	% Passados 0,063 mm
A	100	97	78
B	100	100	90
C	100	86	67
D	100	83	69
E	100	98	79
F	100	98	93
G	100	100	99
H	100	95	80

Como foi referido anteriormente no ponto 3., sobre a influência da dimensão das partículas, dos oito fíleres analisados, a cal hidratada (Amostra G) seguida do fíler recuperado de pó granítico (Amostra F) e fíler calcário RC 590 (Amostra B), foram os que apresentaram maior percentagem (maior ou igual a 90%) de partículas menores que 0,063 mm, sendo estas as partículas que contribuem para a obtenção dos requisitos granulométricos das misturas betuminosas na sua zona mais fina e que contribuem para a rigidificação do betume nesse tipo de misturas. Por outro lado, o que apresentou maior percentagem de partículas superiores a 0,063 mm foi o fíler recuperado de pó calcário (Amostra C) e fíler recuperado pó granítico (Amostra D), as partículas maiores do fíler, preencherão os vazios e os espaços entre os agregados maiores dando maior compacidade e resistência às misturas. Apesar de não haver uma uniformidade dos valores de material passado no peneiro 0,063 mm (Gráfico 1), a diferença existente é pouco significativa. De acordo com os requisitos de granulometria para os fíleres comerciais (Amostras A,B,E,G e H) e segundo a norma NP EN 13043, os valores obtidos encontram-se dentro dos limites impostos (ver ponto 2.4.1.2).

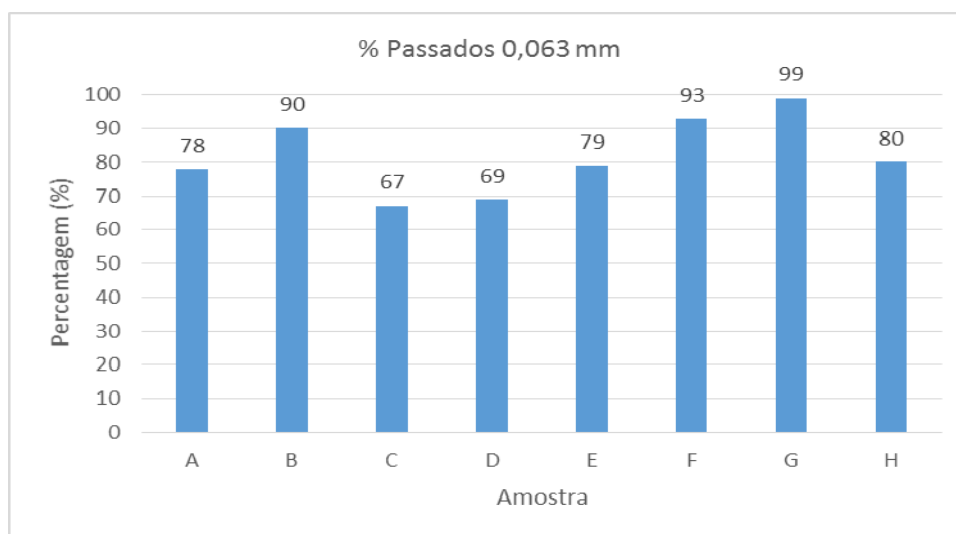


Gráfico 1 Percentagem de passados no peneiro de abertura 0,063 mm

4.2. Determinação da qualidade dos finos – Ensaio Azul de Metileno

O ensaio de adsorção de azul de metileno constitui uma alternativa eficiente, simples, rápida e económica de avaliar o estado de limpeza de um agregado, permitindo estimar a quantidade e tipo de argilas presentes na sua fração fina. Da análise efetuada aos resultados obtidos (Gráfico 2), constatamos que apresentam maior teor de azul de metileno, fíler recuperado de pó granítico (Amostra F – 7,3 ml/g), fíler recuperado de pó granítico (Amostra D – 3,3 ml/g), cal hidratada (Amostra G – 3,3 ml/g), sendo que as restantes amostras de fíler calcário RC 480 (Amostra A), fíler

calcário RC 590 (Amostra B), fíler recuperado de pó calcário (Amostra C), fíler calcário C 100 (Amostra E), cal hidráulica (Amostra H), obtiveram o mesmo valor experimental de 1,7 ml/g. Após a realização do ensaio, foi possível aferir que no caso dos fíleres, o ensaio realizado apresenta reduzida sensibilidade quando aplicado a materiais pouco argilosos, perfilando-se como pouco relevante, consequência dos teores obtidos serem sempre muito reduzidos.

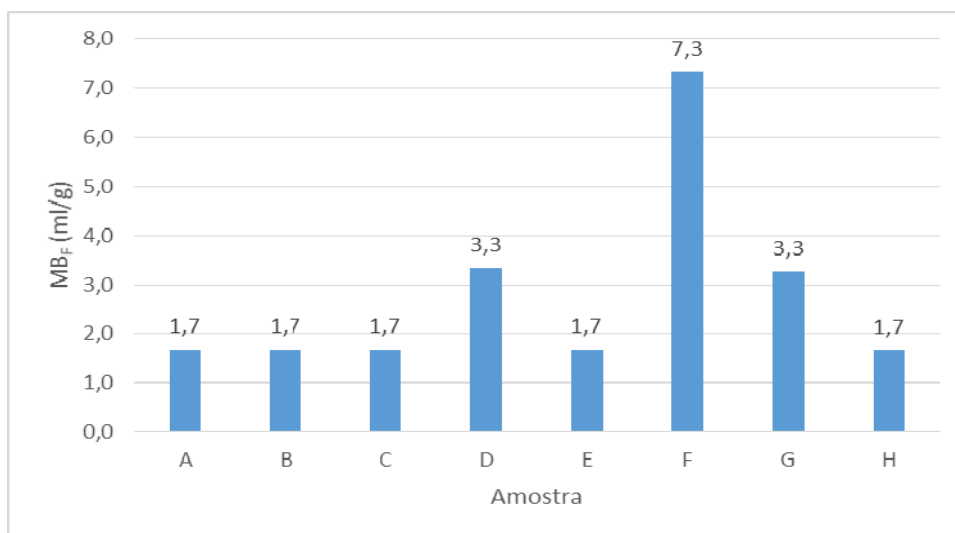


Gráfico 2 Teor de Azul de Metileno

Na Tabela 20 podemos verificar as categorias (norma NP EN 13043) correspondentes aos valores do ensaio de azul de metileno para cada amostra de fíler e se apresentam as exigências definidas no Caderno de Encargos Tipo Obra - Estradas de Portugal para fíleres a incluir em misturas betuminosas.

Tabela 20 Resumo das categorias e conformidade das exigências para os valores obtidos

Amostra	A	B	C	D	E	F	G	H
MB _F	1,7	1,7	1,7	3,3	1,7	7,3	3,3	1,7
Categoria MB _F NP EN 13043	MB _F 10	MB _F 10	MB _F 10	MB _F 10	MB _F 10	MB _F 10	MB _F 10	MB _F 10
Requisitos CE Estradas Portugal Quadro 14.03.0-3b	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

4.3. Determinação da massa volúmica do fíler

A determinação da massa volúmica dos fíleres, realizou-se através do método do picnómetro, sendo os seus resultados apresentados no Gráfico 3. Numa primeira análise foi possível constatar que os valores de massa volúmica dos fíleres de origem calcária: fíler calcário RC 480 (Amostra A), fíler calcário RC 590 (Amostra B), fíler recuperado de pó calcário (Amostra C), fíler calcário C100 (Amostra E), cal hidráulica (Amostra H), variavam entre 2,70 Mg/m³ e 2,74 Mg/m³, assim como os fíleres de origem granítica: fíler recuperado de pó granítico (Amostra D) e fíler recuperado de pó granítico (Amostra F), variam entre 2,62 Mg/m³ e 2,64 Mg/m³, o que não patenteia uma destacada diferença em ambos os casos. O mesmo não acontece para a cal hidratada (Amostra G) que apresenta um valor de massa volúmica (2,24 Mg/m³) significativamente inferior, tal facto pode ser explicado pela elevada porosidade das partículas, consequência de uma elevada percentagem de vazios deste material, como vai ser possível constatar no ponto seguinte (4.4).

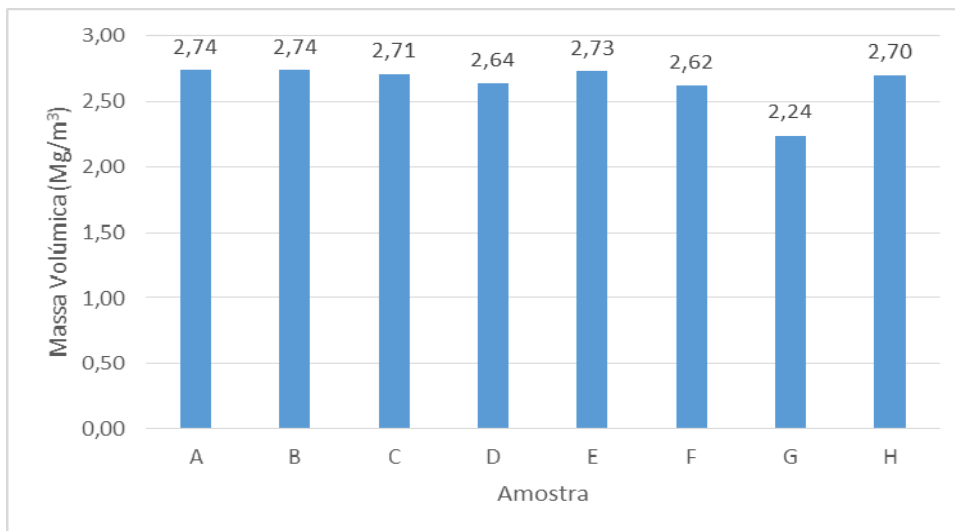


Gráfico 3 Massa volúmica dos fíleres

4.4. Determinação do índice de vazios do fíler seco compactado

Para a determinação do índice de vazios do fíler seco compactado, foram ensaiadas as amostras de fíler calcário RC 480 (Amostra A), fíler calcário RC 590 (Amostra B), fíler recuperado de pó calcário (Amostra C), fíler recuperado de pó granítico (Amostra D), fíler calcário C100 (Amostra E), fíler recuperado de pó granítico (Amostra F), cal hidratada (Amostra G), cal hidráulica (Amostra H), pela observação do Gráfico 4 verifica-se que os fíleres comerciais de calcário (Amostra A – 29,4%, Amostra B – 31,2% e Amostra E – 28,1%) registam menor índice de vazios de fíler. Por outro lado a cal hidratada (Amostra G – 59,1%) é o fíler que apresenta maior índice de vazios. A

cal hidráulica (Amostra H – 45,7%) tem um valor que se situa na mesma ordem de grandeza dos fíleres recuperados graníticos (Amostras D – 38,1%, e Amostra F – 46,7%).

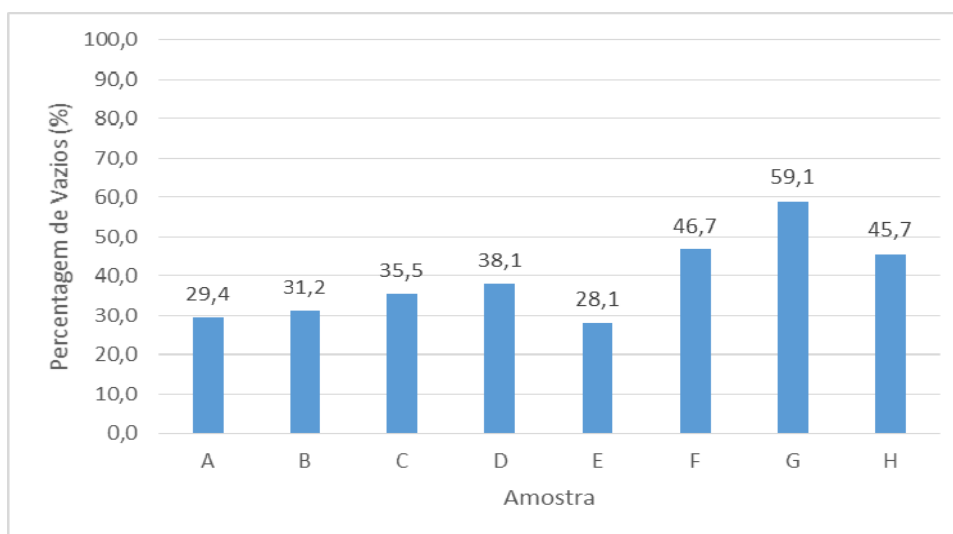


Gráfico 4 Percentagem de vazios do fíler

A diferença existente entre a cal hidratada e restantes os fíleres, poderá prender-se com o facto da sua configuração estrutural da cal hidratada, elevada porosidade e valor de massa volúmica inferior, podendo originar um menor arranjo das partículas durante a compactação e consequente aumento do volume. Os valores de vazios do fíler seco compactado são classificados segundo a norma portuguesa NP EN 13043, que estabelece categorias de acordo com uma tabela de intervalos de vazios, sendo que a norma do produto não está preparada para classificar fíleres com valores de percentagem em volume de vazios tão elevados, como o caso da cal hidratada (Amostra G). Na Tabela 21 podemos verificar as categorias (norma NP EN 13043) correspondentes aos valores da percentagem de vazio dos fíleres e verificação do cumprimento das exigências definidas no Caderno de Encargos Tipo Obra - Estradas de Portugal para fíleres a incluir em misturas betuminosas.

Tabela 21 Resumo das categorias e conformidade das exigências para os valores obtidos

Amostra	A	B	C	D	E	F	G	H
Vazios do Fíler (%)	29,40	31,19	35,45	31,94	28,07	46,73	59,12	45,68
Categoria v NP EN 13043	V _{28/38}	V _{28/38}	V _{28/38}	V _{28/38}	V _{28/38}	V _{44/55}	V _{44/55}	V _{44/55}
Requisitos CE Estradas Portugal Quadro 14.03.0-3b	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗

4.5. Determinação da massa volúmica aparente em querosene

A massa volúmica aparente em querosene foi realizada em todas as amostras de fíler, e os resultados obtidos podem ser consultados no Gráfico 5. Da análise aos resultados foi possível verificar que os fíleres recuperados de pó calcário (Amostra C – 0,77 Mg/m³), de pó granítico (Amostra D – 0,67 Mg/m³) e de pó granítico (Amostra F – 0,67 Mg/m³) apresentavam os valores mais elevados, seguido dos fíleres comerciais fíler calcário C100 (Amostra E – 0,50 Mg/m³), cal hidráulica (Amostra H – 0,50 Mg/m³) e cal hidratada (Amostra G – 0,15 Mg/m³) com o valor mais reduzido.

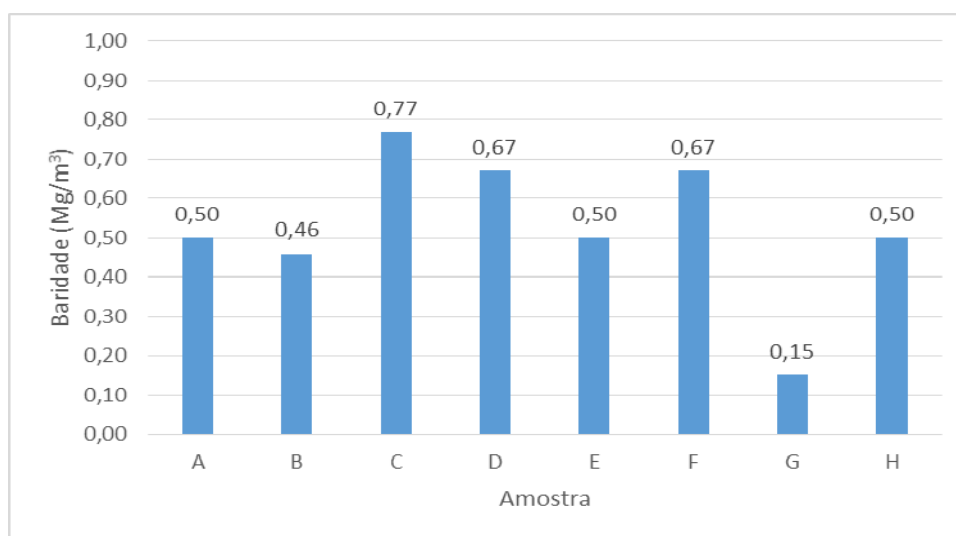


Gráfico 5 Baridade

Na Tabela 22 podemos verificar as categorias (norma NP EN 13043) correspondentes aos valores obtidos para a baridade dos fíleres e se cumprem as exigências definidas no Caderno de Encargos Tipo Obra - Estradas de Portugal para fíleres a incluir em misturas betuminosas.

Tabela 22 Resumo das categorias e conformidade das exigências para os valores obtidos

Amostra	A	B	C	D	E	F	G	H
Baridade (Mg/m ³)	0,50	0,46	0,77	0,67	0,50	0,67	0,15	0,50
NP EN 13043 Amplitude 0,5 – 0,9 (Mg/m ³)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓
Requisitos CE Estradas Portugal Quadro 14.03.0-3b	✓	✓	✓	✓	✓	✓	X	✓

Perante a leitura dos resultados é possível aferir que os fíleres que apresentam baridade reduzida, são sinónimo de massa volúmica reduzida e maior índice de vazios de fíler, enquanto uma baridade superior é sinónimo de massa volúmica elevada e menor índice de vazios de fíler.

4.6. Determinação da variação da Temperatura de amolecimento Anel e Bola

Os resultados da determinação da variação da temperatura de amolecimento anel e bola (Gráfico 6) e a categoria correspondente segundo a norma NP EN 13043, pode ser verificado na Tabela 23.

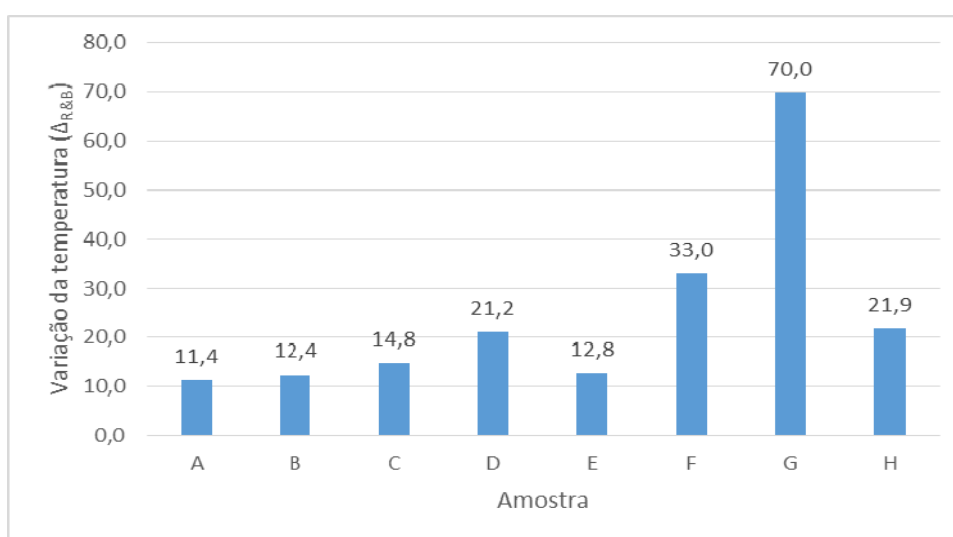


Gráfico 6 Variação da temperatura de amolecimento anel e bola

Analisados os valores obtidos, é possível perceber que os valores de efeito rigidificante são semelhantes nas amostras: fíler calcário RC 480 (Amostra A – 11,40), fíler calcário RC 590 (Amostra B – 12,40), fíler calcário C100 (Amostra E – 12,80), fíler recuperado de pó calcário (Amostra C – 14,80), aumentando ligeiramente no fíler recuperado de pó granítico (Amostra D – 21,20), cal hidráulica (Amostra H – 21,90) e no fíler recuperado de pó granítico (Amostra F – ≥ 33,00).

Tabela 23 Resumo das categorias correspondentes aos valores de ensaio obtidos

Amostra	A	B	C	D	E	F	G	H
Variação temperatura (°C)	11,40	12,40	14,80	21,20	12,80	≥ 33,00	NA	21,90
Categoria NP EN 13043	Δ _{R&B} 8/16	Δ _{R&B} 8/16	Δ _{R&B} 8/16	Δ _{R&B} 17/25	Δ _{R&B} 8/16	Δ _{R&B} 25	NA	Δ _{R&B} 17/25
Nota: NA – Não aplicável								

A determinação deste parâmetro não é aplicável à cal hidratada (Amostra G) devido a sua elevada finura e porosidade.

O efeito rigidificante, como referido anteriormente, está relacionado com a percentagem de volume de vazios, sendo que a existência de um elevado volume traduz-se numa rigidificação mais elevada, pelo facto de haver menos betume livre para ser utilizado na mistura.

4.7. Determinação da viscosidade aparente (Número do betume)

A determinação da viscosidade aparente de uma mistura betuminosa, para os diferentes fíleres, permitiu obter os resultados descritos no Gráfico 7, onde é possível perceber que os valores com menores são referentes aos fíleres comerciais de calcário: fíler calcário RC 480 (Amostra A – 26), fíler calcário C100 (Amostra E – 26), fíler calcário RC 590 (Amostra B – 28), seguidos do fíler recuperado de pó calcário (Amostra C – 36), fíler recuperado de pó granítico (Amostra D – 40), cal hidráulica (Amostra H – 46), fíler recuperado de pó granítico (Amostra F – 52), terminando com a cal hidratada (Amostra H – 108), como o valor mais elevado com alguma disparidade dos restantes.

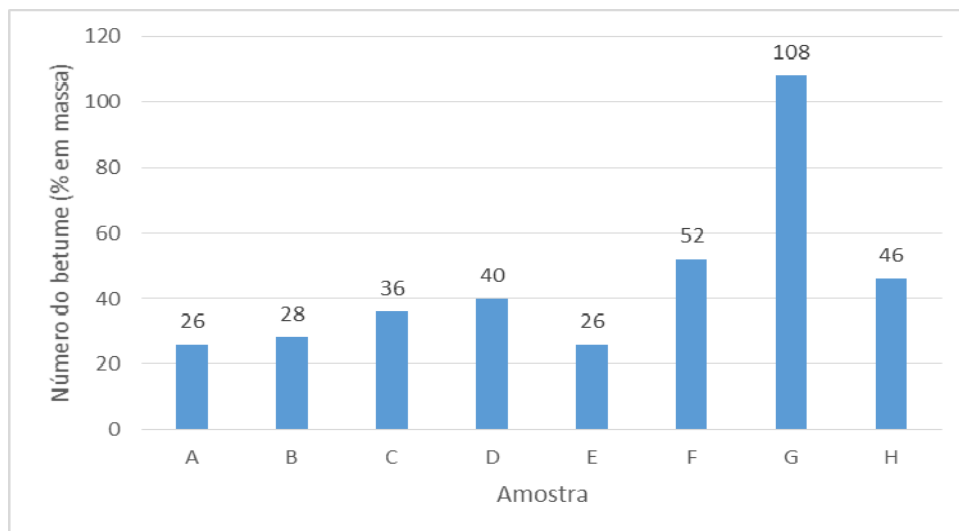


Gráfico 7 Número do Betume

Na Tabela 24 podemos verificar as categorias (norma NP EN 13043) correspondentes aos valores obtidos para o número do betume e a verificação do cumprimento das exigências definidas no Caderno de Encargos Tipo Obra - Estradas de Portugal para fileres a incluir em misturas betuminosas.

Tabela 24 Resumo das categorias correspondentes aos valores de ensaio obtidos

Amostra	A	B	C	D	E	F	G	H
Número do betume	26	28	36	40	26	52	108	46
Categoria <i>BN</i> NP EN 13043	BN _{28/39}	BN _{28/39}	BN _{28/39}	BN _{40/52}	BN _{28/39}	BN _{40/52}	NA	BN _{40/52}
Nota: NA – Não aplicável								

4.8. Análise química por espectrometria de fluorescência de Raios X

A análise por espectrometria de fluorescência de raios x, foi realizada em laboratório nas oito amostras de fíler, tendo detetado a existência de diversos elementos químicos na composição química das amostras. Na tabela 25 estão representados os teores dos compostos químicos obtidos. Da observação aos resultados obtidos e dos elementos com representação mais significativa, foi possível verificar que as amostras de fíler calcário RC 480 (Amostra A), fíler calcário RC 590 (Amostra B), fíler recuperado de pó calcário (Amostra C), fíler calcário C 100 (Amostra E), cal hidratada (Amostra G), cal hidráulica (Amostra H) detêm valores de CaO (óxido de cálcio) que variam entre os 52 % e 73 % sendo que o fíler recuperado de pó granítico (Amostra D), fíler recuperado de pó granítico (Amostra F) registam uma variação inferior, entre 1 % a 2 %, como é possível verificar no Gráfico 8.

Perante os valores obtidos refere-se que no caso da cal hidratada sendo constituída fundamentalmente por óxidos e hidróxidos de cálcio (CaO e Ca(OH)₂) o valor obtido parece ser manifestamente inferior ao esperado. No outro elemento de maior relevância, o dióxido de sílica (SiO₂) apresentava registos mais elevados, entre os 56% e 57% no fíler recuperado de pó granítico (Amostra D), fíler recuperado de pó granítico (Amostra F) e mais reduzidos, entre os 0,3 % e 8 % no fíler calcário RC 480 (Amostra A), fíler calcário RC 590 (Amostra B), fíler recuperado de pó calcário (Amostra C), fíler calcário C100 (Amostra E), cal hidratada (Amostra G) e cal hidráulica (Amostra H), como se constata no Gráfico 9.

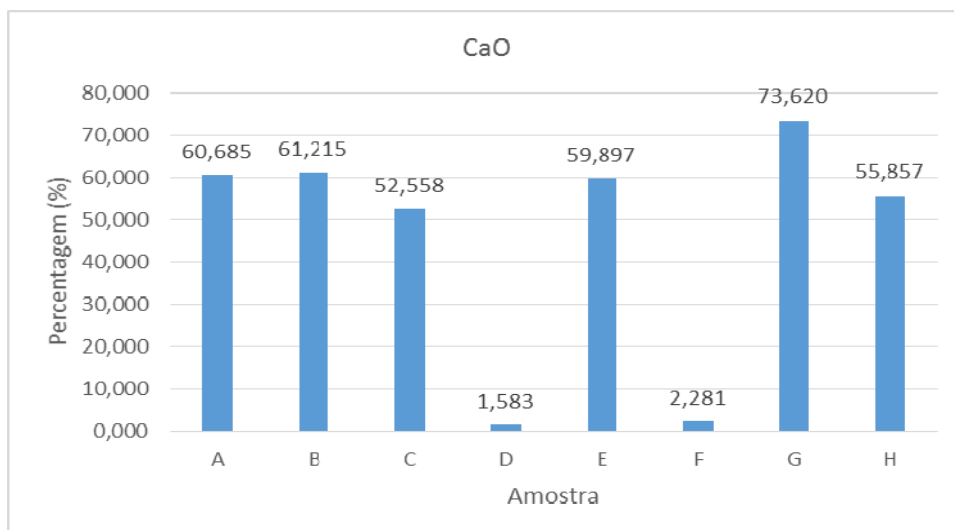


Gráfico 8 Variação do teor de CaO nas amostras de fíler

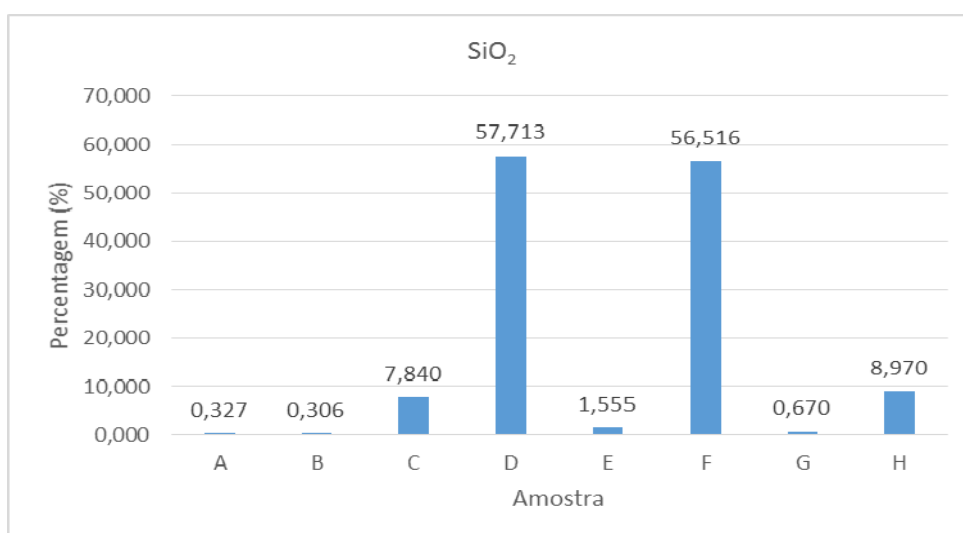


Gráfico 9 Variação do teor de SiO₂ nas amostras de fíler

Apesar da menor representatividade, o óxido de cálcio (CaO), não apresenta qualquer valor para o fíler calcário RC 480 (Amostra A), fíler calcário RC 590 (Amostra B) e apresenta valores entre os 0,03 % e 4 % para os restantes. Os valores de óxido de alumínio ou alumina (Al₂O₃) estão compreendidos entre 2% e 13% para o fíler recuperado de pó calcário (Amostra C), fíler recuperado de pó granítico (Amostra D), fíler recuperado de pó granítico (Amostra F), cal hidráulica (Amostra H) e não apresentam qualquer representatividade no fíler calcário RC 480 (Amostra A), fíler calcário RC 590 (Amostra B), fíler calcário C100 (Amostra E), cal hidratada (Amostra G). No que se refere aos compostos de ferro (FeO e Fe₂O₃), a sua variação de valores situa-se entre os 0,04 % e os 4 %.

Importa salientar, da análise realizada foram detetados diversos componentes químicos das amostras de fíler, apesar de que existem outros que não são detetáveis através da realização deste mesmo ensaio, classificados como "Outros" na Tabela 25 o que constitui uma desvantagem.

Tabela 25 Resultados médios da análise das amostras em (%)

Amostra	A	B	C	D	E	F	G	H
Al ₂ O ₃	0,000	0,000	2,897	13,703	0,949	11,738	0,000	2,515
As ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000
As ₂ O ₅	0,000	0,000	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000
BaO	0,000	0,000	0,011	0,017	0,017	0,053	0,000	0,000
Bi ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000
Bi ₂ O ₅	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000
CaO	60,685	61,215	52,558	1,583	59,897	2,281	73,620	55,857
Cl	0,000	0,000	0,000	0,037	0,000	0,071	0,206	0,066
Cr ₂ O ₃	0,000	0,000	0,000	0,009	0,000	0,012	0,000	0,009
FeO	0,042	0,041	0,759	2,843	0,100	4,206	0,082	1,032
Fe ₂ O ₃	0,047	0,046	0,844	3,160	0,115	4,674	0,092	1,147
K ₂ O	0,000	0,000	0,512	4,239	0,095	4,104	0,039	0,687
MnO	0,000	0,000	0,018	0,094	0,000	0,075	0,000	0,013
Nb ₂ O ₅	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000
P ₂ O ₅	0,000	0,000	0,000	0,328	0,000	0,445	0,000	0,000
PbO	0,000	0,000	0,000	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000
Rb ₂ O	0,000	0,000	0,000	0,021	0,000	0,018	0,000	0,000
SO ₃	0,232	0,177	1,009	0,614	0,270	0,395	0,911	2,020
SiO ₂	0,327	0,306	7,840	57,713	1,555	56,516	0,670	8,970
SnO ₂	0,000	0,000	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
SnO	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000
SrO	0,012	0,013	0,008	0,007	0,014	0,019	0,018	0,040
TiO ₂	0,000	0,005	0,087	0,349	0,012	0,717	0,007	0,100
V ₂ O ₅	0,000	0,000	0,000	0,025	0,000	0,057	0,013	0,013
ZnO	0,000	0,000	0,000	0,020	0,000	0,014	0,000	0,000
ZrO ₂	0,000	0,000	0,005	0,030	0,000	0,053	0,000	0,004
Outros	38,655	38,197	33,452	15,169	36,976	14,541	23,342	27,527

4.9. Determinação da solubilidade em água

Da realização do ensaio da solubilidade em água, obtiveram-se os resultados expressos na Gráfico 10, onde verificamos que o valor mais elevado é referente à cal hidratada (Amostra G – 9,4), seguida de valores intermédios da cal hidráulica (Amostra H – 2,5), fíler calcário RC 590 (Amostra B – 2,7), cal hidráulica (Amostra H – 2,5), fíler calcário RC 480 (Amostra A – 2,1) e valores mais baixos referentes ao fíler recuperado de pó granítico (Amostra F – 1,5), fíler calcário C100

(Amostra E – 1,2), fíler recuperado de pó granítico (Amostra D – 1,2) e fíler recuperado de pó calcário (Amostra C – 0,1).

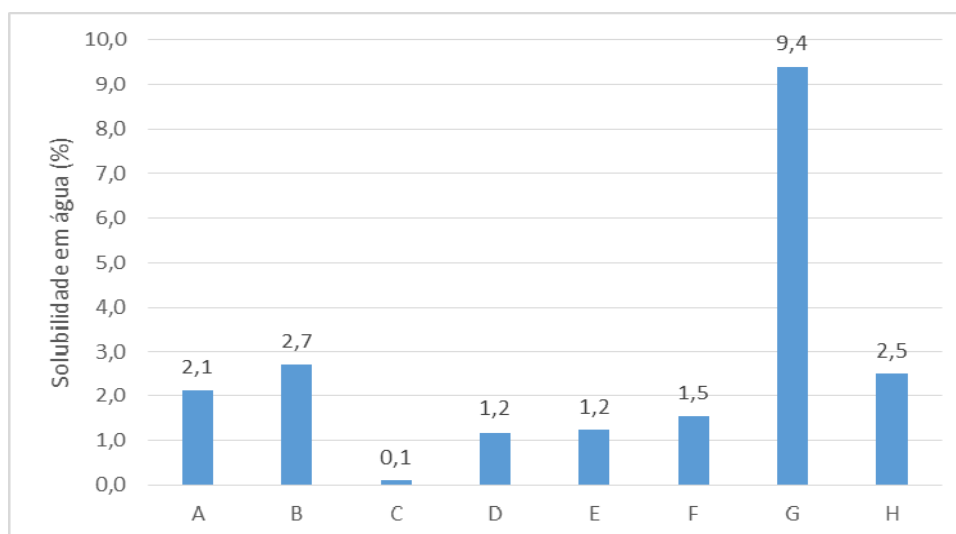


Gráfico 10 Solubilidade em água

Na Tabela 26 observamos as categorias (norma NP EN 13043) correspondentes aos valores obtidos para o número do betume e a verificação das exigências definidas no Caderno de Encargos Tipo Obra - Estradas de Portugal para fíleres a incluir em misturas betuminosas. O valor observado no caso do fíler G pode ser devido ao facto de este fíler conter partículas de diâmetro inferior ao diâmetro dos poros do filtro utilizado na filtragem.

Tabela 26 Resumo das categorias correspondentes aos valores de ensaio obtidos

Amostra	A	B	C	D	E	F	G	H
Solubilidade em água (% em massa)	2,1	2,7	0,1	1,2	1,2	1,5	9,4	2,5
Categoria WS NP EN 13043	WS ₁₀	WS ₁₀	WS ₁₀	WS ₁₀	WS ₁₀	WS ₁₀	WS ₁₀	WS ₁₀

4.10. Determinação da suscetibilidade à água

Na determinação da suscetibilidade à água dos fíleres, ou seja, avaliação da maior ou menor resistência à separação do fíler do betume em presença da água, foi possível confirmar que todas as amostras submetidas a ensaio demonstraram não suscetibilidade à água, não sendo necessário a realização de qualquer cálculo ou avanço para obtenção de valores segundo a norma.

Na Tabela 27 foi feito um resumo de todos os resultados dos ensaios realizados para caracterização físico química dos fíleres.

Tabela 27 Resumo dos resultados obtidos para caracterização físico química dos fíleres

Amostra	A	B	C	D	E	F	G	H
Passados 0,063 mm (%)	78	90	67	69	79	93	99	80
MB _F (ml/g)	1,7	1,7	1,7	3,3	1,7	7,3	3,3	1,7
Massa Volúmica (Mg/m ³)	2,74	2,74	2,71	2,64	2,73	2,62	2,24	2,70
Vazios do fíler (%)	29,40	31,19	35,45	38,12	28,07	46,73	59,12	45,68
Baridade (Mg/m ³)	0,50	0,46	0,77	0,67	0,50	0,67	0,15	0,50
Variação temperatura $\Delta_{R\&B}$	11,40	12,40	14,80	21,20	12,80	≥ 33,00	–	21,90
Número do betume (%)	26	28	36	40	26	52	108	46
CaO (%)	60,685	61,215	52,558	1,583	59,897	2,281	73,620	55,857
SiO ₂ (%)	0,327	0,306	7,840	57,713	1,555	56,516	0,670	8,970
Solubilidade em água (% em massa)	2,1	2,7	0,1	1,2	1,2	1,5	9,4	2,5
Suscetibilidade à água	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não

Com base nos resultados de caracterização dos fíleres obtidos, avaliou-se a possível existência de uma correlação entres os valores dos diversos ensaios, apresentando-se nos gráficos seguintes (Gráfico 11,12 e 13) as variações das três características que apresentaram uma melhor correlação. Assim, parece ser possível através da determinação apenas de uma das características o conhecimento aproximado das outras duas sem realizar os ensaios. Obviamente para uma conclusão mais definitiva sobre esta matéria, haveria que realizar uma campanha mais alargada de ensaios para outras amostras de fíleres.

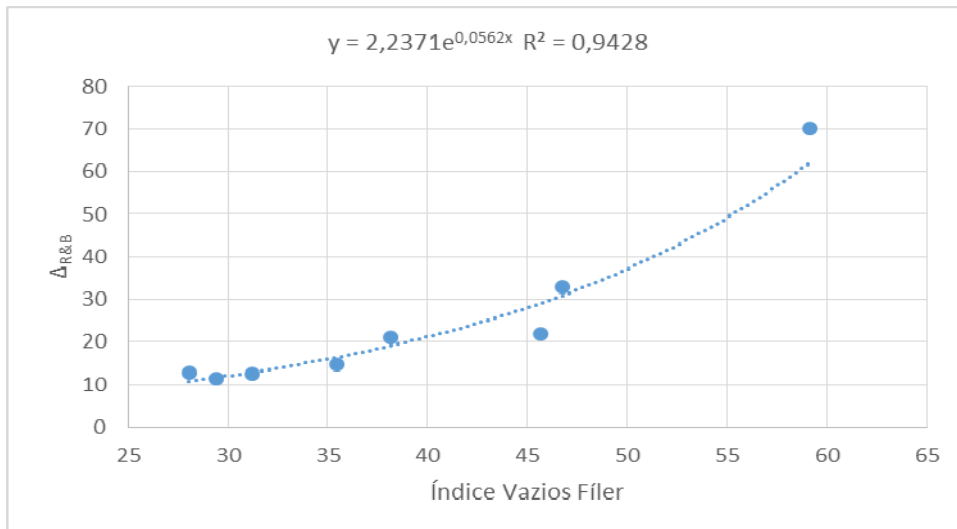


Gráfico 11 Correlação entre índice vazios do fíler e variação da temperatura anel e bola

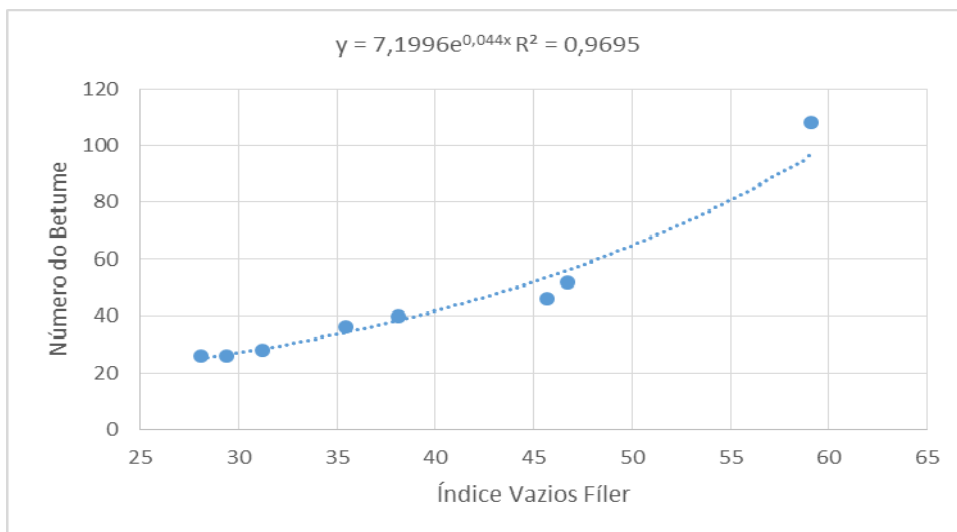


Gráfico 12 Correlação entre índice vazios do fíler e número do betume

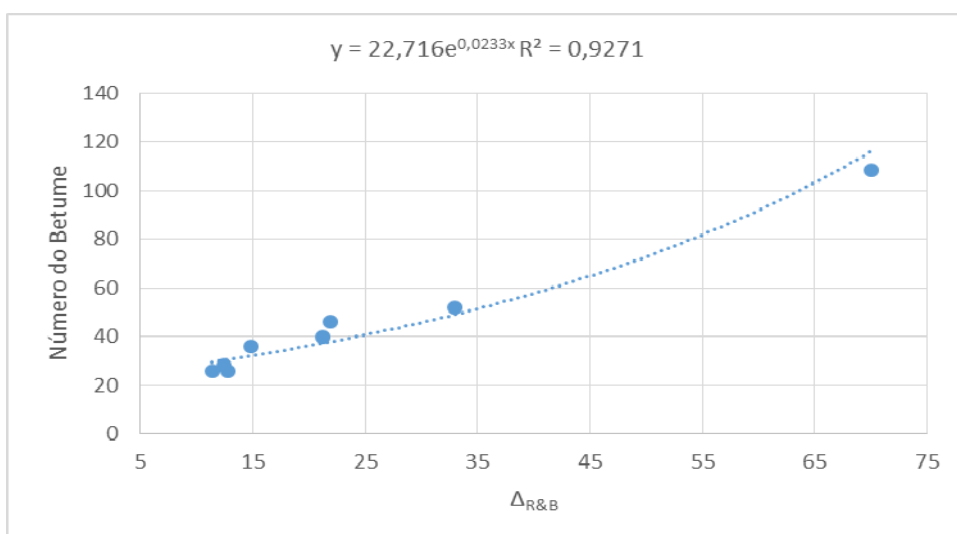


Gráfico 13 Correlação entre número do betume e variação da temperatura anel e bola

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5. Conclusões

Do estudo realizado resultou uma caracterização físico química de diversos fíleres usualmente utilizados no fabrico de misturas betuminosas, sobre os quais iremos apresentar as principais conclusões da avaliação realizada. A concretização desta dissertação permitiu constatar a carência de informação e reduzidas investigações sobre o tema.

No trabalho experimental realizado, efetuaram-se diversos ensaios, segundo a norma NP EN 13043 (Agregados para misturas betuminosas), em fíleres com diferentes características (fíler comercial calcário, fíler recuperado granítico, fíler recuperado calcário, cal hidratada e cal hidráulica), utilizando a fração passada no peneiro 0,125 mm.

Dos resultados alcançados no presente estudo, iniciando pelas características granulométricas dos fíleres, uma das propriedades mais adequadas da sua caracterização, verificou-se que os fíleres comerciais se encontravam dentro dos limites impostos na norma e concordantes com as especificações indicadas nas fichas técnicas dos diferentes produtos.

Na avaliação do desempenho dos fíleres quanto à qualidade dos finos, através do ensaio de azul de metileno, verificou-se que todos os fíleres cumpriam com os requisitos do Caderno Encargos das Estradas de Portugal e que os valores mais elevados eram referentes a fíleres recuperados de materiais graníticos o que nos pode indiciar que os valores podem estar associados às características geológicas nomeadamente à presença de micas.

A determinação do índice de vazios do fíler seco compactado, demonstrou ser dos ensaios que melhor caracteriza os fíleres, associando os materiais de melhor qualidade, fíleres comerciais, a valores mais reduzidos do índice de vazios. Constatou-se a existência de uma ótima correlação com o número do betume e variação da temperatura de amolecimento anel e bola. Verifica-se uma forte correlação entre os resultados dos ensaios de vazios Rigden, variação temperatura de amolecimento anel e bola e viscosidade do fíler (número de betume). Seria necessário realizar mais ensaios com fíleres com outros valores mas tudo indica ser possível encontrar leis de correlação entre os três parâmetros, caracterizando o fíler quanto ao seu poder rigidificante apenas com o comportamento perante um ensaio. Neste caso parece ser o ensaio de Rigden o mais aconselhável pois apresenta uma melhor repetibilidade e reprodutibilidade, menor

influência por parte do operador, não sendo necessário trabalhar com betume pelo que não se colocam problemas de segurança e com reduzidos custos de equipamento necessário.

Verificou-se que os fíleres apresentam comportamentos muito distintos pelo que devem ser estudados convenientemente o seu desempenho nas diferentes misturas betuminosas, para que cada um deles possa ser usado de forma criteriosa, função do fim em vista e não esquecendo que estes materiais são utilizados nas misturas betuminosas com os seguintes fins:

- contribuir com a sua granulometria para a granulometria da mistura de agregados;
- constituir com o betume um mástique de maior rigidez que o betume, mástique esse que vai ligar os agregados.

No entanto, face às características de cada um deles os materiais podem ser utilizados para se conseguirem outros objetivos, como aumentar a rigidez das misturas betuminosas principalmente a altas temperaturas e aumentar a adesividade do ligante ao agregado e permitir um aumento da dosagem do betume melhorando o comportamento da mistura betuminosa à fadiga, aumentando a sua durabilidade sem comprometer o comportamento às deformações permanentes.

Segundo o Caderno de Encargos das Estradas de Portugal todos os fíleres cumprem as exigências de granulometria e azul de metileno. Alguns dos fíleres não podem ser usados em misturas betuminosas: fíler recuperado de pó granítico (Amostra F), cal hidratada (Amostra G) e cal hidráulica (Amostra H) no que diz respeito aos vazios do fíler seco compactado, cal hidratada (Amostra G), por incumprimento das exigências.

A impossibilidade em realizar o ensaio variação temperatura anel e bola da cal hidratada (Amostra G) deveu-se à elevada porosidade das partículas e elevado volume de vazios entre partículas.

Perspetivas futuras

Face à pouca literatura, há uma necessidade de alargar o estudo, procurando refletir de que forma as variações de características dos fíleres influenciam o desempenho das misturas betuminosas onde são incorporados, diversificando a origem dos fíleres em termos petrográficos e em termos de distribuição geográfica.

CAPÍTULO 6

BIBLIOGRAFIA

6. Bibliografia

Alves, L. (2011). *Ligantes Betuminosos e a Normalização Europeia - Tese de Mestrado*. Porto: Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto.

Asphalt Institute. (1983). *Asphalt technology and construction practice*. Maryland: Asphalt Institutes.

Branco, F., Pereira, P. & Santos, L. P. (2011). *Pavimentos Rodoviários*. Coimbra: Almedina.

Cavalcante, V. & Soares, J. (1997). O efeito do tipo e do teor de fíler nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas. *33ª Reunião Anual de Pavimentação*. Florianópolis: Universidade Federal do Ceará.

Cooler Jr., L., Brown, E., Hanson, D. & Fletcher, M. (1998). Characterization of asphalt-filler mortars with superpave binder tests . *Journal of the association of asphalt paving technologists (AAPT)*.

Craus, J., Ishai, I. & Sides, A. (1978). Some Physico-Chemical aspects of the effect and the role of the filler type and properties. *Journal of the Association of asphalt paving technologists (AAPT)*.

Estradas de Portugal. (2008). *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis (Volume 2)*. Almada.

Estradas de Portugal, S. (2012). *Caderno de Encargos Tipo Obra 14.03 - Pavimentação*. Almada.

Freire, A. (2003). *Deformações permanentes de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários - Tese Doutoramento*. Coimbra: Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Gomes, L. (2005). *Reciclagem de Misturas Betuminosas a Quente em Central*. Porto: MVC.

Hesp, S., Smith, B. & Hoare, T. (2001). Effect of the Filler Particle Size on the Low. *Journal of the Association os Asphalt Paving Tehcnologists*.

Jalali, A. (2009). *A Cal na Construção*. Guimarães: Gráfica Vilaverdense - Artes Gráficas, Lda.

Lee, K. W. & Mahboub, K. (2006). *Asphalt Mix Design and Construction: Past, Present, and Future*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.

LNEC. (2005). *Conservação e Reabilitação de Pavimentos Rodoviários*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil .

Lopes, Ó. M. (2009). *Misturas Betuminosas - Determinação das Características para o Cálculo dos Pavimentos - Tese de Mestrado*. Porto: Faculdade Engenharia Universidade do Porto.

Luminari, M. & Fidato, A. (1998). State of the art report on mix design in RILEM Report 17. Bituminous Binders and Mixes. . London: E & FN Spon.

Manuppella, G. & Moreira, J. (1975). Comunicação apresentada ao II Congresso Ibero-Americano de Geologia Económica. *Panorama dos Calcários Jurássicos Portugueses*. Buenos Aires.

Manuppella, G., Moreira, J. C., & Graça e Costa, J. (1985). *Calcários e dolomitos do Maciço Calcário Estremenho. Estudos, Notas e Trabalhos*. D.G.G.M.

Meininger, R. (1992). *Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance*. Philadelphia: ASTM.

Mendes, S. (2011). *Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infraestruturas de transportes - Tese de Mestrado*. Lisboa: Instituto Superior Engenharia de Lisboa.

Miranda, H. (2008). *Resistência à fadiga de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha - Tese de Mestrado*. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa - IST.

Monismith, C., Epps, J., & Finn, F. (1985). *Improved Asphalt Mix Design - Proceedings*. Association of Asphalt Paving Technologists.

Morais, H. (2001). *Estudo da Fundação dum Pavimento Rodoviário Flexível - Tese de Mestrado*. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança.

Pais, J., Pereira, P. & Azevedo, M. (2000). Ensaio Mecânicos para Caracterização de Misturas Betuminosas - 1º Congresso Rodoviário Português. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Paulo Pereira & Miranda, V. (1999). *Gestão da Conservação dos Pavimentos Rodoviários*. Braga: Universidade do Minho.

Pereira, P., Pais, J., Freitas, E., Silva, H. & Oliveira, J. (2007). *A reabilitação da rede rodoviária no século XXI*. Guimarães: Universidade do Minho.

Santos, A. (2002). *Estruturas de Pavimento Rodoviário Flexível*. Guimarães: Universidade do Minho.

Santos, M. J. (2009). *Dimensionamento de camadas de reforço de pavimentos rodoviários flexíveis - Tese de Mestrado*. Aveiro: Universidade de Aveiro.

Santos, P. (2002). *Pavimentos Rodoviários*. Braga: Impresso na Tipografia Barbosa & Xavier, Lda.

Teixeira, A. (2000). *Caracterização da resistência à fadiga de misturas betuminosas em equipamento servo-pneumático - Tese de Mestrado*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Wang, L. & Masad, E. (2007). *Analysis of Asphalt Pavement Materials and Systems: Emerging Methods*. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers.

White, T., Haddock, J. & Rismantojo, E. (2006). *Aggregate Tests for Hot-mix Asphalt Mixtures Used in Pavements, Edição 557*. Transportation Research Board.

Sites Consultados

(Maio de 2013). Obtido de www.amp.pt.
(Maio de 2013). Obtido de www.lnec.pt.
(Junho de 2013). Obtido de www.repositorio-aberto.up.pt
(Junho de 2013). Obtido de www.inir.pt.
(Junho de 2013). Obtido de www.bcsdportugal.org.
(Junho de 2013). Obtido de www.ria.ua.pt.
(Junho de 2013). Obtido de www.run.unl.pt.
(Julho de 2013). Obtido de www.secilargamassas.pt.
(Junho de 2013). Obtido de www.paginas.fe.up.pt.
(Agosto de 2013). Obtido de www.lneg.pt.
(Setembro de 2013). Obtido de www.ipq.pt.
(Setembro de 2013). Obtido de www.fazvia.com.
(Outubro de 2013). Obtido de www.engenhariacivil.com.
(Outubro de 2013). Obtido de www.almariada.blogspot.pt

Normas

NP EN 196-6:2010 (Ed. 2) Métodos de ensaio de cimentos. Parte 6: Determinação da finura, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

NP EN 206-1:2007 (Ed. 2) Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

NP EN 459-1:2011 (Ed. 2) Cal de construção. Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

NP EN 459-2:2011 (Ed. 2) Cal de construção. Parte 2: Métodos de ensaio, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

NP EN 459-3:2011 (Ed. 2) Cal de construção. Parte 3: Avaliação da conformidade, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

NP EN 933-9:2011 (Ed. 3) Ensaios das propriedades geométricas dos agregados. Parte 9: Avaliação dos finos. Ensaio do azul de metileno, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

EN 933-10:2009 (Ed. 2) Tests for geometrical properties of aggregates. Part 10: Assessment of fines - Grading of filler aggregates (air jet sieving), Norma Europeia – Versão Inglesa.

NP EN 1097-4:2012 (Ed. 2) Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 4: Determinação dos vazios do fíler seco compactado, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

NP EN 1097-7:2012 (Ed. 2) Ensaios das propriedades mecânicas e físicas dos agregados. Parte 7: Determinação da massa volúmica do fíler. Método do picnómetro, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

EN 1744-1:2009+A1:2012 (Ed. 1) Tests for chemical properties of aggregates. Part 1: Chemical analysis, Norma Europeia – Versão Inglesa.

EN 12597:2000 (Ed. 1) Bitumen and bituminous binders. Terminology, Norma Europeia – Versão Inglesa.

NP EN 13043:2004 (Ed. 1) Agregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

NP EN 13108-1:2011 (Ed. 1) Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 1: Betão betuminoso, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

EN 13108-2:2006 (Ed. 1) Bituminous mixtures. Material specifications. Part 2: Asphalt Concrete for very thin layers, Norma Europeia – Versão Inglesa.

EN 13108-6:2006 (Ed. 1) Bituminous mixtures. Material specifications. Part 6: Mastic Asphalt, Norma Europeia – Versão Inglesa.

EN 13108-7:2006 (Ed. 1) Bituminous mixtures. Material specifications. Part 7: Porous Asphalt, Norma Europeia – Versão Inglesa.

NP EN 13108-8:2011 (Ed. 1) Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 8: Misturas betuminosas recuperadas, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

NP EN 13108-20:2008 (Ed. 1) Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 20: Ensaio de Tipo, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

NP EN 13108-21:2008 (Ed. 1) Misturas betuminosas. Especificações dos materiais. Parte 21: Controlo da Produção em Fábrica, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

NP EN 13179-1:2010 (Ed. 1) Ensaio de fíleres utilizados em misturas betuminosas. Parte 1: Variação da temperatura de amolecimento de anel e bola, Norma Europeia – Versão Portuguesa.

NP EN 13179-2:2010 (Ed. 1) Ensaio de fíleres utilizados em misturas betuminosas. Parte 2: Viscosidade aparente (Número de betume), Norma Europeia – Versão Portuguesa.

EN 14023:2010 (Ed. 2) Bitumen and bituminous binders. Specification framework for polymer modified bitumens, Norma Europeia – Versão Inglesa.