



**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**  
**Departamento de Engenharia Civil**

**ISEL**



## **Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas**

**FLÁVIO JOSÉ QUARESMA PEREIRA**  
(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de  
Especialização de Vias de Comunicação e Transportes

**Orientadores:**

Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista, Investigadora Auxiliar (LNEC)  
Doutora Maria da Graça Alfaró Lopes, Professora Coordenadora c/ Agregação (ISEL)

**Júri:**

**Presidente:**

Doutora Maria Helena Marecos, Professora Coordenadora (ISEL)

**Vogais:**

Doutor José Manuel Coelho das Neves, Professor Auxiliar (IST)

Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista, Investigadora Auxiliar (LNEC)

Doutora Maria da Graça Alfaró Lopes, Professora Coordenadora c/ Agregação (ISEL)

**Setembro de 2009**



# **Estudo da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas**

Nome: Flávio José Quaresma Pereira

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil

Orientação: Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Maria da Graça Alfaro Lopes

## **Resumo**

De uma forma geral, em Portugal, os valores de referência existentes para avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas foram estabelecidos de acordo com a norma Militar Americana MIL-STD-620A (1966). No entanto, com o aparecimento da norma Europeia EN 12697-12, tornou-se necessário efectuar a avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas segundo a referida norma. Assim, este trabalho teve como objectivo contribuir para a obtenção de valores de referência de sensibilidade à água, avaliada de acordo com o método preconizado pela norma Europeia em vigor, EN 12697-12:2008.

Neste trabalho foi avaliada a sensibilidade à água de três misturas betuminosas fabricadas em laboratório, constituídas por três tipos de agregados (granitos, basaltos e calcários) e dois tipos de betume (penetração nominal de  $35/50 \times 10^{-1}$  mm e  $50/70 \times 10^{-1}$  mm), tendo sido também estudada a influência da variação da temperatura do ensaio de tracção indirecta ( $15^{\circ}\text{C}$  e  $25^{\circ}\text{C}$ ) nos resultados obtidos.

Para as misturas betuminosas ensaiadas, os valores da Resistência Conservada obtidos pela norma Militar foram sempre superiores aos da norma Europeia e o ensaio de tracção indirecta realizado à temperatura de ensaio de  $25^{\circ}\text{C}$  também revelou melhores percentagens de resistência conservada face à temperatura de ensaio de  $15^{\circ}\text{C}$ .

## **Palavras-chave**

Pavimentos flexíveis; Misturas betuminosas; Durabilidade; Sensibilidade à água; Resistência conservada; Ensaio de tracção indirecta.



# **Study of the Water Sensitivity of Asphalt Mixtures**

Name: Flávio José Quaresma Pereira

Dissertation to obtain the degree of Master in Civil Engineering

Advisors: Fátima Alexandra Barata Antunes Batista

Maria da Graça Alfaro Lopes

## **Abstract**

In general, the existing reference values for assessing the water sensitivity of asphalt in Portugal were established according to U.S. Military MIL-STD-620A (1966). However, with the emergence of European standard EN 12697-12, it became necessary to evaluate the water sensitivity of asphalt under this standard. This work aimed to contribute to the achievement of reference values for water sensitivity evaluated according to the method recommended by the ruling European standard, EN 12697-12:2008.

In this work, the water sensitivity was evaluated by three asphalt mixtures produced in the laboratory consisting of three types of aggregates (granites, basalts and limestones) and two types of bitumen (nominal penetration of  $35/50 \times 10^{-1}$  mm and  $50/70 \times 10^{-1}$  mm). Also being studied was the influence of the temperature variation on the indirect tensile test ( $15^{\circ}\text{C}$  and  $25^{\circ}\text{C}$ ) on the obtained results.

For the tested bituminous mixtures, the values of retained resistance obtained by the U.S. Military standard were always superior than the European standard and the indirect tensile test at the temperature of  $25^{\circ}\text{C}$  also revealed greater percentages of retained resistance in comparison with the temperature of  $15^{\circ}\text{C}$ .

## **Keywords**

Flexible pavements; Asphalt mixtures; Durability; Water sensitivity;

Retained resistance; Indirect tensile tests.



## **Agradecimentos**

Quero em primeiro lugar agradecer às pessoas que tornaram possível este projecto, às minhas orientadoras Doutora Fátima Alexandra Barata Antunes Batista, Investigadora Auxiliar no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) e Doutora Maria da Graça Dias Alfaro Lopes, Professora Coordenadora com agregação do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). Pela disponibilidade, profissionalismo, paciência, atenção e amizade, o meu muito obrigado, esperando poder ter retribuído com trabalho e dedicação o seu investimento neste projecto.

Ao LNEC, na pessoa do seu presidente, Investigador Coordenador Carlos Alberto Matias Ramos e à Investigadora Principal Doutora Maria de Lurdes B. Costa Antunes, Chefe do Núcleo de Infra-Estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias (NIRA) do Departamento de Transportes (DT) do LNEC, pelos meios facultados e às várias pessoas que contribuíram directa ou indirectamente para a realização deste trabalho.

Aos técnicos do NIRA, os senhores Carlos Pimentel, Nuno Nunes e Eduardo Coimbra, pelo seu profissionalismo, pela paciência e atenção sempre demonstrada, antes, durante e após a execução dos ensaios laboratoriais, também o meu muito obrigado.

Gostaria de agradecer em particular a algumas pessoas que me ajudaram durante este trajecto: aos meus colegas e amigos João Dias e Frederico Vieira, à Carmen Pavão pela amizade e compreensão sempre demonstrada e à minha irmã Célia, pela amizade e aconselhamento que me forneceu durante a execução deste trabalho.

Por fim, e nunca menos importante, às duas pessoas responsáveis pela pessoa que sou, que fui e que serei, e a quem devo tudo, os meus pais Fátima e José, o meu mais profundo obrigado.

A todos eles e a quem por lapso aqui não mencionei, os meus sinceros agradecimentos.



---

# Índice

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Introdução</b>  | <b>2</b>  |
| 1.1. Enquadramento do tema  | 2         |
| 1.2. Motivação e objectivos   | 3         |
| 1.3. Estrutura do trabalho  | 4         |
| <b>2. Aspectos Relativos à Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas</b> | <b>6</b>  |
| 2.1. Considerações iniciais   | 6         |
| 2.2. O pavimento  | 7         |
| 2.2.1. Definições e características   | 7         |
| 2.2.2. Tipos de pavimentos  | 8         |
| 2.2.3. Constituição   | 9         |
| 2.2.4. A presença da água no pavimento                                      | 10        |
| 2.3. Misturas betuminosas   | 11        |
| 2.3.1. Generalidades  | 11        |
| 2.3.2. Agregado   | 11        |
| 2.3.3. Betume   | 14        |
| 2.3.4. Características volumétricas das misturas betuminosas                | 19        |
| 2.3.5. Comportamento reológico das misturas betuminosas                     | 22        |
| 2.3.6. Tipos de misturas betuminosas  | 23        |
| 2.4. Processos de movimentação da água nas misturas betuminosas             | 24        |
| 2.5. Mecanismos de degradação associados à presença de água                 | 25        |
| 2.5.1. Perda de adesividade   | 25        |
| 2.5.2. Perda de coesão  | 31        |
| 2.6. Patologias associadas à presença de água                               | 32        |
| 2.7. Considerações finais   | 36        |
| <b>3. Estudo Experimental para Avaliação da Sensibilidade à Água</b>        | <b>40</b> |
| 3.1. Considerações iniciais   | 40        |
| 3.2. Caracterização dos materiais utilizados no estudo                      | 41        |
| 3.2.1. Mistura de agregados   | 42        |
| 3.2.2. Betumes  | 45        |
| 3.3. Caracterização das misturas betuminosas utilizadas no estudo           | 46        |
| 3.3.1. Misturas BB-G1 e BB-G2   | 46        |
| 3.3.2. Mistura BB-B1  | 46        |
| 3.3.3. Requisitos/Propriedades das misturas                                 | 47        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.4. Preparação dos provetes _____   | 47        |
| 3.4.1. Generalidades _____   | 47        |
| 3.4.2. Equipamento utilizado _____   | 48        |
| 3.4.3. Fabrico dos provetes _____  | 48        |
| 3.5. Ensaio segundo a Norma Militar Americana MIL-STD-620A (1966),<br>Método 104 _____ | 54        |
| 3.5.1. Generalidades _____   | 54        |
| 3.5.2. Equipamento utilizado _____   | 54        |
| 3.5.3. Método de ensaio _____  | 55        |
| 3.6. Ensaio segundo a Norma Europeia EN 12697-12:2008 – Método A _                     | 57        |
| 3.6.1. Generalidades _____   | 57        |
| 3.6.2. Equipamento utilizado _____   | 59        |
| 3.6.3. Método de ensaio _____  | 60        |
| 3.7. Considerações finais _____  | 64        |
| <b>4. Apresentação e Análise de Resultados _____</b>                                   | <b>66</b> |
| 4.1. Considerações iniciais _____  | 66        |
| 4.2. Apresentação de resultados _____  | 67        |
| 4.2.1. Mistura BB-G1 _____   | 67        |
| 4.2.2. Mistura BB-G2 _____   | 68        |
| 4.2.3. Mistura BB-B1 _____   | 69        |
| 4.2.4. Tipo de rotura dos provetes _____   | 70        |
| 4.3. Análise de resultados _____   | 72        |
| 4.3.1. Avaliação da influência do método de ensaio _____                               | 72        |
| 4.3.2. Avaliação da influência do tipo de agregados _____                              | 73        |
| 4.3.3. Avaliação da influência do tipo de betume _____                                 | 75        |
| 4.3.4. Avaliação da influência da variação da temperatura _____                        | 76        |
| 4.3.5. Avaliação do tipo de rotura dos provetes _____                                  | 77        |
| 4.4. Considerações finais _____  | 77        |
| <b>5. Conclusões e Trabalhos Futuros _____</b>   | <b>80</b> |
| 5.1. Conclusões _____  | 80        |
| 5.2. Trabalhos futuros _____   | 83        |
| <b>Referências Bibliográficas _____</b>  | <b>85</b> |
| <b>Bibliografia Consultada _____</b>   | <b>89</b> |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1 – Tipos de pavimentos rodoviários em função dos materiais e da deformabilidade _____                    | 8  |
| Figura 2.2 – Constituição de um pavimento _____  | 9  |
| Figura 2.3 – A presença da água num pavimento _____  | 10 |
| Figura 2.4 – Constituição do betume asfáltico _____  | 15 |
| Figura 2.5 – Envelhecimento do betume e influência dos seus componentes ao longo do tempo _____                    | 18 |
| Figura 2.6 – Composição volumétrica de uma mistura betuminosa _____  | 19 |
| Figura 2.7 – Comportamento reológico de uma mistura betuminosa _____   | 23 |
| Figura 2.8 – Principais tipos de misturas betuminosas _____  | 23 |
| Figura 2.9 – Desagregação com início na base das camadas betuminosas _____   | 33 |
| Figura 2.10 – Desagregação superficial _____   | 34 |
| Figura 2.11 – Peladas ou ninhos _____  | 34 |
| Figura 2.12 – Subida de finos nas camadas betuminosas _____  | 35 |
| Figura 2.13 – Subida de finos nas camadas betuminosas _____  | 35 |
| Figura 2.14 – Factores fundamentais a ter em conta no estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas _____ | 37 |
| Figura 3.1 – Granulometria da mistura de agregados graníticos e fuso granulométrico _____                          | 43 |
| Figura 3.2 – Granulometria da mistura de agregados basálticos e calcários e fuso granulométrico _____              | 44 |
| Figura 3.3 – Acondicionamento do material _____  | 49 |
| Figura 3.4 – Equipamento na estufa antes da mistura _____  | 50 |
| Figura 3.5 – Mistura dos agregados com o betume _____  | 51 |
| Figura 3.6 – Compactação dos provetes (compactador de impacto) _____   | 52 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.7 – Desmoldagem dos provetes (prensa)                  | 53 |
| Figura 3.8 – Determinação da baridade imersa dos provetes       | 56 |
| Figura 3.9 – Determinação da força de rotura Marshall           | 57 |
| Figura 3.10 – Provetes submetidos a vácuo                       | 61 |
| Figura 4.1 – Apresentação dos principais resultados obtidos     | 70 |
| Figura 4.2 – Avaliação da influência do método de ensaio        | 72 |
| Figura 4.3 – Avaliação da influência do tipo de agregados       | 74 |
| Figura 4.4 – Avaliação da influência do tipo de betume          | 75 |
| Figura 4.5 – Avaliação da influência da variação da temperatura | 76 |

## Índice de Quadros

|  |    |
|--|----|
| Quadro 2.1 – Requisitos/propriedades do betume _____   | 16 |
| Quadro 3.1 – Misturas betuminosas utilizadas no estudo _____   | 41 |
| Quadro 3.2 – Composição granulométrica da mistura de agregados graníticos _  | 42 |
| Quadro 3.3 – Características do agregado granítico _____   | 43 |
| Quadro 3.4 – Composição granulométrica da mistura de agregados basálticos e calcários _____                                | 44 |
| Quadro 3.5 – Características dos agregados basálticos e calcários _____  | 45 |
| Quadro 3.6 – Características dos betumes 35/50 e 50/70 _____   | 45 |
| Quadro 3.7 – Requisitos/propriedades da mistura _____  | 47 |
| Quadro 4.1 – Ensaio realizados _____   | 66 |
| Quadro 4.2 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G1 (norma MIL-STD-620A – Método 104) _____    | 67 |
| Quadro 4.3 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G1 (norma EN 12697-12 – Método A), 15°C _____ | 67 |
| Quadro 4.4 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G1 (norma EN 12697-12 – Método A), 25°C _____ | 67 |
| Quadro 4.5 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G2 (norma MIL-STD-620A – Método 104) _____    | 68 |
| Quadro 4.6 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G2 (norma EN 12697-12 – Método A), 15°C _____ | 68 |
| Quadro 4.7 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G2 (norma EN 12697-12 – Método A), 25°C _____ | 68 |
| Quadro 4.8 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-B1 (norma MIL-STD-620A – Método 104) _____    | 69 |
| Quadro 4.9 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-B1 (norma EN 12697-12 – Método A), 15°C _____ | 69 |

Quadro 4.10 – Tipo de rotura dos provetes \_\_\_\_\_ 71

# Lista de Símbolos e Abreviaturas

## Símbolos

### Alfabeto Latino

| Símbolo               | Significado   |
|-----------------------|---|
| $B_{\min}$            | Valor admissível para a percentagem de ligante            |
| $F_1$                 | Força de rotura média do Grupo 1                          |
| $F_2$                 | Força de rotura média do Grupo 2                          |
| $h$                   | Altura do provete   |
| $m_1$                 | Massa do provete seco                                     |
| $m_2$                 | Massa do provete saturado dentro de água                  |
| $m_3$                 | Massa do provete saturado com a superfície seca           |
| $P_{ITS}$             | Resistência máxima (força de rotura) em tracção indirecta |
| $P_{\text{Marshall}}$ | Resistência máxima (estabilidade Marshall corrigida)      |
| $V_a$                 | Volume aparente de agregados                              |
| $V_{ab}$              | Volume absorvido de betume                                |
| $V_b$                 | Volume de betume  |
| $V_e$                 | Volume efectivo de betume                                 |
| $V_m$                 | Porosidade calculada com base na baridade máxima teórica  |
| VMA                   | Volume de vazios no esqueleto mineral                     |
| $V_{pm}$              | Valor admissível para a porosidade                        |
| $V_v$                 | Volume de vazios  |

### Alfabeto Grego

| Símbolo        | Significado                                   |
|----------------|---|
| $\Phi$         | Diâmetro do provete                           |
| $\rho_{b,SSD}$ | Baridade determinada pelo método hidrostático |

## Abreviaturas

| <b>Abreviatura</b> | <b>Significado</b>  |
|--------------------|---|
| AB                 | Argamassa Betuminosa com Betume Modificado  |
| AC                 | Asphalt Concrete  |
| BB                 | Betão Betuminoso  |
| BBd                | Betão Betuminoso Drenante   |
| BBr                | Betão Betuminoso Rugoso   |
| DEC                | Departamento de Engenharia Civil  |
| DT                 | Departamento de Transportes   |
| EN                 | Norma Europeia  |
| E.P.               | Estradas de Portugal  |
| LNEC               | Laboratório Nacional de Engenharia Civil  |
| INE                | Instituto Nacional de Estatística   |
| ISEL               | Instituto Superior de Engenharia de Lisboa  |
| ITS <sub>m</sub>   | Resistência (tensão de rotura) em tracção indirecta                               |
| ITS <sub>w</sub>   | Resistência em tracção indirecta dos provetes “imersos”                           |
| ITS <sub>d</sub>   | Resistência em tracção indirecta dos provetes “a seco”                            |
| ITSR               | Resistência conservada em tracção indirecta                                       |
| IRC                | Índice de Resistência Conservada  |
| NIRA               | Núcleo de Infra-Estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias                           |
| MB                 | Macadame Betuminoso   |
| MBD                | Mistura Betuminosa Densa  |
| MBAM               | Mistura Betuminosa de Alto Módulo   |
| mBBr               | Micro Betão Betuminoso Rugoso   |
| MBA-BBA            | Mistura betuminosa aberta com betume modificado com alta percentagem de borracha  |
| MBA-BBM            | Mistura betuminosa aberta com betume modificado com média percentagem de borracha |
| MBR-BBA            | Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com alta percentagem de borracha  |
| MBR-BBM            | Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com média percentagem de borracha |
| MIL-STD            | Norma Militar Americana   |
| NP                 | Norma Portuguesa  |
| RTFOT              | Rolling Thin Film Oven Test   |
| SiO <sub>2</sub>   | Sílica  |
| U.S.               | United States   |

---

# CAPÍTULO

# 1

---

## Introdução

*Neste capítulo é realizada uma primeira abordagem aos conceitos mais relevantes no estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas, sendo apresentados os objectivos a atingir e a descrição da estrutura do trabalho.*

## **1. Introdução**

### **1.1. Enquadramento do tema**

A dissertação de mestrado que se desenvolveu, submetida ao tema “Estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas”, insere-se na área de conhecimento das Infra-estruturas de Transportes/Materiais para Pavimentação.

A rede rodoviária constitui a infra-estrutura de transportes mais importante para o desenvolvimento global de qualquer país, pelo grau de liberdade que lhe está implicitamente associado. Ela pode-se desenvolver por vias de importância progressivamente menor de forma a cobrir todo o território.

Mesmo quando grande parte dos passageiros e da mercadoria é transportada por outros meios de transporte, como o ferroviário ou o aéreo, é o transporte rodoviário que, na maior parte das situações, faz a interface entre ambos e permite o transporte porta-a-porta.

Com a aplicação dos sucessivos planos rodoviários nacionais, a rede rodoviária no nosso país tem vindo a sofrer uma grande reestruturação e desempenha um papel cada vez mais fundamental (Branco *et al.*, 2006).

Em 7 de Outubro de 2008, a rede nacional de estradas em Portugal possuía 12907 quilómetros de extensão (INE, 2008). Da rede classificada sob jurisdição das Estradas de Portugal (E.P.) que está contabilizada (10390 quilómetros), apenas 0,25% é constituída por pavimentos rígidos, sendo a restante rede constituída por pavimentos flexíveis e semi-rígidos (pavimentos com camadas superiores em misturas betuminosas).

Com tão vasta extensão e associado a um crescente nível de exigência, segurança, conforto e até economia, o bom comportamento das misturas betuminosas é fundamental.

De entre as características que influenciam o comportamento das misturas betuminosas ao longo de tempo, encontra-se a sua resistência à acção da água. A sensibilidade à água de misturas betuminosas é um factor importante no desempenho e na durabilidade dos pavimentos flexíveis e semi-rígidos, em especial quando se trata de misturas para camadas de desgaste, uma vez que estão directamente sujeitas à acção do tráfego e dos agentes atmosféricos.

## **1.2. Motivação e objectivos**

A sensibilidade à água das misturas betuminosas é habitualmente avaliada na sua formulação, sendo estabelecidos nos Cadernos de Encargos valores mínimos de resistência conservada a cumprir de acordo com o método de ensaio utilizado para a sua avaliação.

Em Portugal, os valores de referência existentes para avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas foram estabelecidos de acordo com a norma de ensaio Militar Americana MIL-STD-620A (1966), método 104 (APORBET, 1998). No entanto, com o aparecimento da norma Europeia EN 12697-12 relativa à sensibilidade à água de misturas betuminosas, tornou-se necessário efectuar a avaliação desta propriedade através da referida norma. Verificou-se contudo que existem diferenças significativas entre os métodos de ensaio preconizados na norma MIL-STD-620A e na norma EN 12697-12, que podem conduzir a resultados muito diferentes para a resistência conservada de uma determinada mistura (Batista *et al.*, 2008).

A edição em vigor da norma Europeia EN 12697-12 de 2008 preconiza três métodos de ensaio. O método A, o único que constava na primeira edição da norma de 2003, baseia-se na determinação da resistência à tracção indirecta dos provetes, sendo este método aquele que tem sido mais utilizado ao nível dos países europeus onde a norma está em vigor (Batista e Antunes, 2009)

Tendo em atenção o exposto, considerou-se oportuno a obtenção de valores de sensibilidade à água de misturas betuminosas aplicadas em Portugal, de acordo com o método de ensaio A preconizado na norma Europeia EN 12697-12:2008.

Assim, este trabalho teve como principais objectivos contribuir para a obtenção de valores de referência de sensibilidade à água de misturas betuminosas aplicadas em camadas de desgaste, no nosso País, de acordo com a norma Europeia.

Para este efeito, foram seleccionados para ensaio misturas betuminosas constituídas por três tipos de agregados (granitos, basaltos e calcários) e dois tipos de betume (penetração nominal de  $35/50 \times 10^{-1}$  mm e  $50/70 \times 10^{-1}$  mm).

### **1.3. Estrutura do trabalho**

O trabalho desenvolvido encontra-se organizado em cinco capítulos distintos:

Capítulo 1: “Introdução”. Neste capítulo efectua-se o enquadramento do tema e apresentam-se os objectivos do trabalho e a estrutura adoptada.

Capítulo 2: “Aspectos relativos à sensibilidade à água de misturas betuminosas”. Neste capítulo é efectuada uma revisão bibliográfica onde são analisados os principais conceitos relacionados com a temática em estudo.

Capítulo 3: “Estudo experimental para avaliação da Sensibilidade à Água”. Neste capítulo são descritas as misturas betuminosas e os métodos de ensaio utilizados no estudo experimental desenvolvido.

Capítulo 4: “Apresentação e análise de resultados”. Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos na realização dos ensaios de sensibilidade à água sobre as misturas betuminosas em estudo.

Capítulo 5: “Conclusões e trabalhos futuros”. Apresentam-se as principais conclusões retiradas da execução do trabalho, em particular do estudo experimental efectuado, sendo por fim efectuada uma previsão sobre possíveis trabalhos futuros que possam ser desenvolvidos sobre este tema.

---

## CAPÍTULO

## 2

---

### **Aspectos Relativos à Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas**

*Este capítulo tem como objectivo dar a conhecer as misturas betuminosas no âmbito da sua sensibilidade à água. Perceber o meio em que situam as misturas betuminosas, as suas propriedades e o seu comportamento. Conhecer a “matéria-prima”, de que forma a água a influencia e quais as suas consequências. Será prestada especial atenção à problemática da adesividade entre o betume e agregado.*

## **2. Aspectos Relativos à Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas**

### **2.1. Considerações iniciais**

A acção da água sobre as misturas betuminosas pode afectar em maior ou menor grau a durabilidade dos pavimentos. O estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas à água é um problema complexo, pois depende de factores ambientais, práticas construtivas e características das misturas betuminosas em si, podendo o clima e o tráfego acelerar a degradação dos pavimentos (Furlan *et al.*, 2004).

A avaliação da resistência à acção erosiva da água de misturas betuminosas é um passo importante no processo de selecção dos materiais e dosagens das misturas. A selecção inadequada de materiais e a incorrecta determinação da sensibilidade à água podem resultar em degradações prematuras no pavimento, bem como em custos excessivos em manutenção e reabilitação (Vasconcelos *et al.*, 2006).

Neste sentido, torna-se importante o conhecimento dos materiais, das misturas e a avaliação do seu comportamento na presença de água.

## 2.2. O pavimento

### 2.2.1. Definições e características

Comece-se por entender o que é uma estrada. Uma estrada pretende estabelecer uma superfície de rolamento em que os veículos possam circular com comodidade, segurança, rapidez, economia, no maior número possível de situações climáticas, de preferência sempre (Miranda, 2008).

O pavimento é parte da estrada, rua ou pista que suporta directamente o tráfego e transmite as respectivas solicitações à infra-estrutura: terreno, obras de arte, etc. (*LNEC E 284-1973 – Vocabulário de Estradas e Aeródromos, citado por Miranda, 2008*).

Este deve possuir um comportamento estrutural adequado de forma a garantir:

- Capacidade de carga - para resistir às cargas impostas pela passagem dos veículos;
- Resistência à fadiga - resistência das camadas ligadas para resistirem às solicitações repetidas impostas pela passagem de veículos;
- Resistência às deformações permanentes – resistência para não se deformar com a passagem dos veículos.

Deve também possuir um comportamento funcional adequado com o intuito de garantir:

- Conforto;
- Segurança de circulação;
- Economia;
- Proteger o solo das acções climáticas.

As acções climáticas são fundamentalmente de dois tipos: hídricas (pela acção da água) ou térmicas (pela acção da temperatura).

### 2.2.2. Tipos de pavimentos

Apresenta-se, de seguida, a Figura 2.1, que representa os vários tipos de pavimento que existem, em função dos materiais e da deformabilidade.

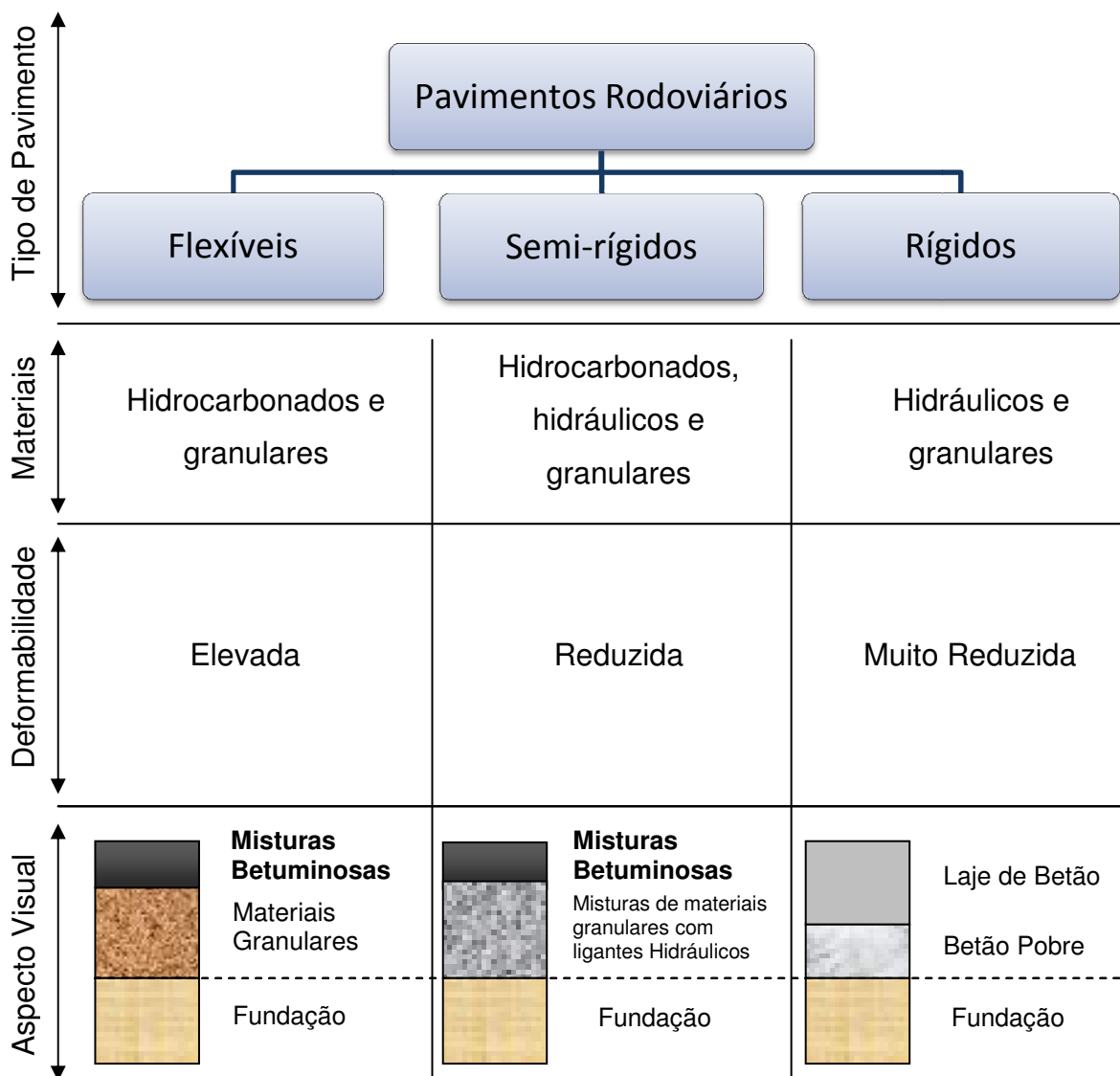
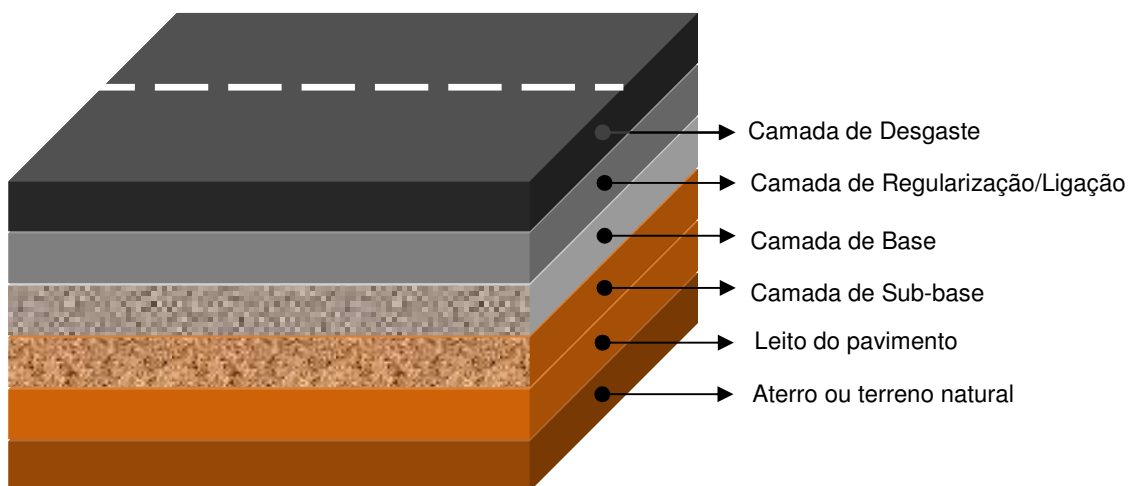


Figura 2.1 – Tipos de pavimentos rodoviários em função dos materiais e da deformabilidade (adaptado de Branco *et al.*, 2006)

Neste estudo serão apenas contemplados os pavimentos flexíveis e os semi-rígidos, pois são os que são constituídos por misturas betuminosas nas camadas superiores.

### 2.2.3. Constituição

Na Figura 2.2 apresenta-se uma estrutura tipo de um pavimento flexível:



**Figura 2.2 – Constituição de um pavimento**

Nos pavimentos flexíveis, as misturas betuminosas são utilizadas na execução das camadas de desgaste, de regularização/ligação e por vezes de base, as quais assentam sobre camadas granulares, com características de base ou de sub-base. Estes quatro tipos de camadas formam o pavimento, que por sua vez assenta sobre a fundação do pavimento, onde normalmente é construída uma camada de apoio ao pavimento, denominada leito por pavimento. Esta camada em conjunto com o aterro ou o terreno natural forma a plataforma de apoio do pavimento.

No caso de um pavimento semi-rígido, a estrutura é em tudo semelhante a esta, com a diferença de uma ou ambas as camadas granulares serem tratadas com um ligante hidráulico (usualmente cal ou cimento). As misturas betuminosas assentam sobre estas e são utilizadas na execução de camadas de desgaste e de regularização/ligação.

Enquanto o leito do pavimento, as camadas de sub-base, base e regularização têm a função de garantir o comportamento estrutural, a camada de desgaste tem essencialmente a função de garantir o comportamento funcional.

## 2.2.4. A presença da água no pavimento

Existem três origens distintas para a água presente num pavimento:

- Água proveniente da superfície;
- Água proveniente das zonas limítrofes;
- Águas subterrâneas;

Na Figura 2.3 são representadas de forma esquemática essas três origens.

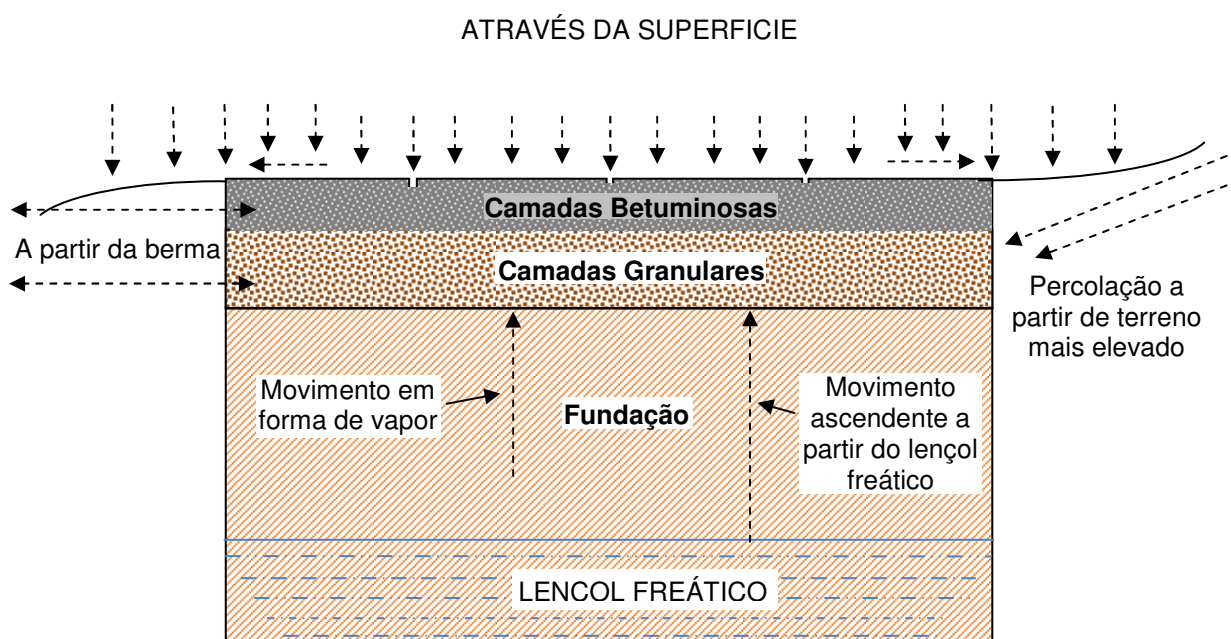


Figura 2.3 – A presença da água num pavimento (adaptado de Miranda, 2008)

De acordo com Kandhal (1992), citado por Copeland (2007), o movimento mais comum da água é o movimento ascendente a partir do lençol freático, por capilaridade. Isto pode dever-se à falta de características adequadas dos materiais que constituem as camadas de sub-base e de base, com uma elevada permeabilidade, que podem levar a uma drenagem inadequada. Deste modo, as camadas granulares ficam com muita água na sua constituição, o que a faz migrar no sentido ascendente em direcção às camadas betuminosas.

Para melhor se compreender a influência da água nas misturas betuminosas faz-se, de seguida, uma descrição das mesmas.

## **2.3. Misturas betuminosas**

### **2.3.1. Generalidades**

As misturas betuminosas são tradicionalmente utilizadas na construção e reabilitação de pavimentos flexíveis e semi-rígidos.

Uma das suas camadas, a de desgaste, constitui a superfície de rolamento tendo normalmente como função, para além de transmitir as cargas do tráfego à camada inferior, evitar a infiltração de águas que sobre ela circulem. É portanto um elemento fundamental quando é estudada a sensibilidade à água das misturas betuminosas.

A camada de regularização tem, como a designação indica, a função de servir de regularização para a execução da camada de desgaste e, simultaneamente, de degradar as cargas do tráfego transmitidas da camada de desgaste à camada de base.

A composição das misturas betuminosas é naturalmente um factor essencial no seu comportamento, sendo os seus dois componentes base (para além do ar), os seguintes: agregado (incluindo o filler) e betume. Poderão ser adicionados também aditivos à mistura com o intuito de melhorar as suas características.

### **2.3.2. Agregado**

Os agregados formam cerca de 85 % do volume das misturas betuminosas, o que contribui para que assumam um papel de extrema importância no que concerne à promoção da resistência e absorção de grande parte dos esforços impostos pelos veículos (Mahmoud, 2005). A utilização de agregados tem como objectivo a formação de um esqueleto pétreo que resista à acção do tráfego, sendo a sua resistência devida ao imbricamento dos grãos entre si (Branco *et al.*, 2006).

De uma forma geral, uma mistura betuminosa é composta por agregado de três dimensões diferentes: agregado grosso, agregado fino e por filer, tendo cada um a sua função específica (Miranda, 2008):

- Os agregados grossos têm a função de garantir estabilidade à mistura betuminosa, de aumentar a resistência mecânica e de assegurar rugosidade superficial suficiente para a circulação dos veículos.
- Os agregados finos (inferiores a 2 mm) têm a função de dar estabilidade e compacidade à mistura.
- O filer (material inferior a 0,063 mm) tem a função de dar compacidade e impermeabilidade.

Os agregados podem ser classificados, quanto à natureza, em três grupos principais (Hunter, 2000):

- Naturais – todas as rochas que tenham surgido segundo um processo de transformação natural, podendo ser obtidas por intermédio de meios de extracção directa, escavação ou explosão de rochas;
- Artificiais/sintéticos – formam-se como resultado de processos industriais;
- Reciclados – obtidos através da reciclagem de materiais.

Entre as principais características dos agregados que influenciam o comportamento das misturas betuminosas, encontram-se: (Branco *et al.*, 2006):

- Granulometria;
- Resistência à fragmentação;
- Forma;
- Limpeza.

### **Granulometria**

Os agregados, quando incorporados como elementos estruturantes numa mistura betuminosa, deverão obedecer a um fuso granulométrico pré-estabelecido para a respectiva mistura betuminosa, determinado pelo Caderno de Encargos. A granulometria vai influenciar a resistência obtida, assim como as propriedades das misturas betuminosas nas várias fases da sua vida (Miranda, 2008).

Na fase de construção, a granulometria influencia a trabalhabilidade da mistura, devendo o agregado manter as suas características intactas. Para tal, é necessário que este ofereça resistência à fragmentação aquando da sua aplicação e também ao choque térmico, dadas as elevadas temperaturas de fabrico e de aplicação das misturas.

Na fase de serviço, a granulometria adoptada condiciona o tipo de estrutura que se vai obter, assim como o nível de imbricamento entre as partículas do agregado.

A utilização de uma curva granulométrica contínua dá origem a uma mistura fechada ou densa, que impedirá a penetração da água no pavimento dada a sua compacidade. Por sua vez, a utilização de uma mistura de granulometria descontínua dá origem a uma mistura aberta ou drenante, que permitirá a penetração da água no pavimento. Estas misturas betuminosas, designadas como drenantes, são utilizadas apenas em camadas de desgaste e têm precisamente como função principal a rápida extracção da água da superfície do pavimento com o intuito de evitar fenómenos de “aquaplaning” ou redução do ruído, entre outras. Este assunto será desenvolvido na secção 2.3.6.

### **Resistência à fragmentação**

Como foi referido, durante a fase de construção o agregado está sujeito a fortes solicitações, fruto das elevadas temperaturas e acções mecânicas no fabrico e aplicação das misturas. No entanto, depois de entrar ao serviço continua a ser muito solicitado principalmente pela acção do tráfego.

Uma boa resistência à fragmentação consiste na utilização de materiais duros, resistentes ao choque e ao atrito, entre as suas próprias partículas e ao desgaste produzido pelo tráfego na superfície do pavimento (Branco *et al.*, 2006).

Os agregados localizados próximos ou na superfície do pavimento devem apresentar maior resistência à fragmentação do que os localizados nas camadas inferiores.

É frequente a utilização do ensaio de Los Angeles para caracterizar esta propriedade do agregado.

### **Forma**

A selecção incorrecta dos agregados quanto à sua forma geométrica poderá originar a sua fragmentação. A forma das partículas de agregado deverá ser aproximadamente cúbica, não sendo aconselhável a utilização de partículas lamelares ou alongadas, que são mais frágeis.

Actualmente, os ensaios mais utilizados para avaliar a forma do agregado são o índice de forma e o índice de achatamento.

### **Limpeza**

A limpeza é um factor importante na avaliação da sensibilidade à água uma vez que se o agregado possuir argila, matéria orgânica, ou outras substâncias não desejadas, pode reduzir o atrito entre os grãos, haver variações volumétricas pela presença de água ou dificultar o envolvimento pelo betume.

Os ensaios do equivalente de areia ou da determinação do valor de azul-de-metileno são os utilizados para a determinação da limpeza de um agregado. Estes ensaios são realizados sobre o filer e à fracção mais fina do agregado de uma mistura betuminosa.

### **2.3.3. Betume**

O outro componente base das misturas betuminosas é o betume asfáltico que é o ligante mais usado em trabalhos de pavimentação rodoviária (Branco *et al.*, 2006). É uma substância aglutinante e complexa de cor castanha ou preta, cuja composição varia de acordo com a origem do petróleo bruto usado e com os tratamentos realizados. Este é utilizado como ligante nas misturas betuminosas, dadas as suas características adesivas que permitem o envolvimento dos agregados formando uma estrutura mais resistente e “impermeável” em virtude de

uma outra característica, fundamental para o tema em estudo, a sua resistência à água.

O betume numa mistura betuminosa tem a função de:

- Permitir a ligação entre os agregados, de modo a que a mistura betuminosa possua resistência à tracção;
- Conferir trabalhabilidade à mistura betuminosa;
- Garantir flexibilidade à mistura betuminosa;
- Assegurar impermeabilidade e durabilidade à mistura betuminosa.

Para melhor se compreender de que forma o betume consegue desempenhar estas funções e quais as propriedades que lhe estão associadas, é importante conhecer a sua composição química.

### Composição química

A composição química do betume é complexa, podendo no entanto ser dividida em dois grupos químicos fundamentais (Figura 2.4): os asfaltenos (fracção insolúvel) e os maltenos (fracção solúvel). Este último pode ser dividido em três subgrupos: as resinas, os aromáticos e os saturados (Branco *et al.*, 2006).

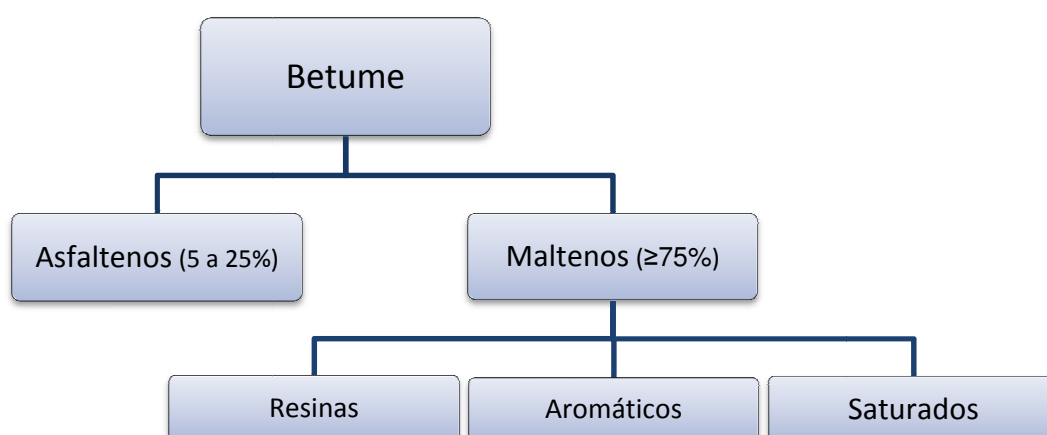


Figura 2.4 – Constituição do betume asfáltico

Os asfaltenos são sólidos amorfos que constituem 5 a 25% do betume, sendo materiais altamente polarizados, de peso molecular elevado, que têm efeito importante nas características reológicas do betume. Quanto maior for a sua quantidade, mais duro será o betume.

Os maltenos podem apresentar-se no estado líquido ou viscoso, sendo a sua percentagem no betume igual ou superior a 75%.

As resinas são substâncias muito polarizadas o que as tornam muito adesivas.

Os aromáticos e os saturados são líquidos viscosos que perfazem, respectivamente, 40 a 65% e 5 a 20% do betume.

### Propriedades do betume

Os betumes utilizados em pavimentação rodoviária devem apresentar propriedades que respeitem critérios estabelecidos nas especificações aplicáveis. De acordo com o Caderno de Encargos Tipo da E.P., de Fevereiro de 2009, o betume deve garantir valores adequados aos seguintes requisitos/propriedades (Quadro 2.1):

**Quadro 2.1 – Requisitos/propriedades do betume**

| Requisitos  | Propriedades                           |
|---|--|
| Consistência a temperatura de serviço intermédia              | Penetração a 25 °C                     |
| Consistência a temperatura de serviço elevada                 | Temperatura de amolecimento            |
| Durabilidade, resistência ao envelhecimento, (RTFOT) a 163 °C | Variação de massa, máxima              |
|   | Penetração retida, 25°C                |
|   | Aumento da Temperatura de amolecimento |
| Outros requisitos   | Viscosidade Cinemática (135°)          |
|   | Ponto de fragilidade de Fraass         |
|   | Ponto de inflamação                    |
|   | Teor em parafinas                      |
|   | Solubilidade                           |

Como se pode constatar da análise do quadro anterior, a penetração e a temperatura de amolecimento são duas das mais importantes propriedades do betume, consideradas mesmo as mais importantes por Branco *et al.* (2006). Conhecidas estas propriedades, tem-se caracterizada a sua consistência, para além de também ser possível estimar outra propriedade importante com base nestas duas, como é o caso da viscosidade, que será analisada mais à frente neste trabalho na secção 2.5.1.

A consistência do betume varia muito com a temperatura, ficando mole quando é aquecido e endurecendo quando arrefece. Conhecido o seu valor, é possível avaliar o intervalo de temperaturas em que é possível, por exemplo, manipular o ligante em boas condições na fase de fabrico e colocação da mistura, ou saber que betume utilizar em zonas de clima mais quente ou mais frio.

Como foi referido, avaliadas a penetração e a temperatura de amolecimento, têm-se caracterizadas algumas das propriedades mais importantes do betume. A penetração pode ser avaliada pelo ensaio de penetração a 25°C e a temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola. De seguida, são descritos resumidamente estes dois ensaios.

O ensaio de penetração a 25°C (norma EN 1426) consiste em medir a profundidade, em décimos de milímetro, a que uma agulha com determinadas características penetra durante cinco segundos num betume à temperatura de 25°C. Para despiste de erros devem ser efectuados três ensaios, sendo o valor da penetração a média desses três ensaios.

A determinação da temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola (norma EN 1427) consiste em colocar uma esfera de aço, também com determinadas características, sobre uma amostra de betume contida num anel de latão. Este conjunto por sua vez é colocado sobre um vaso de vidro com água (com 2,5 centímetros de altura) que vai sendo aquecida à razão de 5°C por minuto. Com o aumento da temperatura o betume vai ficando menos viscoso, o que faz com que a esfera anteriormente colocada sobre o betume vá descendo sobre o anel de latão até chegar à base do mesmo. No instante em que isso

acontece regista-se a temperatura da água, sendo o valor da temperatura de amolecimento determinado pela média de dois ensaios.

### Envelhecimento do betume

Outra característica que importa avaliar é o envelhecimento do betume. É um aspecto importante pois deste fenómeno resulta o aumento da sua viscosidade e rigidez, bem como a perda de ductilidade e de adesividade entre o betume e o agregado (Pellinen *et al.*, 2008). Como consequência deste fenómeno, a sua flexibilidade diminui e o pavimento torna-se mais susceptível ao fendilhamento e consequente penetração da água.

Os maltenos são os componentes que mais contribuem para o envelhecimento do betume, pois a perda desta fracção devido a oxidação, volatilização, radiação solar e temperatura faz com que o betume adquira essas características.

Na Figura 2.5 pode observar-se a curva do índice de envelhecimento (em função do tempo) e a influência de cada componente do betume no seu envelhecimento.

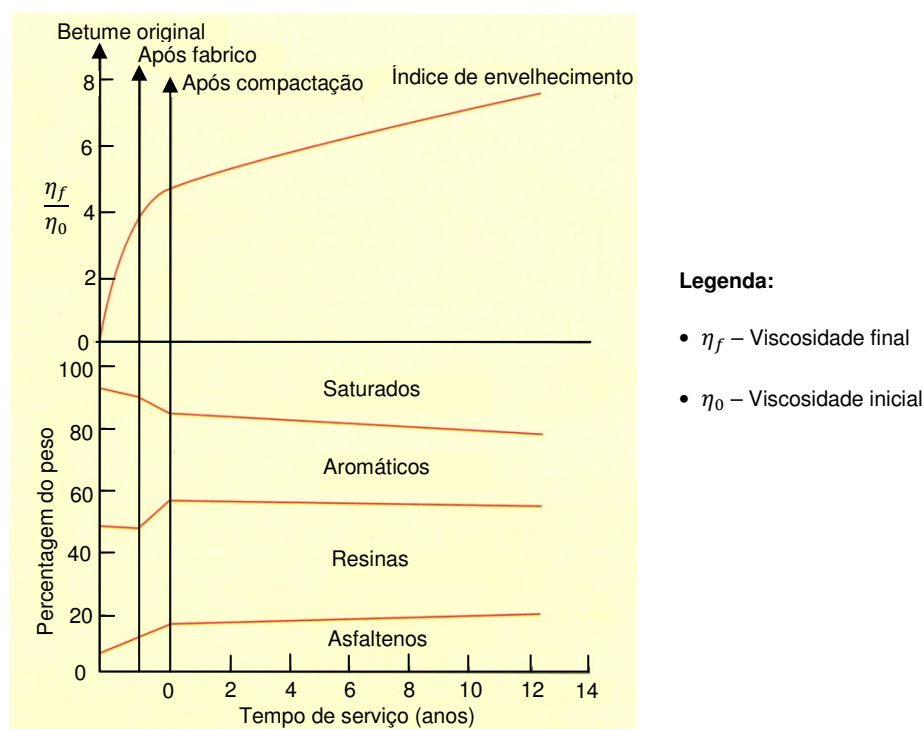


Figura 2.5 – Envelhecimento do betume e influência dos seus componentes ao longo do tempo (adaptado de Shell, 2003)

Como se pode constatar pela análise da figura, o betume após o seu fabrico e compactação já sofreu grande parte do seu envelhecimento (cerca de 60%), continuando com o tempo a envelhecer.

### Comportamento reológico

O betume asfáltico tem uma reologia dependente da temperatura e do tempo de solicitação, apresentando um comportamento visco-elástico (Miranda, 2008). Desta forma, aquando da aplicação de uma carga e consequente deformação, uma parte é recuperada (elástico) e outra não (viscoso), sendo tanto mais elástico quanto mais rápida e menor for o valor da solicitação.

#### 2.3.4. Características volumétricas das misturas betuminosas

Entrando agora no domínio do conjunto (betume, agregado e ar), é importante que se comece por analisar a composição volumétrica da mistura (Figura 2.6):

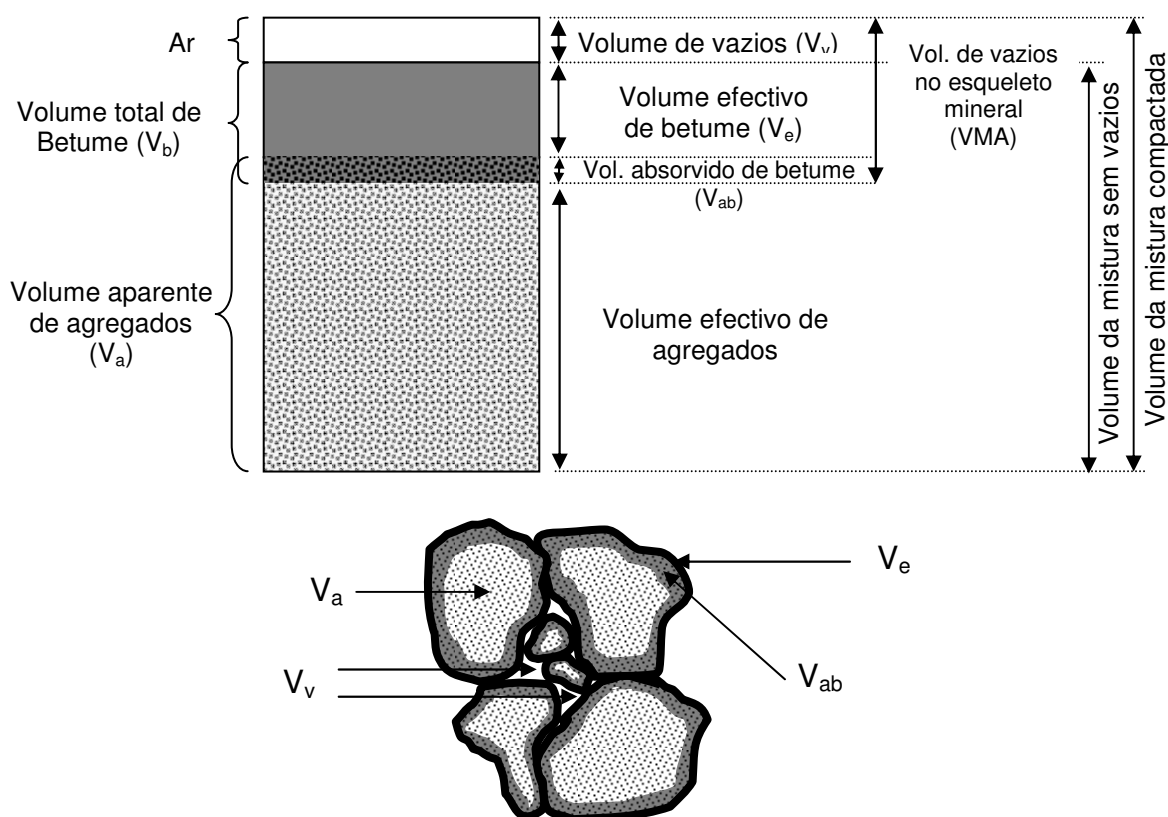


Figura 2.6 – Composição volumétrica de uma mistura betuminosa (Branco *et al.*, 2006).

Pela análise desta figura pode-se ter uma noção da percentagem relativa de cada componente na composição da mistura. Percebe-se que parte do betume é absorvido pelo agregado ( $V_{ab}$ ) e que outra parte fica à superfície do agregado ( $V_e$ ), perfazendo o volume total de betume ( $V_b$ ). Este em junção com o volume de vazios tem o nome de VMA – Volume de vazios no esqueleto mineral.

Deve tomar-se especial atenção ao facto de que a porção de betume absorvida pelo agregado não actuar mais como ligante, diminuindo a espessura de betume que envolve as partículas de agregado. Caso este facto não seja salvaguardado na formulação da mistura, as misturas tornam-se mais frágeis e susceptíveis às acções prejudiciais da água.

Inicia-se agora a análise das características fundamentais de uma mistura betuminosa, que são as seguintes (Branco *et al.*, 2006):

- Estabilidade;
- Durabilidade;
- Flexibilidade;
- Resistência à fadiga;
- Impermeabilidade;
- Trabalhabilidade.

### **Estabilidade**

Esta propriedade está relacionada com a capacidade de resistir com pequena deformação às cargas impostas pela passagem repetida dos veículos. Duas características fundamentais são necessárias para que uma mistura possua esta característica: atrito interno dos materiais e coesão. O atrito interno é função do agregado e depende da granulometria, da textura, da forma ou da densidade. A coesão é uma característica do betume que assegura uma ligação entre as partículas de agregado. Quanto mais betume existir na mistura, maior será a coesão entre as partículas de agregado, mas só até um determinado valor, a partir daí esse valor baixa. A quantidade excessiva de ligante também diminui o atrito interno entre as partículas.

### **Durabilidade**

A durabilidade é um factor importante nas características de uma mistura betuminosa, em particular para a sensibilidade à água. Quanto mais resistência à acção da água, da temperatura e do tráfego, maior será a durabilidade da mistura. O betume possui um papel importante neste característica uma vez que, de uma forma geral, quanto maior for a sua quantidade, maior será a resistência à desintegração da mistura pelos factores acima referidos. Como se viu na caracterização do betume, é gradualmente perdida a fracção de maltenos com a oxidação, volatilização, radiação solar e temperatura, por isso uma maior quantidade de betume retarda este processo. Outro factor importante a ter em atenção aquando da presença de um elevado teor de betume na mistura é a redução do volume de vazios, o que tornará mais difícil a entrada de água para o interior da mesma. No entanto, um elevado teor de betume pode reduzir a estabilidade da mistura, por isso, na sua formulação terá de se determinar a quantidade de betume adequada.

### **Flexibilidade**

É uma propriedade que a mistura deve possuir para se adaptar a assentamentos pontuais das camadas inferiores ou de zonas onde a acção dos veículos é elevada. De uma forma geral, maior quantidade de betume melhora esta característica.

### **Resistência à fadiga**

A resistência à fadiga, como já foi referido, consiste na resistência que as camadas ligadas devem possuir de forma a resistirem às solicitações repetidas impostas pela passagem de veículos. De uma forma geral, elevada percentagem de betume também melhora esta característica.

### **Impermeabilidade**

É também uma característica importante na avaliação da sensibilidade à água. A impermeabilização da mistura tem como função oferecer resistência à passagem

de água e de ar através da mistura. Quanto menor for o volume de vazios ( $V_v$ ), maior será a impermeabilidade da mistura. Como já foi referido, quanto maior for a quantidade de betume, menor será este volume, logo, melhor será esta característica.

## **Trabalhabilidade**

No entanto, não basta só ter uma mistura com as características ideais, são necessárias condições para transportar, colocar e compactar a mistura no local e deixá-la no estado pretendido. A correcta formulação da mistura é um factor importante para boas condições de trabalhabilidade.

Além de todas estas características já citadas, a camada de desgaste, por ser a camada superficial, deve também possuir as seguintes:

- Um bom coeficiente de atrito – tanto em piso seco como molhado;
- Nível de ruído pneu-pavimento – dentro dos limites estabelecidos;
- Superfície regular – circulação cómoda, segura e económica;
- Adequada macro-textura – para permitir o escoamento das águas;
- Aderência – particularmente com tempos de chuva.

### **2.3.5. Comportamento reológico das misturas betuminosas**

O comportamento reológico das misturas betuminosas é fortemente influenciado pela presença de betume na sua composição, que confere às mesmas um comportamento dependente da duração do tempo de aplicação da carga e da temperatura, denominado por comportamento visco-elástico (Neves, 2005, e Miranda, 2008). Assim, quando a temperatura e o tempo de aplicação da carga são curtos, a mistura apresenta um comportamento predominantemente elástico, tornando-se visco-elástico a viscoso à medida que estes valores vão aumentando, tal como se demonstra na Figura 2.7.

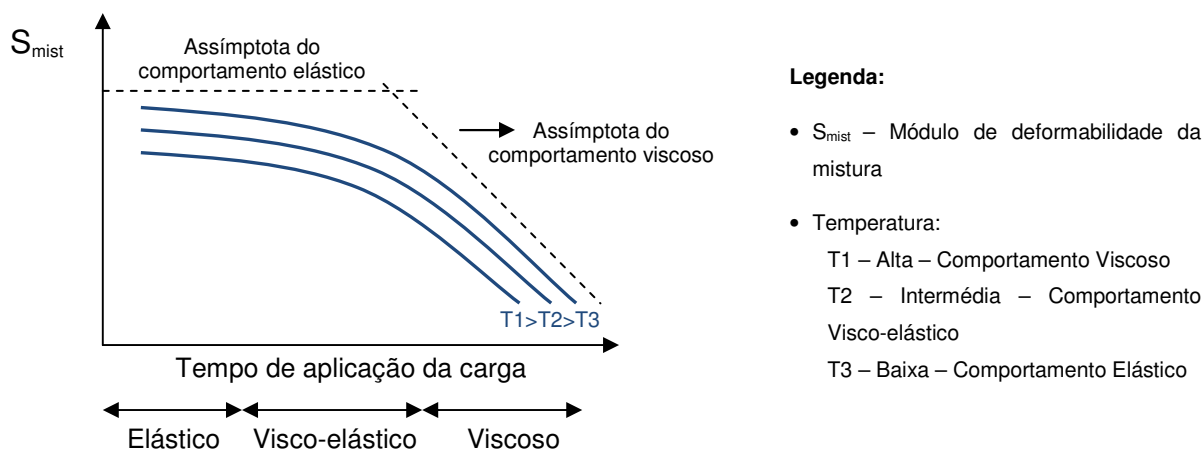


Figura 2.7 – Comportamento reológico de uma mistura betuminosa (Neves, 2005)

### 2.3.6. Tipos de misturas betuminosas

Existem vários tipos de misturas betuminosas. No que concerne à sua porosidade, podem classificar-se em três tipos principais: densas, rugosas e drenantes, tal como se representa esquematicamente na Figura 2.8.

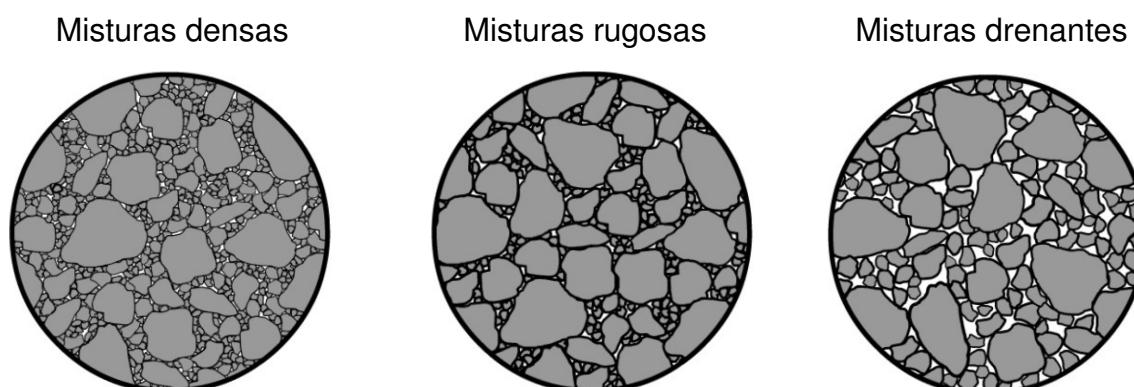


Figura 2.8 – Principais tipos de misturas betuminosas

Como já foi anteriormente referido, as misturas densas, que apresentam uma curva granulométrica contínua, tem como uma das principais funções impedir a penetração da água para as camadas subjacentes. As misturas drenantes, constituídas por uma curva granulométrica descontínua, têm como função permitir a infiltração da água na mistura. Como meio-termo entre estas duas misturas, temos as misturas rugosas, que apesar de permitirem a entrada de água, não a fazem com a mesma facilidade das misturas drenantes.

## **2.4. Processos de movimentação da água nas misturas betuminosas**

Após uma breve referência às propriedades da mistura betuminosa, inicia-se agora a análise dos dois processos primários de movimentação da água na mesma, que são os seguintes:

- Por difusão;
- Por migração térmica.

A difusão da água ocorre quando os seus iões migram entre soluções aquosas até ambas terem a mesma concentração. Desta forma, pode-se dizer que a difusão é comandada por gradientes de concentração. Este fenómeno é particularmente importante quando a água se encontra no estado gasoso, porque poderá permitir o movimento do vapor de água nas misturas betuminosas, reduzindo a rigidez do betume, podendo levar a falhas coesivas.

Num sólido, a água move-se de regiões quentes para regiões frias. Similarmente, numa mistura betuminosa, os iões também se vão mover de regiões quentes para regiões frias. Segundo Copeland (2007), um ião que se move rapidamente em água quente, tem maior probabilidade de migrar através da mistura betuminosa e penetrar para o agregado. Este fenómeno é indesejado, uma vez que pode enfraquecer o agregado, ou mover-se para a interface betume/agregado e danificar a sua ligação.

Existem também processos internos na mistura betuminosa que afectam a movimentação da água:

- Adsorção;
- Sucção por capilaridade;
- Osmose.

A adsorção é um processo que liga um ião (temporariamente ou permanentemente) à mistura betuminosa e impede-o de se mover. A adsorção pode ser o resultado de um processo químico ou efeitos de superfície.

A sucção por capilaridade ocorre quando a água é arrastada para os vazios da mistura com superfície molhada, devido a tensões superficiais. Em misturas de granulometria contínua, este facto pode ser compensado devido à sua impermeabilidade. Ainda de salientar que a água pode mover-se para baixo ou para cima no interior da mistura betuminosa, devido à gravidade ou à sucção capilar.

Por último, a osmose é o nome dado ao movimento da água entre meios com concentrações de solutos diferentes, separados por membranas semi-impermeáveis. Nestes meios, a água pode facilmente passar, não acontecendo o mesmo com o material nela dissolvido. Assim, a água poderá passar através do betume por osmose, podendo eventualmente chegar à superfície do agregado, com as consequências já referidas.

## **2.5. Mecanismos de degradação associados à presença de água**

Segundo Terrel e Al-Swailmi (1994), um dos principais factores que afecta a durabilidade das misturas betuminosas é a acção da água, à qual estão associados, de uma forma geral, dois mecanismos de degradação da mistura:

- Perda de adesividade entre o betume e o agregado;
- Perda de coesão e de resistência do betume.

Existe ainda outro mecanismo denominado “degradação ou fractura de partículas de agregado quando sujeitos a congelamento”, que não será considerado neste trabalho por serem muito raras degradações deste tipo no nosso país.

### **2.5.1. Perda de adesividade**

Um dos factores que determina a durabilidade de uma mistura betuminosa é o grau de adesividade desenvolvido entre o betume e o agregado. A água pode prejudicar a união entre os dois componentes reduzindo a resistência e a estabilidade das misturas (Furlan *et al.*, 2004).

A adesividade é uma força intermolecular de atracção na área de contacto entre corpos desconhecidos que actua unindo-os. A adesividade pode ser usada para referir a quantidade de energia que é necessária para quebrar a ligação entre o betume e o agregado (Kanitpong e Bahia, 2003, citado por Copeland, 2007).

Diversos autores (Khandal e Parker Jr., 1998; Roberts *et al.*, 1991; Yoon e Tarren, 1988, citado por Furlan *et al.*, 2004) consideram que embora as características do betume e o tipo de mistura possam influenciar a sensibilidade à água de misturas betuminosas, as propriedades dos agregados são as principais responsáveis pela resistência adesiva entre o betume e o agregado.

São muitas as características do agregado que influenciam o fenómeno da adesividade, entre as quais se destacam:

- Porosidade e absorção;
- Composição química;
- Composição mineralógica e polaridade;
- Angularidade;
- Forma;
- Textura superficial.

### **Porosidade e Absorção**

A porosidade é caracterizada pelos seus poros, que são descritos como cavidades de formas irregulares, podendo ser conectadas por capilares e apresentar forma e diâmetro variados. O menor diâmetro interno do poro é usado como a sua medida de tamanho. A parte interconectada de um sistema de poros é chamada de espaço efectivo do poro. As características dos poros geralmente determinadas são: tamanho do poro, distribuição dos tamanhos dos poros e área interna específica, chamada de superfície específica (Kandhal e Lee, 1972, citado por Gouveia *et al.*, 2004). A porosidade pode ser determinada relacionando a densidade aparente e real do agregado.

A absorção de betume pelo agregado tem uma forte correlação com a porosidade e com a distribuição do tamanho dos poros, pois a taxa e a extensão da absorção de betume dependem não somente do total de vazios, mas também do tamanho

real do poro no agregado, sob os efeitos da pressão capilar e da viscosidade do betume.

O tamanho e a distribuição dos poros podem determinar a quantidade e o mecanismo de absorção. Alguns poros pequenos, que podem ser penetrados pela água, podem não apresentar absorção de betume devido à maior viscosidade do betume comparada à da água.

Lee (1969), citado por Gouveia *et al.* (2004), verificou ainda que tamanhos de poros maiores que 0,5  $\mu\text{m}$  influenciam directamente a absorção de betume e que poros menores que 0,1  $\mu\text{m}$  já não absorvem betume.

### **Composição química**

Lettier *et al.* (1949), citado por Gouveia *et al.* (2004), ao estudarem a estrutura cristalina dos agregados de mesma origem mas com características de absorção distintas, verificaram que os agregados que absorvem menos betume possuem estruturas cristalinas compactas e densas e que agregados que absorvem mais betume são caracterizados por numerosos interstícios entre os cristais. Estes investigadores verificaram que a capacidade de absorção do agregado não está relacionada directamente com sua a composição química, pois existem agregados absorventes e não absorventes com a mesma composição química, mas sim com a porosidade da partícula.

### **Composição mineralógica e polaridade**

Os minerais nas partículas de agregados apresentam os seus átomos dispostos numa rede cristalina, onde os átomos da superfície exercem atracção sobre átomos de gases, líquidos ou sólidos que com ela tenham contacto, promovendo a adsorção química. Essa adsorção é o principal factor na adesividade entre o agregado e os ligantes betuminosos (Bernucci *et al.*, 2008). No entanto, a mineralogia não pode produzir sozinha uma base para prever o comportamento de um agregado em serviço. Exames petrográficos e o desempenho de agregados similares em obras existentes, sob condições ambientais e de carregamento

semelhantes são também ferramentas importantes na avaliação do seu comportamento.

Os agregados podem ser classificados em ácidos, básicos ou ultrabásicos, de acordo com a quantidade de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) presente. O sentido dos termos ácido e básico não corresponde ao utilizado na química, mas está relacionado com a carga eléctrica superficial das partículas do agregado (Bernucci *et al.*, 2008). Segundo Furlan *et al.* (2004), o aumento do teor de sílica num agregado aumenta a sua afinidade com a água e, por isso, são chamados agregados hidrofílicos. Por outro lado, agregados básicos como basaltos e gabros, devido à menor concentração de sílica nas suas composições, tendem a desenvolver melhores ligações ao betume que à água e, por isso, são chamados hidrofóbicos.

A maioria dos agregados silicosos tais como arenito, quartzo e cascalho tornam-se negativamente carregados na presença de água, enquanto materiais calcários conduzem a carga positiva na presença de água.

Muitos agregados contêm ambas as cargas porque são compostos de minerais tais como sílica com carga negativa e também cálcio, magnésio, alumínio ou ferro com carga positiva. Agregados típicos que apresentam esta condição são os basaltos. A dolomita é um exemplo de caso extremo de agregado electropositivo e o quartzito um exemplo de agregado electronegativo.

Os agregados de rochas classificadas como ácidas costumam apresentar problemas de adesividade, enquanto os de rochas classificadas como básicas costumam apresentar melhor adesividade ao ligante asfáltico (Bernucci *et al.*, 2008).

### **Angularidade**

Agregados angulares, ou seja, com cantos agudos, proporcionam maior intertravamento e atrito entre partículas, formando uma estrutura granular mais resistente e proporcionando maior estabilidade às misturas. Por outro lado, os cantos agudos podem ser responsáveis pela perfuração da película de betume

que cobre o agregado, possibilitando a entrada de água na interface betume-agregado.

### **Forma**

Conforme referido anteriormente, a forma ideal dos agregados, para uso em misturas betuminosas, é a cúbica. A utilização de partículas de forma plana ou alongada (lamelar) em misturas betuminosas pode causar vários problemas, entre eles a quebra de partículas durante a compactação, fazendo com que a película de betume que cobre o agregado se rompa, também possibilitando a entrada de água na interface betume-agregado (Furlan *et al.*, 2004).

### **Textura Superficial**

Kim *et al.* (1992), citado por Furlan *et al.* (2004), verificaram que misturas betuminosas contendo agregados com textura superficial rugosa promovem uma melhor ligação entre o betume e o agregado. Exames cuidadosos nas superfícies de ruptura, após os ensaios de fadiga, revelaram que a ruptura ocorrida nas misturas contendo agregados de textura superficial lisa se dava na interface betume-agregado, enquanto em misturas contendo agregados de superfície rugosa ela progredia através das partículas, até a agregados mais grossos, indicando uma união mais forte entre o betume e o agregado.

Para além dos agregados, o tipo de betume presente nas misturas betuminosas é outro dos responsáveis pela resistência adesividade entre o betume e o agregado. Dos factores relacionados com o betume, a viscosidade é a característica mais frequentemente ligada ao fenómeno de adesividade e de absorção.

### **Viscosidade do betume**

A viscosidade do betume “indica” o grau de mobilidade molecular e a magnitude das forças atractivas em líquidos e é influenciada directamente pela temperatura. Com o aumento da temperatura, as forças inter-moleculares diminuem, aumentando o poder de molhagem do betume e possibilitando o aumento da área

de recobrimento na superfície do agregado. Essa diminuição da viscosidade pode contribuir para que ocorra uma pequena absorção de betume pelo agregado, melhorando assim o inter-travamento.

No que se refere à adesividade, ao longo dos anos vários autores verificaram que betumes mais viscosos resistem mais ao deslocamento da película de betume pela acção da água que os menos viscosos (Majidzadeh e Brovold, 1968; Taylor e Khosla, 1983, Hicks, 1991, citado por Gouveia *et al.*, 2004). Um comportamento semelhante é esperado com o envelhecimento dos ligantes que, de acordo com o referido anteriormente, através do processo de envelhecimento tornam-se mais viscosos. Entretanto, deve-se destacar que o envelhecimento altera as propriedades mecânicas das misturas betuminosas, tornando-as mais quebradiças e frágeis, podendo este processo acarretar danos prematuros nas camadas betuminosas, sobretudo nas de desgaste. O envelhecimento pode afectar o grau de absorção de betume pelo agregado, pois ela está directamente relacionada ao tempo de exposição das misturas a temperaturas que propiciem diminuição da viscosidade.

Huang *et al.* (2003), citado por Gouveia *et al.* (2004), afirmaram que a perda da resistência adesiva das misturas betuminosas corresponde à perda de componentes resultantes da ligação na interface betume-agregado da mistura. Como um par único, a “química” da interface betume-agregado determina o grau de adesividade e de sensibilidade à água. A partir da avaliação das misturas betuminosas com grupos funcionais similares àqueles formados no envelhecimento, concluíram que alguns compostos formados no processo de oxidação do betume aumentam a resistência da mistura à acção da água.

Outro tipo de alteração na composição dos betumes pode ocorrer devido à absorção selectiva, que causa modificações no betume absorvido e no não absorvido (ou efectivo). Alguns componentes do betume podem penetrar nos poros de forma diferenciada, dependendo do tamanho do poro. Por exemplo, grandes moléculas, como as dos asfaltenos, ficam concentradas no filme de betume efectivo, enquanto moléculas menores, como as dos maltenos, são preferencialmente absorvidas dentro do poro. Portanto, o filme de betume que

cobre o agregado pode ter as suas propriedades reológicas, físicas, químicas e de envelhecimento diferentes das do betume original adicionado à mistura (Lee *et al.*, 1990, citado por Gouveia *et al.*, 2004).

### 2.5.2. Perda de coesão

A coesão pode ser definida como a força intermolecular que, não havendo forças exteriores, une as moléculas de um sólido ou de um líquido. Analisando a um macro nível, a coesão nas misturas betuminosas compactadas são forças coesivas que constituem a integridade do material. A um micro nível, e considerando a película de betume que contorna o agregado, a coesão pode ser definida como a deformação que ocorre debaixo da carga para além da influência da interligação mecânica e orientação molecular (Terrel e Al-Swwailmi, 1990, citado por Copeland, 2007).

A perda de coesão devido à presença de água ocorre tipicamente no mástique. As forças coesivas que aí se desenvolvem são influenciadas pela viscosidade do betume. A viscosidade, como já foi referido, está dependente da temperatura e do envelhecimento do betume.

A água pode afectar a coesão em várias maneiras, nomeadamente:

- Diminuição da resistência da união betume-agregado, causando uma redução severa na resistência e integridade da mistura;
- Deterioração do mástique devido a saturação e aumento do volume de vazios;
- A água poderá comportar-se como um solvente no betume e resultar na redução de resistência, aumentando a deformação permanente;
- Betumes que retenham a maior parte da água, têm mostrado acumular estragos a um ritmo mais elevado (Cheng *et al.*, 2002, citado por Copeland 2007). Em casos extremos, a presença de água (saturação) pode resultar em emulsão betuminosa. A emulsão betuminosa é uma mistura entre dois líquidos imiscíveis em que um deles (a fase dispersa) se encontra na forma de finos glóbulos no seio do outro líquido (a fase contínua). É mais comum

a ocorrência de uma emulsão inversa onde a água fica suspensa dentro do betume em esferas (Miknis, *et al.*, 2005, citado por Copeland (2007)).

## **2.6. Patologias associadas à presença de água**

O conhecimento das várias patologias associadas à presença de água numa mistura betuminosa é essencial para se perceber a sua origem.

De seguida são listadas as principais consequências da presença da água numa mistura betuminosa:

- Desagregação (com início na camada de desgaste ou nas camadas subjacentes);
- Subida de finos.

### **Desagregação**

A desagregação resulta de uma perda de adesividade e caracteriza-se pelo deslocamento da película de ligante do agregado.

A desagregação com início na base das camadas betuminosas pode ocorrer devido a várias causas, como a selecção inadequada de materiais, falhas na construção, ou pela presença de água e/ou pelo vapor de água na mistura. É um fenómeno difícil de detectar uma vez que começa na base das camadas betuminosas e manifesta-se através de outros mecanismos de falha como a fadiga, suporte estrutural, fendas longitudinais ou deformação permanente. Na Figura 2.9 pode ser observado um fenómeno de desagregação deste tipo.



**Figura 2.9 – Desagregação com início na base das camadas betuminosas**  
(<http://pavementinteractive.org>)

A desagregação com início na camada de desgaste resulta da deficiente ligação entre os diferentes componentes de uma mistura betuminosa, ou da falta de estabilidade dessa ligação (Branco *et al.*, 2006). Neste caso, a desagregação ocorre de cima para baixo, ou seja, a partir da camada de desgaste.

Resulta também numa perda de adesividade e poderá ocorrer devido às seguintes causas:

- Deficiências na qualidade dos materiais;
- Deficiências na execução da camada de desgaste;
- Segregação dos inertes em central;
- Transporte ou colocação da mistura;
- Deficiências no betume;
- Condições de temperatura desfavoráveis na fase de execução (temperaturas muito reduzidas);
- Ou pela presença de água.

Quando existe um desgaste rápido do mástique que envolve o agregado grosso, este fica à vista originando uma desagregação designada por “Cabeça de gato” (Branco *et al.*, 2006). Na origem deste desgaste rápido poderá estar uma deficiente qualidade dos materiais constituintes ao nível da adesividade betume-agregado ou uma deficiente dosagem de ligante. Este fenómeno pode ser visualizado na Figura 2.10.



**Figura 2.10 – Desagregação superficial (<http://pavementinteractive.org>)**

Com a ausência de mástique, o agregado grosso fica sujeito a uma acção muito mais severa por parte dos pneus dos veículos, que poderá originar a formação de “peladas ou ninhos” (Figura 2.11). Estas são caracterizadas pelo desprendimento de blocos da camada de desgaste. São usualmente uma degradação que envolve uma desagregação elevada, mas poderá ter outras origens, como uma deficiência localizada da mistura betuminosa da camada de desgaste, ou por deficiência na ligação entre esta camada e a camada subjacente, ou ainda pela espessura reduzida da camada de desgaste. Este fenómeno é muito severo sobre os veículos e também sobre o pavimento. Chegado a este ponto entra-se num ciclo vicioso onde a passagem sucessiva de veículos vai degradando cada vez mais o pavimento, acelerando o seu processo de degradação. Os ninhos podem ainda resultar de drenagem deficiente ou de um defeito localizado na camada de desgaste.



**Figura 2.11– Peladas ou ninhos (<http://pavementinteractive.org>)**

## Subida de finos

A subida de finos das camadas granulares de pavimentos flexíveis acontece quando já existem fissuras significativas nas camadas betuminosas. Quando tal acontece, os finos que naturalmente se armazenam na base das camadas, são bombados para o exterior como se pode observar pela Figura 2.12 e Figura 2.13.

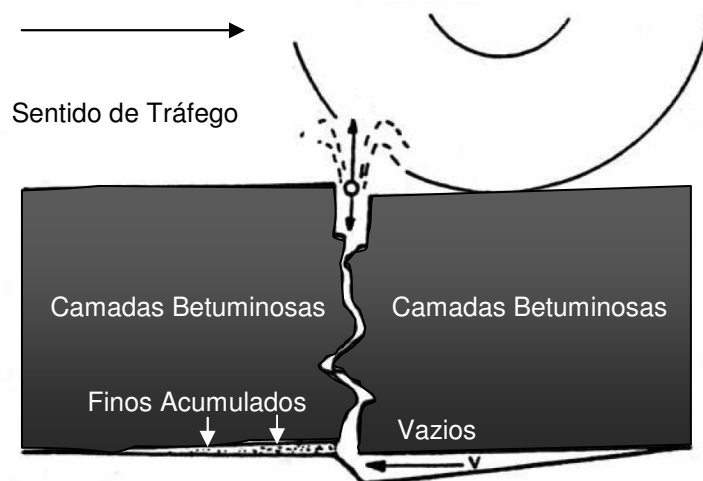


Figura 2.12 – Subida de finos nas camadas betuminosas (adaptado de Miranda, 2008)



Figura 2.13 – Subida de finos nas camadas betuminosas (<http://pavementinteractive.org>)

Conforme referido, a existência destes tipos de patologias podem favorecer o aparecimento ou evolução de outras, como por exemplo, fendilhamento ou deformações permanentes à superfície.

## **2.7. Considerações finais**

Ao longo deste capítulo percebe-se que a água pode influenciar as misturas betuminosas de muitas formas e causar vários problemas.

A água pode entrar no pavimento através da superfície ou da berma, por percolação a partir de terreno mais elevado ou em movimentos a partir do lençol freático. Uma vez presente, ela pode movimentar-se por difusão, em movimentação por pressão, por migração térmica, por adsorção, sucção por capilaridade ou por osmose. Como resultado da sua presença e movimentação surgem mecanismos de degradação importantes como a falha na adesividade entre o betume e o agregado e a perda de coesão. Estas degradações originam patologias nos pavimentos, das quais se salientam a desagregação e subida de finos.

Uma vez que é impossível impedir que exista água nas misturas betuminosa, o objectivo passa por evitar que a água penetre. Os principais componentes da mistura responsáveis pela “impermeabilização” da mesma são os agregados finos e o betume, que formam o “mástique betuminoso”. De forma genérica, pretende-se uma quantidade de betume relativamente elevada, por forma a envolver bem os agregados, oferecer resistência à passagem de água e de ar, oferecer resistência à desintegração da mistura, adaptar-se a assentamentos pontuais das camadas inferiores, resistir à fadiga, conferir coesão e trabalhabilidade à mistura, entre outros. No entanto, a elevada quantidade de betume só é positiva até um determinado valor, a partir do qual se verifica uma diminuição importante do atrito interno entre as partículas, diminuindo a estabilidade da mistura. Esta é conseguida pelo imbricamento dos grãos de agregado entre si, que formam um esqueleto pétreo que resiste à acção do tráfego. Os agregados formam 85% do volume das misturas betuminosas desempenhando assim um papel importante no

comportamento da mistura betuminosa, em particular, na resistência ao efeito da água. Além do atrito interno, a um agregado é exigido resistência ao desgaste, uma forma aproximadamente cúbica e ser limpo, ter alguma angularidade, ter uma textura superficial rugosa, entre outras.

Com estas características é possível conceber misturas betuminosas resistentes à acção da água, da temperatura e do tráfego.

Na Figura 2.14 resumem-se factores fundamentais a ter em conta no estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas.

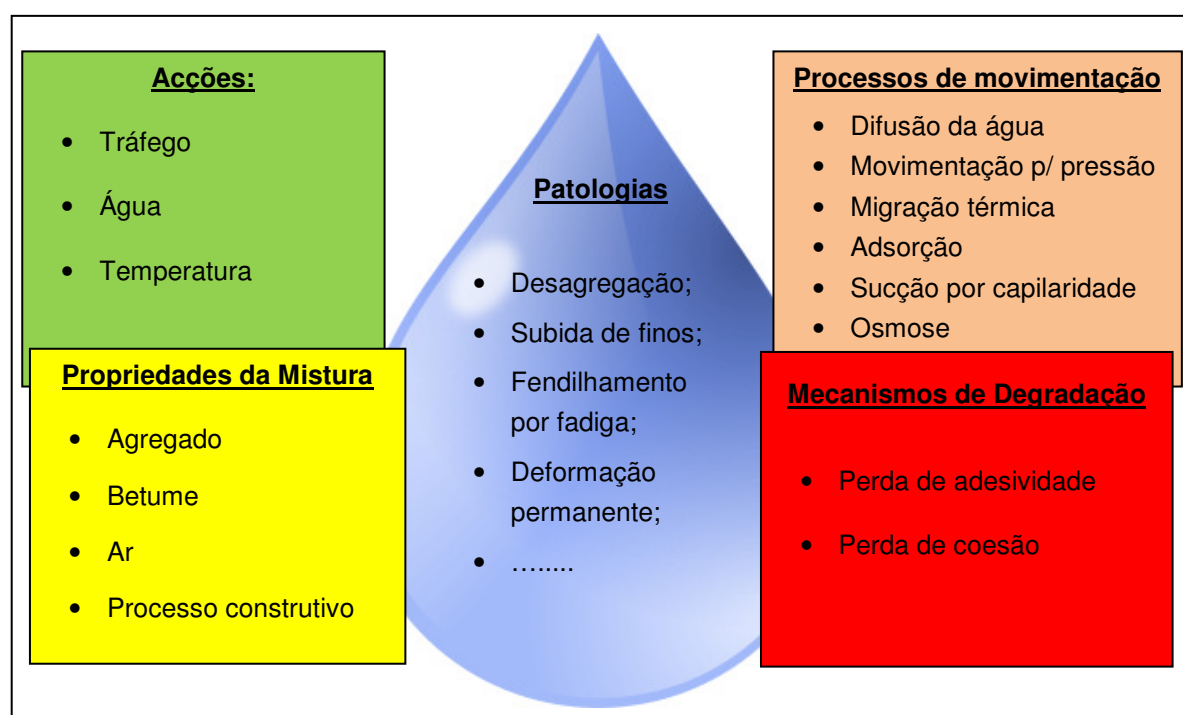


Figura 2.14 – Factores fundamentais a ter em conta no estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas (adaptado de Copeland, 2007)



---

## **CAPÍTULO**

### **3**

---

## **Estudo Experimental para Avaliação da Sensibilidade à Água**

*Neste capítulo são descritos os materiais e misturas betuminosas utilizadas para a realização do estudo experimental, bem como os métodos de ensaio utilizados. Foram fabricadas em laboratório três tipos de misturas betuminosas que foram ensaiadas para avaliação de sensibilidade à água pela norma Militar Americana MIL-STD-620A, método 104 e pela norma Europeia EN 12697-12:2008, método A.*

### **3. Estudo Experimental para Avaliação da Sensibilidade à Água**

#### **3.1. Considerações iniciais**

De uma forma geral, a avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas é realizada com recurso a ensaios de resistência mecânica realizados sobre dois grupos de provetes de misturas betuminosas com características idênticas, que são previamente acondicionados em condições distintas: um dos grupos é acondicionado em condições mais severas, do ponto de vista da acção da água. O quociente entre a resistência média dos provetes desse grupo e a resistência média dos provetes acondicionados em condições menos severas fornece uma “resistência conservada”, que é utilizada como indicador da sensibilidade à água (Batista e Antunes, 2009).

Existem vários métodos de ensaio baseados neste conceito e, como tal, nem todos os países utilizam a mesma norma. No Brasil e nos Estados Unidos da América as normas utilizadas são a AASHTO T 283 ou ASTM D4867 (Vasconcelos *et al.*, 2006). Em países Europeus, como a França e Portugal, antes da introdução das normas europeias, utilizavam-se respectivamente, a NF P98-251-1 (Koenders *et al.*, 2008) e a norma Militar Americana MIL-STA-620A (APORBET, 1998). No entanto, os países pertencentes à Comunidade Europeia têm vindo a adoptar gradualmente a norma Europeia EN 12697-12:2008. Neste trabalho, considera-se oportuno realizar ensaios para a avaliação da sensibilidade à água segundo a norma Europeia EN 12697-12:2008 e segundo a norma anteriormente utilizada em Portugal, a MIL-STA-620A.

Para a realização dos ensaios foram utilizados provetes betuminosos que foram preparados segundo a norma EN 12697-30:2004+A1:2007. Na secção 3.4 deste capítulo é descrita a realização desses provetes.

Posteriormente, são também descritos os métodos de ensaio de ambas as normas Militar e Europeia, nas secções 3.5 e 3.6, respectivamente.

Contudo, vai se iniciar o capítulo com a descrição dos materiais e das misturas betuminosas utilizadas para a avaliação da sensibilidade à água.

### 3.2. Caracterização dos materiais utilizados no estudo

A sensibilidade à água foi avaliada utilizando três misturas betuminosas efectuadas em laboratório, constituídas por três tipos de agregados (granitos, basaltos e calcários) e dois tipos de betume (penetração nominal de  $35/50 \times 10^{-1}$  mm e  $50/70 \times 10^{-1}$  mm).

Tendo em atenção os objectivos do presente estudo, seleccionaram-se misturas pertencentes ao grupo do “betão betuminoso”, com características de camadas de desgaste, adquirido assim a designação de acordo com a norma EN 13108-1, de AC14 surf. No Quadro 3.1, identificam-se as misturas betuminosas utilizadas e as respectivas designações.

**Quadro 3.1 – Misturas betuminosas utilizadas no estudo**

| Identificação | Tipo de Mistura                  | Tipo de Agregado   | Tipo de Betume | Designação de acordo com EN 13108-1 |
|---------------|----------------------------------|--------------------|----------------|-------------------------------------|
| BB-G1         | AC 14 surf<br>(Betão betuminoso) | Granito            | 50/70          | AC14 surf 50/70                     |
| BB-G2         |                                  |                    | 35/50          | AC14 surf 35/50                     |
| BB-B1         |                                  | Basalto e calcário | 35/50          | AC14 surf 35/50                     |

Dois dos agregados utilizados, granitos e basaltos, são agregados provenientes de rochas naturais e que pertencem ao tipo de rochas ígneas. Estes tipos de rocha são aquelas que se solidificaram de um estado líquido e apresentam composição química, granulação, textura e modos de ocorrência muito variáveis. Os granitos são resultantes de arrefecimento lento de grandes massas no interior da crosta terrestre, enquanto os basaltos são originários de fluxos de lava para a superfície da Terra.

O outro agregado utilizado, o calcário, é proveniente de rochas sedimentares. Estes tipos de rocha são formadas por sedimentos carregados pela água, vento ou gelo e acumulados em áreas deprimidas, também conhecidas por bacias sedimentares. São caracterizadas por camadas estratificadas, originadas pelos processos de deposição, podendo também ser formadas por precipitação química de minerais dissolvidos em água, como é o caso do calcário.

As rochas podem ser classificadas quanto ao teor em sílica, sendo os granitos considerados agregados ácidos (> 65%), os basaltos são considerados agregados básicos (45 a 52%), e os agregados calcários ultrabásicos (< 45%).

O agregado granítico utilizado no fabrico das misturas BB-G1 e BB-G2 veio separado nas seguintes fracções granulométricas: 8/14, 4/8 e 0/4. Por sua vez o agregado utilizado no fabrico da mistura BB-B1 veio separado em: Brita 2 (11,2/16mm) e Brita 1 (4/12mm) de origem basáltica e Areão (0/4mm) de origem calcária. Em todas as misturas utilizou-se filler de origem calcária.

### 3.2.1. Mistura de agregados

No Quadro 3.2, na Figura 3.1 e no Quadro 3.3, apresentam-se as principais características dos agregados graníticos utilizados no fabrico das misturas BB-G1 e BB-G2.

Quadro 3.2 – Composição granulométrica da mistura de agregados graníticos

| Dimensão da abertura dos peneiros (Série base mais a série 2) (mm) | Percentagem acumulada do material que passa (%) |
|--|---|
| 16   | 98  |
| 14   | 97  |
| 12,5   | 85  |
| 10   | 72  |
| 8  | 64  |
| 6,3  | 57  |
| 4  | 42,9  |
| 2  | 31  |
| 1  | 25  |
| 0,500  | 18  |
| 0,250  | 14,3  |
| 0,125  | 9   |
| 0,063  | 7,1   |

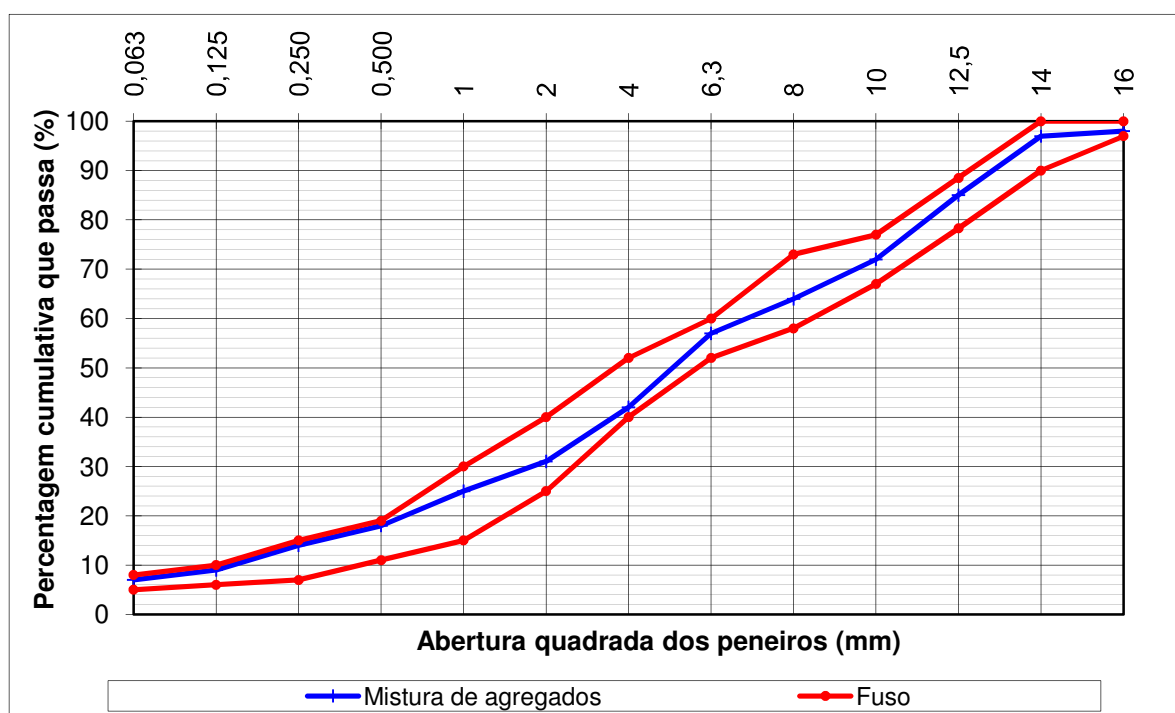


Figura 3.1 – Granulometria da mistura de agregados graníticos e fuso granulométrico

Quadro 3.3 – Características do agregado granítico

| Características   | Agregado 8/14 | Agregado 4/8 | Agregado 0/4 |
|---|---------------|--------------|--------------|
| Fragmentação de Los Angeles (NP EN 1097-2) <sup>(1)</sup> | 28%           | ----         | ----         |
| Índice de Lamelação (BS 812-105-1) <sup>(2)</sup>         | 24%           | 24%          | ----         |
| Índice de Alongamento (BS 812-105-2) <sup>(2)</sup>       | 21%           | 19%          | ----         |
| Equivalente de Areia (NP EN 933-8) <sup>(1)</sup>         | ----          | ----         | 70%          |
| Azul-de-metileno (NP EN 933-9) <sup>(1)</sup>             | ----          | ----         | 0,5g/kg      |
| Absorção de água (NP EN 1097-6) <sup>(1)</sup>            | 0,5%          | ----         | 0,2%         |

<sup>(1)</sup> De acordo com o Caderno de Encargos Tipo da E.P. em vigor (Fevereiro de 2009)

<sup>(2)</sup> De acordo com o anterior Caderno de Encargos Tipo (ex-JAE, 1998)

No Quadro 3.4, na Figura 3.2 e no Quadro 3.5, apresentam-se algumas características do agregados basálticos e calcários utilizados no fabrico da mistura BB-B1.

Quadro 3.4 – Composição granulométrica da mistura de agregados basálticos e calcários

| Dimensão da abertura dos peneiros (Série base mais a série 2) (mm) | Percentagem acumulada do material que passa (%) |
|--|---|
| 16   | 100   |
| 14   | 94  |
| 12,5   | 88,7  |
| 10   | 74  |
| 8  | 67  |
| 6,3  | 53,6  |
| 4  | 46,9  |
| 2  | 32  |
| 1  | 25  |
| 0,500  | 18  |
| 0,250  | 14  |
| 0,125  | 9   |
| 0,063  | 6,3   |

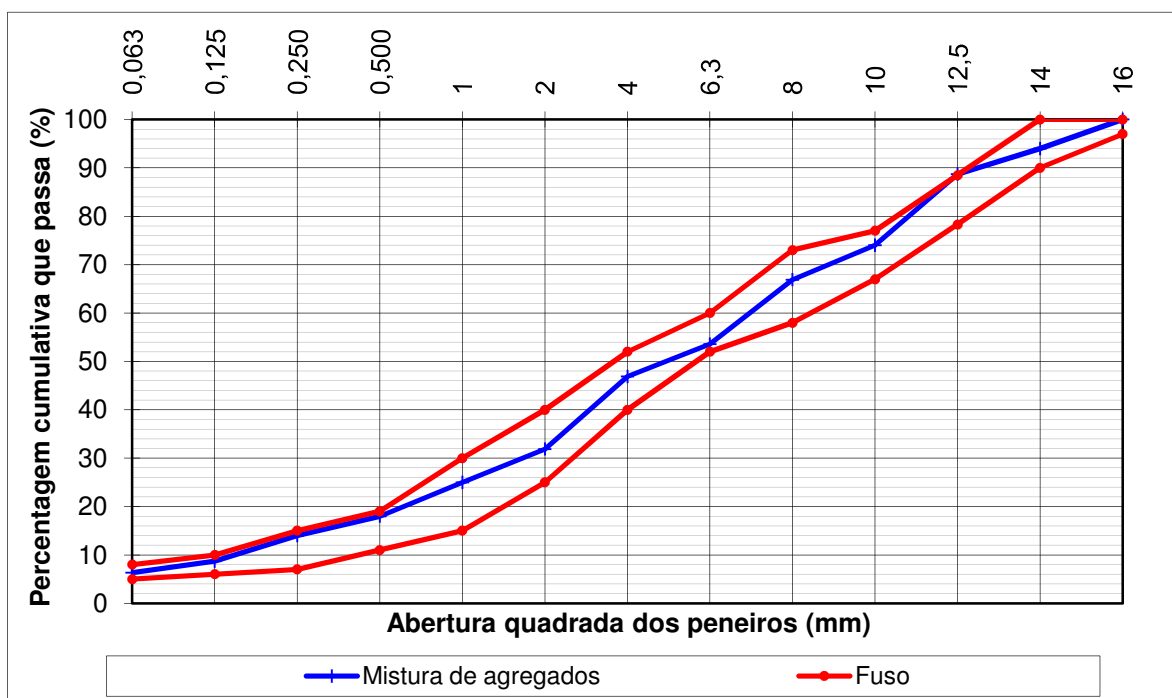


Figura 3.2 – Granulometria da mistura de agregados basálticos e calcários e fuso granulométrico

**Quadro 3.5 – Características dos agregados basálticos e calcários**

| <b>Características</b>                                 | <b>Brita 2<br/>(Basalto)</b> | <b>Brita 1<br/>(Basalto)</b> | <b>Areão<br/>(Calcário)</b> |
|--|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Índice de Lamelação<br>(BS 812-105-1) <sup>(2)</sup>   | 11%                          | 14%                          | ----                        |
| Índice de Alongamento<br>(BS 812-105-2) <sup>(2)</sup> | 15%                          | 12%                          | ----                        |
| Equivalente de Areia<br>(NP EN 933-8) <sup>(1)</sup>   | ----                         | ----                         | 63%                         |
| Azul-de-metileno<br>(NP EN 933-9) <sup>(1)</sup>       | ----                         | ----                         | 0,7 g/kg                    |
| Absorção de água<br>(NP EN 1097-6) <sup>(1)</sup>      | 0,43%                        | 0,96%                        | 1,62%                       |

<sup>(1)</sup> De acordo com o Caderno de Encargos Tipo da E.P. em vigor (Fevereiro de 2009)

<sup>(2)</sup> De acordo com o anterior Caderno de Encargos Tipo (ex-JAE, 1998)

### 3.2.2. Betumes

No Quadro 3.6 são descritas as características dos betumes 35/50 e 50/70 utilizados no presente estudo.

**Quadro 3.6 – Características dos betumes 35/50 e 50/70 (<http://www.galpenergia.pt>)**

| <b>Características</b>                                       | <b>Unidades</b>    | <b>Limites</b> |              |
|--|--------------------|----------------|--------------|
|  |                    | <b>35/50</b>   | <b>50/70</b> |
| Penetração   | 0,1mm              | 35/50          | 50/70        |
| Temperatura de amolecimento – Método<br>anel e bola          | °C                 | 50/58          | 46/54        |
| Viscosidade cinemática (mínimo)                              | mm <sup>2</sup> /s | 370            | 295          |
| Solubilidade (mínimo)  | % (mm)             | 99,0           | 99,0         |
| Temperatura de inflamação (mínimo)                           | °C                 | 240            | 230          |
| Resistência ao Endurecimento – Método RTFOT                  |                    |                |              |
| Varição de massa (máximo)                                    | % (mm)             | 0,5            | 0,5          |
| Penetração retida (mínimo)                                   | %                  | 53             | 53           |
| Temperatura de amolecimento – Método<br>anel e bola (mínimo) | °C                 | 52             | 50           |
| Aumento da temperatura de amolecimento<br>(máximo)           | °C                 | 8              | 9            |

### 3.3. Caracterização das misturas betuminosas utilizadas no estudo

#### 3.3.1. Misturas BB-G1 e BB-G2

As misturas BB-G1 e BB-G2 são misturas compostas por agregado granítico e por betume 50/70 e 35/50, respectivamente.

A composição adoptada para estas misturas betuminosas foi a seguinte:

- Agregado de dimensão nominal 8/14 mm \_\_\_\_\_ 31,8%
- Agregado de dimensão nominal 4/8 mm \_\_\_\_\_ 20,9%
- Agregado de dimensão nominal 0/4 mm \_\_\_\_\_ 39,4%
- Filer \_\_\_\_\_ 2,9%
- Betume \_\_\_\_\_ 5,0%

Segundo o estudo de formulação efectuado pela firma que forneceu os materiais, a baridade máxima teórica destas misturas betuminosas é de 2496Kg/m<sup>3</sup>.

#### 3.3.2. Mistura BB-B1

A mistura BB-B1 é uma mistura composta por agregado basáltico e calcário e por betume 35/50.

A composição adoptada para esta mistura betuminosa foi a seguinte:

- Agregado de dimensão nominal 11,2/16 mm (Basalto) \_\_\_\_\_ 25,7%
- Agregado de dimensão nominal 4/12 mm (Basalto) \_\_\_\_\_ 24,7%
- Agregado de dimensão nominal 0/4 mm (Calcário) \_\_\_\_\_ 42,8%
- Filer \_\_\_\_\_ 1,9%
- Betume \_\_\_\_\_ 4,9%

Segundo o estudo de formulação efectuado pela firma que forneceu os materiais, a baridade máxima teórica destas misturas betuminosas é de 2578Kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3.3. Requisitos/Propriedades das misturas

No Quadro 3.7 resumem-se os requisitos mínimos exigidos no Caderno de Encargos Tipo da E.P. (2009), para o tipo de misturas em apreço.

**Quadro 3.7 – Requisitos/propriedades da mistura**

| Propriedades   | Requisitos* (AC14 surf) |
|--|-------------------------|
| Vazios na mistura de agregados (VMA), mín.   | VM Amin14               |
| Porosidade, $V_{pm}$   | $V_{pmin3} - V_{pmax5}$ |
| % de ligante, mín.   | Bmin4,0                 |
| Índice de Resistência Conservada (IRC) em ensaios de compressão Marshall, segundo norma MIL-STD-620A, mín. | 80%                     |

\*De acordo com o Caderno de Encargos Tipo da E.P. em vigor (Fevereiro de 2009)

## 3.4. Preparação dos provetes

### 3.4.1. Generalidades

Ambas as normas de ensaio utilizadas neste estudo para avaliação da sensibilidade à água das misturas betuminosas fabricadas – a MIL-STD-620A – método 104 e a EN 12697-12:2008 – método A – se baseiam no ensaio de provetes cilíndricos. No caso da norma Militar Americana, os provetes a ensaiar deverão ter um diâmetro de 101,6 mm. No caso da norma Europeia, e para as misturas com a dimensão máxima do agregado de 14 mm em apreço, os provetes cilíndricos a utilizar poderão ter um diâmetro de  $100 \pm 3$  mm.

Tendo em conta o exposto, os provetes cilíndricos para ensaio foram preparados de acordo com a norma EN 12697-30:2004+A1:2007, que descreve a “Preparação de provetes por compactador de impacto”, normalmente conhecidos por “Provetes Marshall”.

Os provetes foram assim fabricados em laboratório, tendo como objectivo a determinação da sua resistência conservada pelas normas anteriormente referidas (Militar e Europeia).

Para poder ser aplicada a norma EN 12697-30:2004+A1:2007, a dimensão máxima do agregado não poderá ser superior a 22,4 mm. O formato do provete deverá ser cilíndrico e respeitar as dimensões de  $101,6 \pm 0,1$  mm de diâmetro e  $63,5 \pm 2,5$  mm de altura.

### **3.4.2. Equipamento utilizado**

Para a realização dos provetes foi utilizado o seguinte equipamento:

- 1 Compactador de impacto;
- 1 Pilão de compactação;
- 2 Estufas;
- Moldes de compactação (constituídos por base, cilindro e alonga);
- Tabuleiros;
- 1 Misturadora (constituída por base, taça e vareta);
- 1 Balança;
- 1 Panela;
- 1 Funil;
- 1 Colher;
- 1 Espátula;
- 1 Pá;
- Papel de filtro;
- 1 Prensa;
- 1 Acrescenta do molde;

### **3.4.3. Fabrico dos provetes**

O fabrico dos provetes começa pela divisão, peneiração (se necessário) e pesagem dos agregados. Estes vinham acondicionados em sacas, separados pelas várias fracções granulométricas já referidas. Os betumes foram fornecidos

em latas de 5 litros de capacidade. Pode observar-se pela Figura 3.3 o aspecto do acondicionamento da mistura BB- G1.



**Figura 3.3 – Acondicionamento do material**

A quantidade de material, em particular, de cada fracção de agregado que os provetes devem possuir, é determinada experimentalmente, sendo que para a realização destes ensaios esse trabalho já tinha sido efectuado. A metodologia de pesagem passa por colocar os agregados dentro de um tabuleiro sobre uma balança, sendo efectuada uma pesagem. Concluído esse procedimento, o tabuleiro vai para a estufa a uma determinada temperatura (aproximadamente 160°C), permanecendo por um determinado período de tempo para permitir o seu aquecimento à temperatura adequada ao fabrico da mistura. O betume também vai para a estufa com o intuito de torná-lo “trabalhável”, ou seja, menos viscoso para ser possível adicioná-lo posteriormente. Para a estufa também vai todo o material relacionado com os moldes e equipamentos que entram em contacto directo com a mistura, nomeadamente a taça e a vareta da misturadora, o funil, e a espátula, conforme demonstra a Figura 3.4.



Figura 3.4 – Equipamento na estufa antes da mistura

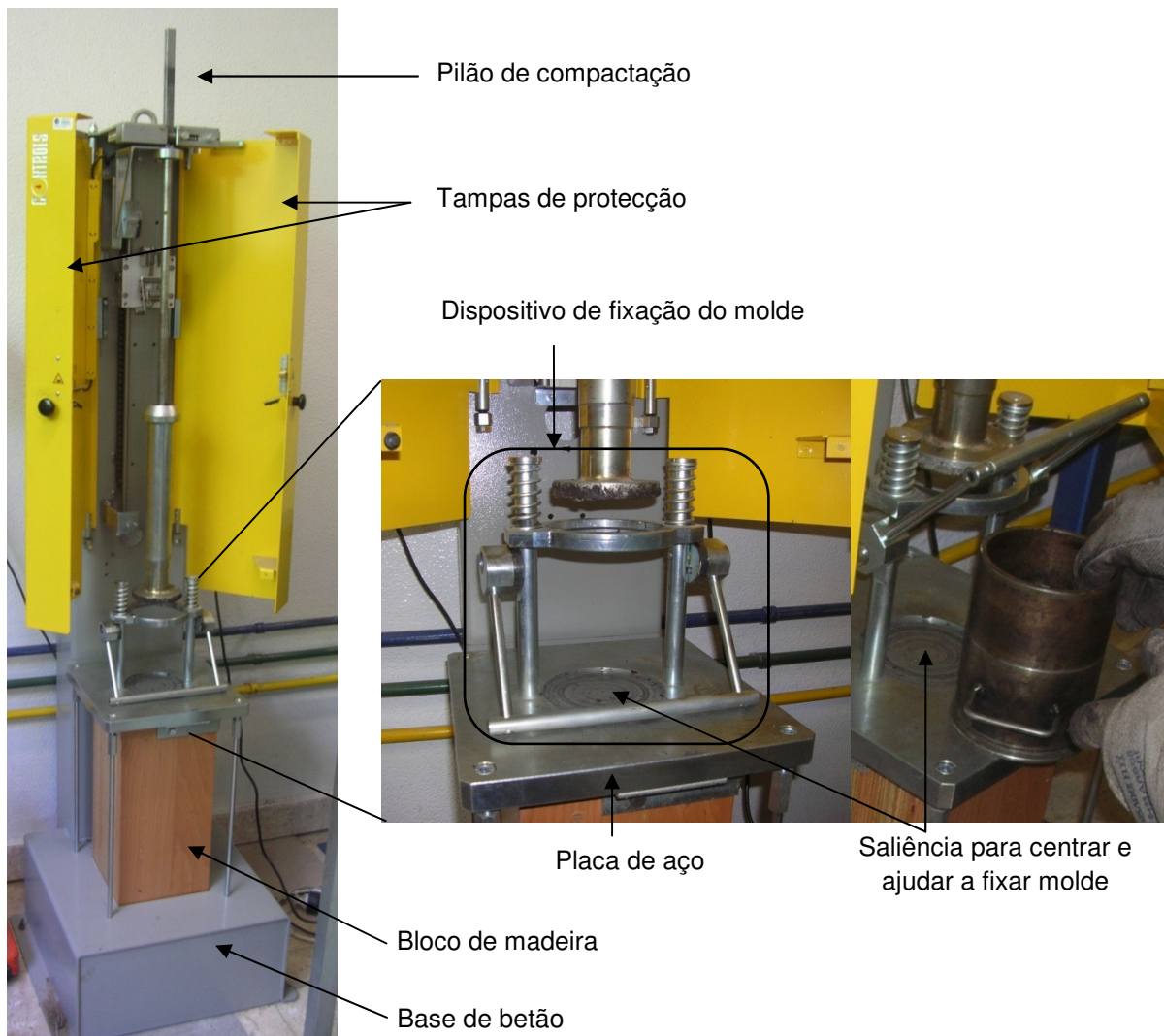
Depois de todos os materiais estarem devidamente aquecidos, pode-se passar à moldagem dos provetes. O primeiro passo é transpor os agregados da travessa para a taça da misturadora e adicionar o elemento que falta, o betume, para assim perfazer o peso total predefinido para o provete. Depois, a vareta e a taça são colocadas na misturadora para se poder dar início à mistura. Por baixo da taça é colocada uma fonte de calor com o objectivo de manter a temperatura desejada. Quando a olho nu é possível ver que todos os agregados já estão completamente cobertos por betume, então dá-se por concluída a mistura sendo possível passar o material para dentro do molde. Podem observar-se estes passos na Figura 3.5.



**Figura 3.5 – Mistura dos agregados com o betume**

Previamente à passagem da mistura para o molde há que prepará-lo. O molde é constituído por 3 peças: a base, o cilindro e a alonga. Antes de colocar a mistura é necessário colocar na base do molde uma folha de papel vegetal para impedir que esta se “cole” à base do molde e possibilite o seu “descolamento” uma vez compactado. Depois de colocar a mistura no molde deve-se espalhá-la bem por todo o volume, de forma a torná-la bem distribuída sem segregação. Este procedimento pode ser desenvolvido, por exemplo, com a ajuda de uma espátula. Por fim, deve também ser colocada outra folha de papel vegetal no topo da mistura, pelas mesmas razões da primeira. Após estes procedimentos a mistura está pronta para ser compactada.

A compactação é efectuada com recurso a um compactador de impacto (Figura 3.6), ao qual é anexo um pilão de compactação, que como o nome indica, vai compactar a mistura. O pilão é constituído por um eixo guia cilíndrico, uma massa deslizante e um suporte. O procedimento consiste em deixar cair a massa do pilão a partir de uma determinada altura e com a aplicação de um determinado número de pancadas (neste caso, de 75 pancadas em cada lado), num determinado intervalo de tempo, sobre a base do pilão que se encontra posicionada sobre o provete betuminoso.



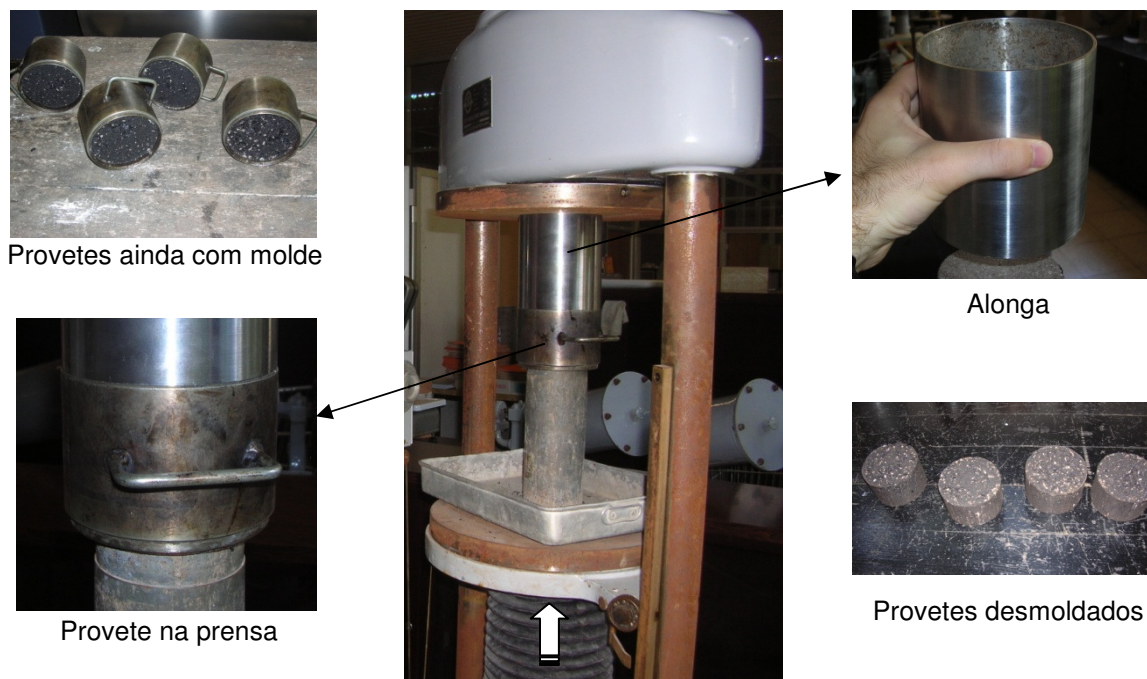
**Figura 3.6 – Compactação dos provetes (compactador de impacto)**

O compactador é assente sobre um bloco de madeira, que por sua vez assenta sobre uma base de betão.

Após as primeiras 75 pancadas, o molde deve ser retirado do dispositivo de fixação e invertido o cilindro do molde, com o intuito de compactar com mais 75 pancadas na outra face do provete.

Após concluída a compactação, o provete é arrefecido à temperatura ambiente, ou recorrendo a uma ventoinha. O mesmo procedimento deverá ser executado para os restantes provetes até todos estarem concluídos.

Depois de arrefecidos os provetes dá-se início à sua desmoldagem. Este procedimento realiza-se com recurso a um dispositivo de extrusão, neste caso uma prensa, como se pode observar pela Figura 3.7.



**Figura 3.7 – Desmoldagem dos provetes (prensa)**

O mecanismo de funcionamento é o seguinte: o provete é colocado sobre o braço da prensa, que como possui um diâmetro inferior ao do molde, vai permitir que este empurre o provete para fora do molde e para dentro da alonga. Esta possui um diâmetro superior ao do provete, mas que ainda permite encaixar na face exterior do molde (que foi desenvolvido com o intuito de permitir este encaixe). Assim, quando a prensa inicia o seu movimento ascendente, o provete é empurrado para fora do molde e para dentro da alonga, sem que, no entanto, fique preso dentro desta e permita a sua fácil remoção.

O mesmo procedimento é realizado para os restantes provetes até serem todos desmoldados e estejam prontos para os ensaios pretendidos.

### **3.5. Ensaios segundo a Norma Militar Americana MIL-STD-620A (1966), Método 104**

#### **3.5.1. Generalidades**

O método de avaliação da sensibilidade à água que era usualmente utilizado em Portugal, baseado no método 104 da norma Americana MIL-STD-620A, baseia-se na comparação entre forças de rotura Marshall de dois grupos de provetes que são previamente acondicionados de forma diferente: Um grupo de 4 provetes cilíndricos Marshall (Grupo 1) é imerso em água a 60°C durante cerca de 30 minutos; um segundo grupo (Grupo 2) é acondicionado durante 24 horas num banho a 60°C. Após o período de acondicionamento de cada grupo de provetes é determinada a força de rotura de cada provete através do ensaio Marshall e calculado o respectivo valor médio: força de rotura média F1 dos provetes do Grupo 1 e força de rotura média F2 dos provetes do grupo 2 (APORBET, 1998).

Com base nos resultados obtidos para as forças de rotura médias, calcula-se o Índice de Resistência Conservada (IRC) através da equação 3.1:

$$IRC = \frac{F_2}{F_1} \times 100 \quad (\%) \quad (3.1)$$

#### **3.5.2. Equipamento utilizado**

O material necessário para a realização deste ensaio é relativamente simples e reduzido, tal como se identifica de seguida:

- 1 Termómetro;
- 1 Cronómetro;
- 1 Pano;
- 1 Recipiente com água;
- 1 Balança;
- 1 Cesto e 1 vareta de metal;
- 1 Equipamento para banho-maria;
- 1 Prensa.

### 3.5.3. Método de ensaio

Segundo o método de ensaio preconizado pela norma Militar Americana MIL-STD-620A, deve começar-se pela determinação da baridade dos 8 provetes para posteriormente se efectuar a separação em dois grupos com baridades médias iguais ou muito semelhantes.

A determinação da baridade de cada provete foi efectuada segundo a norma EN 12697-6:2003:+A1:2007 – Procedimento B (Bulk density – SSD), conforme se sintetiza:

- Começa-se por efectuar a identificação de cada provete e de seguida realizadas as primeiras pesagens com os provetes totalmente secos ( $m_1$ ).
- Depois, são colocados num recipiente com água durante cerca de 50 minutos. Com o auxílio de um termómetro, é verificada a temperatura da água. Seguidamente, cada provete é colocado num cesto metálico dentro de um recipiente com água. O cesto está ligado por uma vareta metálica a uma balança, com o intuito de medir novamente o peso do provete ( $m_2$ ).
- Assim que este passo está concluído, o provete é retirado do cesto e com o auxílio de um pano é retirada a água em excesso da sua superfície, onde por fim é verificado novamente o seu peso ( $m_3$ ).

Estes procedimentos podem ser visualizados na Figura 3.8.



**Figura 3.8 – Determinação da baridade imersa dos provetes**

Após registadas as medições na Folha de Registo de Ensaio, determinam-se as baridades dos provetes. Separados em 2 grupos com baridades médias iguais ou semelhantes, pode-se passar ao passo seguinte, de avaliação da sensibilidade à água.

Um dos grupos é colocado dentro de um banho de água a 60°C durante 30 minutos (20 a 40 minutos de acordo a norma Militar MIL-STD-620A – Método 100), enquanto o outro grupo fica 24 horas no mesmo banho de água a 60°C. Finalizados os respectivos períodos de imersão, é determinada a força de rotura através do ensaio Marshall, procedimento que se descreve de seguida.

Um por um, cada provete é ensaiado pela sua vez. Após o período de imersão a 60°C, cada provete é retirado do banho de água e, com o auxílio de um pano, é retirado o excesso de água da sua superfície, sendo depois colocado na prensa para ensaio, como é demonstrado na Figura 3.9.

Uma vez preparado o equipamento dá-se início ao ensaio, sendo exercida uma força vertical a velocidade constante, estando o ensaio concluído quando for atingida a força de compressão máxima. Ao mesmo tempo que se desenrola o

ensaio, os dados são registados automaticamente no computador, sendo traçado um gráfico que regista a força exercida pela prensa em função da deformação sofrida pelo provete. No final é registada a força máxima exercida pela prensa durante o procedimento, sendo este valor designado por força de rotura.

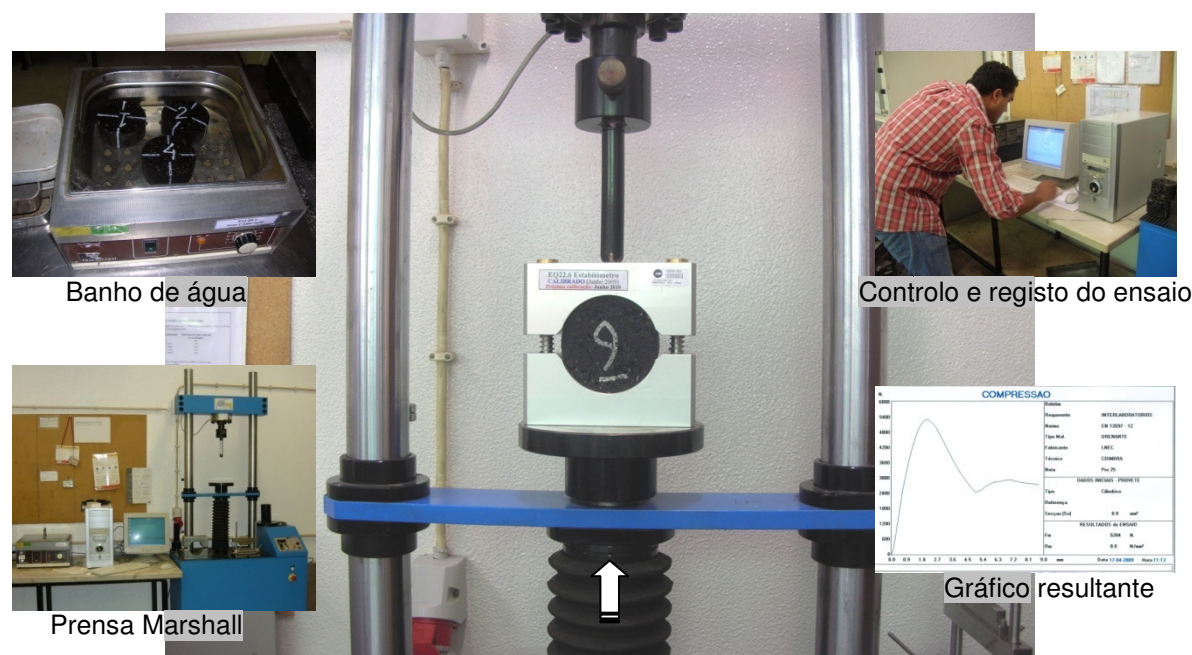


Figura 3.9 – Determinação da força de rotura Marshall

O mesmo procedimento é realizado com os outros provetes e no final determina-se a força de rotura média dos quatro provetes de cada grupo.

Por fim, e pela equação 3.1, calcula-se o Índice de Resistência Conservada, valor indicativo da sensibilidade à água.

## 3.6. Ensaio segundo a Norma Europeia EN 12697-12:2008 – Método A

### 3.6.1. Generalidades

A primeira publicação da norma EN 12697-12, referente à sensibilidade à água de misturas betuminosas é datada de 2003. Nessa edição é apenas preconizado um

método de ensaio, que é semelhante ao método A da norma em vigor, a EN 12697-12:2008.

Além do método A, a EN 12697-12:2008 preconiza mais dois métodos de ensaio: o método B, que se baseia na resistência à compressão simples de provetes cilíndricos; e o método C, que é apenas aplicável em misturas betuminosas macias, fornecendo um valor de adesividade da mistura.

Segundo Batista e Antunes (2009), o método C não é, em geral, aplicável em misturas betuminosas fabricadas em Portugal, sendo o método A aquele que tem vindo a ser mais utilizado nos países Europeus, como é o caso da vizinha Espanha.

Como tal, o método A foi o método utilizado nos ensaios de laboratório efectuados segundo a norma Europeia EN 12697-12:2008, sendo descrito de seguida.

Primeiramente, são fabricados pelo menos seis provetes cilíndricos, fabricados segundo a norma EN 12697-30:2004+A1:2007. Consoante a dimensão máxima do agregado varia a dimensão dos provetes, sendo utilizados provetes de  $100\pm 3$  mm para agregados com dimensão máxima inferior ou igual a 22mm, semelhantes aos utilizados pela norma Militar MIL-STD-620A. Após o fabrico, os provetes são separados em 2 grupos (de 3 provetes) com baridades e alturas médias iguais ou muito semelhantes, sendo os limites definidos para a baridade de  $15 \text{ kg/m}^3$  e para altura de 5 mm.

O primeiro grupo de provetes, denominado por grupo de provetes “a seco” ( $ITS_d$ ), é acondicionado ao ar a uma temperatura de  $20\pm 5^\circ\text{C}$ .

O segundo grupo de provetes, denominado por grupo de provetes “imersos” ( $ITS_w$ ), é primeiramente medido (como será descrito na secção 3.6.3), sendo depois submetido ao condicionamento em vácuo. Este procedimento consiste em colocar os provetes em água destilada a uma temperatura de  $20\pm 5^\circ\text{C}$ , sendo depois mantidos durante  $30\pm 5$  minutos a uma pressão de  $6,7\pm 0,3$  kPa. Posto isto, os provetes são novamente medidos, com o intuito de verificar a sua variação de

volume, sendo depois colocados num banho de água a  $40\pm 1^{\circ}\text{C}$  durante um período de 68 a 72 horas.

Terminado o período de condicionamento, os dois grupos de provetes são colocados à temperatura desejada para o ensaio de tracção indirecta: o primeiro grupo ( $\text{ITS}_d$ ) é colocado ao ar a uma temperatura definida entre os  $5^{\circ}\text{C}$  e os  $25^{\circ}\text{C}$ ; o segundo grupo ( $\text{ITS}_w$ ) é colocado num novo banho de água à mesma temperatura definida para o grupo  $\text{ITS}_d$ . A norma EN 12697-12 inclui uma nota onde recomenda que seja adoptada uma temperatura de ensaio de  $25^{\circ}\text{C}$ , para se obter influência máxima da adesividade do ligante e para minimizar a influência dos agregados partidos na linha de rotura do provete. Observa-se, no entanto, que a norma EN 13108-20 preconiza uma temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$  para efeitos de ensaios de tipo iniciais de misturas betuminosas abrangidas pela marcação CE (Batista *et al.*, 2008).

A partir dos valores médios das resistências à tracção indirecta dos provetes “imersos” ( $\text{ITS}_w$ ) e “a seco” ( $\text{ITS}_d$ ), é calculada a resistência conservada em tracção indirecta (ITSR) através da equação 3.2:

$$ITSR = \frac{\text{ITS}_w}{\text{ITS}_d} \times 100 \quad (\%) \quad (3.2)$$

### 3.6.2. Equipamento utilizado

O material necessário para a realização deste ensaio é o seguinte:

- 1 Esquadro;
- 1 Termómetro;
- 1 Cronómetro;
- 1 Pano;
- 3 Recipientes com água;
- 1 Balança;
- 1 Cesto e 1 vareta de metal;
- 1 Equipamento para banho-maria;
- 1 Estufa;

- 1 Câmara seca;
- 1 Bomba de vácuo;
- 1 Recipiente de vácuo (Picnómetro) e acessórios;
- 1 Proveta;
- 1 Prensa.

### **3.6.3. Método de ensaio**

Tal como sucedido para a norma Militar Americana, começa-se por determinar a baridade imersa dos provetes, procedimento esse que é igual ao já descrito na secção 3.5.3.

No caso deste procedimento de ensaio para avaliação da sensibilidade à água, para além das baridades, é importante que os dois grupos de provetes tenham também alturas iguais ou semelhantes. Assim, aquando da marcação dos provetes, além da sua identificação, estes são marcados verticalmente e transversalmente para posteriormente serem medidos. A norma EN 12697-29:2002 define que devem ser medidas quatro alturas ( $h$ ) e seis diâmetros ( $\Phi$ ), medidos da seguinte forma: medir quatro alturas igualmente espaçadas à volta do perímetro de cada provete, onde a posição de medida deve ser claramente marcada; medir dois diâmetros perpendiculares entre si no topo do provete, no meio e na base, a partir das posições já marcadas para a medição da altura. Após efectuadas as medições, o ensaio prossegue normalmente.

Calculadas as baridades e efectuados os grupos, são verificados os limites de variação entre cada grupo de provetes: 5 mm para os comprimentos médios e de  $15 \text{ kg/m}^3$  para a baridade.

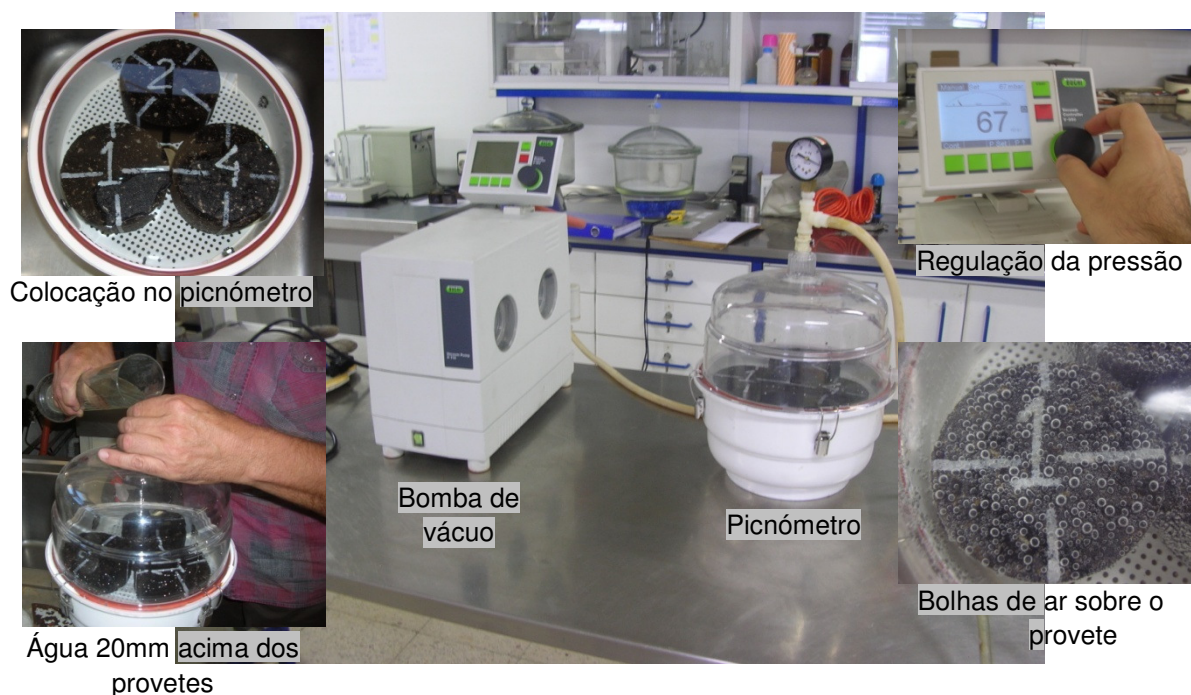
A seguir, o primeiro grupo de provetes ( $ITS_d$ ) é acondicionado ao ar a uma temperatura de  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ .

O segundo grupo de provetes ( $ITS_w$ ) prossegue para o vácuo, procedimento que se descreve de seguida.

Primeiro, colocam-se os provetes dentro do Picnómetro sobre uma base com furos. Depois coloca-se a tampa no equipamento e com o auxílio de uma proveta, enche-se com água destilada até pelo menos 20 mm acima do topo dos provetes.

Depois, num intervalo de  $10 \pm 1$  minutos aplica-se o vácuo até à pressão de  $6,7 \pm 0,3$  kPa. Em estudos anteriores (Batista *et al.*, 2008), verificou-se ser importante que a pressão fosse reduzida gradualmente. Assim, como a pressão atmosférica é de aproximadamente 100 kPa, faz-se uma redução de aproximadamente 10,4 kPa por minuto. O vácuo mantém-se por um período de  $30 \pm 5$  minutos, revertendo-se depois o processo até ficar de novo lentamente à pressão atmosférica.

Durante este processo é evidente a perda de ar pelos provetes, ficando estes cobertos por bolhas de ar. Este e outros pormenores são visíveis na Figura 3.10.



**Figura 3.10 – Provetes submetidos a vácuo**

Saídos do vácuo, os provetes são medidos novamente com o intuito de verificar a sua variação de volume. Se esse aumento for superior a 2%, então o provete não serve para o ensaio, sendo necessário efectuar outro.

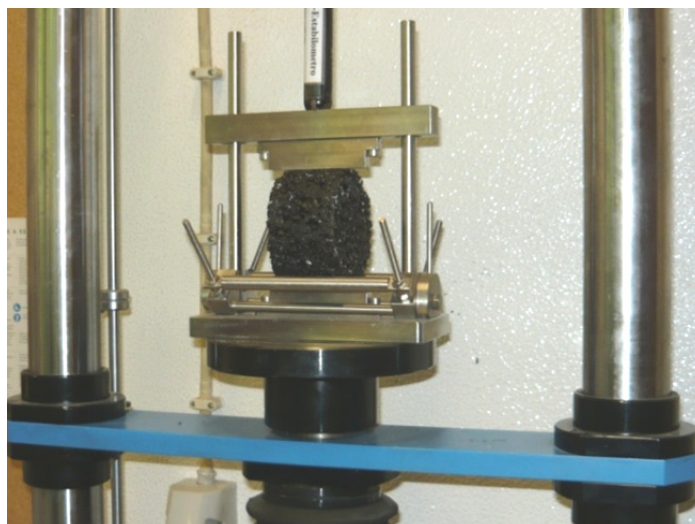
De seguida, os provetes são acondicionados num banho de água a  $40 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante um período de 68 a 72 horas.

Terminado esse período de condicionamento, os provetes são trazidos para a temperatura de ensaio, conforme o pretendido (entre 5°C e 25°C).

Neste trabalho, foram realizados ensaios de tracção indirecta a duas temperaturas distintas, de 15°C e 25°C, com o objectivo de avaliar a influência da temperatura de ensaio nos resultados da resistência conservada. Conforme já foi referido, a temperatura de 15°C foi seleccionada por ser a temperatura preconizada na norma EN 13108-20 relativa aos ensaios de tipo iniciais de misturas betuminosas abrangidas pela marcação C.E (Batista *et al.*, 2008). A temperatura de 25°C é a recomendada na norma EN 12697-12 de forma a maximizar a influência da adesividade do ligante e minimizar a influência dos agregados partidos na linha de rotura.

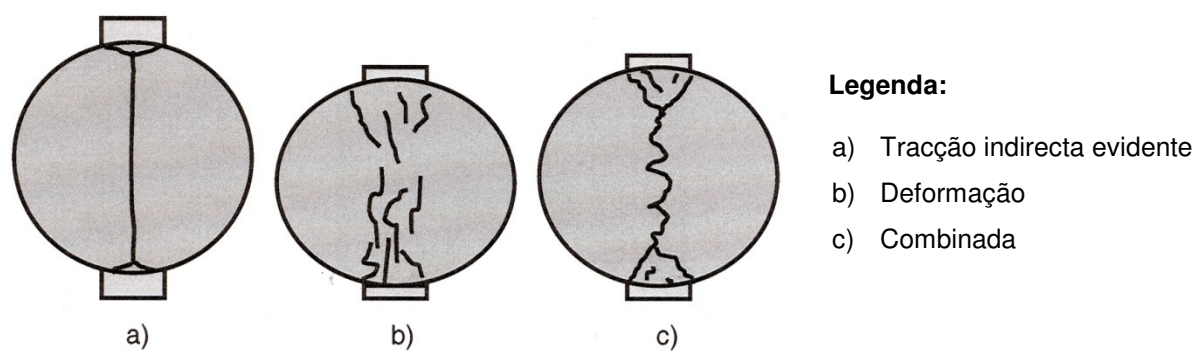
Uma vez seleccionada a temperatura do ensaio de tracção indirecta, os dois grupos de provetes (a “seco” e “imersos”) são acondicionados a essa temperatura. Os provetes “a seco” devem ser colocados ao ar à temperatura definida, enquanto os provetes “imersos” devem ser colocados num recipiente com água à mesma temperatura. Os provetes devem permanecer nestas últimas condições durante pelo menos 2 horas.

De seguida, os provetes são submetidos ao ensaio de tracção indirecta. Este ensaio é em tudo semelhante ao ensaio Marshall, já descrito na secção 3.5.3, com a diferença da forma de aplicação da carga que é diferente para a aplicação desta norma (EN 12697-12). Esse procedimento pode ser visualizado na Figura 3.11.



**Figura 3.11 – Ensaio de tracção indirecta**

A norma Europeia EN 12697-12 também exige que após o ensaio se visualize que tipo de rotura foi verificada, podendo ser: tracção indirecta evidente; por deformação; ou combinada. Que também seja verificado o revestimento de ligante na superfície do agregado exposto e a existência ou não de agregado fracturado ou esmagado. Esses procedimentos são descritos com pormenor na norma EN 12697-23:2003 (*Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*), onde é possível obter elementos de apoio que permitem efectuar estas observações com maior facilidade e eficiência. Na Figura 3.12 é possível visualizar uma figura da referida norma, onde são demonstrados os tipos de rotura possíveis.



**Figura 3.12 – Análise do tipo de rotura dos provetes**

De seguida, na Figura 3.13, podem-se observar os provetes das misturas BB-G1 e BB-G2 alinhados para análise do tipo de rotura e o interior de um provete ensaiado, onde será efectuada a análise do revestimento do ligante na superfície do agregado e da presença de agregado fracturado ou esmagado.



**Figura 3.13 – Análise do tipo de rotura, do revestimento e a presença de agregado fracturado ou esmagado**

### **3.7. Considerações finais**

Foram seleccionadas para ensaio 3 tipos de misturas betuminosas: duas compostas por agregado granítico e betumes 35/50 e 50/70; outra composta por agregado basáltico e calcário e betume 35/50. Estas misturas betuminosas, do tipo betão betuminoso AC14 surf, foram caracterizadas bem como os seus materiais constituintes.

Os provetes betuminosos foram fabricados segundo a norma EN 12697-30:2004+A1:2007. Para a utilização da norma Militar Americana MIL-STD-620A foram fabricados oito provetes, enquanto que para a norma Europeia EN 12697-12 foram fabricados seis.

Como se pôde verificar pelos métodos de ensaios realizados segundo as duas normas, existem diferenças significativas entre ambas. A norma Militar Americana possui uma filosofia mais “simples”, onde os provetes são colocados em água a 60°C, por diferentes períodos de tempo (30 minutos para o Grupo 1 e 24 horas para Grupo 2), sendo depois ensaiados e comparadas as resistências médias de cada grupo. Por seu lado, a norma Europeia define que apenas um dos grupos seja acondicionado em água, ficando o outro grupo (a “seco”) ao ar, a uma determinada temperatura ( $20\pm 5^\circ\text{C}$ ). A aplicação de vácuo ao grupo de provetes “imersos”, procedimento algo delicado e que visa garantir a presença de água em todos os vazios do provete, é talvez a diferença mais notória e relevante entre ambas as normas. A colocação de ambos os grupos de provetes pelo menos 2 horas a temperaturas de ensaio que poderão ser bastante distintas (entre 5°C e 25°C) é também uma diferença notória, a par do ensaio de compressão, que é distinto para cada norma. Por fim, a análise do tipo de rotura dos provetes poderá ser um procedimento importante para melhor se entender os resultados obtidos.

No capítulo seguinte, serão apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados segundo as duas normas de avaliação de sensibilidade à água referidas.

---

## CAPÍTULO

### 4

---

## Apresentação e Análise de Resultados

*Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos na realização de ensaios de sensibilidade à água sobre os 3 tipos de misturas betuminosas descritas no capítulo anterior: BB-G1, BB-G2 e BB-B1. Pretendeu-se comparar os resultados obtidos pelas duas normas em estudo, a Militar Americana MIL-STD-620A - Método 104 e a norma Europeia EN 12697-12:2008 – Método A, verificar a influência do agregado, do betume, da variação da temperatura do ensaio de tracção indirecta nos resultados dos ensaios realizados segundo a norma Europeia e analisar o tipo de rotura verificada pelos provetes ensaiados segundo a mesma norma.*

## 4. Apresentação e Análise de Resultados

### 4.1. Considerações iniciais

Para a avaliação da sensibilidade à água, as três misturas betuminosas fabricadas (BB-G1, BB-G2 e BB-B1) foram ensaiadas de acordo com duas normas: MIL-STD-620A - Método 104 e EN 12697-12:2008 – Método A. Nos ensaios realizados segundo a norma Europeia usaram-se duas temperaturas de ensaio de tracção indirecta (compressão diametral) distintas (15°C e 25°C) para as misturas compostas por granito e a temperatura de ensaio de 15°C para a mistura composta por basalto e calcário.

No Quadro 4.1 sintetizam-se os ensaios que foram realizados sobre cada uma das misturas betuminosas em estudo, identificando a respectiva norma e temperatura de ensaio.

Quadro 4.1 – Ensaios realizados

| Identificação da mistura | Tipo de agregado   | Tipo de betume | Norma e método de ensaio  | Temperatura do ensaio de compressão |
|--------------------------|--------------------|----------------|---------------------------|-------------------------------------|
| BB-G1                    | Granito            | 50/70          | MIL-STD-620A – Método 104 | 60°C                                |
|                          |                    |                | EN 12697-12 – Método A    | 15°C                                |
|                          |                    |                |                           | 25°C                                |
| BB-G2                    | Granito            | 35/50          | MIL-STD-620A – Método 104 | 60°C                                |
|                          |                    |                | EN 12697-12 – Método A    | 15°C                                |
|                          |                    |                |                           | 25°C                                |
| BB-B1                    | Basalto e calcário | 35/50          | MIL-STD-620A – Método 104 | 60°C                                |
|                          |                    |                | EN 12697-12 – Método A    | 15°C                                |

Nas secções que se seguem, procede-se à apresentação e análise dos principais resultados obtidos nos ensaios realizados para avaliação da sensibilidade à água.

## 4.2. Apresentação de resultados

### 4.2.1. Mistura BB-G1

Nos Quadros 4.2 a 4.4 apresentam-se os principais resultados obtidos nos ensaios realizados sobre a mistura BB-G1, segundo os diferentes métodos e condições de ensaio considerados neste estudo.

**Quadro 4.2 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G1 (norma MIL-STD-620A – Método 104)**

| Identificação da Mistura (tipo de material)    | Grandeza   | Provetes imersos 30 min. a 60°C | Provetes imersos 24 horas a 60°C |
|--|--|---------------------------------|----------------------------------|
| BB-G1<br>(Agregados graníticos e betume 50/70) | $\rho_{b,SSD}$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup> | 2440                            | 2441                             |
|  | $V_m$ (%) <sup>(1)</sup>                           | 2,3                             | 2,2                              |
|  | $P_{Marshall}$ (kN) <sup>(1)</sup>                 | 19,4                            | 13,8                             |
|  | IRC (%)  | 69                              |                                  |

**Legenda:**  $\rho_{b,SSD}$  — Baridade, determinada pelo método hidrostático (SSD);  $V_m$  — Porosidade, calculada com base na baridade máxima teórica;  $P_{Marshall}$  — Resistência máxima (estabilidade Marshall corrigida); IRC — Índice de resistência conservada (no ensaio Marshall); (1) — Valores médios para cada grupo de provetes.

**Quadro 4.3 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G1 (norma EN 12697-12 – Método A), 15°C**

| Identificação da Mistura (tipo de material)    | Grandeza   | Provetes ≈3 dias ao ar a 20°C | Provetes submetidos a vácuo e imersos ≈72 horas a 40°C |
|--|--|-------------------------------|--|
| BB-G1<br>(Agregados graníticos e betume 50/70) | $\rho_{b,SSD}$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup> | 2424                          | 2423   |
|  | $V_m$ (%) <sup>(1)</sup>                           | 2,9                           | 2,9  |
|  | $P_{ITS}$ (kN) <sup>(1)</sup>                      | 30,9                          | 13,6   |
|  | $ITS_m$ (kPa) <sup>(1)</sup>                       | 3086                          | 1352   |
|  | ITSR (%)   | 44                            |  |

**Legenda:**  $\rho_{b,SSD}$  — Baridade, determinada pelo método hidrostático (SSD);  $V_m$  — Porosidade, calculada com base na baridade máxima teórica;  $P_{ITS}$  — Resistência máxima (força de rotura) em tracção indirecta;  $ITS_m$  — Resistência (tensão de rotura) em tracção indirecta; ITSR — Resistência conservada à tracção indirecta; (1) — Valores médios para cada grupo de provetes.

**Quadro 4.4 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G1 (norma EN 12697-12 – Método A), 25°C**

| Identificação da Mistura (tipo de material)    | Grandeza   | Provetes ≈3 dias ao ar a 20°C | Provetes submetidos a vácuo e imersos ≈72 horas a 40°C |
|--|--|-------------------------------|--|
| BB-G1<br>(Agregados graníticos e betume 50/70) | $\rho_{b,SSD}$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup> | 2416                          | 2415   |
|  | $V_m$ (%) <sup>(1)</sup>                           | 3,2                           | 3,2  |
|  | $P_{ITS}$ (kN) <sup>(1)</sup>                      | 10,7                          | 5,9  |
|  | $ITS_m$ (kPa) <sup>(1)</sup>                       | 1069                          | 584  |
|  | ITSR (%)   | 55                            |  |

**Legenda:**  $\rho_{b,SSD}$  — Baridade, determinada pelo método hidrostático (SSD);  $V_m$  — Porosidade, calculada com base na baridade máxima teórica;  $P_{ITS}$  — Resistência máxima (força de rotura) em tracção indirecta;  $ITS_m$  — Resistência (tensão de rotura) em tracção indirecta; ITSR — Resistência conservada à tracção indirecta; (1) — Valores médios para cada grupo de provetes.

#### 4.2.2. Mistura BB-G2

Nos Quadros 4.5 a 4.7 apresentam-se os principais resultados obtidos nos ensaios realizados sobre a mistura BB-G2, segundo os diferentes métodos e condições de ensaio considerados neste estudo.

**Quadro 4.5 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G2 (norma MIL-STD-620A – Método 104)**

| Identificação da Mistura (tipo de material)    | Grandeza   | Provetes imersos 30 min. a 60°C | Provetes imersos 24 horas a 60°C |
|--|--|---------------------------------|----------------------------------|
| BB-G2<br>(Agregados graníticos e betume 35/50) | $\rho_{b,SSD}$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup> | 2426                            | 2425                             |
|  | $V_m$ (%) <sup>(1)</sup>                           | 2,8                             | 2,8                              |
|  | $P_{Marshall}$ (kN) <sup>(1)</sup>                 | 20,3                            | 17,9                             |
|  | IRC (%)  | <b>88</b>                       |                                  |

**Legenda:**  $\rho_{b,SSD}$  – Baridade, determinada pelo método hidrostático (SSD);  $V_m$  – Porosidade, calculada com base na baridade máxima teórica;  $P_{Marshall}$  – Resistência máxima (estabilidade Marshall corrigida); IRC – Índice de resistência conservada (no ensaio Marshall); (1) – Valores médios para cada grupo de provetes.

**Quadro 4.6 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G2 (norma EN 12697-12 – Método A), 15°C**

| Identificação da Mistura (tipo de material)    | Grandeza   | Provetes ≈3 dias ao ar a 20°C | Provetes submetidos a vácuo e imersos ≈72 horas a 40°C |
|--|--|-------------------------------|--|
| BB-G2<br>(Agregados graníticos e betume 35/50) | $\rho_{b,SSD}$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup> | 2409                          | 2413   |
|  | $V_m$ (%) <sup>(1)</sup>                           | 3,5                           | 3,3  |
|  | $P_{ITS}$ (kN) <sup>(1)</sup>                      | 34,1                          | 20,9   |
|  | $ITS_m$ (kPa) <sup>(1)</sup>                       | 3395                          | 2096   |
|  | ITSR (%)   | <b>62</b>                     |  |

**Legenda:**  $\rho_{b,SSD}$  – Baridade, determinada pelo método hidrostático (SSD);  $V_m$  – Porosidade, calculada com base na baridade máxima teórica;  $P_{ITS}$  – Resistência máxima (força de rotura) em tracção indirecta;  $ITS_m$  – Resistência (tensão de rotura) em tracção indirecta; ITSR – Resistência conservada à tracção indirecta; (1) – Valores médios para cada grupo de provetes.

**Quadro 4.7 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-G2 (norma EN 12697-12 – Método A), 25°C**

| Identificação da Mistura (tipo de material)    | Grandeza   | Provetes ≈3 dias ao ar a 20°C | Provetes submetidos a vácuo e imersos ≈72 horas a 40°C |
|--|--|-------------------------------|--|
| BB-G2<br>(Agregados graníticos e betume 35/50) | $\rho_{b,SSD}$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup> | 2417                          | 2418   |
|  | $V_m$ (%) <sup>(1)</sup>                           | 3,2                           | 3,1  |
|  | $P_{ITS}$ (kN) <sup>(1)</sup>                      | 13,4                          | 10,3   |
|  | $ITS_m$ (kPa) <sup>(1)</sup>                       | 1331                          | 1019   |
|  | ITSR (%)   | <b>77</b>                     |  |

**Legenda:**  $\rho_{b,SSD}$  – Baridade, determinada pelo método hidrostático (SSD);  $V_m$  – Porosidade, calculada com base na baridade máxima teórica;  $P_{ITS}$  – Resistência máxima (força de rotura) em tracção indirecta;  $ITS_m$  – Resistência (tensão de rotura) em tracção indirecta; ITSR – Resistência conservada à tracção indirecta; (1) – Valores médios para cada grupo de provetes.

### 4.2.3. Mistura BB-B1

Nos Quadros 4.8 e 4.9 apresentam-se os principais resultados obtidos nos ensaios realizados sobre a mistura BB-B1, segundo os diferentes métodos e condições de ensaio considerados neste estudo.

**Quadro 4.8 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-B1 (norma MIL-STD-620A – Método 104)**

| Identificação da Mistura (tipo de material)                       | Grandeza   | Provetes imersos 30 min. a 60°C | Provetes imersos 24 horas a 60°C |
|---|--|---------------------------------|----------------------------------|
| <b>BB-B1</b><br>(Agregados basálticos e calcários e betume 35/50) | $\rho_{b,SSD}$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup> | 2507                            | 2507                             |
|   | $V_m$ (%) <sup>(1)</sup>                           | 2,8                             | 2,8                              |
|   | $P_{Marshall}$ (kN) <sup>(1)</sup>                 | 14,2                            | 14,7                             |
|   | IRC (%)  | <b>100</b>                      |                                  |

**Legenda:**  $\rho_{b,SSD}$  – Baridade, determinada pelo método hidrostático (SSD);  $V_m$  – Porosidade, calculada com base na baridade máxima teórica;  $P_{Marshall}$  – Resistência máxima (estabilidade Marshall corrigida); IRC – Índice de resistência conservada (no ensaio Marshall); (1) – Valores médios para cada grupo de provetes.

**Quadro 4.9 – Resultados do ensaio de sensibilidade à água sobre a mistura BB-B1 (norma EN 12697-12 – Método A), 15°C**

| Identificação da Mistura (tipo de material)                       | Grandeza   | Provetes ≈3 dias ao ar a 20°C | Provetes submetidos a vácuo e imersos ≈72 horas a 40°C |
|---|--|-------------------------------|--|
| <b>BB-B1</b><br>(Agregados basálticos e calcários e betume 35/50) | $\rho_{b,SSD}$ (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>(1)</sup> | 2510                          | 2512   |
|   | $V_m$ (%) <sup>(1)</sup>                           | 2,6                           | 2,6  |
|   | $P_{ITS}$ (kN) <sup>(1)</sup>                      | 22,4                          | 20,3   |
|   | $ITS_m$ (kPa) <sup>(1)</sup>                       | 2327                          | 2118   |
|   | ITSR (%)   | <b>91</b>                     |  |

**Legenda:**  $\rho_{b,SSD}$  – Baridade, determinada pelo método hidrostático (SSD);  $V_m$  – Porosidade, calculada com base na baridade máxima teórica;  $P_{ITS}$  – Resistência máxima (força de rotura) em tracção indirecta;  $ITS_m$  – Resistência (tensão de rotura) em tracção indirecta; ITSR – Resistência conservada à tracção indirecta; (1) – Valores médios para cada grupo de provetes.

De seguida, na Figura 4.1, apresentam-se graficamente os principais resultados obtidos. Nesta figura é possível visualizar, para cada tipo de mistura, a resistência média dos provetes (em kN), bem como o Índice de Resistência Conservada no ensaio Marshall e Resistência Conservada em Tracção Indirecta (em percentagem), quer se trate de ensaios realizados segundo a norma Militar ou a norma Europeia, respectivamente.

É importante referir que, apesar de se ter optado por representar no mesmo gráfico as resistências obtidas nos dois métodos de ensaio utilizados, os valores

não são directamente comparáveis pois correspondem a modos de aplicação da carga e conseqüentemente estados de tensão no provete, totalmente diferentes.

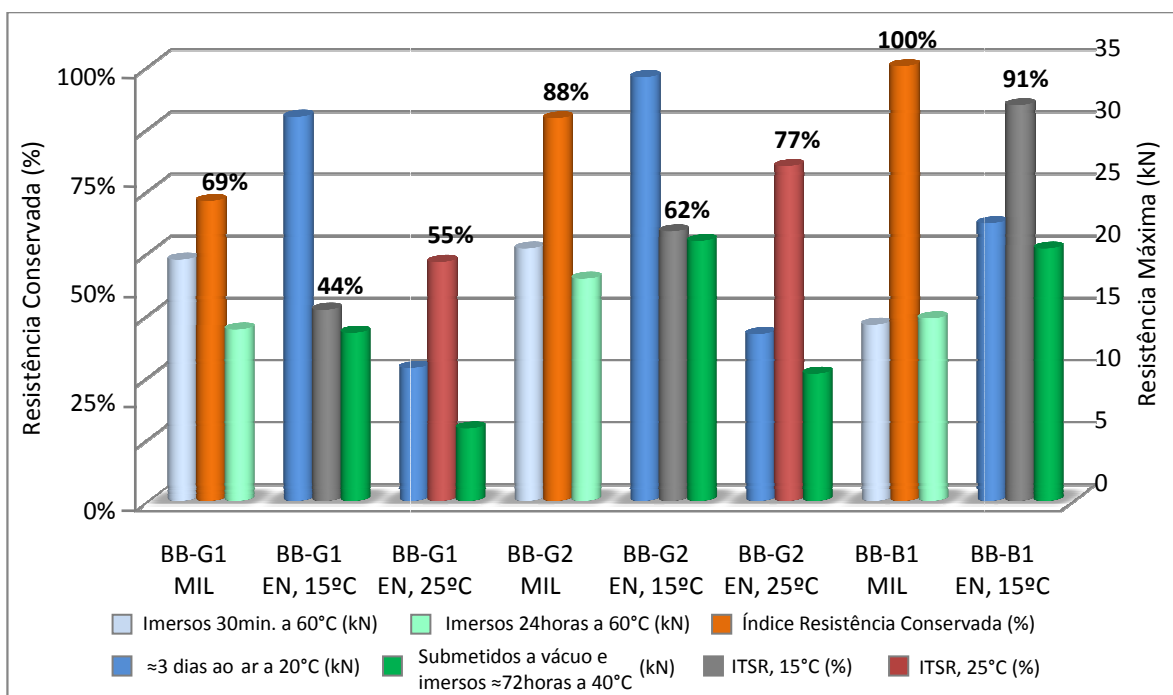


Figura 4.1 – Apresentação dos principais resultados obtidos

#### 4.2.4. Tipo de rotura dos provetes

No final do ensaio de tracção indirecta (para provetes ensaiados segundo a norma Europeia) fez-se a observação do tipo de rotura de cada provete, pois tal como foi referido, é importante analisar por que razão se deu a rotura do mesmo. Assim, no Quadro 4.10, são apresentados os resultados relativos à observação do tipo de rotura verificada por cada provete, do revestimento na superfície do agregado exposto e da presença de agregado fracturado ou esmagado.

Quadro 4.10 – Tipo de rotura dos provetes

| Identificação da Mistura | Tipo de Provetes   | Identificação do Provete | Tipo de rotura (T. Ind., def., comb.) | Revestimento de ligante na superfície do agregado exposto (NA, Rr, Er) | Presença de agregado fracturado ou esmagado (NA, Rf, Ef) |
|--------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------------|--|--|
| Mistura BB-G1 (15°C)     | Provetes a "seco"  | G1_3                     | Comb.                                 | N.A.   | Rf   |
|                          |                    | G1_5                     | Comb.                                 | N.A.   | Ef   |
|                          |                    | G1_6                     | Comb.                                 | N.A.   | Rf   |
|                          | Provetes "imersos" | G1_1                     | T.Ind.                                | Er   | Rf   |
|                          |                    | G1_2                     | T.Ind.                                | Er   | Rf   |
|                          |                    | G1_4                     | Comb.                                 | Rr   | Rf   |
| Mistura BB-G1 (25°C)     | Provetes a "seco"  | G1_16                    | Comb.                                 | N.A.   | Rf   |
|                          |                    | G1_18                    | Comb.                                 | N.A.   | Rf   |
|                          |                    | G1_20                    | Comb.                                 | N.A.   | Rf   |
|                          | Provetes "imersos" | G1_15                    | Comb.                                 | Er   | Rf   |
|                          |                    | G1_17                    | Comb.                                 | Er   | Rf   |
|                          |                    | G1_19                    | T.Ind.                                | Er   | Rf   |
| Mistura BB-G2 (15°C)     | Provetes a "seco"  | G2_2                     | Comb.                                 | N.A.   | Ef   |
|                          |                    | G2_4                     | Comb.                                 | N.A.   | Ef   |
|                          |                    | G2_5                     | T.Ind.                                | Rr   | Ef   |
|                          | Provetes "imersos" | G2_1                     | Comb.                                 | Rr   | Ef   |
|                          |                    | G2_3                     | Def.                                  | Er   | Rf   |
|                          |                    | G2_6                     | Comb.                                 | Er   | Rf   |
| Mistura BB-G2 (25°C)     | Provetes a "seco"  | G2_9                     | Comb.                                 | Rr   | Rf   |
|                          |                    | G2_11                    | Comb.                                 | Rr   | Rf   |
|                          |                    | G2_12                    | Comb.                                 | Rr   | Rf   |
|                          | Provetes "imersos" | G2_7                     | Comb.                                 | Er   | Rf   |
|                          |                    | G2_8                     | Comb.                                 | Er   | Rf   |
|                          |                    | G2_10                    | T.Ind.                                | Er   | Rf   |
| Mistura BB-B1 (15°C)     | Provetes a "seco"  | B1_2                     | Comb.                                 | N.A.   | Rf   |
|                          |                    | B1_4                     | Comb.                                 | N.A.   | Rf   |
|                          |                    | B1_6                     | T.Ind.                                | N.A.   | Rf   |
|                          | Provetes "imersos" | B1_1                     | Comb.                                 | Rr   | Rf   |
|                          |                    | B1_3                     | T.Ind.                                | N.A.   | Rf   |
|                          |                    | B1_5                     | T.Ind.                                | Rr   | Rf   |

**Legenda:** T. Ind. - Tracção indirecta evidente; Def - Deformação; Comb. - Combinada; NA - Nada a assinalar; Rr - Foram observadas deficiências no revestimento com reduzida expressão; Er - Foram observadas deficiências no revestimento com elevada expressão; Rf – Foram observados agregados fracturados ou esmagados com reduzida expressão; Ef - Foram observados agregados fracturados ou esmagados com elevada expressão

### 4.3. Análise de resultados

#### 4.3.1. Avaliação da influência do método de ensaio

Na Figura 4.2 representam-se graficamente os resultados obtidos nos ensaios de avaliação da sensibilidade à água das três misturas betuminosas fabricadas, realizadas segundo cada um dos métodos de ensaio em estudo.

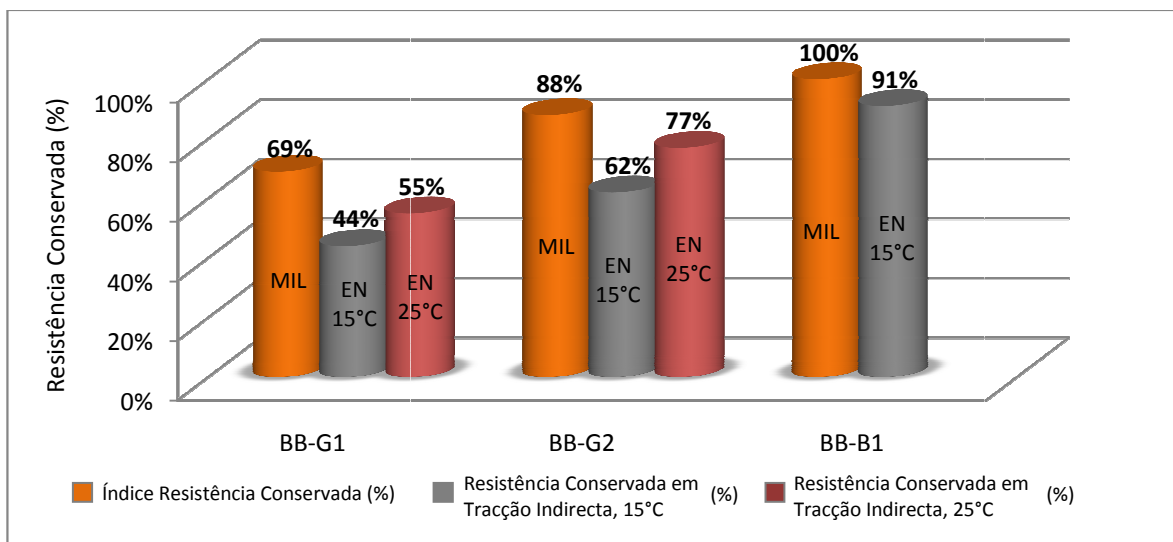


Figura 4.2 – Avaliação da influência do método de ensaio

Da observação da Figura 4.2, verifica-se que as três misturas ensaiadas (BB-G1, BB-G2 e BB-B1) exibem maiores valores de resistência conservada quando ensaiadas pelo método 104 da norma MIL-STD-620A e valores inferiores quando ensaiadas segundo o método A da norma EN 12697-12, para ambas as temperaturas de ensaio (15°C e 25°C).

Efectuando uma comparação entre os resultados obtidos por cada norma, verifica-se que os valores registados pela norma Europeia à temperatura de ensaio de 15°C são, em média, cerca de 20 pontos percentuais inferiores aos registados pela norma Militar, o mesmo se passando para a temperatura de ensaio de 25°C, onde se verifica uma diferença média de 12,5 pontos percentuais.

Cabe aqui referir que o Caderno de Encargos Tipo da E.P. (2009) especifica a avaliação da sensibilidade à água através do Índice de Resistência Conservada

(IRC) ou pela Resistência Conservada em Tracção Indirecta (ITSR), que traduz uma perda de resistência por parte de um grupo de provetes quando sujeito a condições mais severas sob o ponto de vista da acção da água. O referido Caderno de Encargos preconiza um valor mínimo de 80% de IRC para o tipo de misturas betuminosas em estudo (AC 14 surf), podendo concluir-se que a mistura BB-G1 não satisfaz os requisitos mínimos de IRC.

Relativamente aos valores de ITSR, foi possível verificar que o Caderno de Encargos Tipo da E.P. em vigor consagra apenas valores para duas misturas betuminosas fabricadas a quente para camada de desgaste: a mistura MBA-BBA (Mistura betuminosa aberta com betume modificado com alta percentagem de borracha) e para a mistura MBR-BBA (Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com alta percentagem de borracha), estando “por declarar” valores para todas as restantes misturas.

No que concerne às misturas MBA-BBA e MBR-BBA, foram definidos, respectivamente, os valores de 75% e 65% para ensaios realizados à temperatura de ensaio de 15°C. Este tipo de misturas betuminosas não poderá ser directamente comparada com as misturas em estudo em virtude de ser utilizado um betume modificado, no entanto poderão contribuir para a determinação do valor de ITSR a definir para as misturas betuminosas em estudo.

#### **4.3.2. Avaliação da influência do tipo de agregados**

Os agregados de granito e de basalto são provenientes de rochas ígneas enquanto os agregados de calcário são provenientes de rochas sedimentares. Quanto ao teor em sílica, os agregados graníticos são ácidos (> 65%), os agregados basálticos são básicos (45 a 52%) e os agregados calcários ultrabásicos (< 45%). Conforme o referido na secção 2.5.1, o sentido dos termos ácido e básico está relacionado com a carga eléctrica superficial das partículas do agregado, sendo, de forma geral, tanto maior a afinidade com betume quanto menor for o seu teor em sílica (Bernucci *et al.*, 2008). Em função da sua polaridade, os agregados de rochas classificadas como ácidas costumam

apresentar problemas de adesividade, enquanto os de rochas classificadas como básicas costumam apresentar melhor adesividade ao ligante.

Note-se que nas secções 3.2.1 e 3.2.2, foram analisadas algumas características destes materiais, tendo o basalto apresentado menores valores de índice de lamelação e índice de alongamento face aos valores apresentados pelo granito.

De seguida, na Figura 4.3, podem-se comparar os resultados obtidos pelas misturas BB-G2 e BB-B1, compostas pelo mesmo tipo de betume (35/50) e por agregado “granítico” e “basáltico e calcário”, respectivamente.

Em função das suas características, será de esperar melhor comportamento da mistura composta por agregado basáltico e calcário relativamente à mistura composta por agregado granítico.

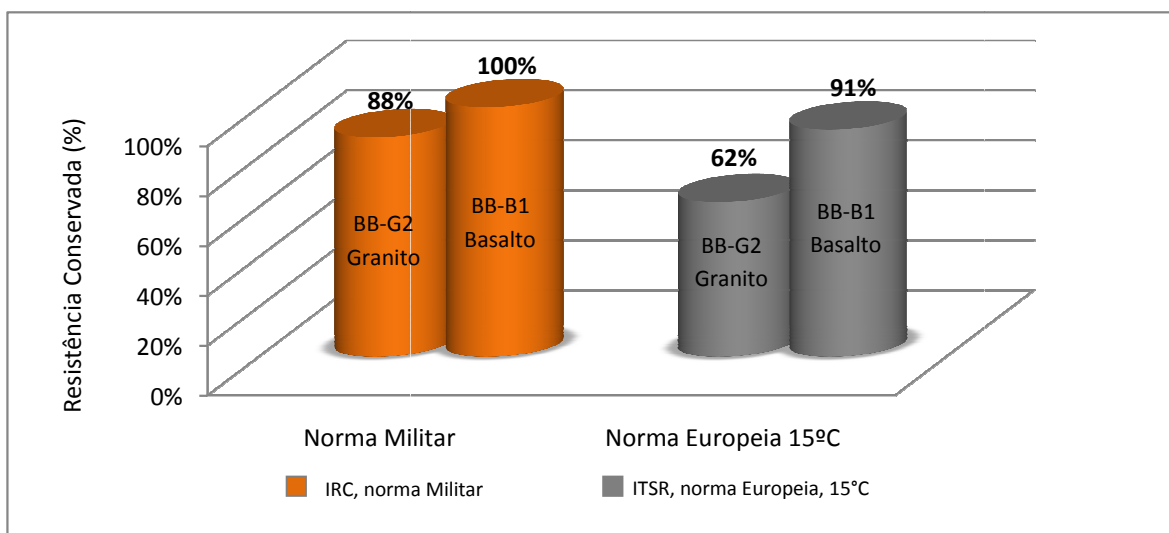
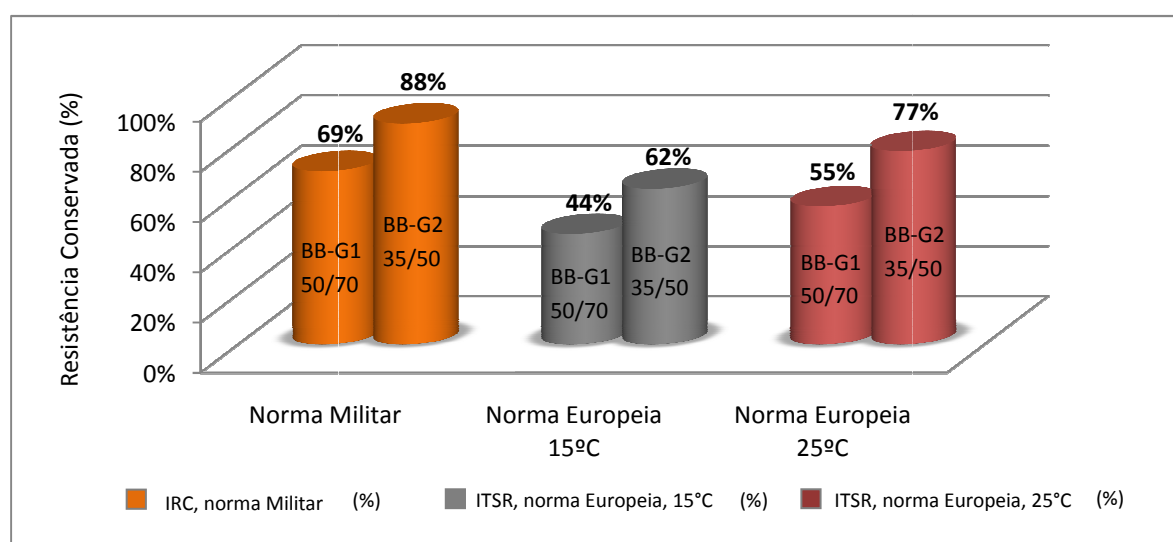


Figura 4.3 – Avaliação da influência do tipo de agregados

Conforme se pode observar pela Figura 4.3, os resultados demonstram isso mesmo, ou seja, quer no ensaio realizado segundo a norma Militar, quer no ensaio realizado segundo a norma Europeia, a mistura composta por basalto e calcário demonstrou melhor resistência à acção da água face à mistura composta por granito.

### 4.3.3. Avaliação da influência do tipo de betume

Conforme referido, no âmbito deste estudo, foram fabricadas duas misturas betuminosas em que apenas difere o tipo de betume utilizado: na mistura BB-G1 utilizou-se um betume de penetração nominal 50/70 (0,1 mm) e na mistura BB-G2 um betume de penetração nominal 35/50 (0,1 mm). De acordo com o referido na secção 2.3.3, a classificação dos betumes em 35/50 e 50/70 é efectuada de acordo com os valores de penetração nominal calculados com base no ensaio de penetração a 25°C (norma EN 1426), que consiste em medir a profundidade, em décimos de milímetro, a que penetra uma agulha com determinadas características durante cinco segundos num betume à temperatura de 25°C. Pode-se concluir do ensaio para determinação da penetração que, quanto menor for esse valor, maior será a sua “dureza” e consequentemente, a sua resistência às solicitações. Com base neste pressuposto, será de esperar que a mistura BB-G2, fabricada com betume 35/50, resista com maior eficiência ao condicionamento efectuado sobre os provetes. Com o objectivo de efectuar uma análise comparativa entre as duas misturas referidas (BB-G1 e BB-G2), apresentam-se na Figura 4.4 os resultados obtidos nos ensaios para avaliação da sensibilidade à água, segundo os métodos/condições de ensaio passíveis de comparação.



**Figura 4.4 – Avaliação da influência do tipo de betume**

Da observação da Figura 4.4 verifica-se que para o ensaio de sensibilidade à água realizado por qualquer um dos métodos de ensaio utilizado, a mistura em que se

utilizou betume mais duro (BB-G2) apresentou sempre valores superiores de resistência conservada.

#### 4.3.4. Avaliação da influência da variação da temperatura

O método A da norma Europeia EN 12697-12:2008 permite que o condicionamento dos provetes seja efectuado a uma temperatura de ensaio de tracção indirecta compreendida entre 5°C e 25°C. Conforme já foi referido, o mesmo método recomenda a temperatura de ensaio de 25°C com o intuito de maximizar a influência da força adesiva do ligante e minimizar a influência dos agregados fracturados na linha de rotura. Por outro lado, a norma EN 13108-20 preconiza uma temperatura de 15°C para efeitos de ensaio de tipo iniciais de misturas betuminosas abrangidas pela marcação C.E (Batista *et al.*, 2008). Assim, procedeu-se à avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas segundo as duas temperaturas de ensaio de tracção indirecta referidas, apresentando-se os resultados obtidos na Figura 4.5.

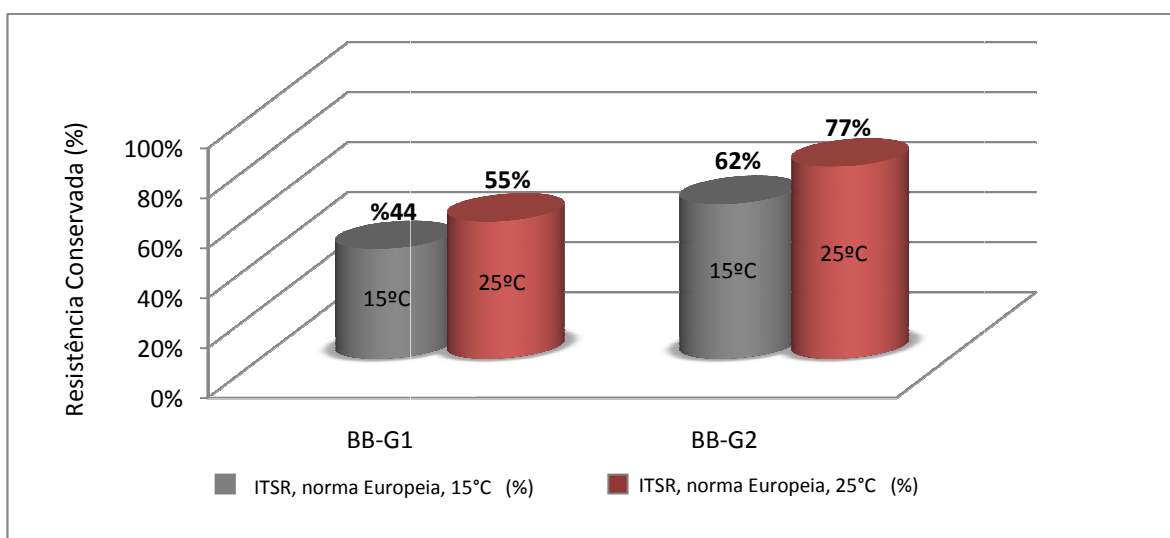


Figura 4.5 – Avaliação da influência da variação da temperatura

Pela análise da Figura 4.5, pode-se verificar que os valores de resistência conservada em tracção indirecta obtidos pela temperatura de ensaio de 15°C são, para as misturas ensaiadas, inferiores aos obtidos à temperatura de ensaio de 25°C. As diferenças registadas não são, no entanto, relativamente significativas,

na ordem de 11 e 15 pontos percentuais, respectivamente, para as misturas BB-G1 e BB-G2.

Ainda de referir que, apesar dos ensaios realizados à temperatura de 15°C terem produzido menores percentagens de resistência conservada, os valores da resistência oferecida (em kN), foram substancialmente superiores aos ensaios realizados à temperatura de 25°C (Figura 4.1).

#### **4.3.5. Avaliação do tipo de rotura dos provetes**

No que concerne à avaliação do tipo de rotura dos provetes, foi possível verificar (Quadro 4.10) que em geral foi combinada, ou seja, que existe uma linha de rotura mas não totalmente evidente, sendo que apenas foi verificada por uma vez a rotura por deformação (sem linha de rotura evidente). As maiores deficiências no revestimento do agregado foram, de forma geral, verificadas nos grupos de provetes “imersos”, sendo esta uma característica que se pode relacionar com a acção da água, que funciona como “força de rotura” entre o ligante e o agregado. Por fim, no que diz respeito à presença de agregados fracturados ou esmagados, é de notar que em todos os provetes ensaiados existem, em maior ou menor expressão, agregados fracturados ou esmagados, sendo que, em geral, esse fenómeno foi de reduzida expressão. De referir ainda que os agregados fracturados ou esmagados na mistura composta por basaltos e calcários se deu principalmente no agregado de dimensão nominal 0/4 mm, composta por calcário.

#### **4.4. Considerações finais**

Os resultados obtidos revelaram alguns aspectos que importa salientar, como é o caso dos valores de resistência conservada obtidos pela aplicação da norma Militar serem sempre superiores aos registados pela norma Europeia, a ambas temperaturas de ensaio (15°C e 25°C).

De referir que, estudos recentemente realizados no LNEC (Batista *et al.* 2008; Batista e Antunes, 2009) também indicam a mesma tendência.

Outro aspecto a salientar é que, a norma Europeia tende a efectuar uma maior diferenciação entre os resultados quando a mistura apresenta piores características do ponto de vista de acção da água. Esse facto é evidenciado pela mistura BB-G1, a que apresentou valores de resistência à água mais reduzidos, onde é possível verificar que a diferença entre os resultados apresentados pela norma Militar e os resultados apresentados pela norma Europeia são, respectivamente, 25 e 14 pontos percentuais para a temperatura de ensaio de 15°C e 25°C. Por outro lado, a mistura BB-B1, que apresentou melhores valores de sensibilidade à água, revelou uma diferença de resultados entre as duas normas (Militar e Europeia à temperatura de ensaio de 15°C) de apenas 9 pontos percentuais.

Estas e outras conclusões são analisadas no capítulo seguinte.

---

## **CAPÍTULO**

### **5**

---

## **Conclusões e Trabalhos Futuros**

*Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões retiradas da execução deste trabalho, com especial atenção para o trabalho prático realizado. É também efectuada uma proposta de possíveis trabalhos futuros a desenvolver sobre este tema.*

## **5. Conclusões e Trabalhos Futuros**

### **5.1. Conclusões**

Neste capítulo, apresentam-se as principais conclusões obtidas no âmbito do trabalho desenvolvido para avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas. Para este trabalho foram fabricadas e avaliadas em laboratório três misturas betuminosas, utilizando na sua constituição agregados “graníticos”, “basálticos e calcários” e betumes com penetração  $35/50 \times 10^{-1}$  mm e  $50/70 \times 10^{-1}$  mm.

Seguidamente apresentam-se as três misturas betuminosas utilizadas:

- BB-G1 – Mistura Betuminosa densa composta por granito e betume 50/70;
- BB-G2 – Mistura Betuminosa densa composta por granito e betume 35/50;
- BB-B1 – Mistura Betuminosa densa composta por basalto, calcário e betume 35/50;

Os trabalhos desenvolvidos na parte experimental em laboratório compreenderam a avaliação da sensibilidade à água por dois métodos: o primeiro método preconizado pela norma Militar Americana MIL-STD-620A – Método 104 e o segundo pela norma Europeia EN 12697-12:2008 – Método A. Ambos os métodos têm como filosofia a separação dos provetes a ensaiar em dois grupos com características muito semelhantes, sendo depois um dos grupos condicionado em condições menos severas sob o ponto de vista da acção da água e o outro em condições mais severas. O quociente entre a resistência média dos dois grupos de provetes fornece um Índice de Resistência Conservada, ou Resistência Conservada em Tracção Indirecta, quer se trate do ensaio realizado segundo a norma Militar Americana MIL-STD-620A ou segundo a norma Europeia EN 12697-12, respectivamente.

Apesar da mesma filosofia, os dois métodos têm algumas diferenças, nomeadamente no que diz respeito ao tempo de condicionamento dos provetes, à temperatura de condicionamento, ao método de ensaio, entre outras.

Após analisados os resultados obtidos no decorrer do trabalho, considera-se que foram atingidos os objectivos a que este trabalho se propôs:

- Melhor compreensão do comportamento das misturas betuminosas à acção da água;
- Contribuição para o estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas, com a avaliação de três misturas betuminosas densas;
- Análise comparativa da norma Europeia EN 12697-12:2008 – Método A, quando comparada com a norma Militar Americana MIL-STD-620A – Método 104.

Os resultados dos ensaios para avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas permitiram obter as seguintes conclusões principais:

- A norma Militar apresentou valores de resistência conservada superiores aos observados pela norma Europeia, em todas as misturas ensaiadas.
- Os resultados obtidos pela aplicação da norma Militar situaram-se entre os 69% e os 100% e os da norma Europeia entre os 44% e os 91%, sendo os piores resultados obtidos pela mistura BB-G1 e os melhores pela mistura BB-B1.
- A norma Europeia evidenciou uma maior diferenciação de resultados entre as diferentes misturas;
- Avaliando a influência dos dois tipos de agregados, foi a mistura composta essencialmente por basalto que apresentou melhores resultados face à mistura produzida com granito.
- As misturas compostas por betume mais “duro” (35/50) também conduziram a melhores valores de sensibilidade à água, em comparação com o betume 50/70.
- Relativamente à influência da temperatura no ensaio de tracção indirecta, os valores de resistência conservada (%) obtidos à temperatura de ensaio

de 15°C registaram piores valores sensibilidade à água do que os obtidos à temperatura de ensaio de 25°C, apesar de oferecerem maior resistência em valor absoluto (kN).

- O Caderno de Encargos Tipo da E.P. (2009), exige um Índice de Resistência Conservada mínimo de 80% para misturas ensaiadas segundo a norma Militar, valor que não foi verificado pela mistura BB-G1 (69%), sendo no entanto garantido pelas outras duas misturas ensaiadas, BB-G2 (88%) e BB-B1 (100%).
- O tipo de rotura observada nos provetes foi, em geral, combinada. As maiores deficiências no revestimento do agregado foram observadas para o grupo de provetes “imersos” e foi permanente presença de agregado fracturado nos provetes ensaiados, apesar de geralmente ser de reduzida expressão.

Com base nos resultados obtidos, pode ser efectuada uma análise final sobre valores mínimos de Resistência Conservada em Tracção Indirecta (ITSR) para as misturas betuminosas estudadas.

Tal como foi referido, o Caderno de Encargos Tipo da E.P. (2009) exige um Índice de Resistência Conservada mínimo de 80% para misturas do tipo AC14 surf, ensaiadas segundo a norma Militar. Como também foi verificado, os valores de sensibilidade à água obtidos pela norma Europeia foram sempre inferiores aos da norma Militar, cerca de 20 pontos percentuais, em média, para a temperatura de ensaio de 15°C e 12,5 pontos percentuais, em média, para a temperatura de 25°C.

Foi também possível verificar que o Caderno de Encargos Tipo da E.P. em vigor já possui valores de ITSr para duas misturas betuminosas fabricadas a quente para camada de desgaste: as misturas MBA-BBA e MBR-BBA. Para a mistura MBA-BBA é definido um valor mínimo de 75% de ITSr e para a mistura MBR-BBA um valor mínimo de 65%, sendo ambos os valores determinados para a temperatura de ensaio de 15°C.

Neste sentido, face aos resultados obtidos pela norma Europeia em relação à norma Militar e aos resultados observados pelas misturas MBA-BBA e MBR-BBA, estima-se que o valor de ITSR a vigorar em verificações técnicas seja inferior em cerca de 10 a 20 pontos percentuais relativamente aos valores preconizados pela norma Militar, para o tipo de misturas betuminosas em estudo e para ensaios realizados à temperatura de 15°C.

## 5.2. Trabalhos futuros

O trabalho que foi desenvolvido pretendeu contribuir para a melhor caracterização da sensibilidade à água de misturas betuminosas tradicionais, fazendo parte de um estudo mais alargado que está a ser desenvolvido sobre este tema.

O Caderno de Encargos Tipo da E.P. em vigor, de Fevereiro de 2009, contempla as seguintes misturas betuminosas a quente para camada de desgaste:

- AC14 surf (BB), da qual fazem parte as misturas betuminosas estudadas;
- AC14 surf (BB) com incrustação de agregados duros;
- AC14 surf (BBr);
- AC10 surf (mBBr);
- PA 12,5 (BBd);
- MBA-BBM;
- MBR-BBM;
- MBA-BBA;
- MBR-BBA.

De todos estes tipos de misturas betuminosas, tal como já foi referido, apenas as últimas duas (MBA-BBA e MBR-BBA) já possuem valores de referência de ITSR consagrados do Caderno de Encargos Tipo em vigor, estando “por declarar” valores para todos os outros tipos de misturas.

Para além das misturas betuminosas a quente para camada de desgaste, também estão “por declarar” valores de referência de sensibilidade à água para misturas betuminosas a quente para camadas de base (AC32 base (MB), AC20 base (MB e MBAM)) e misturas betuminosas a quente para camadas de regularização/ligação

(AC20 bin ligante (MB e MBD), AC16 bin ligante (MBAM), AC14 bin ligante (BB) e AC4 bin ligante (AB)).

Uma vez que cada tipo de mistura pode ser composta por diferentes tipos de agregados e betumes, torna-se elevado o número de combinações possíveis e, conseqüentemente, o número de ensaios a realizar.

Neste contexto, é evidente que existe ainda muito trabalho a executar com vista a dotar o Caderno de Encargos Tipo da E.P. em vigor (2009), com todos os valores de sensibilidade à água aí consagrados.

## Referências Bibliográficas

APORBET (1998) – *Misturas Betuminosas. Contribuição para a normalização do fabrico e da aplicação*. APORBET – Associação Portuguesa de Fabricantes de Misturas Betuminosas.

Batista, F.A., Antunes, M.L. e Fonseca, P. (2008) – *Avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas com betume modificado com alta percentagem de borracha*. Comunicação em CD-ROM do V Congresso Rodoviário Português “Estradas 2008”, CRP, 10p.

Batista, F.A. e Antunes, M.L. (2009) – *Ensaios de comparação interlaboratorial para avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas compactadas*. Relatório LNEC nº181/2009, Processo 0702/01/17243.

Bernucci, L.B., Motta, L.M.G., Ceratti, J.A.P. e Soares, J.B. (2008) – *Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros*. PETROBRAS e ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos. Rio de Janeiro, 2008.

Branco, F., Pereira, P. e Santos, L.P. (2006) – *Pavimentos Rodoviários* (3ª Reimpressão). Almedina.

*Caderno de Encargos Tipo Obra, Volume 14.03* (Fevereiro de 2009) – Estradas de Portugal, S.A. Acedido em 16 de Julho de 2009. Disponível em [http://www.estradasdeportugal.pt/site/v3/docs/caderno\\_encargos/Microsoft%20Word%20-%20Cap14.03%20-%20Pavimenta%C3%A7%C3%A3o%20Fev.2009%20Revis%C3%A3o%20PG.pdf](http://www.estradasdeportugal.pt/site/v3/docs/caderno_encargos/Microsoft%20Word%20-%20Cap14.03%20-%20Pavimenta%C3%A7%C3%A3o%20Fev.2009%20Revis%C3%A3o%20PG.pdf)

Copeland, A.R. (2007) – *Influence of moisture on bond strength of asphalt-aggregate systems*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Vanderbilt University, Nashville - Tennessee.

EN 12697-6:2003+A1:2007– European standard EN 12697 - Bituminous mixtures – *Test methods for hot mix asphalt. Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens.*

EN 12697-12:2003 – European standard EN 12697 - Bituminous mixtures – *Test methods for hot mix asphalt. Part 12 - Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.*

EN 12697-12:2008 – European standard EN 12697 - Bituminous mixtures – *Test methods for hot mix asphalt. Part 12 - Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.*

EN 12697-23:2003 – European standard EN 12697 - Bituminous mixtures – *Test methods for hot mix asphalt. Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.*

EN 12697-29:2002 – European standard EN 12697 - Bituminous mixtures – *Test methods for hot mix asphalt. Part 29: Determination of the dimensions of bituminous specimen.*

EN 12697-30:2004+A1:2007– European standard EN 12697 - Bituminous mixtures – *Test methods for hot mix asphalt. Part 30 – Specimen preparation by impactor.*

EN 13108-1:2006 – Bituminous mixtures – Material specifications. Part 1: *Asphalt concrete.*

EN 13108-20:2006 – Bituminous mixtures – Material specifications. Part 20: *Type testing.*

EN 1426:2007 (Ed. 2) – Bitumen and bituminous binders. *Determination of needle penetration.*

EN 1427:2007 (Ed. 2) – Bitumen and bituminous binders. *Determination of the softening point. Ring and Ball method.*

---

*Extensão da rede nacional rodoviária (Km) por localização geográfica (Distrito) e tipo de rede rodoviária* (Outubro de 2008) – Instituto Nacional de Estatística (INE). Acedido em 17 de Junho de 2009. Disponível em [http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INEexpgid=ine\\_indicadoreseindOcorrCod=0002129eselTab=tab2](http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INEexpgid=ine_indicadoreseindOcorrCod=0002129eselTab=tab2)

Furlan, A.P., Gouveia, L.T., Fabbri, G.T.P. e Fernandes Jr., J.L. (2004) – *Influência de características dos agregados na susceptibilidade a dano por umidade de misturas asfálticas*. Anais do 17º Encontro de Asfalto. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP). Rio de Janeiro, Dezembro de 2004, 8p.

Gouveia, L.T., Furlan, A.P., Parreira, A.B., Júnior, J.L.F. e Fabbri, G.T.P. (2004) – *Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e a sua influência na susceptibilidade à umidade*. Departamento de transportes – Escola de engenharia de São Carlos – USP. 12p.

Hunter, R.N. (2000) – *Asphalts in road construction*. Acedido em 17 de Julho de 2009. Disponível em [http://books.google.pt/books?id=77snb03IAV4C&dq=Asphalts+in+road+construction+hunter&printsec=frontcover&source=bl&ots=6vz\\_1WKLNc&sig=eOOOEL4-Af1zBZpIX\\_UX65loOts&hl=pt-PT&ei=ufpgSuPvFZGhjAehmenMDg&sa=X&oi=book\\_result&ct=result&resnum=1](http://books.google.pt/books?id=77snb03IAV4C&dq=Asphalts+in+road+construction+hunter&printsec=frontcover&source=bl&ots=6vz_1WKLNc&sig=eOOOEL4-Af1zBZpIX_UX65loOts&hl=pt-PT&ei=ufpgSuPvFZGhjAehmenMDg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=1)

Koenders, B., Colange, J., Stoker, D. e Andersen, E. (2008) – *Testing of compacted asphalt as a function of mixture variables and conditioning parameters*. ISAP - International Symposium on Asphalt Pavements and Environment (pp.739-750). Zurich.

Mahmoud, E.M. (2005) – *Development of experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage*. Dissertação para a obtenção do grau de mestre em Ciências. Texas A&M University, Colege Station, USA. Acedido em 17 de Julho de 2009. Disponível em <http://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/4959/etd-tamu-2005C-CVEN-Mahmoud.pdf?sequence=1>

MIL-STD-620A – Method 100 (1966) – *Standard test method for unit weight, Marshall stability, and flow of bituminous mixtures*.

MIL-STD-620A – Method 104 (1966) – *Standard test method for measurement of reduction in Marshall stability of bituminous mixtures caused by immersion in water.*

Miranda, H.M.B. (2008) – *Resistência à Fadiga de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Alta Percentagem de Borracha.* Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Transportes. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Portugal.

Miranda, H.M.B. (2008) – *Elementos de apoio à Unidade Curricular de Pavimentação.* Mestrado em Engenharia Civil, perfil de Vias de Comunicação e Transportes, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal.

Neves, J.M.C. (2005) – *Aspectos da modelação no dimensionamento de pavimentos rodoviários.* Elementos de apoio à disciplina de Pavimentação. Mestrado em Transportes, Perfil de Vias de Comunicação, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

Pellinen, T., Xiao, J. e Shah, A. (2008) – *The effect of aging on mechanical properties of hot-mix asphalt.* International Society for Asphalt Pavements Symposium, 18<sup>th</sup>-20<sup>th</sup> August 2008, Zurich. Switzerland.

Shell (2003) – *The Shell bitumen handbook.* Fifth Edition, Thomas Telford Publishing, London, UK.

Terrel, R.L. e Al-Swailmi, S. (1994) - *Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection.* SHRP-A-403. National Research Council, Washington DC. Acedido em 21 de Julho de 2009. Disponível em <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-403.pdf>

Vasconcelos, K.L., Bashin, A., Little, D.N. e Soares, J.B. (2006) – *Avaliação do dano por umidade induzida e da recuperação de trincas de mástique.* Anais do 18<sup>o</sup> Encontro de Asfalto. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás (IBP). Rio de Janeiro, Maio de 2006, 8p.

## Bibliografia Consultada

Coutinho, S.C. (1999) – *Elementos de apoio à Unidade Curricular de Materiais de Construção 1*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. Acedido em 18 de Julho de 2009. Disponível em <http://paginas.fe.up.pt/~jcouti/agregpart1.pdf>

Kringos, N., Scarpas, A. e Azari, H. (2009) – *Combined experimental and numerical analysis of moisture infiltration in the modified Lottman test*. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials. Taylor e Francis Group. (pp. 261-270). United Kingdom.

Little, A.H.D. (December 2005) – *Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effect of water on the adhesive bond*. Texas Transport Institute. Texas.

Menezes, M. V. P. (2008) – *Estudo das características de superfície de pavimentos rodoviários para análise de segurança do tráfego*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Neves, J.M.C. (2001) – *Contribuição para a modelação do comportamento estrutural de pavimentos rodoviários flexíveis*. Tese de Doutoramento. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal

Rubio, B., Jiménez, R., Pérez, F. e Martínez, A. (2009) – *Assessment of moisture effect on open graded mixes using water sensitivity and Cantábrio after immersion test*. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials. Taylor e Francis Group. (pp. 271-281). United Kingdom.

Scholz, T.V., Brown, S.F. (1996) – *Factors affecting durability of paving mixtures. Performance and Durability of Bituminous Materials - Proceedings of Symposium, University of Leeds, March 1994*. Edited by J.G. Cabrera and J.R. Dixon. Published by FN Spon, an imprint of Chapman e Hall, first edition 1996, (pp. 173-190).

Shah, Brij D. (August 2003) – *Evaluation of moisture damage within asphalt concrete mixes*. Master's thesis, Texas A&M University.

Twagira, M.E. e Jenkins, K.J. (2009) – *Moisture damage on bituminous stabilized materials using a MIST device*. *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*. Taylor e Francis Group. (pp. 283-293) United Kingdom.