



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Pavimentos Betuminosos Permeáveis Resistência à Deformação Permanente da Camada Superficial

(Versão final após defesa pública)

Ricardo José Camilo Tenreiro

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil
(ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof.^a Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida

Covilhã, julho de 2016

Em memória do meu avô Aníbal.

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação representa o culminar de uma etapa fundamental da minha vida ao concluir este percurso académico, o que não seria possível sem um número considerável de pessoas e entidades a quem manifesto o meu agradecimento.

Começo por agradecer à minha orientadora, Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida, pelo apoio incondicional, pela ajuda, pela disponibilidade, pelo constante incentivo e encorajamento, pelos conselhos e principalmente pela amizade e pelos momentos de boa disposição passados ao longo do presente trabalho.

À Universidade da Beira Interior, pelo contributo e condições disponibilizadas durante a minha formação e acolhimento ao longo destes cinco anos.

A todos os docentes que marcaram este meu percurso académico e me transmitiram todo o seu conhecimento para poder chegar a esta etapa final.

À CEPSA Portuguesa S.A., pelos betumes disponibilizados e pelo seu contributo na realização deste trabalho.

À empresa JRS pelo fornecimento das fibras celulósicas.

Aos Srs. Albino, Félix e Luciano, técnicos dos laboratórios de construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, pela grande ajuda prestada na execução de todo o trabalho experimental.

Ao meu amigo Micael, pela amizade, companheirismo, incentivo, ajuda e motivação ao longo deste trabalho.

Aos meus companheiros e amigos de casa, Tiago e Manuel, pelos cinco magníficos anos que pude partilhar com eles e que levarei para a vida, e também ao meu amigo Filipe que, mesmo não morando, marcou a sua presença, companhia e grande amizade.

Ao Mauro e ao Luís que embora fisicamente ausentes durante este ano, deram apoio, motivação e grande amizade mesmo com os milhares de quilómetros que nos separaram.

Às minhas colegas e amigas, Liliana e Márcia, por toda a amizade, motivação, incentivo e ajuda durante todo o trabalho laboratorial, sem elas nada seria possível.

Ao meu grande amigo Fábio, pela amizade que perdura ao longo dos anos e me permitiram chegar aqui graças aos seus conselhos e incentivos.

A todos os meus verdadeiros amigos, que de alguma forma, sempre souberam transmitir a força necessária, e um incansável apoio moral.

À minha família, em especial aos meus pais, ao meu irmão, à minha cunhada, aos meus avós e aos meus padrinhos de batismo, por me acompanharem ao longo da vida e me terem dado carinho e condições para a minha formação.

Por último, mas não menos importante, à minha namorada, Inês Mendonça, por todo o apoio, motivação, encorajamento, ajuda, incentivo e compreensão. Agradeço-lhe toda a paciência que teve comigo durante a elaboração do presente trabalho. Prometo devolver-lhe todo o tempo que passei no laboratório durante a parte experimental. Que esta dissertação seja o virar de uma página na nossa vida e assim possamos progredir no futuro.

A todos um Muito Obrigado.

RESUMO

A crescente ocupação urbana e o desenvolvimento dos acessos rodoviários, especialmente em perímetro urbano, têm levado a uma progressiva impermeabilização dos solos, provocando um aumento do escoamento superficial e, por consequência, uma diminuição da taxa de infiltração de água nos lençóis freáticos. Surge assim a necessidade de repensar os pavimentos utilizados.

Este estudo tem como principal objetivo avaliar a viabilidade do uso de fibras celulósicas em misturas betuminosas drenantes a aplicar em camadas superficiais de pavimentos permeáveis, com vista a garantir um adequado desempenho mecânico no que diz respeito à resistência à deformação permanente deste tipo de misturas. Com esta solução será possível conceber melhores práticas de resiliência e adaptação adequada para fazer face ao agravamento dos fenómenos climáticos extremos que conduzem a riscos associados a inundações e secas.

No estudo de formulação de cada tipo de mistura, realizado com base no ensaio cântabro, observou-se que a temperatura da água é um fator bastante relevante no comportamento de misturas com adição de fibras, verificando-se um aumento na ordem dos 50 % de perdas de massa quando se passa de uma temperatura de água de 20 °C para 60 °C.

Ainda na presente dissertação, realizou-se o ensaio de simulação, *wheel tracking test*, tendo em conta o preconizado para equipamento pequeno e acondicionamento ao ar, procedimento B, adotando-se uma temperatura de ensaio de 60 °C e aplicando-se a cada lajeta 10 000 ciclos de carga. Dos resultados obtidos verificou-se que as misturas com adição de fibras apresentam um incremento na resistência à deformação permanente, obtendo-se uma profundidade de rodeira nas lajetas bastante inferior em comparação com as misturas sem adição de fibras.

Na generalidade, concluiu-se ao longo da presente dissertação que a adição de fibras celulósicas levou a uma melhoria bastante significativa no comportamento de misturas betuminosas drenantes à deformação permanente, permitindo uma utilização deste tipo de misturas com garantias de bom funcionamento, durabilidade e consequente aumento da segurança para os utentes.

Palavras-chave

Caracterização Mecânica; Deformação Permanente; Ensaio Cântabro; Fibras Celulósicas; Mistura Betuminosa Drenante; Pavimentos Permeáveis; *Wheel Tracking*.

ABSTRACT

The expanding urban occupation and the development of road access, especially in urban areas, has led to increased soil sealing, leading to an extraordinary runoff and then to a decrease in the rate of water infiltration into the groundwater. This creates an urge to rethink the pavements used.

The main goal of this study is to evaluate the feasibility of using cellulosic fibers in porous asphalt to be applied in superficial layers of permeable pavements, ensuring proper mechanical performance concerning the resistance to permanent deformation of such kind of mixtures. With this solution, it will be possible to create better practices of resilience and adaptation, suitable to face extreme weather events that lead to risks associated with floods and droughts.

While studying the formulation of each kind of mixture, based on cântabro particle loss test, it was verified that water temperature has a very important impact on the behavior of mixtures with the addition of fibers. An increase of around 50 % on mass losses was observed when going from a water temperature of 20 °C to one of 60 °C.

Also in this essay, it was performed the wheel tracking test simulation, observing the recommended requirements of small-size devices conditioned in air, procedure B, adopting a test temperature of 60 °C and applying to each specimen 10,000 load cycles. The results have shown that the mixtures with the addition of fibers presented an improved resistance to permanent deformation, obtaining a much lower rut depth than in mixtures without the addition of fibers.

Overall, during the current essay, it has been concluded that the addition of cellulosic fibers has led to an important improvement on the response of porous asphalt to permanent deformation, allowing the use of this kind of mixtures to ensure a proper functioning, durability and, ultimately, an enhanced user safety.

Keywords

Mechanical characterization; Permanent Deformation; Cântabro Particle Loss Test; Cellulosic Fibers; Porous Asphalt; Permeable Pavements; Wheel Tracking.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 - Introdução | 1 |
| 1.1 Enquadramento temático | 1 |
| 1.2 Objetivos do estudo | 1 |
| 1.3 Organização do trabalho desenvolvido | 2 |
| CAPÍTULO 2 - Estado de arte sobre pavimentos permeáveis | 5 |
| 2.1 Introdução | 5 |
| 2.2 Aplicação em outros países | 6 |
| 2.3 Sistemas de pavimentos permeáveis | 7 |
| 2.3.1 Sistema de infiltração total | 9 |
| 2.3.2 Sistema de infiltração parcial | 9 |
| 2.3.3 Sistema sem infiltração | 10 |
| 2.4 Materiais constituintes dos pavimentos permeáveis | 10 |
| 2.4.1 Camada de desgaste | 10 |
| 2.4.2 Camada de base e sub-base | 15 |
| 2.5 Estruturas tipo de pavimentos betuminosos permeáveis | 16 |
| 2.6 Durabilidade e manutenção de pavimentos betuminosos permeáveis | 21 |
| CAPÍTULO 3 - Caracterização mecânica de misturas betuminosas drenantes | 23 |
| 3.1 Introdução | 23 |
| 3.2 Comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente | 24 |
| 3.2.1 Formação de rodeiras em pavimentos rodoviários flexíveis | 24 |
| 3.2.2 Fatores que provocam a deformação permanente | 26 |
| 3.2.3 Consequências da deformação permanente | 34 |
| 3.3 Ensaios laboratoriais de caracterização da resistência à deformação permanente | 35 |
| 3.3.1 Ensaios empíricos | 35 |
| 3.3.2 Ensaios fundamentais | 36 |
| 3.3.3 Ensaios de simulação | 42 |
| 3.4 Análise da deformação permanente em misturas betuminosas drenantes | 47 |
| CAPÍTULO 4 - Trabalho experimental | 53 |
| 4.1 Introdução | 53 |
| 4.2 Caracterização dos materiais usados | 54 |
| 4.2.1 Agregados | 54 |
| 4.2.2 Ligante betuminoso | 57 |
| 4.2.3 Fibras celulósicas | 57 |
| 4.2.4 Cal hidráulica | 59 |
| 4.3 Formulação das misturas betuminosas drenantes | 59 |

| | |
|---|----|
| 4.3.1 Composição de agregados | 61 |
| 4.3.2 Estimativa da quantidade inicial de betume..... | 62 |
| 4.3.3 Teor ótimo de betume | 62 |
| 4.4 Caracterização das misturas betuminosas drenantes | 72 |
| 4.4.1 Módulo de rigidez por ensaio de tração indireta | 72 |
| 4.4.2 Deformação permanente | 74 |
| | |
| CAPÍTULO 5 - Considerações finais | 83 |
| 5.1 Conclusões | 83 |
| 5.2 Trabalhos futuros | 85 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 87 |
| | |
| ACERVO NORMATIVO | 93 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Sistema de infiltração total (adaptado de Interpave, 2010) | 9 |
| Figura 2.2 - Sistema de infiltração parcial (adaptado de Interpave, 2010) | 9 |
| Figura 2.3 - Sistema sem infiltração (adaptado de Interpave, 2010) | 10 |
| Figura 2.4 - Geocélulas plásticas (Fonte: www.abms.com.br consultado a 24/02/2016) | 12 |
| Figura 2.5 - Betão poroso (Fonte: http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/13/imagens/i327370.jpg consultado a 24/02/2016) | 12 |
| Figura 2.6 - Blocos vazados de betão | 13 |
| Figura 2.7 - Blocos intertravados de betão | 13 |
| Figura 2.8 - Mistura betuminosa drenante | 15 |
| Figura 2.9 - Representação esquemática de pavimento com as três camadas fundamentais (adaptado de Drainage Design Manual, 2009) | 15 |
| Figura 2.10 - Estrutura tipo I (adaptado de Diniz, 1980) | 16 |
| Figura 2.11 - Estrutura tipo II (adaptado de Briggs <i>et al.</i> , 2009 citado por Korkealaaskso <i>et al.</i> , 2014) | 17 |
| Figura 2.12 - Estrutura tipo III (adaptado de Basch <i>et al.</i> , 2012) | 17 |
| Figura 2.13 - Estrutura tipo IV (adaptado de Terra Tech, 2009 citado por Korkealaaskso <i>et al.</i> , 2014) | 18 |
| Figura 2.14 - Estrutura tipo V (adaptado de Lebens, 2012) | 18 |
| Figura 2.15 - Estrutura tipo VI (adaptado de Carvalho, C., 2015) | 19 |
| Figura 2.16 - Estrutura tipo VII (adaptado de Tomaz, P., 2009) | 19 |
| Figura 2.17 - Estrutura tipo VIII (adaptado de Virgiliis, 2009) | 20 |
| Figura 2.18 - Estrutura tipo IX (adaptado de Aciolli, 2005) | 20 |
| Figura 2.19 - Varredoura compacta (Fonte: Certona, 2011) | 21 |
| Figura 2.20 - Varredoura com sistema de lavagem de baixa pressão (Fonte: Certona, 2011). 22 | |

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 - Representação esquemática dos vários tipos de cavados de rodeira observados em pavimentos flexíveis (adaptado de NCHRP, 2002 citado por Gardete, 2006) | 25 |
| Figura 3.2 - Representação esquemática das rodeiras causadas por deformações permanentes nas camadas granulares do pavimento (adaptado de Santucci, 2001) | 26 |
| Figura 3.3 - Efeito da temperatura na deformação permanente em misturas betuminosas em ensaios triaxiais realizados a 40 °C e 60 °C (adaptado de Sargand and Kim, 2003 citados por Gardete, 2006) | 27 |
| Figura 3.4 - Zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista, 1999 citados por Freire, A., 2002) | 27 |
| Figura 3.5 - Efeito do processo de compactação no comportamento de misturas betuminosas à deformação permanente (adaptado de Khan <i>et al.</i> , 1998 citado por Gardete, 2006) | 29 |
| Figura 3.6 - Efeito da quantidade de betume numa mistura betuminosa com uma mesma granulometria (adaptado de Erkens, 2002 citado por Gardete, 2006) | 30 |
| Figura 3.7 - Evolução da repartição modal do transporte de mercadorias na EU, previsão até 2030 (DG TREN, 2003 citado por Gardete, 2006) | 31 |
| Figura 3.8 - Repartição modal do transporte de mercadorias em diversos países da EU em 2002 (exceto transporte marítimo) (DG TREN, 2004 citado por Gardete, 2006) | 31 |
| Figura 3.9 - Efeito do excesso de peso por eixo nos pavimentos, contribuição das diversas camadas para a profundidade de rodeira (Chen <i>et al.</i> , 2004 citados por Gardete, 2006) | 32 |
| Figura 3.10 - Correlação entre a textura do agregado, determinada por análise de imagem e a deformação obtida no GLWT (Massad <i>et al.</i> , 2004 citados por Gardete, 2006) | 33 |
| Figura 3.11 - Rodeiras de pequeno raio (Videira, 2014) | 34 |
| Figura 3.12 - Equipamento para o ensaio Marshall (DECA-UBI) | 35 |
| Figura 3.13 - Estabilómetro do ensaio Hveem (adaptado de <i>Asphalt Institute</i> , 1993) | 36 |
| Figura 3.14 - Ensaio de compressão uniaxial estático (Freire, A., 2002) | 37 |
| Figura 3.15 - Ensaio de compressão uniaxial cíclico (Freire, A., 2002) | 38 |
| Figura 3.16 - Curva típica de deformação obtida em ensaios de compressão uniaxial cíclicos (Freire, A., 2002) | 38 |
| Figura 3.17 - Curva típica de deformação obtida em ensaios de compressão uniaxial cíclicos (Gardete, 2006) | 39 |
| Figura 3.18 - Esquema da instrumentação de um provete para o ensaio de corte a altura constante (adaptado de Santucci, 2001) | 41 |
| Figura 3.19 - Ensaio de compressão diametral (DECA-UBI) | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.20 - Cilindro oco e dimensões utilizadas para realização do ensaio (TRB, 2004) | 42 |
| Figura 3.21 - Fases da evolução da deformação permanente (Freire, A., 2002) | 44 |
| Figura 3.22 - Ensaio de pista para determinação da resistência à deformação permanente (<i>Wheel tracking</i>) (DECA-UBI) | 46 |
| Figura 3.23 - a) Pista de ensaios circular interior CAPTIF (<i>Cartebury Accelerated Pavement Testing Indoor</i>); b) Pista de ensaios circular exterior do <i>Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées</i> | 47 |
| Figura 3.24 - Pista de ensaios à escala real do CEDEX - Espanha | 47 |
| Figura 3.25 - Deformação permanente para a lajeta IV e V (Oliveira, 2003) | 49 |
| Figura 3.26 - Perda por desgaste no ensaio cântabro (adaptado de Chen <i>et al.</i> , 2015) | 50 |
| Figura 3.27 - Resultados do ensaio <i>wheel tracking</i> (adaptado de Chen <i>et al.</i> , 2015) | 51 |
| | |
| Figura 4.1 - a) Brita 5/10; b) Brita 5/15; c) Pó de Pedra | 54 |
| Figura 4.2 - a) Colocação do agregado na série de peneiros; b) Cronometragem da peneiração; c) Pesagem de cada peneiro com o material retido | 55 |
| Figura 4.3 - Análise granulométrica dos agregados utilizados | 55 |
| Figura 4.4 - Picnómetro de hélio | 56 |
| Figura 4.5 - a) Pesagem hidrostática; b) Secagem da superfície das partículas | 56 |
| Figura 4.6 - Fibras celulósicas - <i>Viatop Premium</i> | 58 |
| Figura 4.7 - Cal hidráulica | 59 |
| Figura 4.8 - a) Colocação do material na estufa a 160°C; b) Pesagem de cada material; c) Mistura manual | 65 |
| Figura 4.9 - a) Colocação da mistura nos moldes Marshall; b) Colocação de filtro de papel no topo da mistura; c) Compactação da mistura com o compactador de impacto | 65 |
| Figura 4.10 - a) Desmoldagem dos provetes; b) Provetes desmoldados | 66 |
| Figura 4.11 - a) Grupo de provetes imersos; b) Grupo de Provetes secos | 69 |
| Figura 4.12 - a) Máquina de ensaio de Los Angeles; b) Provete antes do ensaio; c) Provete após ensaio | 69 |
| Figura 4.13 - a) Temperatura de ensaio de 20°C; b) Colocação dos provetes na estrutura de suporte do ensaio; c) Ensaio de rigidez por tração indireta; d) Computador de ensaio | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.14 - a) Pesagem do material de cada lajeta; b) Mistura dos materiais na misturadora elétrica; c) Colocação da mistura no molde | 75 |
| Figura 4.15 - a) Compactação da mistura; b) Lajetas após compactação | 75 |
| Figura 4.16 - a) Lajetas após desmoldagem; b) Medição das lajetas para cálculo da baridade; c) Pesagem das lajetas para cálculo da baridade | 76 |
| Figura 4.17 - a) Colocação da lajeta no interior da câmara de ensaio; b) Aquecimento prévio da lajeta no interior da camada; c) Ensaio <i>wheel tracking</i> em curso | 77 |
| Figura 4.18 - a) Lajeta após ser retirada da máquina de ensaio; b) Pormenor do cavado de rodeira | 77 |
| Figura 4.19 - a) Lajeta de mistura fina com fibras antes do ensaio <i>wheel tracking</i> ; b) Lajeta de mistura fina com fibras após ensaio <i>wheel tracking</i> | 78 |
| Figura 4.20 - Linha de tendência logarítmica para as deformações máximas obtidas no ensaio de simulação de pista (<i>wheel tracking</i>) para as misturas finas com e sem adição de fibras celulósicas | 78 |
| Figura 4.21 - Linha de tendência logarítmica para as deformações máximas obtidas no ensaio de simulação de pista (<i>wheel tracking</i>) para as misturas grossas com e sem adição de fibras celulósicas | 79 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Sistemas de pavimentos permeáveis (adaptado de Azzout <i>et al.</i> , 1994) | 8 |
| Tabela 3.1 - Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental (Freire, A., 2002) | 28 |
| Tabela 3.2 - Número de provetes (adaptado da EN 12697-22) | 43 |
| Tabela 3.3 - Declive máximo da rodeira no intervalo 5 000 a 10 000 ciclos para camada de desgaste (EN 12697-22 (mm por 10 ³ ciclos de carga), (PG-3, 2013) | 45 |
| Tabela 4.1 - Massa volúmica do pó de pedra e das britas 5/10 e 5/15 | 57 |
| Tabela 4.2 - Características do betume modificado Elaster 13/60 | 57 |
| Tabela 4.3 - Características do granulado | 58 |
| Tabela 4.4 - Características do betume incluído no granulado | 58 |
| Tabela 4.5 - Características das fibras | 58 |
| Tabela 4.6 - Massa volúmica da cal hidráulica | 59 |
| Tabela 4.7 - Requisitos do fuso granulométrico imposto pelo CE EP para PA 12,5 (BBd) .. | 60 |
| Tabela 4.8 - Requisitos/propriedades impostos por vãs entidades | 60 |
| Tabela 4.9 - Percentagem de agregados para cada mistura | 61 |
| Tabela 4.10 - Granulometria das misturas permeáveis PA 12,5 | 61 |
| Tabela 4.11 - Percentagem de betume inicial para as misturas drenantes (PA 12,5 Grossa e PA 12,5 Fina) | 62 |
| Tabela 4.12 - Formulação de cada mistura para a percentagem de betume estudados | 63 |
| Tabela 4.13 - Baridade máxima teórica | 64 |
| Tabela 4.14 - Baridades (Média de oito provetes por cada teor de betume) | 67 |
| Tabela 4.15 - Propriedades das misturas (Média de oito provetes por cada teor de betume) | 68 |
| Tabela 4.16 - Ensaio cântabro dos provetes dos grupos húmidos e dos grupos secos (media de quatro provetes por cada grupo) | 70 |

| | |
|---|----|
| Tabela 4.17 - Ensaio cântabro húmido para temperatura de água de 20 °C e de 60 °C (média de quatro provetes por cada grupo) | 71 |
| Tabela 4.18 - Formulação final das misturas betuminosas drenantes (percentagem em relação ao peso total da mistura) | 72 |
| Tabela 4.19 - Módulo de rigidez das misturas (média de seis provetes) | 74 |
| Tabela 4.20 - Baridade e porosidade média das misturas nas lajetas | 76 |
| Tabela 4.21 - Baridade e porosidade média das misturas nas lajetas e nos provetes cilíndricos | 76 |
| Tabela 4.22 - Resultados do ensaio à deformação permanente (média de duas lajetas) .. | 80 |
| Tabela 4.23 - Resultados do ensaio à deformação permanente (comparação com Oliveira (2003)) | 81 |

LISTA DE ACRÓNIMOS

| | |
|--------------------------|--|
| AASHTO | American Association of State Highway and Transportation Officials |
| AR | Mistura com betume convencional |
| BBd | Betão Betuminoso Drenante |
| CEDEX | Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas |
| CE EP | Caderno de Encargos das Estradas de Portugal |
| COST | European Cooperation in Science and Technology |
| d₁₀₀₀₀ | Profundidade de rodeira após 10 000 ciclos |
| d₅₀₀₀ | Profundidade de rodeira após 5 000 ciclos |
| DECA | Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura |
| EPA | Environmental Protection Technology |
| FHWA | Federal Highway Administration |
| HV | Mistura com betume de alta viscosidade |
| ITS | Resistência à tração em compressão diametral |
| ITSM | Ensaio de módulo de rigidez por tração indireta |
| LNEC | Laboratório Nacional de Engenharia Civil |
| LVDT | Linear Variable Displacement Transducer |
| MA | Mistura com betume modificado |
| MATTA | Universal Asphalt Tester |
| MFF | Mistura betuminosa fina com adição de fibras |
| MFSF | Mistura betuminosa fina sem adição de fibras |
| MGF | Mistura betuminosa grossa com adição de fibras |
| MGSF | Mistura betuminosa grossa sem adição de fibras |

| | |
|--------------------------|--|
| NAT | Nottingham Asphalt Tester |
| NCHRP | National Cooperative Highway Research Program |
| NLT | Normas del Laboratorio del Transporte |
| NP | Norma Portuguesa |
| NP EN | Norma Portuguesa baseada na Norma Europeia |
| PA | Porous Asphalt |
| P_b | Percentagem de betume em relação ao peso total da mistura |
| PEAD | Polietileno de Alta Densidade |
| PG3 | Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes |
| PL | Perda de partículas. |
| PRD_{air} | Média proporcional da profundidade de rodeira |
| RCD | Resíduos de construção e demolição |
| RD | Profundidade média da rodeira |
| RPM | Rotações por minuto |
| RT | Rise time |
| SBS | Copolímero de estireno butadieno |
| SHRP | Strategic Highway Research Program |
| STEP | Sustainable Technologies Evaluation Program |
| UBI | Universidade da Beira Interior |
| UE | União Europeia |
| UNHSC | University of New Hampshire Stormwater Center |
| V_m | Porosidade |
| WTS | Wheel Tracking Slope |

| | |
|-------------|--|
| WTS_{air} | Taxa de deformação média para o procedimento B |
| ρ | Massa volúmica |

CAPÍTULO 1 - Introdução

1.1 Enquadramento temático

A sociedade enfrenta nos dias que correm graves problemas relativamente à ocorrência de fenómenos de cheia em zonas habitacionais, devidas maioritariamente à impermeabilização dos solos. A utilização de pavimentos betuminosos permeáveis em áreas urbanas tem a característica positiva de contribuir para a redução do volume de escoamento, devido à infiltração e recarga subterrânea dos aquíferos.

Os pavimentos betuminosos permeáveis são constituídos por uma superfície de mistura betuminosa drenante, com uma variedade de tipos de substratos, onde os vazios permitem a infiltração das águas pluviais no solo subjacente.

Com vista a ajudar a ultrapassar a problemática das cheias, surge a necessidade de garantir uma confiança absoluta na utilização deste tipo de pavimentos, assim sendo, os mesmos serão alvo de uma investigação profunda, no que toca, principalmente, aos procedimentos de formulação e avaliação estrutural da sua camada superficial.

Os pavimentos permeáveis podem ter na sua camada superficial vários tipos de materiais, tais como, blocos de betão, blocos vazados, betão poroso e mistura betuminosa drenante, a qual será alvo de investigação durante a presente dissertação.

No desenvolvimento deste estudo é proposta uma dupla camada de mistura betuminosa drenante, a aplicar na camada superficial, sendo uma constituída por agregados mais finos e outra com agregados mais grossos. Pretende-se assim garantir um bom funcionamento dos pavimentos permeáveis ao nível da camada superficial relativamente a problemas de colmatação. O desempenho à deformação permanente destas misturas foi avaliado através do ensaio *wheel tracking* onde se simula a passagem dos veículos por aplicação de um rodado durante 10 000 ciclos.

1.2 Objetivos do estudo

O objetivo do presente estudo passa pela avaliação da viabilidade do uso de fibras celulósicas em misturas betuminosas drenantes, com vista a garantir um adequado desempenho mecânico no que diz respeito à resistência à deformação permanente deste tipo de misturas. Com este estudo, pretende-se garantir uma adequada formulação de misturas drenantes a aplicar em camadas superficiais de pavimentos permeáveis.

Ainda, na presente investigação, pretende dar-se a conhecer todo o tipo de pavimentos betuminosos permeáveis levados a cabo por vários investigadores, com vista a fornecer informação precisa sobre o dimensionamento deste tipo de estruturas.

É necessário comprovar que o desempenho de misturas betuminosas drenantes é, no mínimo, suficiente para suportar uma determinada classe de tráfego, para que estas sejam aceites por entidades responsáveis por pavimentação, e sejam assim incluídas na elaboração dos cadernos de encargos das obras (Antunes e Freire, 2006). No âmbito das misturas betuminosas drenantes não existe em Portugal qualquer especificação que defina parâmetros mínimos a cumprir no que diz respeito ao seu desempenho mecânico, pretendendo-se, nesta dissertação, apresentar resultados que permitam servir de base para futuras formulações.

1.3 Organização do trabalho desenvolvido

O presente trabalho é constituído por cinco capítulos, cuja organização e o conteúdo mais relevante se sintetiza nesta mesma secção.

No presente capítulo, sendo ele o primeiro, começa-se por fazer um breve enquadramento do tema em estudo, seguido da definição dos objetivos da investigação e uma breve síntese da organização do trabalho.

No capítulo 2, apresenta-se um estado de arte sobre pavimentos permeáveis efetuando-se uma breve apresentação acerca da aplicação dos mesmos em outros países, seguindo-se a distinção entre os vários sistemas de pavimentos permeáveis. Em relação aos materiais que constituem este tipo de pavimentos são ainda apresentadas várias soluções que se podem aplicar quer em camadas de desgaste quer em camadas de base e sub-base. Com vista a dar resposta à falta de informação sobre o dimensionamento de pavimentos betuminosos permeáveis é apresentada uma panóplia de estruturas tipo levadas a cabo por vários investigadores. Por fim, apresenta-se informação relativa à durabilidade e à manutenção deste tipo de pavimentos.

No capítulo 3, descrevem-se os principais fatores e consequências da deformação permanente e um resumo dos principais ensaios laboratoriais para caracterizar a resistência à deformação permanente. Ainda neste capítulo é apresentada uma breve análise do comportamento à deformação permanente em misturas betuminosas drenantes realizada por outros investigadores.

No capítulo 4, apresenta-se o trabalho experimental realizado para a caracterização do comportamento mecânico, nomeadamente a resistência à deformação permanente, das misturas betuminosas drenantes. Começa-se neste capítulo por uma caracterização dos materiais utilizados nas misturas seguida da respetiva formulação das mesmas, sendo para isso necessário um estudo da composição de agregados, uma estimativa da quantidade inicial de

betume e, por fim, a escolha do teor ótimo de ligante através da realização do ensaio cântabro, da baridade e da porosidade. Por fim, as misturas com teor ótimo são caracterizadas através do módulo de rigidez e do ensaio de deformação permanente.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões da presente dissertação bem como sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - Estado de arte sobre pavimentos permeáveis

2.1 Introdução

A necessidade de aumentar a rede viária em todo o mundo a um ritmo paralelo ao do crescimento das cidades, gerou um fator benéfico sobretudo para a economia mundial, dado ter permitido “encurtar” distâncias entre cidades e sobretudo, entre países. Uma das consequências do grande crescimento desta rede, prende-se com a elevada impermeabilização do solo que, por sua vez, combinada com eventos de precipitação curta e intensa gera graves problemas de inundação no interior das zonas urbanas. Neste sentido, têm vindo a procurar-se soluções alternativas que possibilitem que o solo recupere a sua capacidade de infiltração original.

No presente capítulo aborda-se o tema dos pavimentos permeáveis com o intuito de perceber qual o seu verdadeiro significado, assim como a sua utilidade, o seu desenvolvimento ao longo dos séculos e também conhecer o seu funcionamento hidráulico e estrutural. Realiza-se um enfoque detalhado em assuntos direcionados para o tema desta dissertação, tais como os tipos de pavimentos permeáveis, os materiais empregues na sua construção, a caracterização das suas camadas ao nível mecânico, a avaliação da sua durabilidade tendo em conta aspetos relativos à sua manutenção e aos problemas de colmatação.

Os pavimentos permeáveis surgem como um novo sistema de drenagem, permitindo que a água se movimente através da sua estrutura porosa, impedindo acumulações na superfície que podem ser prejudiciais, quer para a sua própria durabilidade, quer para a segurança dos utentes (NAPA, 2009).

Em Portugal, ao nível de pavimentos betuminosos, verificou-se um grande desenvolvimento quer ao nível das misturas quer ao nível das estruturas de pavimentos, criando-se assim novas soluções com vista a responder às necessidades de cada caso.

Por outro lado, verifica-se que a maioria dos pavimentos de baixo tráfego, apresentam uma superfície impermeável, não permitindo uma recolha e encaminhamento das águas pluviais. No entanto, começaram a surgir os pavimentos com camada superficial drenante, permitindo que a água que incide no mesmo não fique retida na superfície e assim possa provocar um agravamento dos fenómenos de hidroplanagem, aumentando assim a segurança rodoviária sobretudo em redes de estrada de alta velocidade (Elvik, R. and Greibe, P., 2005).

Entende-se por um pavimento permeável ou poroso, o pavimento que pelas suas características permite a passagem de água e ar pela sua estrutura porosa. As suas propriedades de permeabilidade e porosidade elevada permitem que este tipo de solução, independentemente do local de instalação, influencie significativamente a hidrologia da zona, permitindo uma redução da taxa de escoamento superficial (Diniz, E., 1980).

Relativamente ao dimensionamento estrutural deste tipo de pavimentos é apresentada uma panóplia de pavimentos realizados por vários investigadores nos seus estudos práticos, permitindo assim optar por uma solução aparentemente eficaz. Pretende-se com isto criar uma base de dados bibliográficos com vista a garantir um conhecimento aprofundado sobre a escolha das espessuras das várias camadas que compõe os pavimentos permeáveis, bem como os vários tipos de materiais que se podem usar na sua composição, entre os quais britas, cascalhos e geotêxteis. Dado não existir informação precisa sobre o dimensionamento deste tipo de estruturas, esta será uma das formas de dimensionar um possível troço experimental.

2.2 Aplicação em outros países

O aumento populacional gerou um alerta em vários países, em torno da alteração e adaptação a novos sistemas de drenagem de águas pluviais, surgindo nos anos de 1945-1950 o primeiro protótipo de pavimento com estrutura porosa. Esta aplicação realizada em França, sem qualquer êxito, deveu-se à fraca qualidade do betume utilizado que, na época, não foi capaz de sustentar as ligações da estrutura devido ao elevado índice de vazios. No final do ano de 1970, surge novamente o interesse pela utilização de pavimentos permeáveis, quando países como a França, os Estados Unidos da América, o Japão e a Suécia levam a cabo a execução de várias soluções deste tipo de pavimentos (Azzout *et al.*, 1994).

Os motivos que levaram ao estudo e utilização deste tipo de pavimentos, passam sobretudo por:

- Aumento exagerado das superfícies impermeáveis devido ao rápido crescimento populacional, que combinado com eventos de precipitação intensa provocaram uma sobrecarga nos sistemas de drenagem existentes e consequentes inundações;
- Acumulação de água no pavimento, provocando um decréscimo na segurança e conforto dos utentes da via;
- Diminuição do nível de emissão de ruídos em comparação com o pavimento convencional.

Em 1972 os Estados Unidos da América levam a cabo a primeira investigação acerca de pavimentos permeáveis, tendo por base resultados experimentais, nos quais foi possível mostrar que a camada betuminosa drenante é um material bastante adequado para a construção deste

tipo de pavimentos. Por outro lado, estudos económicos demonstraram que o uso de pavimentos permeáveis era mais económico que os convencionais (Hernandez, J., 2008).

Em França, o *Ministère de l'Équipement* lançou em 1978 um programa de pesquisa com vista a explorar novas soluções para a diminuição das inundações. Por entre essas pesquisas, o pavimento permeável, também conhecido por pavimento com estrutura de reservatório, destacou-se como uma das soluções mais interessantes, graças à sua facilidade de integração ao ambiente das cidades. Desde então, o pavimento permeável passou a ser objeto de pesquisa e estudos experimentais, por forma a ser alcançado um domínio da técnica e das suas vantagens. O pavimento permeável passou então por um importante desenvolvimento, iniciado em 1987, sendo hoje bastante utilizado em vias, calçadas, praças, etc (Azzout *et al.*, 1994).

Também no Japão surge o pavimento permeável que é integrado nos programas que incluem todas as técnicas de infiltração. Tais técnicas são utilizadas principalmente nos bairros das grandes cidades, em lugares com forte probabilidade de serem inundados tais como, pátios de escolas, campos de desporto, etc. Pode-se citar, como exemplo, a cidade de Yokohama, que atingiu a marca de 4,4 milhões de habitantes em 1994 e por isso, desde 1982 tem estudado técnicas de controlo do escoamento superficial, entre as quais o pavimento permeável (Watanabe, 1995).

Na Suécia, a utilização de pavimentos permeáveis foi incentivada pela contribuição que a mesma trouxe para a solução de dois outros problemas importantes: i) a redução do nível do lençol freático levando à diminuição da humidade do solo, e conseqüentemente à compactação natural do solo argiloso local; ii) os danos causados pelo gelo no norte da Suécia, onde as estradas e as canalizações de água pluvial, situadas perto da superfície, sofrem danos consideráveis e cuja manutenção exige grandes custos (Azzout *et al.*, 1994). A larga implantação de pavimentos permeáveis interrompeu a redução do nível do lençol freático e reduziu a necessidade de redes pluviais.

2.3 Sistemas de pavimentos permeáveis

Conhecidos como estruturas reservatório, os pavimentos permeáveis assumem essa denominação tendo em conta as funções realizadas pela matriz porosa, sendo caracterizados pela sua:

- Função mecânica, associada ao termo estrutura, que permite suportar os carregamentos impostos pelo tráfego dos veículos;
- Função hidráulica, associada ao termo reservatório, que assegura, tendo em conta os vazios entre materiais, reter temporariamente as águas seguido pela drenagem e, se possível, infiltração no solo do subleito.

Segundo Azzout *et al.* (1994), os pavimentos permeáveis podem ser divididos em quatro tipos, os pavimentos com revestimento drenante com ou sem infiltração no solo e os pavimentos com revestimento impermeável com ou sem infiltração no solo. Ilustra-se em seguida esses tipos de pavimentos.

Tabela 2.1 - Sistemas de pavimentos permeáveis (adaptado de Azzout *et al.*, 1994)

| | Drenagem Distribuída | Drenagem Localizada |
|--|----------------------|---------------------|
| <p>Saída da água por infiltração</p> <p>Dispositivo de infiltração</p> | | |
| <p>Saída da água por encaminhamento</p> <p>Dispositivo de retenção</p> | | |

No caso dos pavimentos com saída de água por encaminhamento, a água que será armazenada no dispositivo coletor pode ser reutilizada para fins não potáveis, ao invés de ser libertada para a rede de drenagem (Pratt, 1999).

O mesmo autor refere ainda que o funcionamento hidráulico dos pavimentos permeáveis é um processo que se baseia em três aspetos fundamentais:

- Concentração temporária da água no interior do pavimento;
- Entrada imediata da água da chuva na estrutura do pavimento;
- escoamento lento da água por infiltração no solo, por drenagem, através da rede respetiva, ou uma combinação de ambas as formas.

Um aspeto particular deste tipo de pavimentos incide no facto de existir uma base granular que assume a função de filtro e reservatório, o que induz a uma redução na contaminação dos solos (Marchioni, M. e Silva, C., 2010).

No que diz respeito ao tipo de solo onde se insere a estrutura reservatório, a mesma ainda pode ser subdividida em três sistemas distintos tendo em conta o tipo de infiltração no solo, incluindo assim o sistema de infiltração total, o sistema de infiltração parcial e o sistema onde não existe qualquer tipo de infiltração (Shueler, T., 1987).

2.3.1 Sistema de infiltração total

O sistema de infiltração total baseia-se no conceito de devolver ao solo as suas características originais, anteriores à introdução da estrutura de pavimento. A sua estrutura porosa permite que a água se infiltre através dos vazios e garante que a mesma seja encaminhada para os aquíferos que antes serviam nesse mesmo local. Neste tipo de sistema, as águas não são encaminhadas para um lugar específico, evitando assim a sobrecarga de zonas alheias ao local onde este se insere. Uma outra vantagem deste tipo de sistema, passa pela existência de uma camada de reservatório que possibilita um armazenamento inicial e temporário das águas antes das mesmas serem infiltradas (Acioli, L., 2005).

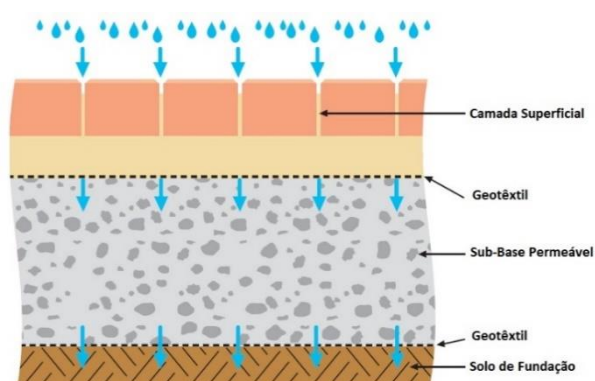


Figura 2.1 - Sistema de infiltração total (adaptado de Interpave, 2010)

2.3.2 Sistema de infiltração parcial

O sistema de infiltração parcial insere-se nos casos em que o solo não possui capacidade suficiente para infiltrar água. Neste tipo de sistema, deve ser inserida uma drenagem subterrânea, constituída por tubos perfurados. O mesmo funciona no sentido de encaminhar as águas que não seriam suportadas pelo reservatório de britas, levando-a para uma saída central (Acioli, L., 2005).

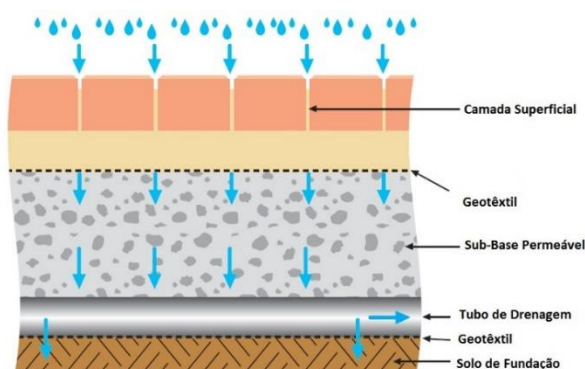


Figura 2.2 - Sistema de infiltração parcial (adaptado de Interpave, 2010)

2.3.3 Sistema sem infiltração

Por fim, o sistema onde não ocorre qualquer tipo de infiltração, permite uma completa captação da água usando uma membrana impermeável e flexível para o efeito. Este tipo de sistema pode ser aplicado em situações onde o solo de fundação possui baixa capacidade de carga e reduzida permeabilidade, podendo ser danificado pela acumulação de água (Interpave, 2010). Este tipo de sistemas também são utilizados em zonas contaminadas com vista a prevenir a infiltração dos agentes poluentes para os aquíferos. Uma outra vantagem deste sistema passa também pela retenção/detenção das águas para fins diversos, tais como irrigação, lavagem, ou águas sanitárias (Acioli, L., 2005).

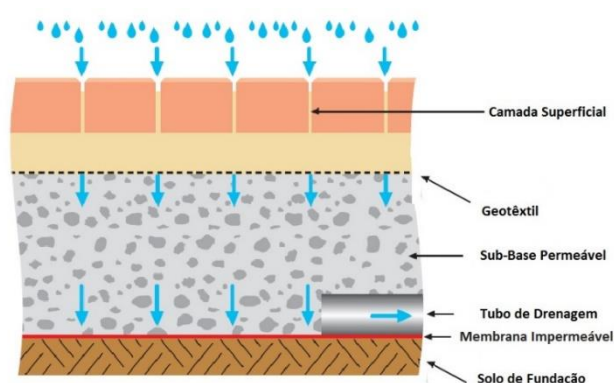


Figura 2.3 - Sistema sem infiltração (adaptado de Interpave, 2010)

2.4 Materiais constituintes dos pavimentos permeáveis

Os pavimentos permeáveis, à semelhança dos pavimentos convencionais, são caracterizados por várias camadas com funções distintas. Para este tipo de pavimentos requer-se altos níveis de porosidade nas suas camadas, sendo que, para isso recorre-se a camadas de desgaste porosas e a camadas de base e sub-base com igual característica e, em alguns casos, esta última assume funções de reservatório. Garantindo-se uma correta utilização dos materiais nas diferentes camadas garante-se uma redução eficaz do escoamento superficial e um equilíbrio hídrico da região (Cahill *et al.*, 2003)

2.4.1 Camada de desgaste

Em relação ao tipo de material escolhido para a camada de desgaste, existem atualmente vários tipos de materiais utilizados no seu dimensionamento, sendo os mais utilizados a mistura betuminosa drenante, o betão poroso e os blocos de betão vazados (Acioli, L., 2005).

A escolha do material a utilizar na camada de desgaste deve incidir na capacidade do mesmo resistir às solicitações produzidas pelo tráfego (deformação vertical e esforço de corte) e, como não poderia deixar de ser, pela sua capacidade de permitir a infiltração das águas pluviais.

Azzout *et al.* (1994), afirmam que a estética, a aderência, a acústica, a resistência à desagregação, o custo, a disponibilidade e a manutenção, são aspetos que devem ser tomados em conta na escolha do material a utilizar na superfície.

Segundo Ferguson B.K. (2005), os pavimentos permeáveis podem classificar-se com base no tipo de camada de desgaste de acordo com as famílias de materiais, entre as quais, agregados, coberto vegetal, geocélulas plásticas, betão poroso, blocos vazados, blocos intertravados com betão, mistura betuminosa drenante, entre outros.

- Agregados

A utilização de agregados nas camadas superficiais constitui uma das formas mais económicas e benéfica para o meio ambiente, dado ser um dos materiais mais abundantes e também natural. Como agregados, podem ser utilizados vários tipos de materiais, tais como granito, xisto, material reciclado de betão (RCD) ou outro tipo de material que não tenha qualquer função no meio em que se insere. A utilização deste tipo de material deverá garantir um grau de porosidade de cerca de 30 a 40 % garantindo assim a principal função permeável de encaminhar as águas ao longo da sua estrutura porosa (Virgiliis, A., 2009).

- Coberto vegetal

Relativamente a superfícies que usam como camada superficial relva ou outro tipo de espécies herbáceas, as mesmas são capazes de suportar tráfego pedonal e até mesmo algum tráfego de veículos. Em relação à porosidade deste tipo de pavimentos esta aumenta quando os mesmos não sofrem qualquer tipo de compactação por excesso de tráfego. A sua utilização remete maioritariamente para zonas de passeios e áreas de estacionamento que não sejam muito movimentadas. Por outro lado, com a utilização de grelhas, geocélulas ou blocos vazados, os mesmos podem suportar maiores cargas devidas ao tráfego. É ainda importante referir que pavimentos com este tipo de material requerem uma manutenção constante, tendo especial atenção ao replantio, ao espalhamento de terra, à irrigação e uso de fertilizantes (Virgiliis, A., 2009).

- Geocélulas plásticas

As geocélulas constituem um tipo de material de camada superficial composto por tiras de polietileno de alta densidade (PEAD), soldadas entre si, que quando abertas formam células contíguas tridimensionais, semelhantes a uma colmeia, que pode ser preenchida por areia, brita, betão ou solo, dependendo da disponibilidade e da finalidade. Poderão ser utilizadas em

várias funções, tais como, suporte de cargas na estabilização de pavimentos rodoviários e ferroviários, em estruturas de contenção de terra e na prevenção e controle da erosão de taludes (Virgiliis, A, 2009).



Figura 2.4 - Geocélulas plásticas (Fonte: www.abms.com.br consultado a 24/02/2016)

- Betão poroso

O betão de estrutura porosa é um material apropriado para suportar carregamentos de baixo volume, como em calçadas, áreas de manobra e estacionamento, atingindo valores de resistência à compressão de 20 a 30 MPa. Eventualmente, sob determinadas condições de dimensionamento, poderá receber carregamentos de tráfego pesado. Segundo Yang e Jiang (2003), terão sido alcançados valores de resistência na ordem dos 50 MPa à compressão e de 6 MPa à tração. Neste tipo de pavimento a porosidade deverá variar entre os 18 a 22 % (Azzout *et al.* 1994; Virgiliis, A., 2009).



Figura 2.5 - Betão poroso (Fonte: <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/13/imagens/i327370.jpg> consultado a 24/02/2016)

- Blocos Vazados

Os blocos vazados baseiam-se em blocos de betão dimensionados com células ou aberturas que permitem o preenchimento com agregados ou outro tipo de material. São colocados lado a lado numa malha regular no entanto, apresentam como desvantagem o custo de aplicação. Por outro lado, apresentam um tempo de vida útil considerável. Esta solução apresenta uma capacidade suficiente para carregamentos exigentes. Relativamente à sua aplicação deverá garantir-se que

os mesmos apresentem pelo menos 20 % de vazios ao longo da sua área superficial (Acioli, L., 2005).

Na Figura 2.6 apresenta-se uma solução de blocos vazados com uma permeabilidade de 100 %.



Figura 2.6 - Blocos vazados de betão

- Blocos Intertravados de Betão

No que diz respeito a pavimentos revestidos com blocos intertravados de betão, a mesma solução poderá ser aplicada para vários tipos de tráfego. São geralmente aplicados sobre uma camada de areia que confere ao pavimento a porosidade e permeabilidade exigida. Este tipo de solução apresenta uma vida útil bastante alargada, assim como uma durabilidade e resistência bastante mais longa. Quando assentes devem ser confinados a bordas rígidas que impeçam que os blocos fiquem livres de tensão e corram o risco de se soltar. Habitualmente são limitados nas extremidades a sarjetas ou vigotas de betão.



Figura 2.7 - Blocos Intertravados de betão

- Mistura betuminosa drenante

No que diz respeito à mistura betuminosa drenante como material de revestimento salienta-se que a mesma foi desenvolvida com o intuito de reduzir os picos de cheia nas zonas urbanas. Este tipo de pavimento apresenta um aspeto similar aos pavimentos betuminosos convencionais, no entanto a sua estrutura é bastante porosa permitindo o fluxo da água através dos seus vazios. Relativamente à porosidade deste tipo de pavimentos, a mesma é conseguida

através da ausência de finos e da introdução de agregados de granulometria uniforme, garantindo assim os vazios entre eles.

Embora os betumes convencionais apresentem um desempenho satisfatório para as condições de tráfego existentes, o aumento da capacidade de carga, ou o número de veículos em circulação, e as extremas condições climáticas encontradas em alguns países têm levado a inúmeros estudos na procura de ligantes que atendam, de forma mais satisfatória, às necessidades dos pavimentos (Júnior, T., 2008).

Os modificadores introduzidos no betume, ou seja, os materiais que são adicionados, devem apresentar resistência à temperatura de trabalho, estabilidade e facilidade de mistura com o ligante base, tendo em conta que as características físicas e químicas da mistura com betume modificado dependem desse mesmo material, do tipo de betume, da percentagem de modificador e do processo de fabrico utilizado (Júnior, T., 2008). De entre os modificadores mais utilizados, os polímeros são aqueles que mais se destacam, uma vez que permitem reduzir a consistência e a suscetibilidade térmica da mistura, levando deste modo a um aumento da resistência à deformação permanente a altas temperaturas. Torna-se comum na Europa o uso de ligantes modificados com polímeros no que diz respeito a misturas betuminosas drenantes, proporcionando uma ligação entre os agregados muito superior à oferecida pelos ligantes convencionais (Gonçalves *et al*, 2000). Por outro lado, a introdução deste tipo de modificadores confere uma maior elasticidade à mistura, levando assim a um aumento da resistência à fadiga, e uma melhoria do comportamento ao desgaste e ao envelhecimento (Zanzotto and Kennepohl, 1996 citados por Júnior, T., 2008; PAVIDREN).

Outra forma de promover uma melhoria significativa às deformações permanentes, fadiga e fissuração das misturas betuminosas é a adição de fibras celulósicas. Usualmente, são utilizadas fibras celulósicas nas misturas betuminosas possibilitando assim um aumento significativo na quantidade de betume sem que ocorra o escorrimento do ligante. Estas permitem, por um lado, a retenção do ligante betuminoso utilizado e, por outro lado, favorecer o revestimento dos agregados, ou seja, a formação de uma camada de betume com espessura constante. Pelo facto das misturas possuírem uma percentagem em betume relativamente elevada (sem escorrimento, devido à presença de fibras), proporciona camadas betuminosas com altas prestações mecânicas, com segurança, conforto de uso e, simultaneamente, com maior durabilidade (Martinho, F. *et al.*, 2013).

Quer os sistemas de mistura betuminosa drenante, quer de betão poroso estão periodicamente sujeitos a problemas de colmatação, para um período aproximado de três anos após a instalação, resultando uma perda de porosidade devido ao preenchimento dos vazios. As principais causas da colmatação devem-se a sedimentos provocados pelo tráfego e tensões causadas por inúmeras ações que provocam o colapso dos poros (Scholz, M. and Grabowiecki, P., 2007).



Figura 2.8 - Mistura betuminosa drenante

2.4.2 Camada de base e sub-base

Situadas sob a camada de desgaste drenante encontram-se as camadas de base e sub-base. Ambas as camadas assumem um papel fundamental no correto funcionamento do pavimento permeável, sendo elas as que recebem todas as cargas impostas pela passagem de veículos (Virgiliis, A., 2009). Por outro lado, as mesmas assumem nos pavimentos permeáveis a função de reservatório na condição de receber todas as águas pluviais drenadas na superfície, podendo encaminha-las para um sistema de drenagem ou por infiltração no solo, em certos casos poderá assumir a função de armazenamento de águas.

Habitualmente recorre-se a agregados não ligados de grande resistência para a camada de sub-base dado ser esta a camada que recebe a maior percentagem de esforços. Poderá optar-se pelo uso de filtros geotêxteis com vista a retardar a problemática da colmatção e, por outro lado, beneficiar a qualidade de água que pode ser infiltrada no solo (Collins, K.A., 2007).

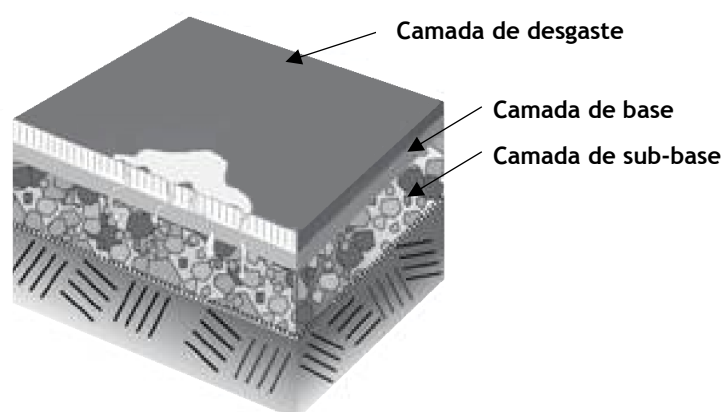


Figura 2.9 - Representação esquemática de pavimento com as três camadas fundamentais. (adaptado de Drainage Design Manual, 2009)

2.5 Estruturas tipo de pavimentos betuminosos permeáveis

Os pavimentos de estrutura porosa têm sido desenvolvidos e investigados ao longo dos tempos por um vasto conjunto de investigadores. Dado não existir qualquer disposição normativa relativamente ao dimensionamento deste tipo de pavimentos foi recolhido, neste subcapítulo, um conjunto de estruturas tipo, levadas a cabo por investigadores de vários países, com o intuito de servir de exemplo para pavimentos que pretendam ser dimensionados no futuro.

Estrutura tipo I: Estrutura proposta por Diniz (1980) no manual da EPA (*Environmental Protection Technology*). Estrutura porosa composta por 3 camadas. A camada superficial constituída por mistura betuminosa drenante com uma espessura de 6,35 cm. De seguida, é proposta uma camada constituída por um agregado fino ($D_{max}=1,27$ cm) com uma espessura de 5,08 cm. Segue-se a última camada, com funções de reservatório, que pode ser calculada por equações hidráulicas e hidrológicas, com base em informações de precipitação local, com vista a garantir espessura suficiente para suportar a acumulação de água.

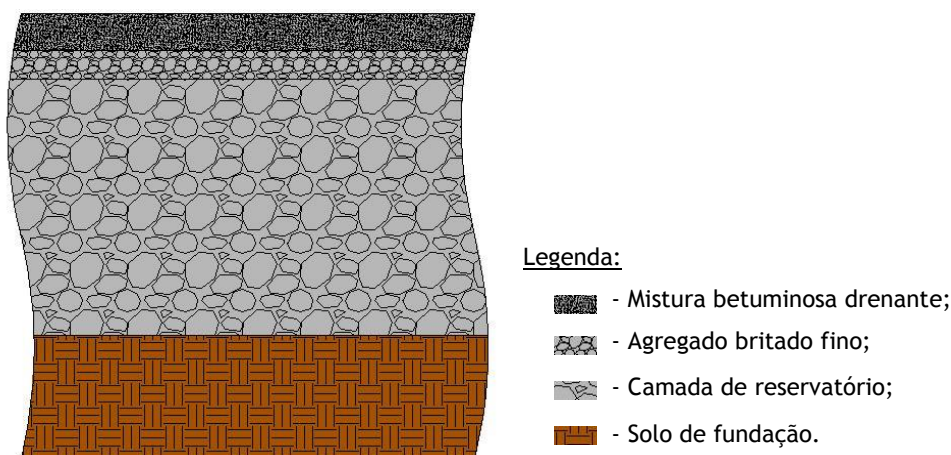


Figura 2.10 - Estrutura tipo I (adaptado de Diniz, 1980)

Estrutura tipo II: A estrutura foi proposta por Briggs *et al.* (2009) e citada por Korkealaaskso *et al.* (2014). Pavimento permeável com estrutura composta por 5 camadas. A camada de desgaste é constituída por mistura betuminosa drenante com uma espessura que poderá variar entre os 10 a 15 cm. Segue-se uma camada de base composta por brita que poderá variar entre os 10 e os 20 cm de espessura. De seguida coloca-se uma camada composta por cascalho com uma espessura que pode variar dos 20 aos 30 cm. Na base desta camada, segue-se outra com uma espessura de 8 cm de gravilha. Por fim, os investigadores propoem uma camada de reservatório de 10 cm.

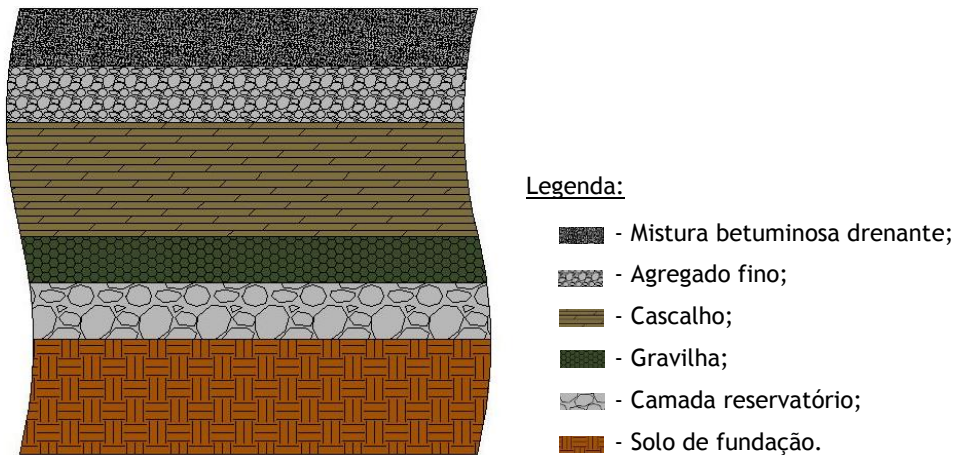


Figura 2.11 - Estrutura tipo II (adaptado de Briggs *et al.*, 2009 citado por Korkealaakso *et al.*, 2014)

Estrutura tipo III: Segundo Basch, E. *et al.*, (2012), no mapa rodoviário para pavimentos permeáveis na cidade de Nova Iorque, proposto em 2012, é indicado um perfil tipo para os pavimentos permeáveis. A camada de desgaste é constituída por mistura betuminosa drenante de 5 a 10 cm de espessura, seguida por uma camada de base com agregado britado com uma espessura de 2,5 a 5 cm. Por fim, é proposto uma camada de reservatório com uma espessura que poderá variar entre os 45 e os 92 cm, dependente da pluviosidade da zona em que se insere o pavimento.

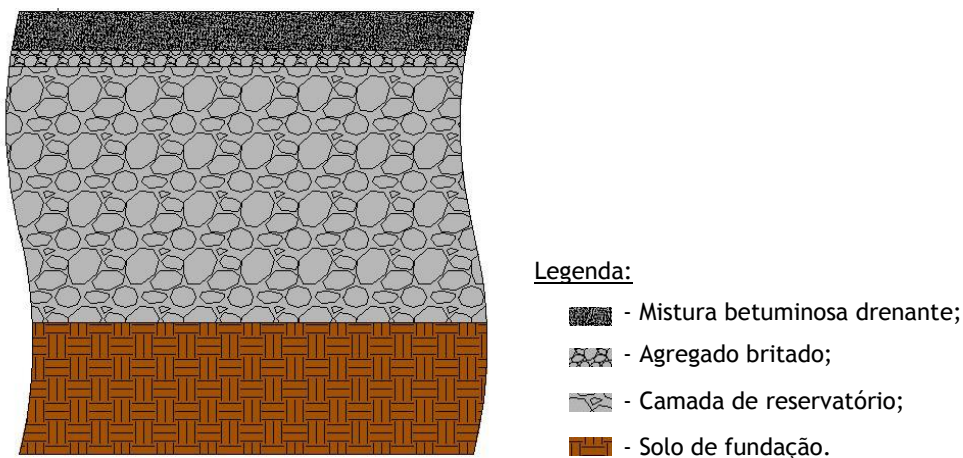


Figura 2.12 - Estrutura tipo III (adaptado de Basch *et al.*, 2012)

Estrutura tipo IV: Estrutura proposta por Terra Tech (2009), citado por Korkealaakso, J. *et al.* (2014), com uma camada superficial de mistura betuminosa drenante de 10 cm, seguida de uma camada de macadame betuminoso com 10 cm, para controlo da qualidade das águas, e com uma porosidade de 40 %. Seguidamente, propõe-se uma camada com aproximadamente 30 cm de espessura e uma porosidade de 25 %, composta por cascalho com funções de filtro. O mesmo autor apresenta ainda uma camada de 8 cm de gravilha confinada por geotêxtil. Por fim, segue-se a camada de reservatório com uma espessura de 10 cm, drenada através de um sistema constituído por tubos.

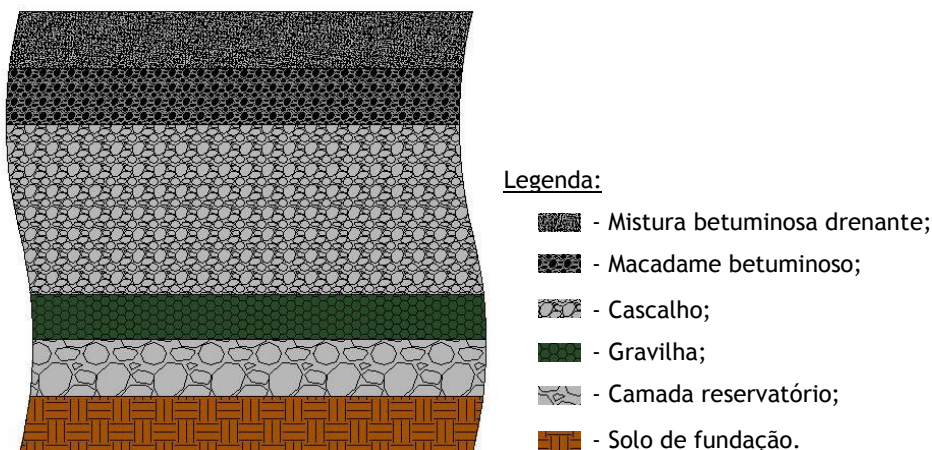


Figura 2.13 - Estrutura tipo IV (adaptado de Terra Tech, 2009 citado por Korkealaaskso *et al.*, 2014)

Estrutura tipo V: Lebens propõe em 2012 uma estrutura tipo para um pavimento betuminoso permeável, no entanto, sem fazer qualquer referência à espessura das camadas, sendo estas compostas pelos seguintes materiais:

- Camada de Desgaste - Mistura betuminosa drenante, com agregados de 1,27 cm a 1,91 cm;
- Camada de Base - Camada composta por agregado britado de 1,27 cm;
- Reservatório - Camada de armazenamento das águas, com agregado britado de 2,54 cm a 5,08 cm;
- Geotêxtil - Na superfície de separação, entre o solo de fundação e o reservatório.

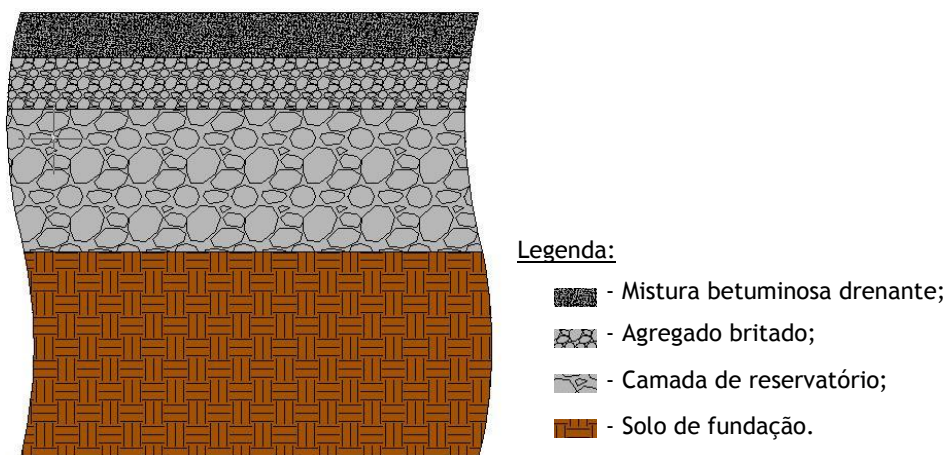


Figura 2.14 - Estrutura tipo V (adaptado de Lebens, M., 2012)

Estrutura tipo VI: Estrutura proposta por investigadora na Universidade da Beira Interior em 2015 com base em análises bibliográficas e experiência de outros investigadores. A autora propõe uma estrutura composta por uma camada superficial de mistura betuminosa drenante com 8 cm, seguida de uma camada de base de brita 5/15 com 9 cm de espessura, e por fim uma camada de reservatório com 25 cm de espessura composta por brita 15/25.

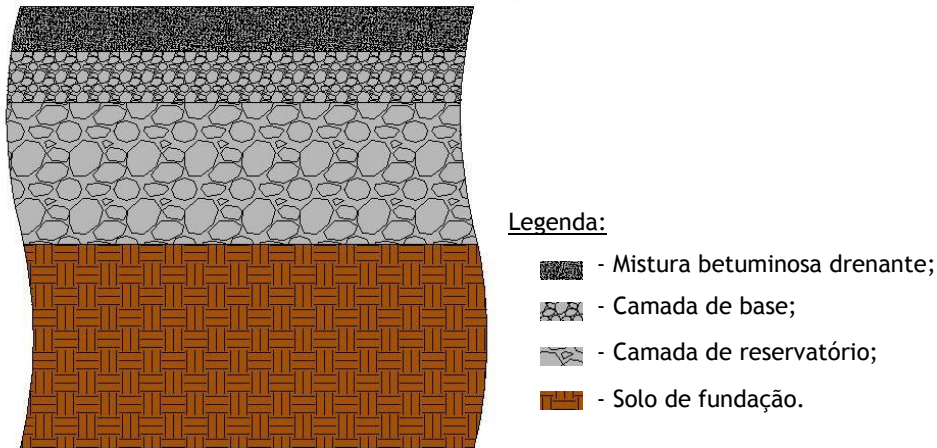


Figura 2.15 - Estrutura tipo VI (adaptado de Carvalho, C., 2015)

Estrutura tipo VII: Tomaz, P. propôs em 2009 a seguinte estrutura tipo:

- Camada Superficial - 6,5 a 10 cm - Mistura betuminosa drenante;
- Camada de Base - 2,5 a 5 cm - Camada composta por brita de 1,27 cm;
- Reservatório - espessura não definida - Agregado britado com 4 a 7,5 mm de diâmetro;
- Camada de Filtro - 5 cm - Camada composta por brita de 1,27 cm;
- Geotêxtil;
- Solo de Fundação - não compactado.

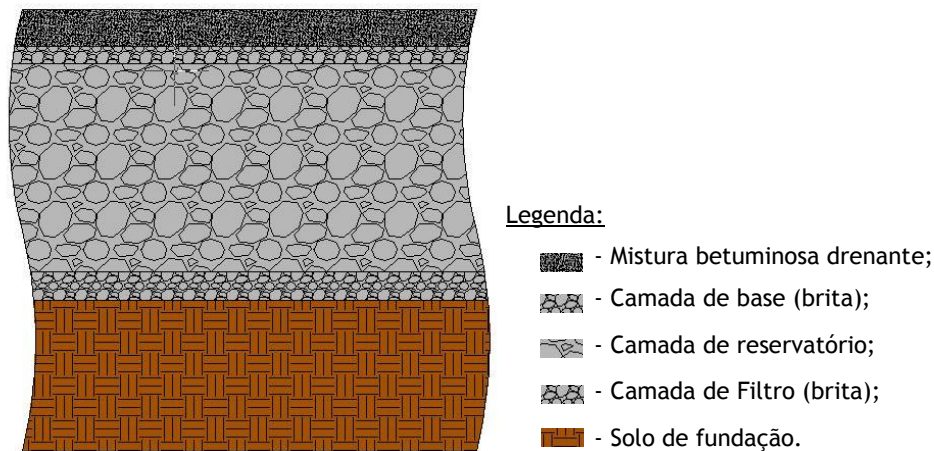


Figura 2.16 - Estrutura tipo VII (adaptado de Tomaz, P., 2009)

Estrutura tipo VIII: Em 2009, Virgiliis propõe um pavimento composto por 4 camadas. Uma primeira camada superficial de mistura betuminosa drenante de 5 cm, seguida de uma de macadame betuminoso com 5 cm de espessura. A camada de reservatório composta por material britado, com 30 cm de espessura. Na base da estrutura, o mesmo autor propõe uma camada de pó de pedra com 5 cm de espessura. Por fim, aconselha-se a colocação de uma membrana geotêxtil.

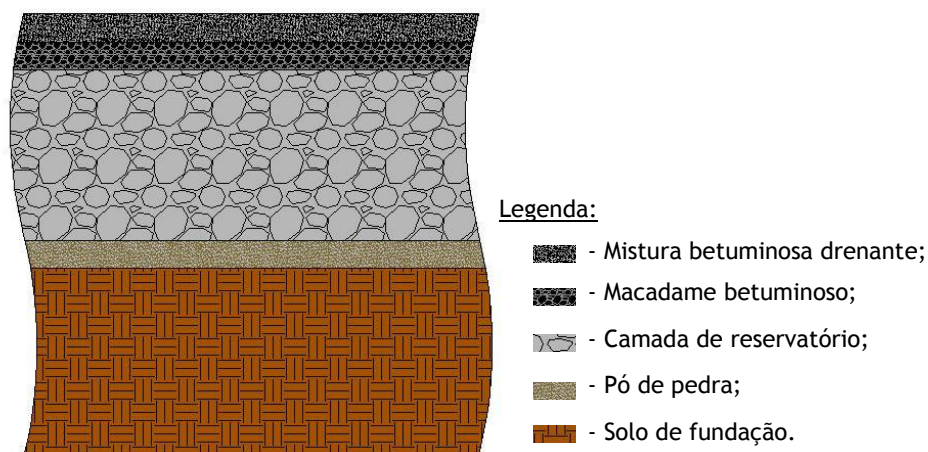


Figura 2.17 - Estrutura tipo VIII (adaptado de Virgiliis, A., 2009)

Estrutura tipo IX: Em 2005, Acioli propõe uma estrutura composta por duas camadas, uma superficial com 7 cm de mistura betuminosa drenante e uma camada de reservatório com uma espessura de 26 a 34 cm. Na interface entre o reservatório e o solo de fundação este propõe a colocação de um filtro geotêxtil.

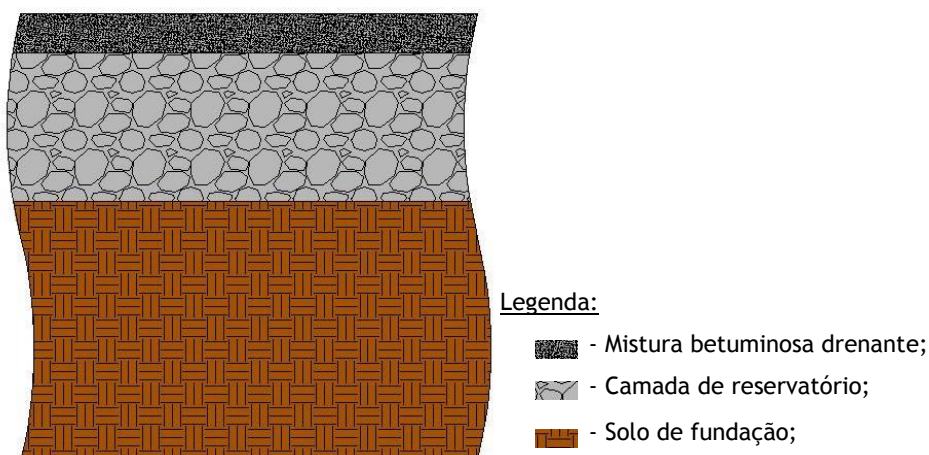


Figura 2.18 - Estrutura tipo IX (adaptado de Acioli, L., 2005)

Estrutura tipo X: De acordo com o guia de dimensionamento *LID* (Dhalla, S. e Zimmer, C., 2010), a estrutura tipo é composta por mistura betuminosa drenante com uma espessura de 5 a 10 cm e uma porosidade mínima de 16 %. Aconselha-se a adição de polímeros com o objetivo de oferecer ao pavimento maior capacidade de carga.

2.6 Durabilidade e manutenção de pavimentos betuminosos permeáveis

No que diz respeito aos pavimentos convencionais um dos principais problemas que se verifica é o aumento da permeabilidade ao longo do tempo, provocando consequências negativas devidas à ação da água. Numa situação completamente oposta encontram-se os pavimentos permeáveis, nos quais o principal problema passa pela colmatação e uma consequente redução da sua capacidade de infiltração (Hernandez, J., 2008).

A colmatação é sem dúvida um dos fatores que mais influencia a durabilidade e o bom funcionamento deste tipo de pavimentos, sendo devida a inúmeros fatores. O tráfego é um dos fatores que mais influencia este fenómeno, dado ter-se verificado que em vias de tráfego intenso a colmatação surge de forma lenta e progressiva, pelo facto de existir uma sucção provocada pela passagem de veículos, que induzem a uma espécie de aspiração natural dos poros (Virgiliis, A., 2009).

É de salientar que em locais de tráfego lento e pouco intenso, o problema de colmatação surge com maior incidência, uma vez que o efeito de sucção não acontece de forma suficiente para garantir a desobstrução dos poros do pavimento (Virgiliis, A., 2009). Segundo Pariat (1992) citado por Virgiliis, A. (2009), após a aplicação da camada de desgaste, ocorrem fenómenos de modificação momentânea do equilíbrio interno da camada, que ocasiona uma diminuição inicial da permeabilidade.

Relativamente à manutenção deste tipo de pavimentos, é sem dúvida importante garantir uma superfície livre de partículas que impossibilitem que a água se possa movimentar livremente na estrutura porosa (Lebens, M and Troyer, B., 2012). Para isto, deve recorrer-se a métodos de limpeza tais como a aspiração do pavimento com recurso a uma varredoura compacta (Figura 2.19).



Figura 2.19 - Varredoura compacta (Fonte: Certoma, 2011)

No caso da camada superficial do pavimento apresentar a sua estrutura porosa significativamente obstruída, que nem o recurso a aspirador a consiga desobstruir e repor a permeabilidade da mesma, é necessário recorrer a um método mais avançado, utilizando para isso um sistema de lavagem de baixa pressão com aspiração imediata tal como é apresentado na Figura 2.20 (Cahill Associates).



Figura 2.20 - Varredoura com sistema de lavagem de baixa pressão (Fonte: Certoma, 2011)

Segundo Wilson, M. (2002), as quantidades de sedimento máximas que podem ser depositadas sem que a camada drenante do pavimento seja afetada dependem da porosidade da mesma. Com base em ensaios experimentais, camadas com 34 % porosidade aumentam o período de manutenção recomendado.

Numa análise detalhada, no que diz respeito ao nível de permeabilidade dos pavimentos ao longo dos tempos, constatou-se que os pavimentos permeáveis na sua generalidade perdem cerca de 90 % da sua capacidade de transportar água ao longo da sua estrutura porosa. No entanto, os 10 % restantes serão mais do que suficientes para lidar com eventos de precipitação intensa (Tota-Maharaj, 2010).

Com vista a manter a função deste sistema de drenagem, aconselha-se a aspiração dos pavimentos, pelo menos, quatro vezes por ano e uma lavagem da camada superficial com o objetivo de remover as partículas finas (EPA, 1999).

Em zonas com temperaturas negativas, a água infiltrada na camada superficial drenante pode tornar-se um problema com consequências sérias para o esqueleto da estrutura do pavimento ao solidificar. No entanto, isso não acontece num pavimento permeável, uma vez que a água consegue atravessar a totalidade da estrutura porosa muito antes de congelar (Interpave, 2010). O mesmo não acontece em pavimentos convencionais com camada superficial drenante, onde a água pode ficar retida durante longos períodos de tempo à superfície e congelar, provocando um aumento de volume na ordem dos 5 % e, conseqüentemente, originando graves problemas como o aparecimento de fissuras.

CAPÍTULO 3 - Caracterização mecânica de misturas betuminosas drenantes

3.1 Introdução

As deformações permanentes dos materiais utilizados nos pavimentos resultam da aplicação repetida de cargas, provocando depressões longitudinais ao longo das rodeiras dos veículos, acompanhadas normalmente por elevações laterais. Esta anomalia no pavimento ocorre, fundamentalmente, devido à densificação e às deformações por corte que ocorrem nas camadas deste (Pais, J.C. *et al.*, 2000).

No presente capítulo, realiza-se um estado de arte acerca do tema relacionado com as deformações permanentes nas misturas betuminosas. Para isso, começa-se por abordar, na generalidade, a caracterização mecânica de misturas betuminosas mais propriamente, a formação de rodeiras. Seguidamente, apresentar-se-á um conjunto de informação sobre todos os fatores que provocam a deformação permanente, tais como, a temperatura, o tipo de betume, etc. Conhecidos todos os fatores que originam esta anomalia apresentar-se-ão as consequências que dela advêm. Numa fase posterior apresentam-se todos os tipos de ensaios de caracterização das misturas betuminosas à deformação permanente. Por fim, e dado o tema desta dissertação estar direcionado para misturas drenantes, é apresentado um conjunto de resultados e conclusões levadas a cabo por outros investigadores nessa matéria.

Em Portugal, 95 % da rede rodoviária nacional é constituída por pavimentos flexíveis. Deste modo, torna-se fulcral um estudo aprofundado do comportamento mecânico das misturas e de quais as patologias que se podem manifestar com vista a poder maximizar-se a sua vida útil.

Admite-se que se forem estudadas e posteriormente controladas as características de comportamento à deformação permanente dos materiais aplicados, usando uma adequada formulação e uma correta aplicação dos mesmos em obra, é possível limitar as deformações permanentes observadas à superfície do pavimento. Assim, a estrutura de um pavimento rodoviário deve ser projetada de modo a garantir que ao longo da sua vida útil não se atinjam determinados estados de ruína que afetem as respetivas condições de serviço (Freire, A., 2002).

Torna-se deste modo fundamental conseguir avaliar a suscetibilidade das misturas betuminosas à deformação permanente, através de ensaios laboratoriais, tais como, o ensaio de *wheel tracking*, o ensaio triaxial cíclico entre outros (Gardete, D. e Picado Santos, L., 2006).

3.2 Comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente

3.2.1 Formação de rodeiras em pavimentos rodoviários flexíveis

Um dos estados de ruína considerados no dimensionamento de pavimentos é o aparecimento, à superfície, de depressões longitudinais ao longo das zonas de passagem dos rodados de veículos pesados (rodeiras), geralmente designadas por cavados de rodeira. Os mesmos poderão dever-se à contribuição de deformações permanentes ocorridas em todas as camadas constituintes do pavimento e na respetiva fundação para a sua formação (Freire, A., 2002).

As elevadas temperaturas que se fazem sentir no verão assumem um papel crítico na formação dos cavados de rodeira. As mesmas provocam uma acentuada redução da viscosidade dos ligantes betuminosos, proporcionando o aparecimento de deformações permanentes nas camadas betuminosas.

Atualmente, não é usual utilizar métodos de previsão da evolução das degradações em pavimentos que considerem a contribuição das camadas betuminosas, para a formação de cavados de rodeira, devido à falta de modelos adequados que simulem o comportamento à deformação permanente das várias camadas constituintes do pavimento, e devido ao desconhecimento de parâmetros que caracterizem o comportamento das misturas à deformação permanente em função dos fatores que a originam (Freire, A., 2002).

Torna-se, sem dúvida, importante estudar o comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas tendo em vista o estabelecimento de metodologias de avaliação adequadas, que permitam ter em conta a influência das características das misturas aplicadas, nas condições de serviço do pavimento.

Este tipo de deformações pode ter origem em diversos mecanismos ou combinações de mecanismos, entre os quais a perda de material por desgaste, as deformações permanentes das camadas inferiores do pavimento e da fundação e as deformações permanentes das camadas betuminosas superiores. Apresenta-se em seguida uma representação esquemática dos vários tipos de rodeira que se podem verificar em pavimentos flexíveis.

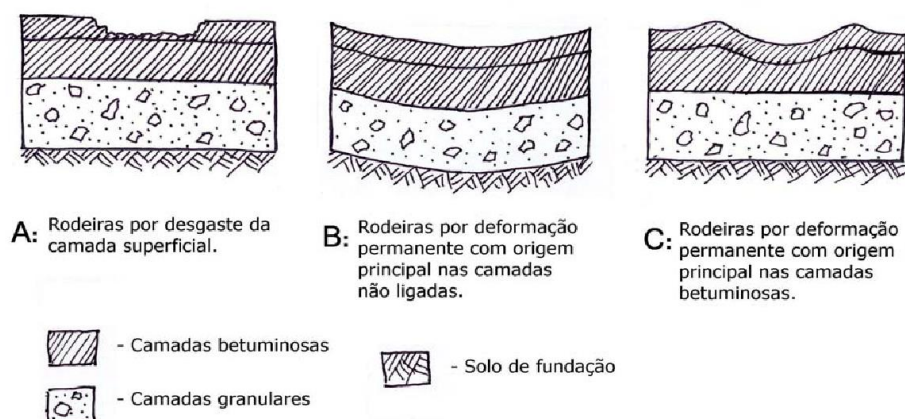


Figura 3.1 - Representação esquemática dos vários tipos de cavados de rodeira observados em pavimentos flexíveis (adaptado de NCHRP, 2002 citado por Gardete, 2006)

No caso A, representado na Figura 3.1, as rodeiras ocorrem devido à desagregação da camada superficial do pavimento, contribuindo apenas esta camada para a formação das rodeiras. Das principais causas para este tipo de desgaste, encontra-se o uso de correntes de neve ou pneus de gelo com pregos, no entanto, a sua ocorrência apenas incide em países com climas mais frios. O fenómeno deste tipo de rodeiras também difere consideravelmente dos restantes pois não resulta de deformações das camadas, mas do desgaste e desagregação da camada de superficial na zona de passagem dos rodados.

No caso B, as rodeiras são causadas pela deformação do solo de fundação, podendo eventualmente existir a contribuição de outras camadas granulares. A origem deste tipo de deformação é essencialmente ao nível do solo de fundação, mantendo as restantes camadas a sua espessura, mas estas vão-se deformar para acompanhar os movimentos da fundação. Estas rodeiras são geralmente identificadas pelo seu grande raio de influência.

No caso C, as depressões são causadas por deformação nas camadas betuminosas sendo acompanhadas por elevações nas zonas laterais contíguas. Para esta deformação contribui, essencialmente, a camada superficial (Freire, A., 2002), podendo ainda existir deformação nas camadas betuminosas que se encontram sob esta. A deformação nas camadas betuminosas acontece geralmente na parte superior do pavimento, que é a zona mais sujeita às cargas circulares e ações climatéricas desfavoráveis, nomeadamente, temperaturas elevadas. Em Portugal, a formação deste tipo de rodeiras é mais preocupante devido às elevadas temperaturas que se fazem sentir no verão.

Têm-se estudado métodos para, com base no perfil superficial transversal do pavimento, se determinar qual a origem da deformação permanente, isto é, quais as camadas do pavimento que mais terão contribuído para a deformação em análise (NCHRP, 2002 citado por Gardete, 2006). Num pavimento todas as camadas podem contribuir em maior ou menor grau para a deformação total (Chen *et al.*, 2004 citados por Gardete, 2006).

No caso de pavimentos permeáveis compostos por misturas betuminosas drenantes e camadas granulares, a passagem de água na estrutura poderá torna-la mais vulnerável às ações aplicadas, tendo em conta os reduzidos contactos entre partículas. Na Figura 3.2 é esquematizado o tipo de deformação que pode ocorrer neste tipo de estruturas.

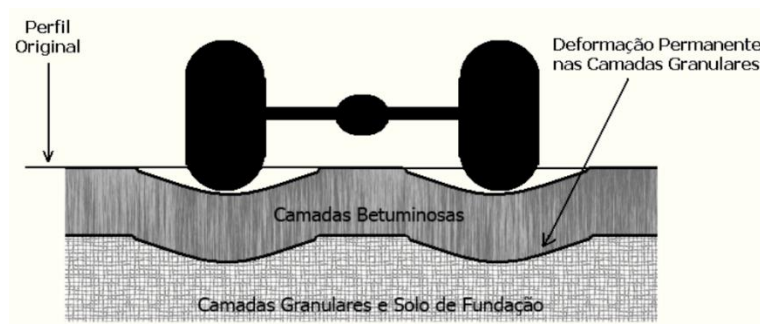


Figura 3.2 - Representação esquemática das rodeiras causadas por deformações permanentes nas camadas granulares do pavimento (adaptado de Santucci, 2001)

Ao longo desta dissertação irá ser realizado um enfoque detalhado na deformação permanente de misturas betuminosas drenantes pelo que, embora relevantes, não serão desenvolvidas as outras causas da formação de rodeiras.

3.2.2 Fatores que provocam a deformação permanente

- Temperatura

As misturas betuminosas são estruturas altamente influenciadas pela temperatura dado possuírem uma parcela viscosa. Deste modo, quando a temperatura aumenta o betume torna-se mais fluido e a resistência à deformação permanente diminui. As deformações de origem viscosa, nomeadamente as irreversíveis, serão superiores o que piora o comportamento da mistura à deformação permanente. Segundo Batista (2014) citado por Duarte, M. (2014), perante um aumento de temperatura, o módulo de rigidez da mistura betuminosa diminui, proporcionando o aparecimento de deformações na zona de passagem de rodados através da aplicação repetida de cargas devido principalmente à passagem dos veículos pesados, contribuindo para a formação dos cavados de rodeira.

As misturas submetidas a temperaturas elevadas ficam sujeitas a dois fenómenos prejudiciais, uma maior deformação por corte e também uma densificação da camada. Na Figura 3.3 pode observar-se o efeito da temperatura na deformação permanente de misturas betuminosas.

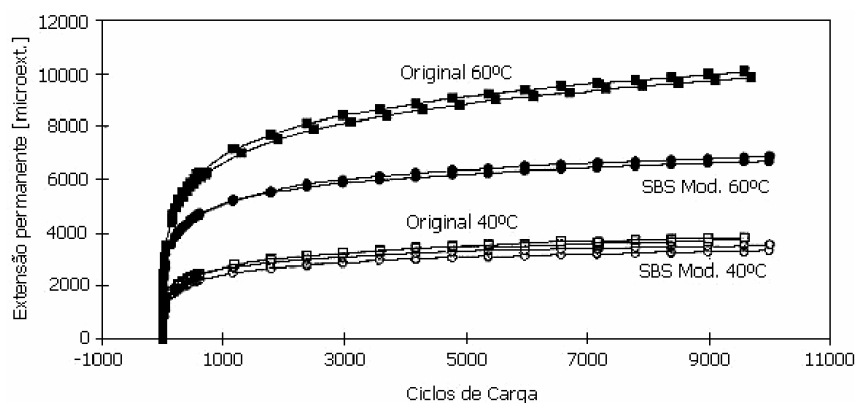


Figura 3.3 - Efeito da temperatura na deformação permanente em misturas betuminosas em ensaios triaxiais realizados a 40 °C e 60 °C (adaptado de Sargand and Kim, 2003 citados por Gardete, 2006)

Para avaliar o comportamento da mistura torna-se importante, nos ensaios laboratoriais, utilizar temperaturas representativas das condições a que a mesma estará sujeita em serviço. Devem ser utilizadas temperaturas de ensaio na gama dos valores mais elevados do que aqueles que se esperam *in situ*, sendo comum a utilização de temperaturas entre 40 °C e 60 °C (Gardete, 2006).

As elevadas temperaturas que se fazem sentir no verão em território português provocam uma redução na viscosidade do betume, proporcionando o aparecimento de deformações permanentes, mais propriamente, os cavados de rodeira. Por este motivo, a temperatura é assumida como um dos fatores que deve merecer mais atenção, pois a sua influência nas propriedades da mistura betuminosa é enorme, aumentando muito a sua suscetibilidade à deformação permanente com o aumento da temperatura (Barbosa, F., 2012).

Deste modo, e com vista a estabelecer rigor na escolha das temperaturas, é apresentado na Figura 3.4 o zonamento climático para Portugal Continental, elaborado por Freire, A., (2002), no âmbito de um estudo acerca da temperatura a usar neste tipo de ensaios para misturas aplicadas em camadas de desgaste.

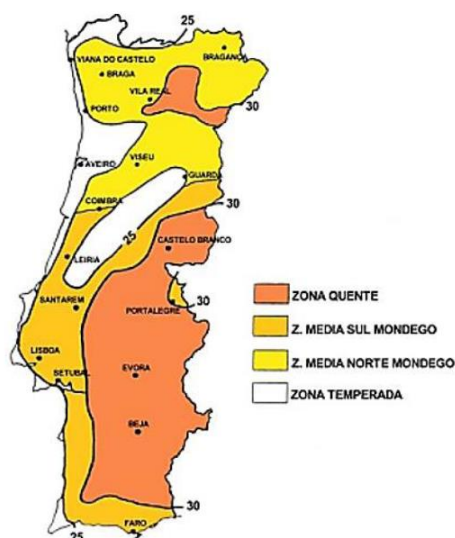


Figura 3.4 - Zonas climáticas de Portugal Continental (Baptista, 1999 citado por Freire, A., 2002)

Na Tabela 3.1 apresentam-se as temperaturas recomendadas a utilizar consoante a zona climática em que se irá aplicar a mistura betuminosa.

Tabela 3.1 - Temperaturas para avaliação da resistência à deformação permanente em Portugal Continental (Freire, A., 2002)

| Zona climática | Temperatura [°C] |
|---|------------------|
| Zona quente | 50 |
| Zona média - Sul do Mondego e zona média norte do Mondego | 45 |
| Zona temperada | 40 |

Com base em resultados de ensaios realizados em pista, verificou-se que a profundidade de rodeira pode aumentar um fator de 250 a 350 com a temperatura, quando este parâmetro aumenta de 20 °C para 60 °C (Hofstra, A. e Klomp, A.J., 1972, citados por Freire, A., 2002).

- Compactação

A compactação é um outro fator que influencia bastante a deformação permanente, pelo facto de estar diretamente relacionada com o volume de vazios da mistura e, conseqüentemente, com os contactos entre partículas no seu esqueleto sólido.

Uma boa compactação leva a volumes de vazios reduzidos podendo desse modo aproximar, quer a baridade da mistura quer a porosidade, aos valores estabelecidos laboratorialmente. Ao diminuir-se o volume de vazios na mistura, esta deforma-se menos quando sujeita à passagem do tráfego, pois caso o volume de vazios seja muito elevado, quando solicitada a mistura irá densificar-se, originando deformações. Este fenómeno ocorre devido à falta de contactos entre partículas de agregados em misturas com compactação deficiente. Deste modo, quando a camada é sujeita a carregamento, as partículas mudam de posição dentro da mistura (rodando), provocando deformações à superfície. Por outro lado, o volume de vazios da mistura após compactação não deve ser muito elevado, pois a mistura poderá tornar-se instável piorando muito o seu comportamento. O volume de vazios para o qual este fenómeno se verifica é designado por “volume de vazios crítico” e é de aproximadamente 3 %, dependendo das misturas (Capitão, S., 2003). No caso das mistura betuminosas drenantes este volume crítico de vazios não se verifica, uma vez que as porosidades destas misturas são superiores a 16 %.

Se a mistura criar resistência suficiente para suportar as cargas, acabará a densificação passando as deformações a ocorrer a volume constante. Se a mistura não adquirir resistência suficiente, o volume de vazios diminuirá sucessivamente até a mistura instabilizar e ocorrerem grandes deformações (Gardete, 2006).

Em obra a compactação é sempre realizada recorrendo a cilindros, no entanto, quando se pretende estudar as misturas em laboratório existem vários processos de compactação

disponíveis para fabricar os provetes. O processo de compactação utilizado condiciona assim os valores obtidos. Este facto torna-se relevante sempre que estão em causa valores obtidos com métodos de compactação diferentes (Khan *et al.*, 1998).

Analisando a Figura 3.5 é mostrado um exemplo de como os provetes de uma mesma mistura betuminosa apresentam diferentes resultados dependentes da forma como foram compactados, para o ensaio de compressão uniaxial estático.

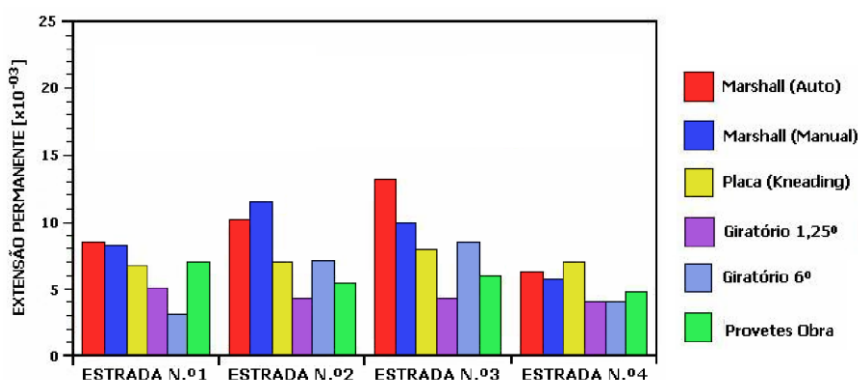


Figura 3.5 - Efeito do processo de compactação no comportamento de misturas betuminosas à deformação permanente (adaptado de Khan *et al.*, 1998 citado por Gardete, 2006)

Segundo Linden, F. e Van der Heide, J. (1987) citados por Freire, A., (2002), é realçada a importância das operações de compactação e concluem que o grau de compactação é um dos principais parâmetros de qualidade a exigir à mistura betuminosa, especialmente em misturas que apresentam baixos teores de betume, com o objetivo de aumentar a resistência à deformação permanente. As misturas bem formuladas e cujos processos construtivos tenham sido bem controlados comportar-se-ão melhor, ou seja, terão uma maior durabilidade e apresentarão melhores características mecânicas, desde que bem compactadas.

- Tipo de betume

O betume é outro fator que influencia a deformação permanente em camadas betuminosas, uma vez que se for em quantidades reduzidas a mistura poderá desagregar-se quando sujeita a solicitações externas. Por outro lado, se a quantidade de ligante for excessiva a mistura tende a deformar-se em excesso quando solicitada, tornando-se uma mistura com baixa resistência à deformação permanente. Para as misturas correntemente utilizadas pode dizer-se que um aumento da percentagem de betume torna a mistura betuminosa mais suscetível à deformação permanente, tal como é ilustrado na Figura 3.6.

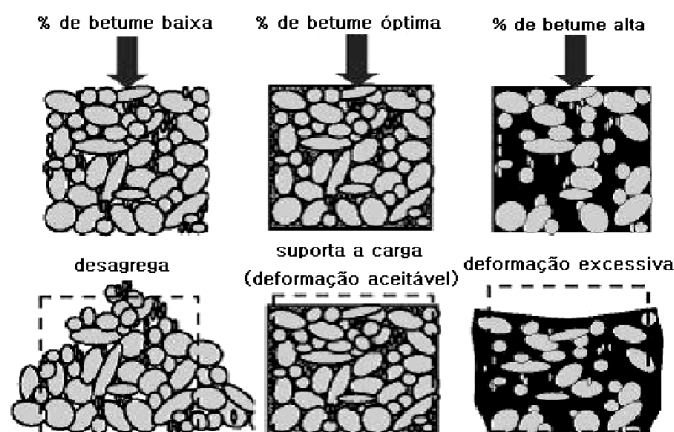


Figura 3.6 - Efeito da quantidade de betume numa mistura betuminosa com uma mesma granulometria (adaptado de Erkens, 2002 citado por Gardete, 2006)

Sendo o betume mais duro, ou seja mais viscoso a uma determinada temperatura, melhor será o seu comportamento à deformação permanente (Prowell, B.D., 1999 e Barreno *et al.*, 2004). Se o betume se apresentar menos fluido, quando solicitado, sofrerá deformações mais baixas, tendo também uma menor componente de deformação viscosa responsável pelas deformações permanentes.

A volatilização e a oxidação dos componentes do betume provocam o seu envelhecimento com a passagem do tempo, e assim uma maior viscosidade para a mesma temperatura. Apesar de este envelhecimento prejudicar algumas características das misturas betuminosas torna-as menos suscetíveis à deformação permanente. Durante o início da vida útil, os pavimentos são mais suscetíveis à ocorrência de fenómenos de deformação permanente, com o envelhecimento do betume estas tornam-se mais resistentes (Gardete, 2006).

No caso de misturas abertas, com porosidades superiores a 16 %, e com 4 % de percentagem ponderal de betume, o efeito do tipo de betume é reduzido, uma vez que a estabilidade da mistura assenta no contacto entre partículas (Freire, A., 2002).

É possível misturar com o betume aditivos que modifiquem o seu comportamento. Entre os aditivos mais comuns, e que são referenciados por alguns autores como passíveis de melhorar o comportamento à deformação permanente, encontram-se o polímero SBS (copolímero de estireno butadieno), tal como evidenciado na Figura 3.3, e a borracha vulcanizada. A adição de diversos tipos de fibras, tais como, as de carbono, de celulose ou, até mesmo, as de poliéster, melhoram o comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas.

- Tráfego

O aumento do tráfego essencialmente pesado, o aumento das cargas transportadas por eixo, a constante substituição dos rodados duplos por rodados simples de base larga e o aumento da pressão de enchimento dos pneus são os principais agentes de formação de patologias em pavimentos rodoviários, nomeadamente os cavados de rodeira (COST 334, 2001).

Prevê-se que existirá até 2030 um crescimento anual no sector do transporte de cargas de 2,1 % para países pertencentes à UE. Na Figura 3.7 apresenta-se a distribuição prevista de transportes de carga por diferentes modos de transporte, excetuando-se o transporte marítimo e pipeline, para os estados membros da UE desde 1990 até 2030. O transporte de mercadorias por estrada terá uma importância crescente, prevendo-se que em 2030 represente 77,4 % do transporte de mercadorias (DG TREN, 2003).

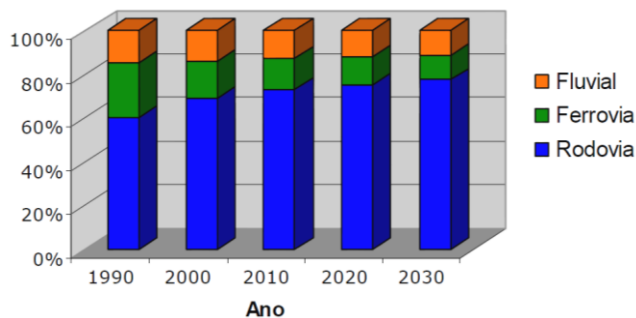


Figura 3.7 - Evolução da repartição modal do transporte de mercadorias na EU, previsão até 2030 (DG TREN, 2003 citado por Gardete, 2006)

Na Figura 3.8 é apresentada uma repartição modal do transporte de bens para diversos países da Europa em 2002. Analisando os dados apresentados, verifica-se que em Portugal o transporte rodoviário de mercadorias é claramente superior ao dos outros meios de transporte, à semelhança do que ocorre na grande maioria dos países europeus.

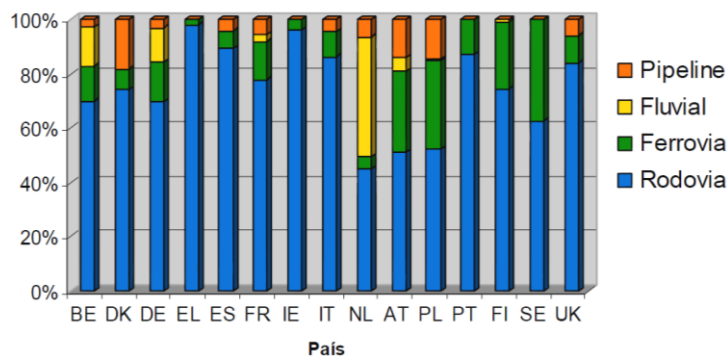


Figura 3.8 - Repartição modal do transporte de mercadorias em diversos países da EU em 2002 (exceto transporte marítimo) (DG TREN, 2004 citado por Gardete, 2006)

O aumento constante do tráfego leva a que se realizem pavimentos com espessuras superiores de misturas betuminosas, pelo qual, cada vez mais devem ser acauteladas questões relacionadas com a composição e execução das misturas betuminosas, bem como fenómenos relacionados com estas, tal como, a deformação permanente. Devido a estas alterações no transporte rodoviário torna-se fundamental procurar soluções, em termos de projeto, construção e conservação, que permitam mitigar estes problemas (Gardete, 2006).

O aumento das cargas nos eixos dos veículos pesados nos pavimentos traduz-se em danos significativos quando se compara o efeito da passagem de um eixo com 100 kN com um de 80 kN. No primeiro caso observa-se uma maior profundidade de rodeira com um acréscimo da

contribuição das camadas betuminosas. Tal como se observa na Figura 3.9 as camadas superiores são aquelas onde se regista um maior acréscimo da contribuição para a deformação permanente (Chen *et al.*, 2004 citados por Gardete, 2006).

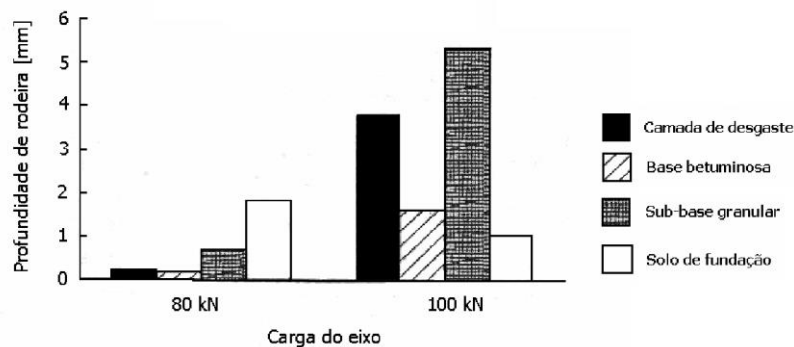


Figura 3.9 - Efeito do excesso de peso por eixo nos pavimentos, contribuição das diversas camadas para a profundidade de rodeira (Chen *et al.*, 2004 citados por Gardete, 2006)

A tendência que se verifica atualmente em substituir os rodados duplos por rodados simples de base larga é outro fator que agrava a formação de cavados de rodeiras, dado a área de pavimento afetada ser menor e a pressão de enchimento do pneu ser superior, provocando tensões no pavimento bastante superiores (COST 334, 2001).

Por outro lado, a velocidade de tráfego também influencia a deformação permanente. Com base em estudos experimentais, verificou-se que para baixas velocidades de tráfego a resposta do pavimento é menos rígida. Este fenómeno ocorre pelo simples facto da carga sobre uma determinada zona do pavimento atuar durante mais tempo, ou seja, um tempo superior de carregamento. Desta forma, resultam deformações superiores onde uma parcela é irreversível. Com base em diversos investigadores, é referido que a extensão vertical máxima em camadas betuminosas provocada por um veículo pesado a 20 km/h é cerca do dobro da provocada pelo mesmo veículo a 80 km/h (Chen *et al.*, 2004 citados por Gardete, 2006).

Um outro fator importante é a distribuição lateral dos veículos. Em locais onde o tráfego é mais canalizado, com uma menor distribuição lateral, os rodados solicitam sempre a mesma zona do pavimento observando-se assim um crescimento mais rápido das rodeiras com o número de eixos. Verifica-se que quando a distribuição lateral dos veículos é maior, a formação de rodeiras por deformação das misturas betuminosas é menor com o número de rodados (Gardete, 2006).

- Granulometria e características dos agregados

A coesão fornecida pelas propriedades do betume e o atrito interno dos agregados são duas componentes que contribuem para a resistência das misturas betuminosas (Pereira, P. e Picado Santos, L., 2002).

Através da granulometria é possível garantir melhorias significativas na estabilidade, na durabilidade, na permeabilidade, na trabalhabilidade, na resistência à fadiga e na resistência à deformação permanente das misturas, bastando para isso uma adequada distribuição granulométrica por forma a garantir um maior número de contactos entre os agregados. (Cunha, 2004 citado por Gardete, 2006).

No que diz respeito a misturas betuminosas drenantes, o uso de agregados de granulometria uniforme favorece o aumento da porosidade, garantindo assim a verdadeira essência deste tipo de misturas. Por outro lado, torna-se difícil garantir um bom contacto entre as partículas de agregado e assim garantir uma resistência adequada deste tipo de misturas quando comparadas com misturas convencionais.

A textura dos agregados também influi na resistência das misturas betuminosas à deformação permanente. Quando os agregados apresentam uma textura superficial mais rugosa, como é o caso dos agregados graníticos, apresentam melhores resultados quando comparados com agregados com textura superficial lisa, como acontece com os agregados calcários. Assim, com o uso de agregados mais rugosos consegue-se uma maior resistência nos contactos das partículas, aumentando a fricção interna e, conseqüentemente, a resistência à deformação permanente. Na Figura 3.10 apresenta-se a correlação estabelecida entre a textura do agregado e a deformação obtida.

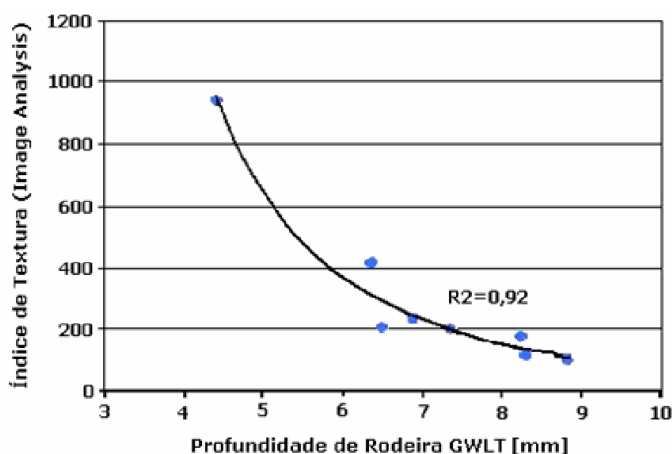


Figura 3.10 - Correlação entre a textura do agregado, determinada por análise de imagem e a deformação obtida no GLWT (Massad *et al.*, 2004 citados por Gardete, 2006).

Ugé, P. e Van de Loo, P.J. (1974) e Brien, D., (1976) citados por Freire, A., (2002), concluíram que misturas betuminosas fabricadas com agregados angulosos (obtidos por britagem) apresentam menores deformações e têm um comportamento mais estável do que misturas com a mesma composição e granulometria com agregados de natureza aluvionar.

Como já foi referido anteriormente, torna-se difícil garantir granulometrias contínuas em misturas drenantes, dado o objetivo de garantir porosidade suficiente nas misturas. Posto isto, e com base em estudos elaborados por diversos autores, parece existir um consenso

generalizado de que as granulometrias descontínuas evidenciam um pior comportamento à deformação permanente. Estudos levados a cabo por Brown, S. e Pell, P. (1974) demonstram que este tipo de comportamento se deve à falta de contacto entre as partículas de agregado, e que se torna mais gravoso quando as misturas são submetidas a temperaturas elevadas, uma vez que o ligante betuminoso proporciona uma lubrificação, que facilita a densificação das misturas.

3.2.3 Consequências da deformação permanente

O pavimento é uma das partes da obra rodoviária mais sujeita a ações agressivas, que podem levar ao aparecimento de vários tipos de anomalias, as quais devem ser evitadas ou rapidamente reparadas. A função essencial de um pavimento rodoviário é assegurar uma superfície de rolamento que permita a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período de vida do pavimento, sob a ação do tráfego, e nas condições climáticas que se verifiquem no local (Branco *et al*, 2011).

As degradações dos pavimentos são geralmente consequência de uma inadequação do material ao uso, podendo este fenómeno ter origem, entre outros, em deficiências de projeto, drenagem mal concebida, materiais de qualidade duvidosa e colocação em obra deficiente. Um desenvolvimento precoce de degradações é um indicador de incongruências ao nível de projeto e conceção, embora com o tempo em serviço, seja de esperar a ocorrência de patologias (Ferreira, A. e Picado-Santos, L., 2007).

Da formação de rodeiras por deformação permanente advêm várias consequências, como por exemplo a diminuição de segurança em tempo de chuva, dado a drenagem transversal ser dificultada. Desta patologia resultam acumulações de água nas depressões geradas no pavimento, agravando assim os fenómenos de hidroplanagem. Em países com invernos rigorosos ao nível de baixas temperaturas, onde haja a ocorrência de fenómenos de formação de gelo, a situação é mais gravosa, já em países com climas secos, a existência de rodeiras no pavimento tornam a condução mais difícil e imprecisa aumentando as dificuldades dos condutores e diminuindo a sua comodidade e segurança (Freire, A., 2002).



Figura 3.11 - Rodeiras de pequeno raio (Videira, 2014).

3.3 Ensaios laboratoriais de caracterização da resistência à deformação permanente

3.3.1 Ensaios empíricos

- Marshall

No que diz respeito a misturas betuminosas a quente realizadas em Portugal (exceto misturas betuminosas drenantes), o método de Marshall, no qual se insere este ensaio, é o mais utilizado em todo o mundo para a formulação de misturas betuminosas (Gardete, 2006).

Este ensaio é realizado de acordo com a norma EN 12697-34:2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test*, e o seu principal objetivo é o de quantificar a resistência mecânica e a deformação sofrida por uma mistura betuminosa compactada laboratorialmente, sob determinadas condições de ensaio. Este ensaio é utilizado como parte da metodologia de formulação de misturas betuminosas mais utilizada em todo o mundo, para obtenção do teor ótimo de betume, e de baridades de referência com vista ao controlo da qualidade das misturas aplicadas (Freire, A., 2002).

Na Figura 3.12 apresenta-se o equipamento utilizado no ensaio de Marshall disponível nos laboratórios do DECA-UBI. Nesta figura é realizado o ensaio em misturas betuminosas densas com vista à escolha do seu teor ótimo.



Figura 3.12 - Equipamento para o ensaio Marshall (DECA-UBI)

A caracterização laboratorial à deformação permanente poderá ser realizada tendo em conta a designada rigidez de Marshall, obtida pelo coeficiente entre os valores da estabilidade Marshall e deformação de Marshall.

A utilização deste ensaio na caracterização à deformação permanente apresenta limitações, por ser um ensaio empírico, que não traduz as ações que a mistura sofre no pavimento, nem determina nenhuma propriedade fundamental. Alguns autores consideram este ensaio

inadequado para caracterizar a resistência das misturas betuminosas à deformação permanente (Chen e Liao, 2002 citados por Gardete, 2006). Das principais vantagens deste tipo de ensaio destacam-se, a sua simplicidade, a sua disponibilidade na maioria dos laboratórios e a vasta experiência na sua utilização.

- Hveem

O método Hveem concebido por Francis N. Hveem, um investigador do *California Department of Transportation*, foi posteriormente objeto de modificações ao longo dos vários anos. Tal como no método de Marshall, o presente método assenta numa longa experiência adquirida através de uma elevada quantidade de resultados obtidos ao longo dos anos, e na sua correlação com comportamentos observados em pavimentos reais (Freire, A., 2002).

Neste ensaio, os provetes são levados até à rotura através do “estabilómetro de Hveem” (Figura 3.13). Como tal, o provete é inserido numa manga de borracha, dentro de um cilindro metálico que contém um líquido. É registada a pressão horizontal desenvolvida pelo provete em ensaio, quando submetido a uma carga axial sendo mantido dentro do molde a 60 °C.

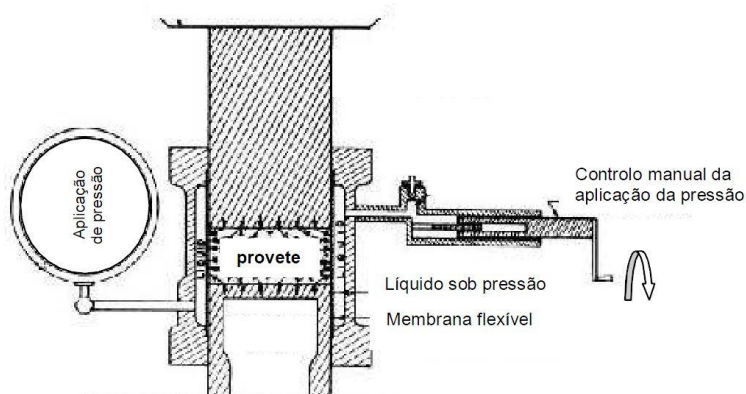


Figura 3.13 - Estabilómetro do ensaio Hveem (adaptado de *Asphalt Institute*, 1993)

3.3.2 Ensaio fundamentais

- Ensaio de compressão uniaxial estáticos

Por forma a avaliar o comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas, desenvolveu-se na década de 70, pelo *Shell Laboratory*, em Amsterdão, o ensaio de compressão uniaxial estático.

Este tipo de ensaio consiste em submeter provetes cilíndricos ou prismáticos a uma carga constante ao longo do tempo, atuando na direção do eixo do provete. Para isso, o mesmo é colocado entre dois pratos, estando um deles fixo e o outro, sobre o qual a força é aplicada, deslocando-se axialmente.

Um dos parâmetros considerado para a caracterização do comportamento das misturas betuminosas à deformação permanente, através de ensaios de compressão uniaxial estáticos, é o valor da extensão medida ao fim de um determinado tempo de ensaio, nomeadamente ao fim de 3600 ou 7200 segundos (Freire, A., 2002). O quociente entre a tensão constante aplicada no decorrer do ensaio e o valor da extensão final, permite calcular o designado “módulo de rigidez da mistura”.

Para a avaliação da resistência à deformação permanente da mistura betuminosa, a deformação utilizada para o cálculo do módulo de rigidez da mistura deveria corresponder à deformação irreversível. Devido às altas temperaturas de realização do ensaio, a parcela de deformação viscosa (irreversível) é muito inferior à parcela da deformação elástica (reversível). Deste modo, para avaliar o comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas pode considerar-se adequado o módulo de rigidez calculado com a deformação total do provete (Gardete, 2006).



Figura 3.14 - Ensaio de compressão uniaxial estático (Freire, A., 2002)

- Ensaios de compressão uniaxial cíclicos

Semelhante ao ensaio de compressão uniaxial estático existe ainda o ensaio de compressão uniaxial cíclico. Neste tipo de ensaio a carga aplicada é cíclica, onde existe uma repetição do carregamento, no entanto, num número reduzido.

Para a realização do ensaio devem ser definidas igualmente as condições de carregamento como sejam a tensão aplicada, a duração do tempo de carregamento e de repouso, a forma do carregamento e o número de carregamentos. O tempo de carregamento nestes ensaios varia, sendo usualmente na ordem dos 10 segundos, após o qual se segue um tempo de repouso com uma duração superior, de forma que o provete recupere toda a extensão reversível.

Este tipo de ensaio, cíclico, surge pelo facto do ensaio de compressão uniaxial estático não simular a passagem do tráfego, ação fundamentalmente dinâmica.

Estes ensaios têm uma configuração igual aos anteriores mas a aplicação de carga é cíclica, com tempos de carga na ordem dos 0,1 a 1 segundos, com tempos de repouso de 0,5 a 1 segundos (Gardete, 2006).

Na Figura 3.15 apresenta-se o exemplo de um equipamento de compressão uniaxial cíclico.



Figura 3.15 - Ensaio de compressão uniaxial cíclico (Freire, A., 2002)

Do resultado deste ensaio surge uma curva de evolução da deformação axial permanente acumulada com o número de carregamentos (Figura 3.16).

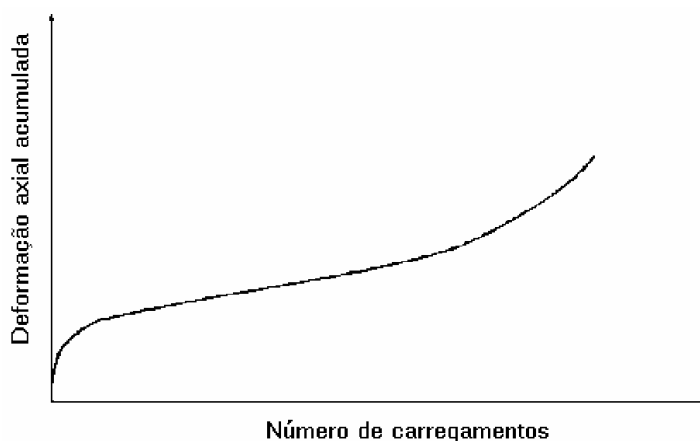


Figura 3.16 - Curva típica de deformação obtida em ensaios de compressão uniaxial cíclicos (Freire, A., 2002)

Deste gráfico resultam três fases características, entre as quais:

- Fase 1 - a inclinação da curva é muito acentuada com a aplicação de cargas. O principal fator que justifica esta fase é a densificação da mistura com a alteração da macrotextura e a reorientação das partículas do agregado que levam a uma mistura mais resistente;

- Fase 2 - a inclinação da curva é mais ténue com as repetições da carga. Nesta fase, a deformação permanente é devida a deformações por corte;
- Fase 3 - a inclinação da curva cresce rapidamente com a aplicação da carga, verificando-se a rotura do provete. A rotura poderá dever-se a vários fatores como sejam a fadiga, a não homogeneidade da mistura, etc.

- Ensaio de compressão triaxial

O ensaio de compressão triaxial permite, de certo modo, aproximar as condições de tensão de ensaio às que a mistura betuminosa está sujeita na realidade. Este tipo de ensaio torna possível que seja aplicado a um provete uma tensão de confinamento, à semelhança do que acontece num pavimento, o que os ensaios de compressão uniaxial não permitem simular de forma satisfatória.

Semelhantes aos ensaios de compressão uniaxial estáticos os ensaios de compressão triaxial têm como única diferença a tensão de confinamento que se aplica nos provetes, sendo assim possível realizar ensaios de compressão triaxial estáticos ou cíclicos.

A existência de uma tensão de confinamento permite realizar o ensaio com temperaturas e tensões superiores, simulando melhor o que acontece *in situ*, sem que ocorra a rotura prematura do provete (Gardete, 2006).

A norma EN 12697-25:2003 refere que se devem utilizar temperaturas de ensaio na ordem dos 40 °C e 60 °C. No que diz respeito à tensão de confinamento a mesma pode ser aplicada por água ou através de uma membrana sujeita a vácuo. Na Figura 3.17 apresenta-se o exemplo de um equipamento de compressão triaxial cíclico no qual a tensão de confinamento é aplicada com água, podendo observar-se na figura a câmara que envolve o provete e permite aplicar a tensão de confinamento.



Figura 3.17 - Curva típica de deformação obtida em ensaios de compressão uniaxial cíclicos (Gardete, 2006)

Os resultados deste tipo de ensaios são apresentados graficamente, em termos da extensão permanente acumulada em função do número de ciclos de aplicação das cargas. Tal como se referiu para o ensaio de compressão uniaxial cíclico, neste ensaio a curva obtida apresenta igualmente três fases principais (Freire, A., 2002).

- Ensaio de corte

Os ensaios de corte permitem, de certo modo, avaliar o comportamento de materiais betuminosos para pavimentação, do ponto de vista de deformação permanente, através da aplicação de cargas repetidas.

Este tipo de ensaios apresenta uma maior divulgação e utilização em países como os Estados Unidos da América, estando incluídos no programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*) com vista a avaliar a resistência à deformação permanente de misturas betuminosas quando sujeitas a temperaturas elevadas (Sousa, J. *et al.*, 1991).

O equipamento de ensaios de corte permite realizar diversos tipos de ensaio. Na Europa não é comum a sua utilização, não estando prevista nenhuma norma para a sua realização, no entanto nos EUA a norma AASHTO TP7-01 define os seguintes ensaios (Gardete, 2006):

- Ensaio de corte com varrimento de frequência com altura constante (*Shear Frequency Sweep Test at Constant Height*), em que é aplicada ao provete uma extensão de forma sinusoidal com uma amplitude de 0,0001 mm/mm, as frequências testadas são de 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02 e 0.01 Hz, durante o ensaio a altura do provete é mantida constante;
- Ensaio de corte simples a altura constante (*Simple Shear Test at Constant Height*), onde se aplica uma tensão de corte que varia com a temperatura utilizada no ensaio variando entre 345 kPa (T = 4 °C) e 35 kPa (T = 40 °C). Esta tensão é mantida constante durante 10 segundos após o que se segue um período de repouso de igual duração. Durante o ensaio a altura do provete é igualmente mantida constante;
- Ensaio de corte cíclico a altura constante (*Repeated Shear at Constant Height*), este é um ensaio dinâmico em que o provete é sujeito a um carregamento sinusoidal com repouso. É aplicada uma tensão máxima de corte de 69 kPa, com um tempo de carregamento de 0,1 segundos seguido de um repouso de 0,6 segundos. Este tipo de ensaio tem a duração de 5000 ciclos e é igualmente mantida constante a altura do provete.

Na Figura 3.18 representa-se a instrumentação dos provetes para o ensaio de corte a altura constante (Santucci, 2001).

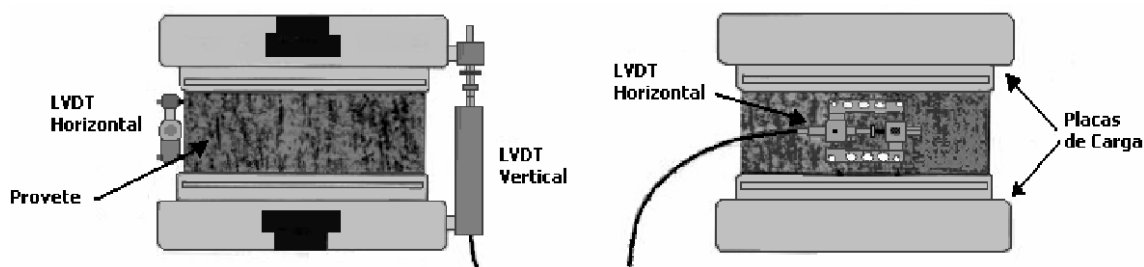


Figura 3.18 - Esquema da instrumentação de um provete para o ensaio de corte a altura constante (adaptado de Santucci, 2001)

- Ensaios de compressão diametral ou tração indireta

Contrariamente aos ensaios apresentados anteriormente, os ensaios de tração indireta apresentam a característica principal da carga ser aplicada diametralmente e não perpendicularmente às faces do provete. Este tipo de ensaio é utilizado para medir as propriedades das misturas betuminosas a baixas e médias temperaturas, tais como a fragilidade térmica e a resistência à tração. Paralelamente aos resultados que se podem obter deste tipo de ensaios é ainda possível determinar o módulo de rigidez das misturas.

Neste tipo de ensaio, o betume assume um papel fundamental na caracterização da mistura, podendo assim não apresentar resultados fiáveis na caracterização das misturas à deformação permanente, pois a resistência fornecida pelo esqueleto do agregado pode não ser corretamente contabilizada.

Com vista á realização deste ensaio existem dois tipos de equipamentos entre os mais divulgados, tais como o *Nottingham Asphalt Tester* (NAT) e o *Universal Asphalt Tester* (MATTA). Este tipo de ensaios poderá ser realizado de forma estática ou com aplicação de cargas cíclicas (Gardete, 2006). Na Figura 3.19 é representado o ensaio de compressão diametral NAT disponível nos laboratórios do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior (DECA-UBI).



Figura 3.19 - Ensaio de compressão diametral (DECA-UBI)

- Ensaio de cilindro oco

O ensaio de cilindro oco surge como um ensaio bastante complexo utilizado essencialmente em trabalhos de investigação. Neste tipo de ensaio é possível aplicar ao provete forças axiais e de corte simultaneamente. Torna-se assim possível simular com mais rigor as solicitações a que o material está sujeito quando solicitado pelo rodado de um veículo, nomeadamente a rotação das tensões principais (Gardete, 2006). Para este ensaio o provete é um cilindro oco, podendo ser obtido por carotagem do interior de um provete cilíndrico e utilizando a parte exterior no ensaio. Na Figura 3.20 apresenta-se um exemplo de um provete para este ensaio.

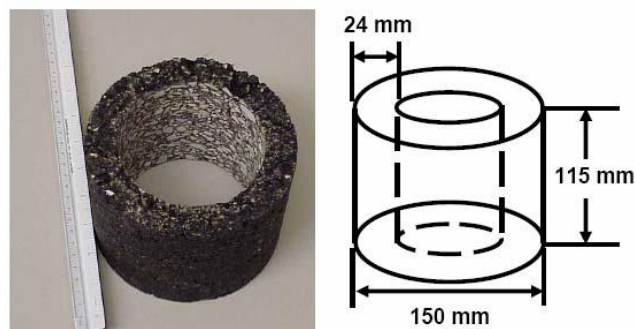


Figura 3.20 - Cilindro oco e dimensões utilizadas para realização do ensaio (TRB, 2004)

Os resultados do ensaio permitem determinar a resistência à fadiga e o módulo de deformabilidade da mistura. O ensaio de cilindro oco é um ensaio muito complexo nas suas diferentes fases. A obtenção dos provetes exige algum esforço e a forma destes impossibilita a utilização de provetes recolhidos em obra. Este é um ensaio que, devido a estas condicionantes, apenas tem sido utilizado em investigação não parecendo reunir as condições para uma utilização na prática (Gardete, 2006).

3.3.3 Ensaio de simulação

Neste tipo de ensaios o objetivo é simular as ações do tráfego utilizando para efeito um rodado. Dentro deste tipo de ensaios encontram-se os ensaios de simulação em pista de laboratório e os ensaios de simulação em pista à escala real. Tanto os ensaios de simulação em pista de laboratório como os de simulação em pista à escala real não possibilitam a obtenção de propriedades fundamentais dos materiais ensaiados, permitem no entanto, efetuar uma avaliação comparativa do seu comportamento quando sujeitos à ação de passagens sucessivas de um rodado sob determinadas condições de ensaio. No âmbito da presente dissertação o ensaio de simulação em pista de laboratório, *wheel tracking test*, será descrito com maior rigor dado ter sido escolhido para avaliar o comportamento à deformação permanente de vários tipos de misturas betuminosas.

- Ensaios de simulação em pista de laboratório - *Wheel Tracking Test*

Os ensaios de simulação em pista de laboratório, designados por *wheel tracking test*, têm como objetivo representar as ações do tráfego através de passagens sucessivas de um rodado, para avaliação do comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas. Embora seja de natureza empírica, permite caracterizar de forma comparativa o comportamento à deformação permanente de duas ou mais misturas betuminosas (Mendes, S.F., 2011).

Este ensaio consiste na medição da profundidade de rodeira formada após sucessivas passagens de uma roda sobre o provete em condições de temperatura elevadas. É realizado de acordo com a norma europeia EN 12697-22:2003 e é vulgarmente denominado como ensaio de pista devido às características do equipamento usado.

A norma europeia EN 12697-22: 2003 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking*) considera a utilização de dois tipos de equipamentos, o equipamento de grandes dimensões (designado por *large-size device* no termo inglês) e o equipamento de pequenas dimensões (designado por *small-size device* no termo inglês).

Dentro do equipamento de pequenas dimensões distinguem-se ainda dois procedimentos distintos (procedimento A e B), os quais se diferenciam pelo ambiente em que decorre o ensaio, ao ar ou em banho de água (apenas para o procedimento B) e pela duração do ensaio. O ensaio pelo procedimento A termina quando se atingem 1000 ciclos de carga, sendo que um ciclo corresponde a duas passagens da roda de ida e volta, ou quando o sulco atingir uma profundidade de 15 mm. O procedimento mais corrente é realizado por condicionamento ao ar (procedimento B), o ensaio termina quando se atingem 10 000 ciclos de carga aplicados ou quando o sulco atinja uma profundidade de 20 mm.

O número de provetes (lajetas) necessários à realização do ensaio também varia consoante o equipamento. Na Tabela 3.2 resume-se essa mesma informação indicada na respetiva norma.

Tabela 3.2 - Número de provetes (adaptado da EN 12697-22)

| Equipamento | Numero mínimo de provetes |
|--------------------------------------|---------------------------|
| Grande ou Extra-grandes dimensões | 2 |
| Pequenas dimensões, Proc. A, ao ar | 6 |
| Pequenas dimensões, Proc. B, ao ar | 2 |
| Pequenas dimensões, Proc. B, em água | 2 |

Do ensaio de pista em provetes acondicionados ao ar, é possível obter resultados relativos ao declive máximo da rodeira ao ar - *Wheel tracking slope in air* (WTS_{air}), a média proporcional da profundidade da rodeira nos dois provetes ensaiados - *Mean Proportional Rut Depth in air* (PRD_{air}) e a profundidade média da rodeira - *Mean Rut Depth in air* (RD).

O declive máximo da rodeira ao ar (WTS_{air}) é obtido com base na profundidade de rodeira após 10 000 ciclos (d_{10000}) e a profundidade de rodeira após 5 000 ciclos (d_{5000}), tal como será exposto no capítulo 4.

Segundo Brown *et al.* (2001) citados por Freire, A. (2002), os ensaios de *wheel tracking* são à priori aqueles que mais facilmente poderão ser implementados no mercado para utilização geral, em termos de análise e controlo de qualidade. São ensaios simples e cujo equipamento apresenta preços acessíveis. No entanto, é ainda necessário estabelecer características de ensaio e valores limite para os resultados, de forma a tornar mais coerente a sua utilização e a interpretação destes, nomeadamente, em termos de aceitação ou rejeição de uma mistura para ser utilizada num pavimento sujeito a determinadas ações de temperatura e de tráfego.

Os resultados de *wheel tracking* podem ser apresentados de forma gráfica, obtendo-se curvas com forma semelhante à indicada na Figura 3.21.

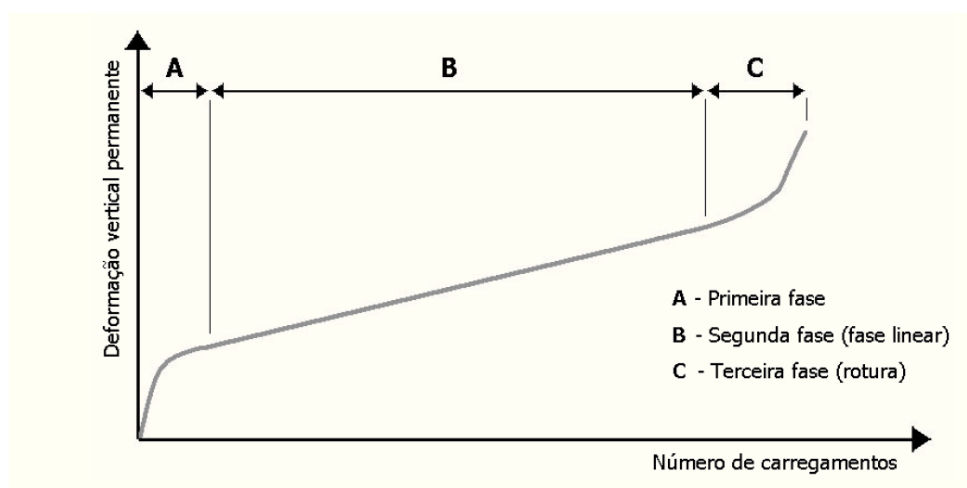


Figura 3.21 - Fases da evolução da deformação permanente (Freire, A., 2002)

Numa primeira fase (A), verifica-se uma variação rápida e acentuada da inclinação da curva. Este tipo de comportamento justifica-se pela deformação verificada devido a tensões de corte e também pela densificação na camada betuminosa. O facto de existir uma densificação, leva a uma maior quantidade de pontos de contacto entre as partículas de agregados da mistura, fenómeno que se estende até a mistura ter resistência suficiente para suportar as cargas sem sofrer mais redução de volume, passando as deformações a ocorrer a volume constante (Gardete, 2006).

Resultante do fenómeno de densificação surge a segunda fase (B), onde se verifica uma velocidade de deformação inferior e praticamente constante. Nesta fase a curva de deformação é quase linear, pelo que a velocidade de deformação obtida nesta fase é usualmente o indicador utilizado para a caracterização das misturas betuminosas à deformação permanente.

Por fim, a última fase (C) a velocidade de deformação cresce rapidamente, facto esse que leva o provete a sofrer deformações apreciáveis. Esta última fase é associada à rotura do provete (Freire, A., 2002; Gardete, 2006).

No que diz respeito a misturas betuminosas drenantes sabe-se que as mesmas apresentam uma menor resistência à deformação permanente do que as misturas densas convencionais pelo facto de possuírem níveis de porosidade muito superiores. Para este tipo de misturas, não existem valores preconizados para os resultados do ensaio *Wheel tracking*, existindo apenas valores obtidos por outros investigadores, tal como será apresentado no subcapítulo 3.4.

No que diz respeito à generalidade das misturas betuminosas, mais propriamente misturas densas convencionais, não existem em Portugal valores preconizados para os resultados do ensaio *wheel tracking*, existindo unicamente a condição no CE EP (2014) da realização do ensaio a 60 °C. No entanto, em Espanha estão definidos valores nas especificações técnicas (PG-3, 2013) de acordo com a norma EN 12697-22:2003, para camadas de desgaste de pavimentos, tal como se apresenta na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Declive máximo da rodeira no intervalo 5 000 a 10 000 ciclos para camada de desgaste (EN 12697-22 (mm por 10³ ciclos de carga), (PG-3, 2013)

| Zona Térmica Estival | Categoria do tráfego pesado (veículos pesados/dia) | | | | |
|----------------------------|---|-------------------------|------------------------|-----------------------|--------------|
| | T00 e T0 (≥ 2000) | T1 (< 2000 ≥ 800) | T2 (< 800 ≥ 200) | T3 (< 200 ≥ 50) | T4 (< 50) |
| Quente | 0,07 | | | 0,10 | - |
| Media | 0,07 | | 0,10 | | - |
| Temperada | 0,10 | | | - | |

Na Figura 3.22 apresenta-se o equipamento *Wheel Tracking*, de pequenas dimensões, instalado nos laboratórios de materiais e construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da UBI (DECA-UBI), que permite a execução de ensaios através da norma europeia EN 12697-22: 2003, pelo procedimento B, tendo para o efeito uma câmara onde é possível regular a temperatura de ensaio. Juntamente com o equipamento de ensaio encontra-se o computador que regista através de um *software* todos os resultados.



Figura 3.22 - Ensaio de pista de laboratório para determinação da resistência à deformação permanente (*Wheel tracking*) (DECA-UBI)

- Ensaios de simulação em pista à escala real

O ensaio de simulação em pista à escala real foi desenvolvido para, entre outras características, simular em escala real o comportamento às deformações permanentes de um pavimento. O facto de ser um ensaio realizado à escala real induz algumas limitações, nomeadamente, o seu elevado custo e a dificuldade de montagem do equipamento. Por outro lado, torna-se difícil introduzir algumas condicionantes como é o caso do fenómeno de envelhecimento dos materiais (Mendes, S.F., 2011).

A principal vantagem deste tipo de ensaio é a obtenção de resultados num intervalo de tempo substancialmente reduzido, quando comparado com a situação real observada nos pavimentos em serviço (Freire, A., 2002).

Em todo o mundo existem diversos tipos de pistas de ensaio, lineares ou circulares, interiores ou exteriores, em vários países. Na Figura 3.23 ilustram-se duas pistas de ensaio circulares, uma interior e outra exterior. Este tipo de pistas simula a ação do tráfego através da aplicação de um ou dois rodados a velocidades que variam entre 4 e 20 km/h, sobre pavimentos contruídos à escala real. No caso das pistas interiores, uma das principais vantagens é o controlo da temperatura de ensaio (Corté, J., *et al.* 1997 citados por Freire, A., 2002).

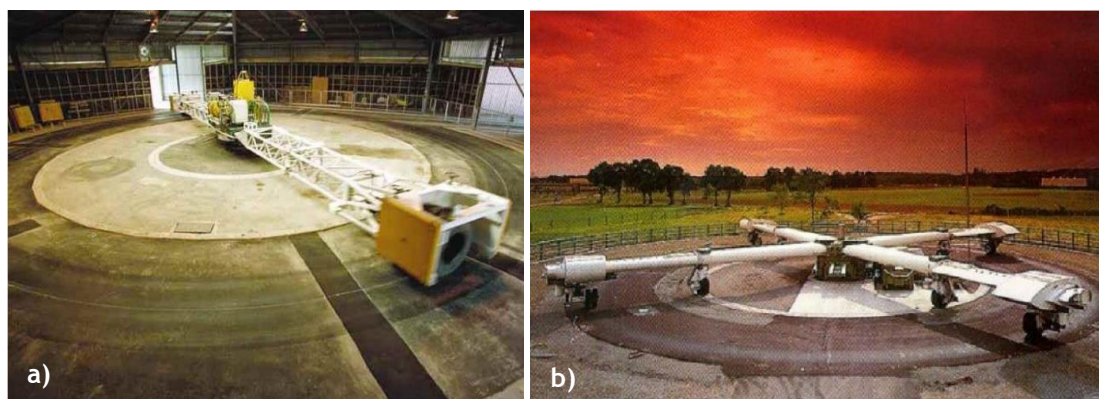


Figura 3.23 - a) Pista de ensaios circular interior CAPTIF (*Cartebury Accelerated Pavement Testing Indoor*); b) Pista de ensaios circular exterior do *Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées*.

Em Espanha existe uma pista de ensaios do CEDEX (Centro de estudos) que possui a particularidade de ter uma forma que possibilita a existência de dois troços retos e curvilíneos (Figura 3.24) (Freire, A., 2002).



Figura 3.24 - Pista de ensaios à escala real do CEDEX - Espanha (Fonte: www.cedex.es).

Como alternativa à utilização destas pistas, poderá recorrer-se à observação de troços experimentais em estradas em serviço, sendo possível avaliar a resposta dos materiais sob a ação real do tráfego e das condições atmosféricas locais, verificando-se no entanto a desvantagem do comportamento dos materiais ser afetado por parâmetros que não são controlados neste caso. Nesta alternativa acresce o elevado tempo necessário para a obtenção de resultados por esta via (Freire, A., 2002).

3.4 Análise da deformação permanente em misturas betuminosas drenantes

As misturas betuminosas drenantes surgem como uma medida inovadora de drenagem rápida de águas pluviais que se poderiam acumular na superfície de pavimentos. As características

estruturais deste tipo de misturas são um conceito muito pouco abordado e de pouca confiança a nível de capacidade de carga. Em seguida apresenta-se um conjunto de conclusões citadas por vários investigadores que realizaram ensaios de deformação permanente neste tipo de misturas betuminosas (Homem, T., 2002).

Já no ano de 1990, Pérez-Jiménez e Gordillo estudaram o comportamento de misturas betuminosas drenantes à deformação permanente através de ensaios do tipo *wheel tracking test* a uma temperatura de 60 °C. Estes autores concluíram que provetes produzidos com ligante modificado apresentam uma maior resistência à deformação permanente, em comparação com provetes com ligante convencional na sua composição. O uso de ligantes modificados permite também diminuir o efeito de pós compactação ocorrido pela passagem de tráfego, facto que acontece frequentemente em pavimentos com camadas superficiais porosas.

Huet *et al.* (1990) constataram que o uso de 1 % de fibras minerais nas misturas betuminosas drenantes aumentava significativamente a resistência à deformação permanente em comparação com as misturas onde estas não foram introduzidas.

Campos (1998) obteve na sua investigação valores bastante reduzidos de deformação permanente em misturas betuminosas drenantes. O autor concluiu que com o aumento da percentagem de betume ocorre uma diminuição na resistência à deformação permanente.

A estrutura dos agregados e o ligante utilizado assumem um papel fundamental na resistência à deformação permanente. Desta forma, Brown e Gibb (1996) levaram a cabo um estudo intensivo realizando para tal ensaios em pista experimental, e ensaios do tipo *wheel tracking*. Dos ensaios realizados e numa análise dos resultados daí obtidos, verificou-se que a aplicação de tensão de confinamento é um fator bastante importante para misturas em que o mecanismo de resistência à deformação permanente passa fundamentalmente pelo atrito e intertravamento entre os agregados. Desta forma, os autores recomendam a utilização de ensaios com confinamento para misturas betuminosas drenantes.

O uso de ligantes modificados, combinado com o uso de fibras foi alvo de estudos por parte de Mallick *et al.* (2000) sendo realizados ensaios de deformação permanente a uma temperatura de 64 °C e 8000 ciclos de carregamento. Numa análise dos resultados verificou-se uma melhoria no comportamento à deformação permanente em misturas com fibras e ligantes modificados.

Homem, T. (2002) desenvolveu um estudo com o objetivo de avaliar a influência da quantidade de betume e de fibras de vidro nas propriedades das misturas betuminosas drenantes, mais propriamente a resistência ao desgaste e à deformação permanente. Para o efeito foram assumidos intervalos de variação quer para a percentagem de betume quer para as fibras. Sendo 3,5 a 6,5 % para o teor de betume e 0 a 1 % para as fibras de vidro. Através do ensaio de desgaste Cântabro verificou-se que quanto maior a quantidade de betume na mistura, melhor é a sua resistência ao desgaste. Por outro lado, para percentagens de fibra compreendidas

entre 0 e 0,5 % qualquer aumento do teor de ligante traduz-se numa redução da resistência ao desgaste.

No que diz respeito à deformação permanente, o presente investigador observou que uma adição de fibras até 0,4 % provoca uma diminuição da deformação permanente. Por outro lado, o acréscimo de fibras após os 0,4 % induz num aumento da deformação permanente. No que diz respeito ao uso de ligantes verificou-se que um aumento do teor de ligante provoca um aumento na deformação permanente. De um modo geral, no estudo levado a cabo por Homem, T. (2002), concluiu-se que a utilização de fibras não revela nenhuma vantagem significativa em relação a misturas sem fibras.

O processo de compactação de lajetas em laboratório, segundo Oliveira, C., (2003), surge como uma causa para resultados insatisfatórios no que diz respeito à deformação permanente, dado a baridade estabelecida não se conseguir alcançar, levando a um aumento da porosidade que favorece uma maior deformação permanente. No estudo de avaliação do desempenho de misturas betuminosas drenantes à deformação permanente, o investigador recorreu às especificações francesas onde é referido que determinada mistura betuminosa é considerada resistente à deformação permanente quando apresenta, no máximo, uma profundidade de rodeira de 10 % em relação à espessura da lajeta, após 30 000 ciclos. Durante o estudo laboratorial não foi possível concluir os 30 000 ciclos uma vez que a presente especificação limita o ensaio até uma deformação máxima de 15 %. Apresenta-se na Figura 3.25 os resultados em forma de gráficos do ensaio *wheel tracking* para duas lajetas, a lajeta IV com uma baridade de 1718 g/cm³ e uma porosidade de 31 %, e uma lajeta V com uma baridade de 1813 g/cm³ e porosidade de 28 %.

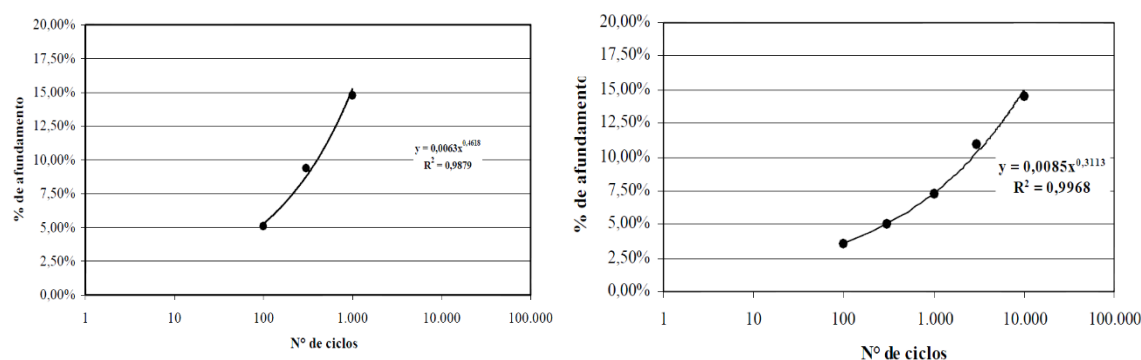


Figura 3.25 - Deformação permanente para a lajeta IV e V (Oliveira, 2003)

Como se pode observar nos resultados da deformação permanente o autor concluiu que a compactação da lajeta IV ficou muito aquém do desejado resultando uma maior porosidade que induz num pior desempenho à deformação permanente, tal como é demonstrado.

Em 2005, Dumke verificou que o uso de fibras celulósicas em misturas betuminosas drenantes levou a um aumento da percentagem de vazios comunicantes e da permeabilidade. A presença

de fibras celulósicas levou a uma diminuição da perda por desgaste no ensaio cântabro seco, no entanto, no ensaio húmido a 60 °C, verificou-se uma perda por desgaste bastante superior.

Tendo em conta a elevada porosidade das misturas betuminosas drenantes, combinada com as altas temperaturas e o tipo de ambiente onde se inserem, Jiang e Xiao (2012) salientam que o uso do índice de avaliação convencional, tais como a estabilidade sob altas temperaturas e a estabilidade sob o efeito de água, por forma a avaliar o desempenho deste tipo de misturas, é único. O estudo levado a cabo em misturas betuminosas drenantes com o mesmo tipo de agregados, mas diferentes composições, quando comparados com mistura do tipo AC-13, mostraram que o ensaio *Hamburg Wheel Tracking* não só considera o efeito das altas temperaturas mas também um reduzido desempenho da mistura sob uma carga de longa duração. Durante a realização do ensaio *Hamburg Wheel Tracking* obteve-se uma profundidade média de rodeira de 3,89 mm. Deste estudo concluiu-se que para o mesmo tipo de materiais constituintes das misturas e para a mesma porosidade, as misturas drenantes de granulometria mais grossa possuem uma melhor estabilidade para altas temperaturas e sob o efeito de água.

Em 2015, Chen *et al.*, levaram a cabo um estudo onde se pretendeu avaliar o comportamento ao desgaste no ensaio cântabro e o desempenho à deformação permanente de misturas com diferentes tipos de ligantes. Para isso, foram realizadas misturas com betume convencional (AR), polímeros (SBS), betume modificado (MA) e betume de alta viscosidade (HV). Esta última é caracterizada pela elevada viscosidade a temperaturas de 60 °C. Foi ainda avaliado o efeito da adição de uma percentagem de fibras celulósicas na ordem dos 0,3 % nas misturas AR e MA. No que diz respeito ao ensaio Cântabro, a mistura HV foi a que apresentou menores perdas. Na Figura 3.26 são apresentados os resultados do ensaio de desgaste.

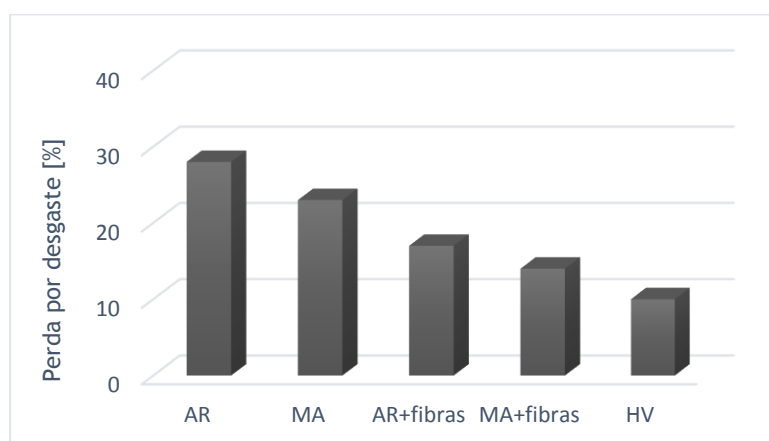


Figura 3.26 - Perda por desgaste no ensaio cântabro (adaptado de Chen *et al.*, 2015)

No que diz respeito à deformação permanente, a profundidade de rodeira mostrou ser sensível ao tipo de ligante utilizado. As cinco misturas foram sujeitas a 6 000 ciclos e nenhuma delas ultrapassou uma profundidade de rodeira superior a 5 mm. Na Figura 3.27 é apresentado o resultado do ensaio de deformação permanente para as cinco misturas, verificando-se que o

uso de betume modificado com polímeros apresenta uma maior resistência à deformação permanente do que misturas fabricadas com ligante convencional.

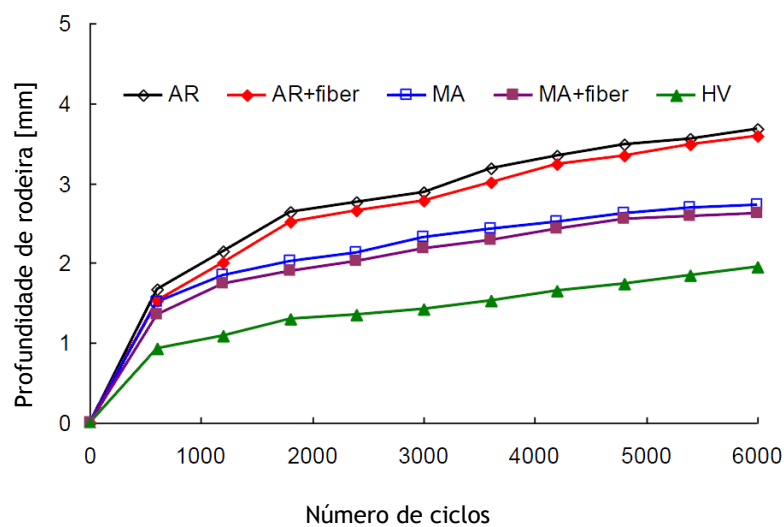


Figura 3.27 - Resultados do ensaio *wheel tracking* (adaptado de Chen *et al.*, 2015)

CAPÍTULO 4 - Trabalho experimental

4.1 Introdução

No presente capítulo apresenta-se uma descrição e discussão de todo o trabalho experimental desenvolvido no âmbito da presente dissertação. O estudo experimental desenvolvido dividiu-se em três etapas fundamentais, começando pela caracterização dos materiais constituintes das misturas e escolha da composição granulométrica, de seguida passou-se à formulação final da mistura com a determinação do teor ótimo de betume. Por fim, pelos ensaios de caracterização mecânica das misturas, mais concretamente o ensaio de desempenho à deformação permanente.

Durante a investigação, foram elaborados quatro tipos de misturas betuminosas drenantes. A mistura grossa sem fibras celulósicas (MGSF), a mistura fina sem fibras celulósicas (MFSF), a mistura grossa com fibras celulósicas (MGF) e a mistura fina com fibras celulósicas (MFF), todas elas com betume PMB 45_80-60 fornecido pela CEPISA S.A. com designação comercial Elaster 13/60.

Pretende-se neste capítulo perceber a real influência das fibras celulósicas nas duas misturas que compõe a camada superficial de um suposto pavimento betuminoso permeável, tanto ao nível das formulações a aplicar, bem como no seu comportamento mecânico, avaliado através de ensaios de rigidez e de deformação permanente.

Inicialmente, começou-se por realizar a análise granulométrica de todos os agregados, determinando-se também a sua massa volúmica respetiva. Seguidamente, procedeu-se ao estudo de composição das misturas betuminosas de acordo com o fuso PA 12,5 (BBd), preconizado pelo Caderno de Encargos tipo obra das Estradas de Portugal (CE EP, 2014) para camadas de desgaste drenantes. Nesta fase, definiu-se a composição de duas misturas, mistura grossa e fina.

A escolha dos teores ótimos de betume de cada mistura efetuou-se através da porosidade e da determinação da perda por desgaste no ensaio Cântabro, de acordo com o estabelecido no Caderno de Encargos tipo obra das Estradas de Portugal (CE EP, 2014).

Conhecidos os teores ótimos de betume de cada mistura drenante, produziram-se provetes cilíndricos, com vista a avaliar a rigidez e lajetas com vista a avaliar o comportamento à deformação permanente.

4.2 Caracterização dos materiais usados

4.2.1 Agregados

No presente trabalho experimental utilizaram-se quatro tipos de agregados, sendo eles a brita 5/10 proveniente da pedra de Fornos de Algodres, localizada no distrito da Guarda, brita 5/15, e pó de pedra provenientes da pedra da Capinha, localizada no concelho do Fundão. É apresentado na figura seguinte os respetivos agregados.



Figura 4.1 - a) Brita 5/10; b) Brita 5/15; c) Pó de Pedra.

- Análise Granulométrica

Com vista a realizar a análise granulométrica dos agregados, foi tida em conta a Norma Portuguesa NP EN 933-1:2000, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração. Colocaram-se os agregados num agitador mecânico durante um período de 5 minutos (Figura 4.2). Seguidamente, cada um dos peneiros foi pesado obtendo-se a percentagem de material retido em cada um.



Figura 4.2 - a) Colocação do agregado na série de peneiros; b) Cronometragem da peneiração; c) Pesagem de cada peneiro com o material retido.

Apresenta-se na Figura 4.3 as análises granulométricas dos agregados utilizados na produção das misturas betuminosas drenantes.

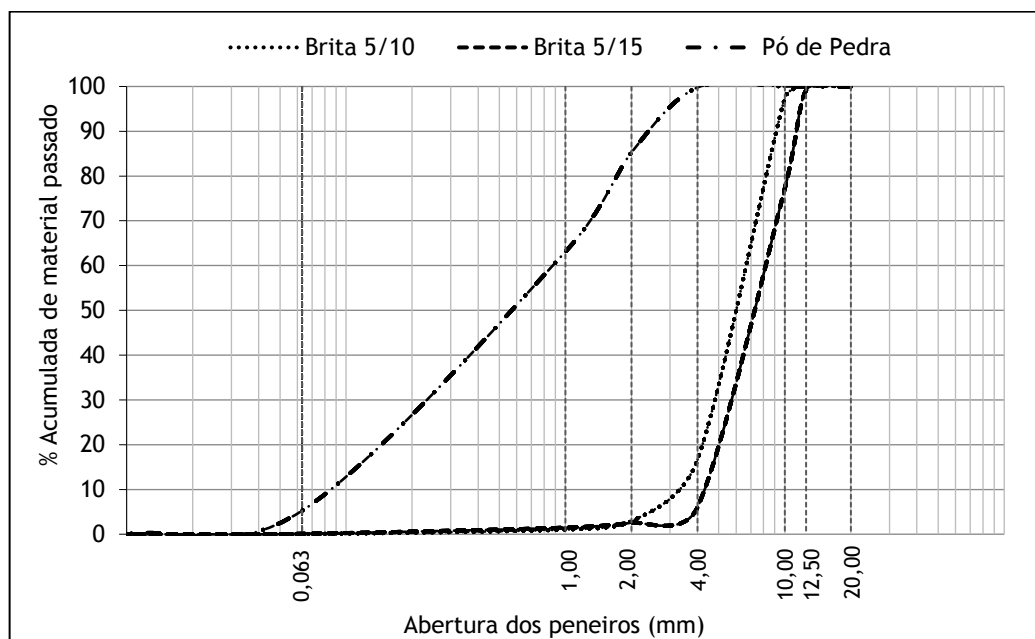


Figura 4.3 - Análise granulométrica dos agregados utilizados.

- Massa Volúmica

De acordo com a Norma Portuguesa EN 1097-6:2003, Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica foi possível determinar a massa volúmica. Para o pó de pedra recorreu-se ao método do picnómetro de hélio (Figura 4.4), para os restantes agregados (grossos) recorreu-se ao método de pesagem hidrostática com cesto de rede metálica (Figura 4.5).

A massa volúmica do pó de pedra determinou-se através do picnómetro de hélio (AccuPyc™ 1330 Gas Pycnometer) resultando três medições para cada amostra, no final obtém-se o valor de massa volúmica média sem recurso a qualquer cálculo. Com este método, consegue-se obter uma maior precisão nos valores obtidos.



Figura 4.4 - Picnómetro de hélio.

O cálculo da massa volúmica dos agregados grossos foi realizado de acordo com a NP EN 1097-6:2003, referida anteriormente O procedimento adotado é retratado na Figura 4.5.



Figura 4.5 - a) Pesagem hidrostática; b) Secagem da superfície das partículas.

Depois do ensaio ter sido realizado e se terem obtido os valores, recorreu-se à seguinte expressão:

$$\rho = \frac{M_1}{M_1 + M_2 - M_3} \times \rho_w \quad (4.1)$$

Em que:

ρ - massa volúmica das partículas saturadas com superfície seca [kg/m³];

ρ_w - massa volúmica da água à temperatura de ensaio [kg/m³];

M_1 - massa do agregado saturado com superfície seca [kg];

M_2 - massa do cesto + agregado saturado, imerso em água [kg];

M_3 - Massa do cesto vazio, imerso em água [kg].

Em seguida apresenta-se na Tabela 4.1 o resumo dos valores obtidos para a massa volúmica de todos os agregados:

Tabela 4.1 - Massa volúmica do pó de pedra e das britas 5/10 e 5/15.

| Agregados | Massa Volúmica [kg/m ³] |
|-------------|-------------------------------------|
| Pó de Pedra | 2690 |
| Brita 5/10 | 2560 |
| Brita 5/15 | 2620 |

4.2.2 Ligante betuminoso

O ligante betuminoso utilizado nas misturas drenantes foi o betume modificado com polímeros PMB 45_80-60. Este betume foi fornecido pela CEPISA Portuguesa, S.A. e tem a designação comercial de Betume Elaster 13/60. Na Tabela 4.2 apresenta-se a caracterização deste betume, elaborado pelo Laboratório Controlo Qualidade, em Matosinhos.

Tabela 4.2 - Características do betume modificado Elaster 13/60

| Ensaio | Método | Resultado | Limites | | Unidade |
|--------------------------------------|----------|-----------|---------|-----|---------|
| | | | Min | Max | |
| Penetração 25 °C, 100 gr, 5 seg | EN 1426 | 53 | 45 | 80 | 0,1 mm |
| Ponto de Amolecimento | EN 1427 | 63,2 | 60 | - | °C |
| Recuperação Elástica 25°C: Torção | EN 13398 | Sup. 70 | 70 | - | % |

A massa volúmica apresentada pelo fornecedor é de 1040 kg/m³. As gamas de temperaturas de mistura e compactação recomendadas pelo fabricante são 155 a 165 °C e 150 a 160 °C, respetivamente.

4.2.3 Fibras celulósicas

Por forma a melhorar as características das misturas betuminosas, utilizaram-se Fibras *Viatop Premium* (Figura 4.5), formadas por grânulos constituídos por uma mistura de fibras naturais de celulose com betume. A sua utilização proporciona um aumento da durabilidade e desempenho das misturas betuminosas, nomeadamente nas misturas betuminosas drenantes que pelo facto de não possuírem finos, apresentam uma menor superfície específica e de

contacto entre os agregados grossos. Nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam-se as características das fibras que foram utilizadas.

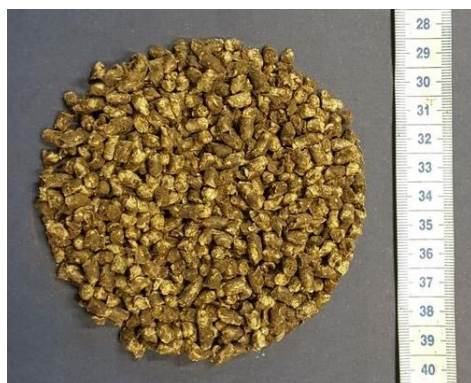


Figura 4.6 - Fibras celulósicas - *Viatop Premium*

Tabela 4.3 - Características do granulado

| Características do granulado | |
|-----------------------------------|----------------------|
| Aspeto | Grânulos cilíndricos |
| Conteúdo de fibras | 87 a 93 % |
| Comprimento médio dos grânulos | 2 a 8 mm |
| Diâmetro médio dos grânulos | 5 ± 1 mm |
| Densidade aparente | 440 a 520 g/l |
| Análise granulométrica, # <4,5 mm | Max. 10 |

Tabela 4.4 - Características do betume incluído no granulado

| Características do betume incluído no granulado | |
|---|----------------|
| Penetração (de acordo com a EN 1426) a 25°C | 50/70 (0,1 mm) |
| Conteúdo de fibras | 87 a 93 % |

Tabela 4.5 - Características das fibras

| Características da fibra | |
|----------------------------|---------------------------|
| Composição básica | Fibra de celulose técnica |
| Conteúdo em celulose | 80 ± 5 % |
| Valor do pH (5 g/100 ml) | 7,5 ± 1,0 |
| Comprimento médio da fibra | 1100 µm |
| Diâmetro médio da fibra | 45 µm |

4.2.4 Cal hidráulica

A cal hidráulica que se utilizou no trabalho experimental tem a designação comercial de MARTIGANÇA HL5 da empresa SECIL. Este ligante hidráulico permite oferecer à mistura uma determinada coesão que evita a fragmentação do pavimento. Os métodos de ensaio utilizados para avaliar as propriedades que compõe a Cal Hidráulica foram realizados tendo como base a NP EN 459-1:2010.

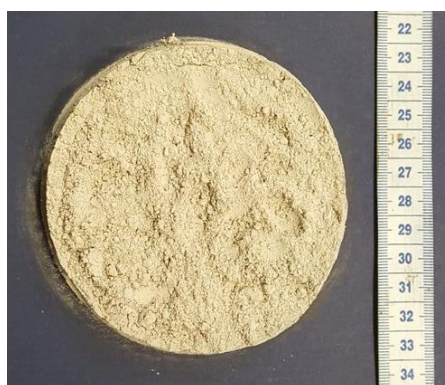


Figura 4.7 - Cal hidráulica

Tendo em conta a Especificação do LNEC E64-1968, E376-1993 e E377-1993 e com recurso ao picnómetro de hélio (AccuPyc™ 1330 Gas Pycnometer) foi possível determinar a massa volúmica da Cal Hidráulica com maior precisão.

Tabela 4.6 - Massa volúmica da cal hidráulica

| Ligante Hidráulico | Massa Volúmica [kg/m ³] |
|--------------------|-------------------------------------|
| Cal Hidráulica | 2760 |

4.3 Formulação das misturas betuminosas drenantes

No que diz respeito à formulação das misturas betuminosas drenantes da camada de desgaste, optou-se por uma dupla camada com vista a melhorar a eficácia das misturas e reduzir o problema de colmatação. Segundo o manual de pavimentação da CEPISA (CEPSA, 2014), esta dupla camada drenante, consiste em aplicar uma camada com um agregado mais grosso, de dimensão máxima entre 12 e 20 mm, com vista a proporcionar vazios de maior tamanho e mais difíceis de colmatar pelas poeiras, de seguida é aplicada uma camada superficial de mistura drenante composta por agregado mais fino, de dimensão entre os 8 e 10 mm, com o objetivo de proporcionar um maior conforto ao utente e também diminuir o ruído dos veículos que sobre ele circulam.

Tanto para a mistura drenante fina, como para a mistura drenante grossa foi adotado o fuso PA 12,5 (BBd) para camadas de desgaste. O fuso apresentado na Tabela 4.7 é indicado no Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal (CE EP, 2014), com a rubrica 14.03.2.4.2.

Nesta dissertação será tida em conta a influência da adição de fibras no desempenho das misturas betuminosas drenantes. Assim, para a mistura fina e para a mistura grossa serão elaboradas em paralelo, misturas com e sem fibras.

Tabela 4.7 - Requisitos do fuso granulométrico imposto pelo CE EP para PA 12,5 (BBd).

| Peneiros Série Base+ Série 2 | Rubrica 14.03.2.4.2 |
|---------------------------------|---|
| | Percentagem acumulada do material passado |
| 20 | 100 |
| 12,5 | 90 - 100 |
| 10 | 55 - 75 |
| 4 | 12 - 30 |
| 2 | 11 - 18 |
| 1 | 6 - 14 |
| 0,063 | 2 - 5 |

Quanto à caracterização das misturas drenantes, o Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal, apresenta propriedades/requisitos a respeitar. No entanto, estes requisitos são indicados para camadas de desgaste de misturas betuminosas drenantes e não para pavimentos permeáveis. Na Tabela 4.8 apresenta-se um conjunto de requisitos propostos por autores de vários países, apresentados no capítulo 2, entre os quais o Caderno de Encargos (Portugal), as especificações Espanholas (Espanha), o manual da UNHSC (Estados Unidos da América) e o manual da FHWA (Estados Unidos da América).

Tabela 4.8 - Requisitos/propriedades impostos.

| Requisitos/Propriedades | Caderno de Encargos da EP | Especificações Espanholas, PG-3 | UNHSC | FHWA |
|---------------------------------|----------------------------|---|---------------------------|--|
| | Camada de Desgaste PA 12,5 | Camadas de Desgaste, misturas drenantes | <i>Porous Asphalt Mix</i> | <i>Characteristics for asphalt surface layer</i> |
| Porosidade, Vm [%] | 22,0 - 30,0 | > 20 | 16,0 - 22,0 | > 16 |
| % de ligante, min [%] | 4,0 | 4,3 | 5,8 - 6,5 | - |
| Ensaio Cântabro húmido, máx [%] | ≤ 25 | ≤ 35 (T0 a T1) e ≤ 40 (T2 a T3) | ≤ 20 | - |

4.3.1 Composição de agregados

Conhecidas as diferentes granulometrias dos agregados que compõe os dois tipos de misturas, grossas e finas, procedeu-se à formulação das duas misturas drenantes com fibras e das duas misturas sem fibras. Desta forma, recorreu-se ao Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal, e foram-se arbitrando diferentes percentagens de cada tipo de agregado e de cal hidráulica, para que a granulometria da composição de agregados da mistura cumprisse o fuso imposto, PA 12,5 (BBd). Por indicação do fabricante das fibras celulósicas adotou-se uma percentagem de adição de 0,5 % de fibras *Viatop Premium* com vista a aumentar a durabilidade e o desempenho das misturas betuminosas drenantes.

Apresentam-se na Tabela 4.9 as percentagens assumidas de cada tipo de agregado para as misturas betuminosas drenantes fina e grossa, tendo em conta o fuso PA 12,5 (BBd).

Tabela 4.9 - Percentagem de agregados para cada mistura

| Misturas | Pó de Pedra 0/4 [%] | Brita 5/10 [%] | Brita 5/15 [%] | Cal hidráulica [%] | Total [%] |
|--------------------------|---------------------|----------------|----------------|--------------------|-----------|
| Mistura Fina - PA 12,5 | 8,0 | 90,0 | - | 2,0 | 100 |
| Mistura Grossa - PA 12,5 | 4,0 | - | 94,0 | 2,0 | 100 |

É importante salientar que foram estudadas outras formulações antes desta, tendo sido produzidas as respetivas misturas, compactados os provetes e determinada a porosidade. No entanto nenhuma delas cumpria este parâmetro fundamental tendo sido por isso rejeitadas. Foram elaboradas novas formulações até se conseguir níveis satisfatórios de porosidade. Por outro lado, a tentativa de cumprir a porosidade condicionou pontualmente a verificação do fuso granulométrico estabelecido pelo Caderno de Encargos (CE EP, 2014) tal como é retratado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Granulometria das misturas permeáveis PA 12,5

| Abertura da Malha [mm] | Mistura Fina [%] | Mistura Grossa [%] | Fuso PA 12,5 (BBd) [%] |
|------------------------|------------------|--------------------|------------------------|
| 20 | 100 | 100 | 100 |
| 12,5 | 100 | 99 | 90 - 100 |
| 10 | 97 | 79 | 55 - 75 |
| 4 | 25 | 12 | 12 - 30 |
| 2 | 12 | 8 | 11 - 18 |
| 1 | 8 | 6 | 6 - 14 |
| 0,063 | 2 | 2 | 2 - 5 |

4.3.2 Estimativa da quantidade inicial de betume

Para ambas as misturas betuminosas permeáveis foi necessário determinar a quantidade inicial de betume utilizando-se, para tal, a seguinte expressão:

$$P_b = 0,035 \times A + 0,045 \times B + K \times C + F \quad (4.2)$$

Em que:

P_b - percentagem de betume em relação ao peso total da mistura [%];

A - percentagem de agregados retidos no peneiro 2,36 mm;

B - percentagem de agregados que passa no peneiro 2,36 mm e fica retido no peneiro 0,075 mm;

C - percentagem de agregados que passa no peneiro 0,075 mm;

K - constante, função da quantidade de material que passa no peneiro 0,075 mm;

K = 0,15 para 11-15% de passados no peneiro 0,075 mm

K = 0,18 para 6-10% passados no peneiro 0,075 mm

K = 0,20 para $\leq 5\%$ passados no peneiro 0,075 mm

F - fator de absorção dos agregados (entre 0 e 2 %). Na falta de informação F = 0,7 %.

Apresenta-se na Tabela 4.11 as quantidades de betume inicial utilizadas nas diferentes misturas.

Tabela 4.11 - Percentagem de betume inicial para as misturas drenantes (PA 12,5 Grossa e PA 12,5 Fina)

| Misturas | Percentagem inicial de betume Elaster [%] |
|--------------------------|---|
| Mistura Fina - PA 12,5 | 4,7 |
| Mistura Grossa - PA 12,5 | 4,6 |

De salientar, como já foi referido, que anteriormente foram elaboradas outras misturas com diferentes teores de betume, no entanto, nenhuma delas cumpriu a porosidade, tendo sido por isso rejeitadas.

4.3.3 Teor ótimo de betume

Determinadas as formulações para as duas misturas drenantes, tanto ao nível dos agregados (Tabela 4.9) como ao nível da percentagem inicial de betume (Tabela 4.11), procedeu-se à preparação de provetes com uma variação de $\pm 0,5\%$ relativa à percentagem de betume estabelecida inicialmente com vista a encontrar o teor ótimo de betume. Nesta seleção, para as misturas betuminosas drenantes, são considerados parâmetros como a baridade, a porosidade e a perda de massa no Ensaio Cântabro.

Produziram-se quatro tipos de misturas diferentes, sendo elas as misturas finas e grossas sem adição de fibras celulósicas e as misturas finas e grossas com adição de fibras celulósicas. Nas misturas com fibras, as percentagens dos agregados sofrem uma ligeira alteração. Apresenta-se na Tabela 4.12 as formulações estudadas com as percentagens de betume em relação ao peso total das misturas.

Tabela 4.12 - Formulação de cada mistura para a percentagem de betume estudados

| Misturas | Betume Elaster [%] | Pó de Pedra 0/4 [%] | Brita 5/10 [%] | Brita 5/15 [%] | Fibras Viatop Premium [%] | Cal hidráulica [%] | Total [%] |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|----------------|----------------|---------------------------|--------------------|-----------|
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 4,2 | 7,6 | 85,8 | - | 0,5 | 1,9 | 100,0 |
| | 4,7 | 7,6 | 85,3 | - | 0,5 | 1,9 | 100,0 |
| | 5,2 | 7,5 | 84,9 | - | 0,5 | 1,9 | 100,0 |
| Mistura Fina Sem Fibras - MFSF | 4,2 | 7,7 | 86,2 | - | - | 1,9 | 100,0 |
| | 4,7 | 7,6 | 85,8 | - | - | 1,9 | 100,0 |
| | 5,2 | 7,6 | 85,3 | - | - | 1,9 | 100,0 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 4,1 | 3,8 | - | 89,7 | 0,5 | 1,9 | 100,0 |
| | 4,6 | 3,8 | - | 89,2 | 0,5 | 1,9 | 100,0 |
| | 5,1 | 3,8 | - | 88,7 | 0,5 | 1,9 | 100,0 |
| Mistura Grossa Sem Fibras - MGSF | 4,1 | 3,9 | - | 90,1 | - | 1,9 | 100,0 |
| | 4,6 | 3,8 | - | 89,7 | - | 1,9 | 100,0 |
| | 5,1 | 3,8 | - | 89,2 | - | 1,9 | 100,0 |

- Baridade máxima teórica

Com vista a determinar a baridade máxima teórica recorreu-se à norma EN 12697-5:2002, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density*, procedimento C. Na Tabela 4.13 apresentam-se os resultados da baridade máxima teórica para as misturas betuminosas drenantes estudadas.

Com vista a calcular a baridade máxima teórica fez-se uso da seguinte expressão:

$$\rho_{\max} = \frac{100}{\frac{p_b}{\rho_b} + \sum_{i=1}^N \frac{p_i}{\rho_i}} \quad (4.3)$$

Em que:

ρ_{\max} - baridade máxima teórica [kg/m³];

p_b - percentagem de betume [%];

p_i - percentagem do agregado i (em relação ao peso total da mistura) [%];

ρ_b - densidade do betume [kg/m^3];

ρ_i - densidade do agregado i [kg/m^3].

Tabela 4.13 - Baridade máxima teórica

| Misturas | Percentagem inicial de betume Elaster [%] | Baridade máxima teórica [kg/m^3] |
|----------------------------------|---|--|
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 4,2 | 2380 |
| | 4,7 | 2360 |
| | 5,2 | 2340 |
| Mistura Fina Sem Fibras - MFSF | 4,2 | 2420 |
| | 4,7 | 2410 |
| | 5,2 | 2390 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 4,1 | 2420 |
| | 4,6 | 2400 |
| | 5,1 | 2390 |
| Mistura Grossa Sem Fibras - MGSF | 4,1 | 2470 |
| | 4,6 | 2450 |
| | 5,1 | 2440 |

- Baridade

Para o cálculo quer da baridade quer da porosidade foi necessário avançar para a produção de provetes, sendo assim possível avaliar as características das misturas betuminosas.

Começou-se por colocar os agregados, o betume e os moldes na estufa a $160\text{ }^\circ\text{C}$, por um período de 60 minutos (Figura 4.8 (a)). Em seguida pesaram-se as quantidades de cada material para a produção de um provete de aproximadamente 1050 g (Figura 4.8 (b)) e procedeu-se à sua mistura manual (Figura 4.8 (c)).

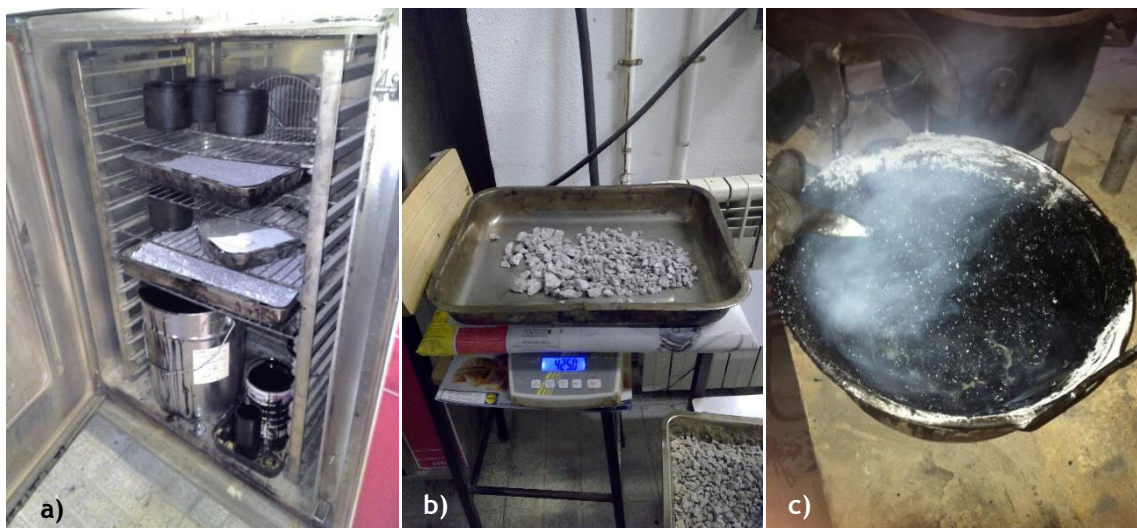


Figura 4.8 - a) Colocação do material na estufa a 160 °C; b) Pesagem de cada material; c) Mistura manual

Retirados os moldes Marshall da estufa, os mesmos foram untados com óleo e colocou-se um filtro de papel na base. Imediatamente a seguir foi colocada a mistura betuminosa no respetivo molde (Figura 4.9 (a)) colocando-se, de igual modo, um filtro no topo do provete (Figura 4.9 (b)). Procedeu-se à sua compactação no compactador de impacto aplicando-se 50 pancadas em cada face do provete (Figura 4.9 (c)).

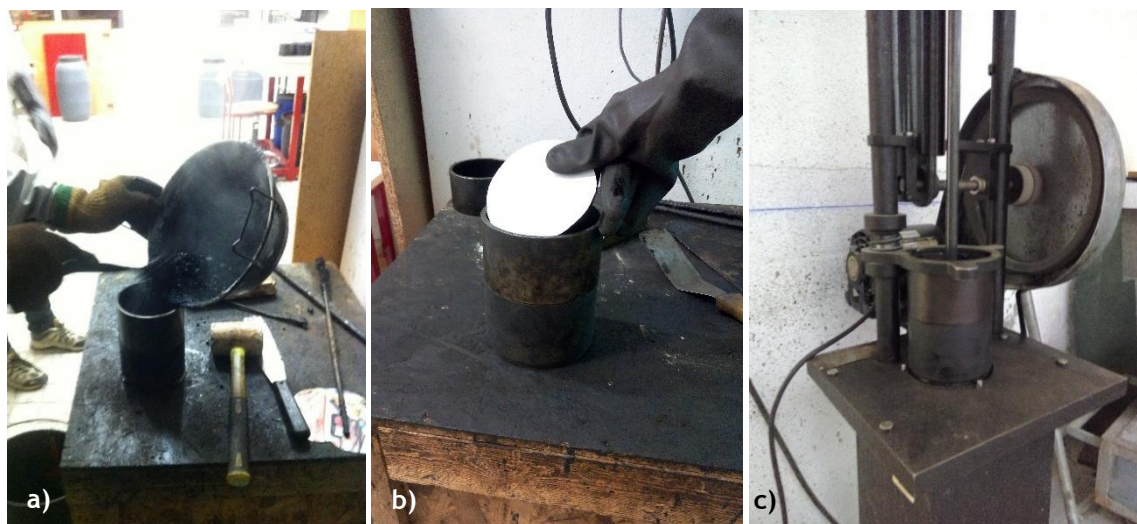


Figura 4.9 - a) Colocação da mistura nos moldes Marshall; b) Colocação de filtro de papel no topo da mistura; c) Compactação da mistura com o compactador de impacto.

Ao fim de 4 horas desmoldaram-se os provetes, tal como se ilustra na Figura 4.10 (a), de onde resultou o conjunto de provetes que se ilustra na Figura 4.10 (b).

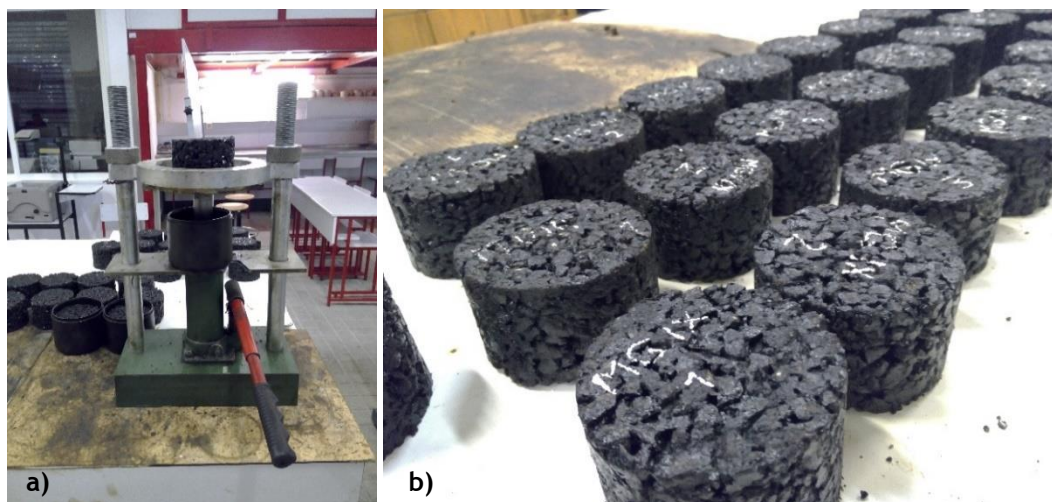


Figura 4.10 - a) Desmoldagem dos provetes; b) Provetes desmoldados.

A baridade determinou-se de acordo com o preconizado na norma europeia EN 12697-6:2003, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens, procedure D: Bulk density by dimensions*, procedimento que integra a medida geométrica do volume aparente.

Determinou-se a baridade através da seguinte expressão:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \quad (4.4)$$

Em que:

$\rho_{b,dim}$ - baridade do provete [kg/m^3];

m_1 - massa do provete seco [g];

h - altura do provete [mm];

d - diâmetro do provete [mm];

Apresenta-se na Tabela 4.14 os valores das baridades médias de oito provetes, para cada mistura betuminosa drenante com betume Elaster, grossa e fina, com e sem adição de fibras.

Tabela 4.14 - Baridades (Média de oito provetes por cada teor de betume)

| Misturas | Percentagem inicial de betume Elaster [%] | Baridade média [kg/m ³] |
|----------------------------------|---|-------------------------------------|
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 4,2 | 1940 |
| | 4,7 | 1930 |
| | 5,2 | 1960 |
| Mistura Fina Sem Fibras - MFSF | 4,2 | 1930 |
| | 4,7 | 1940 |
| | 5,2 | 1940 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 4,1 | 1930 |
| | 4,6 | 1930 |
| | 5,1 | 1940 |
| Mistura Grossa Sem Fibras - MGSF | 4,1 | 1930 |
| | 4,6 | 1950 |
| | 5,1 | 1890 |

- Porosidade

Conhecida a baridade máxima teórica e a baridade torna-se possível determinar a porosidade das misturas betuminosas drenantes produzidas. Com vista a determinar a porosidade dos provetes, recorreu-se à norma EN 12697-8:2003, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*. A porosidade das misturas determinou-se com a expressão 4.37.

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad (4.5)$$

Em que:

V_m - porosidade da mistura [%];

ρ_m - baridade máxima teórica da mistura [kg/m³];

ρ_b - baridade do provete [kg/m³].

Apresenta-se na Tabela 4.15 os valores obtidos no que diz respeito à porosidade:

Tabela 4.15 - Propriedades das misturas (Média de oito provetes por cada teor de betume)

| Misturas | Betume Elaster [%] | Porosidade média [%] |
|----------------------------------|--------------------|----------------------|
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 4,2 | 18,1 |
| | 4,7 | 18,3 |
| | 5,2 | 16,6 |
| Mistura Fina Sem Fibras - MFSF | 4,2 | 20,5 |
| | 4,7 | 19,6 |
| | 5,2 | 19,0 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 4,1 | 20,2 |
| | 4,6 | 19,8 |
| | 5,1 | 18,6 |
| Mistura Grossa Sem Fibras - MGSF | 4,1 | 21,9 |
| | 4,6 | 20,7 |
| | 5,1 | 22,2 |

Como se pode observar, todas as misturas cumprem a porosidade mínima de 16,0 % estabelecida de acordo com o FHWA e o UNHSC. Tendo em conta os limites impostos pelo caderno de encargos das Estradas de Portugal (CE EP, 2014) apenas a mistura grossa sem fibras e 5,1 % de betume cumpre o requisito imposto. Por outro lado, e tendo em conta o limite imposto pelo PG-3 de um mínimo de 20 %, um maior número de misturas e respetivos teores de betume cumpriram este limite. De um modo geral, e como já foi referido, assumiu-se como limite mínimo de porosidade os 16 %, dado as dificuldades impostas pelo fuso granulométrico e sobretudo devido ao método de compactação Marshall.

- Ensaio Cântabro

O ensaio cântabro consiste num ensaio de caracterização que permite avaliar a perda por desgaste de misturas betuminosas drenantes a utilizar na camada de desgaste do pavimento, para isso fez-se uso da norma EN 12697-17:2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 17: Particle loss of porous asphalt specimen* e do *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, 2013).

Para cada mistura foram produzidos oito provetes Marshall por cada teor de betume, ou seja 24 provetes por mistura, os quais foram divididos em dois grupos consoante as suas baridades. Cada grupo foi mantido em condições diferentes antes da realização do ensaio. Um grupo

manteve-se imerso 24 horas a uma temperatura de 60 °C, sendo colocados posteriormente em estufa a 25 °C durante 24 horas. O outro grupo manteve-se seco, colocado a 25 °C em estufa durante 48 horas.



Figura 4.11 - a) Grupo de provetes imersos; b) Grupo de Provetes secos.

Estando os provetes devidamente preparados como mencionado anteriormente, os mesmos foram pesados e colocados de seguida, um a um, na máquina de desgaste de *Los Angeles*, submetidos a 300 voltas, sem esferas de aço, a uma velocidade de 30 rpm. Na Figura 4.12. é ilustrada a sequência do ensaio cântabro.

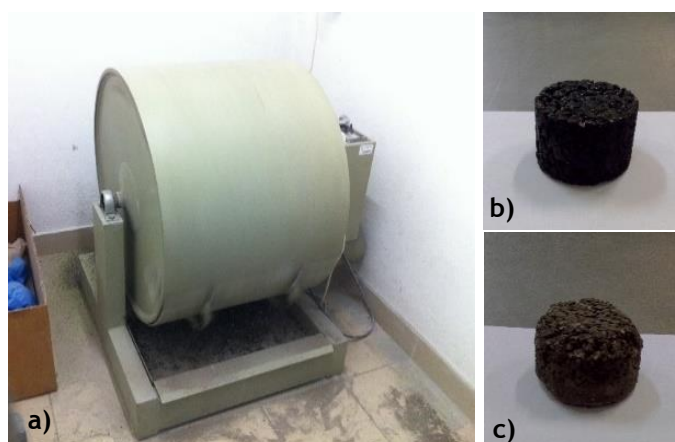


Figura 4.12 - a) Máquina de ensaio de *Los Angeles*; b) Proвете antes do ensaio; c) Proвете após ensaio.

A perda por desgaste de cada provete é determinada através da seguinte expressão:

$$PL = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (4.6)$$

Em que:

PL - Perda de partículas [%];

W_1 - massa da amostra inicial [g];

W_2 - massa da amostra final [g].

Na Tabela 4.16 apresentam-se os resultados obtidos na perda por desgaste das misturas betuminosas drenantes.

Tabela 4.16 - Ensaio cântabro dos provetes dos grupos húmidos e dos grupos secos (media de quatro provetes por cada grupo)

| Misturas | Betume Elaster [%] | Grupo | Perda por desgaste [%] |
|----------------------------------|--------------------|---------|------------------------|
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 4,2 | Secos | 17 |
| | | Húmidos | 30 |
| | 4,7 | Secos | 11 |
| | | Húmidos | 36 |
| | 5,2 | Secos | 7 |
| | | Húmidos | 28 |
| Mistura Fina Sem Fibras - MFSF | 4,2 | Secos | 15 |
| | | Húmidos | 14 |
| | 4,7 | Secos | 12 |
| | | Húmidos | 15 |
| | 5,2 | Secos | 9 |
| | | Húmidos | 16 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 4,1 | Secos | 23 |
| | | Húmidos | 31 |
| | 4,6 | Secos | 17 |
| | | Húmidos | 17 |
| | 5,1 | Secos | 9 |
| | | Húmidos | 22 |
| Mistura Grossa Sem Fibras - MGSF | 4,1 | Secos | 11 |
| | | Húmidos | 13 |
| | 4,6 | Secos | 7 |
| | | Húmidos | 8 |
| | 5,1 | Secos | 8 |
| | | Húmidos | 15 |

De acordo com o Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal (CE EP, 2014) é imposto um limite de 25 % para a perda por desgaste. Por outro lado, e de acordo com o *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, 2013), é estabelecido um limite de 35 % ou 40 %, consoante o tipo de tráfego.

A presença de fibras celulósicas na mistura levou a uma diminuição da perda por desgaste no que diz respeito a provetes secos, por outro lado, os provetes húmidos sofreram uma perda por desgaste muito superior aos provetes húmidos sem fibras. Posto isto, conclui-se que a presença

de fibras é um fator vantajoso pois permite aumentar os teores de betume nas misturas, sem que se verifique o escorrimento do mesmo, e, assim, aumentar a sua durabilidade. No entanto, nas misturas com adição de fibras, sujeitas à presença de água a uma temperatura de 60 °C, a perda por desgaste revelou-se muito superior.

Analisadas todas as conformidades com os requisitos e limites estabelecidos, assumiu-se os resultados do ensaio cântabro como o fator decisivo para a escolha do teor ótimo de betume, bem como as misturas que apresentavam porosidades mais elevadas. Assim, para a mistura MGSF optou-se pelo teor ótimo de betume de 4,6 % dado as misturas com esse teor verificarem quer a porosidade quer a perda por desgaste. Para estas misturas com um teor de 5,1 % verificava-se escorrimento do betume, deste modo exclui-se essa solução. Para a mistura MFSF os resultados obtidos foram muito semelhantes à anterior, optando-se por um teor ótimo de betume de 4,7 %. Para as misturas MGF, a situação mudou pelo facto das fibras permitirem uma percentagem superior de teor de betume, 5,1 %, não se verificando qualquer escorrimento de betume. Finalmente, para as misturas MFF, optou-se por um teor ótimo de betume de 5,2 %, no qual também não se verificou escorrimento do ligante durante a produção e compactação. De salientar, que para os teores ótimos de betume escolhidos para cada mistura todas verificaram os parâmetros fundamentais, tais como a porosidade superior a 16,0 % e a perda por desgaste inferior a 25,0 %. Somente a mistura MFF não cumpriu o limite de 25,0 % na perda por desgaste, no entanto, de acordo com a especificação espanhola, a mesma já cumpre este parâmetro.

Para aferir a interferência da temperatura da água nos resultados do ensaio cântabro húmido, e em especial nas misturas com adição de fibras, optou-se por repetir o ensaio cântabro para os teores ótimos alterando a temperatura da água para 20°C, tal como proposto por Khalid e Pérez-Jiménez (1996) citado por Homem (2002). Apresentam-se na Tabela 4.17, os resultados do ensaio cântabro obtidos para estas condições.

Tabela 4.17 - Ensaio cântabro húmido para temperatura de água de 20 °C e de 60 °C (média de quatro provetes por cada grupo)

| Misturas | Betume Elaster [%] | Grupo | Perda por desgaste [%] |
|---------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------------|
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 5,2 | Húmidos com imersão a 20 °C | 13 |
| | | Húmidos com imersão a 60 °C | 28 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 5,1 | Húmidos com imersão a 20 °C | 14 |
| | | Húmidos com imersão a 60 °C | 22 |

Deste modo verifica-se que para uma temperatura da água de 20 °C a perda por desgaste das misturas com fibras apresenta valores bastante inferiores. Conclui-se assim, que a temperatura da água é um fator bastante relevante no comportamento de misturas com adição de fibras ao

desgaste verificando-se diferenças na ordem dos 50 % quando se passa de uma temperatura de água de 20 °C para uma temperatura de 60 °C. Assim, torna-se possível avaliar a adesividade do ligante pelo facto do mesmo ser modificado e a mistura possuir fibras na composição.

Na Tabela 4.18 apresenta-se a formulação final utilizada para as diferentes misturas, na produção dos provetes para os ensaios de caracterização das misturas betuminosas drenantes.

Tabela 4.18 - Formulação final das misturas betuminosas drenantes (percentagem em relação ao peso total da mistura)

| Misturas | Pó de Pedra 0/4 [%] | Brita 5/10 [%] | Brita 5/15 [%] | Cal hidráulica [%] | Fibras Viatop [%] | Betume [%] |
|----------------------------------|---------------------|----------------|----------------|--------------------|-------------------|------------|
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 7,5 | 84,9 | - | 1,9 | 0,5 | 5,2 |
| Mistura Fina Sem Fibras - MFSF | 7,6 | 85,8 | - | 1,9 | - | 4,7 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 3,8 | - | 88,7 | 1,9 | 0,5 | 5,1 |
| Mistura Grossa Sem Fibras - MGSF | 3,8 | - | 89,7 | 1,9 | - | 4,6 |

4.4 Caracterização das misturas betuminosas drenantes

A caracterização mecânica das misturas betuminosas drenantes surge como um assunto muito pouco estudado e no qual não existem qualquer tipo de normas/requisitos para definir os seus valores limite. Este trabalho de investigação surge com o objetivo de verificar quais os valores que se podem obter em misturas de estrutura porosa, com e sem a adição de fibras, com vista a dar informação sobre o seu comportamento mecânico que se poderá esperar *in situ*, tendo em conta os estudos de formulação elaborados anteriormente.

4.4.1 Módulo de rigidez por ensaio de tração indireta

O ensaio de módulo de rigidez por tração indireta (ITSM - do inglês *Indirect Tensile Stiffness Modulus*) foi realizado no equipamento designado *Nottingham Asphalt Test* (NAT) tendo em conta o Anexo C da norma europeia EN 12697-26:2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*. Para isso, realizou-se um conjunto de seis provetes cilíndricos para cada uma das misturas selecionadas com o teor ótimo de betume. Com vista a garantir uma coerência das condições de ensaio para todas as misturas, adotaram-se alguns parâmetros de acordo com o preconizado na norma europeia EN 12697-26: 2004, tais como, temperatura de ensaio de 20 °C, coeficiente de Poisson de 0,35, tempo de crescimento de carga (RT) (*Rise Time* em inglês) 124 ms, deformação horizontal máxima de 5 µm e pré-carregamento

de 10 aplicações de carga. No que diz respeito à altura e diâmetro dos provetes foi realizada a média de 4 medições.

O ensaio começou pelo acondicionamento dos provetes à temperatura de 20 °C (Figura 4.13 a)). Seguidamente, colocaram-se na estrutura de apoio do ensaio de rigidez (Figura 4.13 b)). A medição da rigidez efetuou-se ao longo de dois diâmetros perpendiculares para cada um dos provetes após um carregamento de cinco aplicações de carga (Figura 4.13 c)). Os resultados obtiveram-se através do computador que se encontra conectado à máquina de ensaio (Figura 4.13 d)).

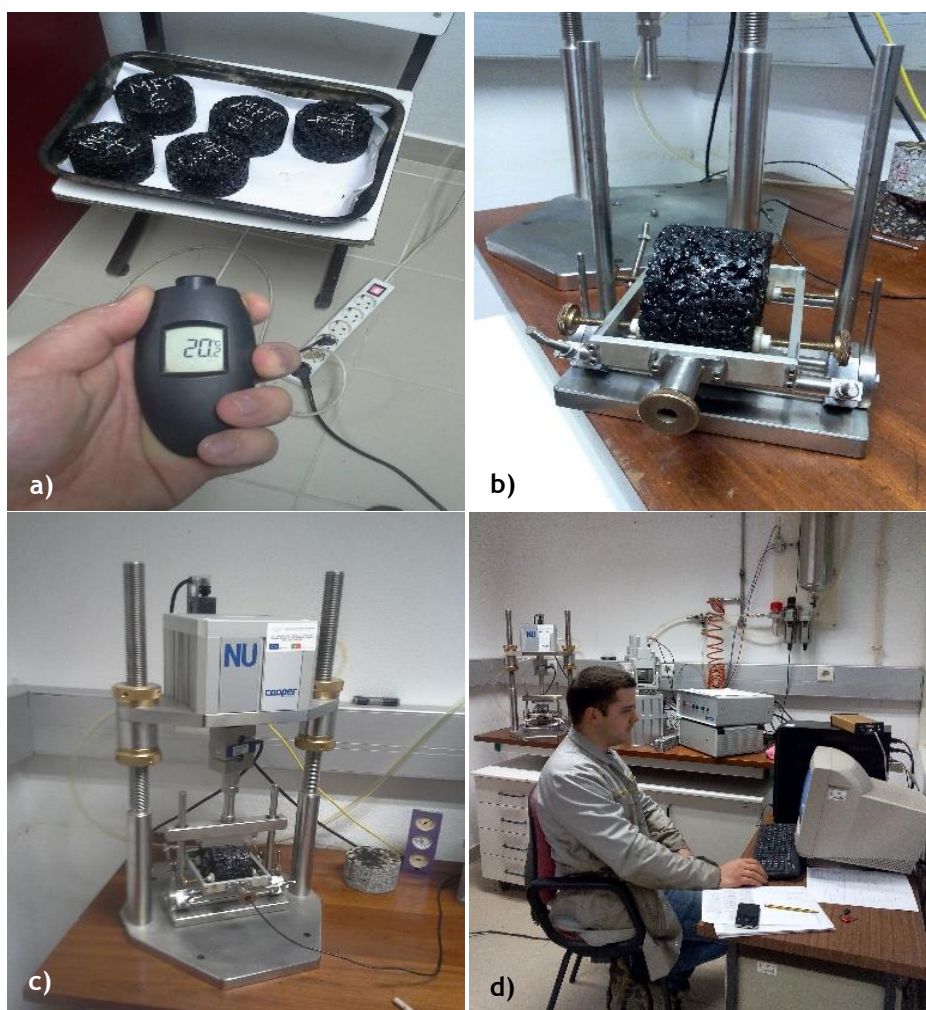


Figura 4.13 - a) Temperatura de ensaio de 20°C; b) Colocação dos provetes na estrutura de suporte do ensaio; c) Ensaio de rigidez por tração indireta; d) Computador de ensaio.

Apresenta-se, na seguinte tabela, o resultado do módulo de rigidez por tração indireta para as quatro misturas (média de seis provetes).

Tabela 4.19 - Módulo de rigidez das misturas (média de seis provetes).

| Misturas | Teor de Betume [%] | Baridade média [kg/m ³] | Porosidade média [%] | ITSM [MPa] |
|----------------------------------|--------------------|-------------------------------------|----------------------|------------|
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 5,2 | 1860 | 21 | 1947 |
| Mistura Fina Sem Fibras - MFSF | 4,7 | 1940 | 19 | 1946 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 5,1 | 1900 | 21 | 2151 |
| Mistura Grossa Sem Fibras - MGSF | 4,6 | 1940 | 21 | 2282 |

Dos resultados obtidos, conclui-se que a adição de fibras não induz nenhuma alteração significativa relativamente à rigidez das misturas.

4.4.2 Deformação permanente

Na presente dissertação, com vista a avaliar as deformações permanentes dos quatro tipos de misturas estudadas anteriormente, recorreu-se ao ensaio de simulação em pista de laboratório, mais propriamente *wheel tracking test*.

Dado que as misturas em análise são usadas com espessuras não superiores a 4 cm na generalidade, utilizaram-se moldes de 30x30x4 cm tendo em conta a norma europeia EN 12697-22:2003, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Laboratory mixing*. Adotou-se o procedimento B, realizando-se para tal duas lajetas por cada uma das quatro misturas. A produção das lajetas realizou-se de acordo com a norma europeia EN 12697-35:2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing*, tendo em consideração a formulação apresentada na Tabela 4.18. A mistura MGSF com teor de betume de 4,6 %, a mistura MFSF com teor de betume de 4,7 %, a mistura MGF com teor de betume de 5,1 % e a mistura MFF com teor de betume de 5,2 %. Quer na produção quer na compactação das lajetas teve-se especial cuidado no controlo da temperatura, de modo a que a mistura fosse compactada a uma temperatura nunca inferior a 150 °C, de acordo com os valores indicados pelo fornecedor do betume. A compactação foi realizada com recurso a placa vibratória por um período aproximado de 60 segundos. Apresenta-se na Figura 4.14 e 4.15 o esquema de produção das lajetas.

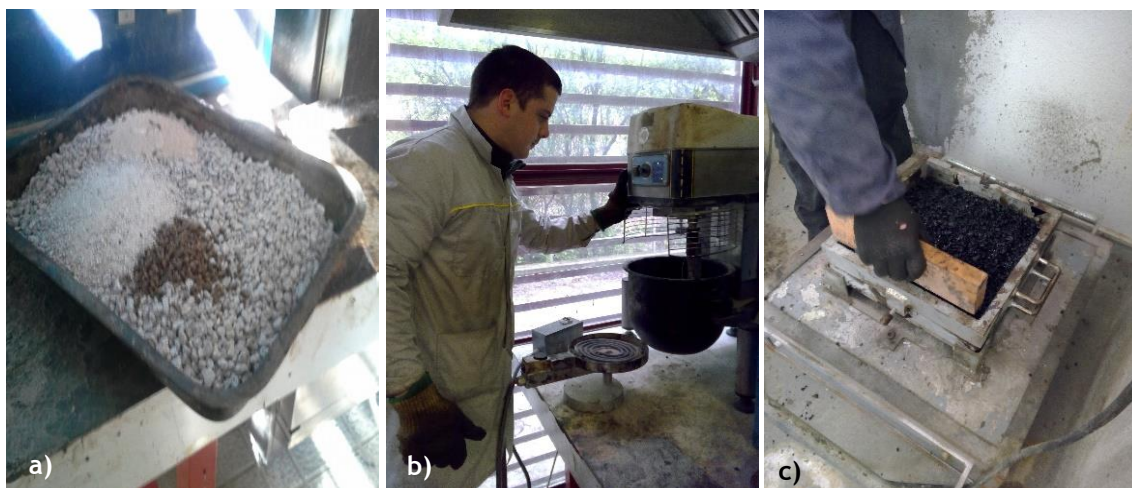


Figura 4.14 - a) Pesagem do material de cada lajeta; b) Mistura dos materiais na misturadora elétrica; c) Colocação da mistura no molde.



Figura 4.15 - a) Compactação da mistura; b) Lajetas após compactação.

Por fim, as lajetas foram colocadas à temperatura ambiente por um período de 7 dias antes da realização do ensaio (Figura 4.16). A baridade foi determinada de acordo com o preconizado na norma europeia EN 12697-6:2003, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens, procedure D: Bulk density by dimensions*, procedimento que integra a medida geométrica do volume aparente. Para isso recorreu-se à seguinte expressão:

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{h \times l \times w} \quad (4.7)$$

Em que:

$\rho_{b,dim}$ - baridade do provete [kg/m^3];

m_1 - massa do provete seco [g];

h - altura do provete [mm];

l - comprimento do provete [mm];

w - largura do provete [mm];

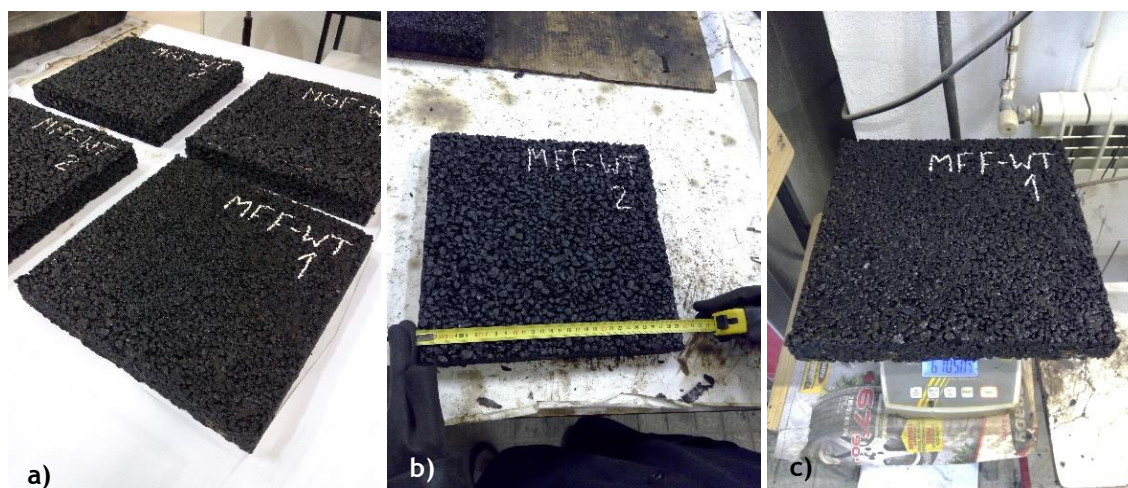


Figura 4.16 - a) Lajetas após desmoldagem; b) Medição das lajetas para cálculo da baridade; c) Pesagem das lajetas para cálculo da baridade.

Do cálculo atrás mencionado resultou as baridades médias para cada uma das misturas betuminosas drenantes descritas na Tabela 4.20. De forma análoga com o descrito no ponto 4.3.3 determinou-se a porosidade média das lajetas.

Tabela 4.20 - Baridade e porosidade média das misturas nas lajetas.

| Misturas | Teor Ótimo de Betume [%] | Baridade média [kg/m ³] | Porosidade média [%] |
|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 5,2 | 1810 | 23 |
| Mistura Fina Sem Fibras - MFSF | 4,7 | 1830 | 24 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 5,1 | 1750 | 27 |
| Mistura Grossa Sem Fibras - MGSF | 4,6 | 1780 | 27 |

Analisados os resultados, pode concluir-se que a porosidade das lajetas apresenta valores superiores aos obtidos nos provetes cilíndricos. Esta diferença deve-se ao método de compactação utilizado. Tal diferença é apresentada na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Baridade e porosidade média das misturas nas lajetas e nos provetes cilíndricos.

| Misturas | Teor Ótimo de Betume [%] | Baridade média [kg/m ³] | | Porosidade média [%] | |
|----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | Lajetas | Provetes cilíndricos | Lajetas | Provetes cilíndricos |
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 5,2 | 1810 | 1860 | 23 | 21 |
| Mistura Fina Sem Fibras - MFSF | 4,7 | 1830 | 1940 | 24 | 19 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 5,1 | 1750 | 1900 | 27 | 21 |
| Mistura Grossa Sem Fibras - MGSF | 4,6 | 1780 | 1940 | 27 | 21 |

Após os 7 dias de cura dos provetes à temperatura ambiente, deu-se início ao ensaio tendo em consideração o preconizado na norma EN 12697-22:2003, para equipamento pequeno e acondicionado ao ar, procedimento B.

Adotou-se uma temperatura de 60 °C para a realização do ensaio, tendo em conta que a zona em estudo se insere numa zona quente, tal como indicado na Figura 3.4. Procedeu-se a um aquecimento prévio das lajetas e do equipamento durante 4 horas, à temperatura de ensaio. Apresenta-se na Figura 4.17 a sequência do procedimento adotado desde a colocação da lajeta na câmara de ensaio até ao registo do valor da deformação.

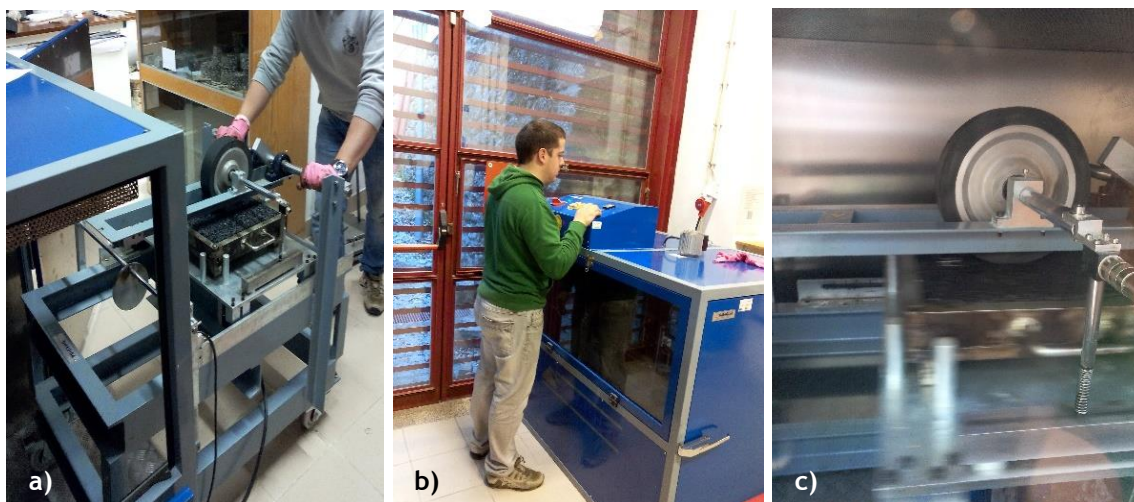


Figura 4.17 - a) Colocação da lajeta no interior da câmara de ensaio; b) Aquecimento prévio da lajeta no interior da câmara; c) Ensaio *wheel tracking* em curso.

O ensaio termina ao fim de 10 000 ciclos de carga ou quando os provetes atinjam uma rodeira com profundidade de 20 mm. Na Figura 4.18 apresenta-se o aspeto das lajetas no final do ensaio.

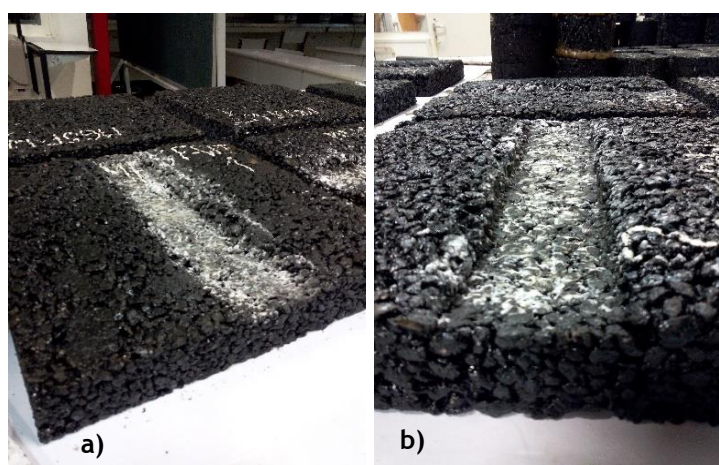


Figura 4.18 - a) Lajeta após ser retirada da máquina de ensaio; b) Pormenor do cavado de rodeira.

Em jeito de comparação, apresenta-se na Figura 4.19 o aspeto de uma lajeta composta por mistura fina com adição de fibras no fim de 10 000 ciclos a uma temperatura média de 60 °C.

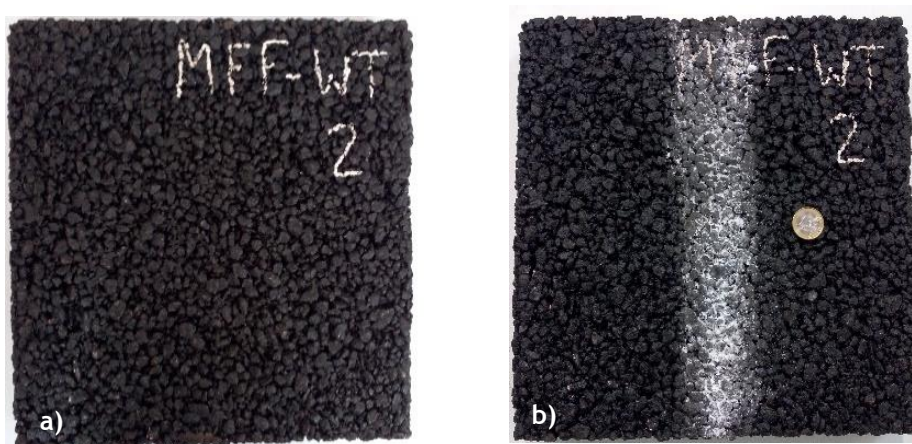


Figura 4.19 - a) Lajeta de mistura fina com fibras antes do ensaio *wheel tracking*; b) Lajeta de mistura fina com fibras após ensaio *wheel tracking*.

Através dos ensaios realizados foi possível obter dois parâmetros fundamentais para cada tipo de mistura, o declive máximo de rodeira - *Wheel Tracking Slope* (WTS) e a média de profundidade de rodeira (RD) para os dois provetes ensaiados em cada mistura. Apresentam-se nas Figuras 4.20 e 4.21 os resultados obtidos no ensaio de deformação permanente para os quatro tipos de misturas. Nas seguintes figuras em forma de gráfico dividiram-se os resultados consoante a mistura, fina e grossa, respetivamente.

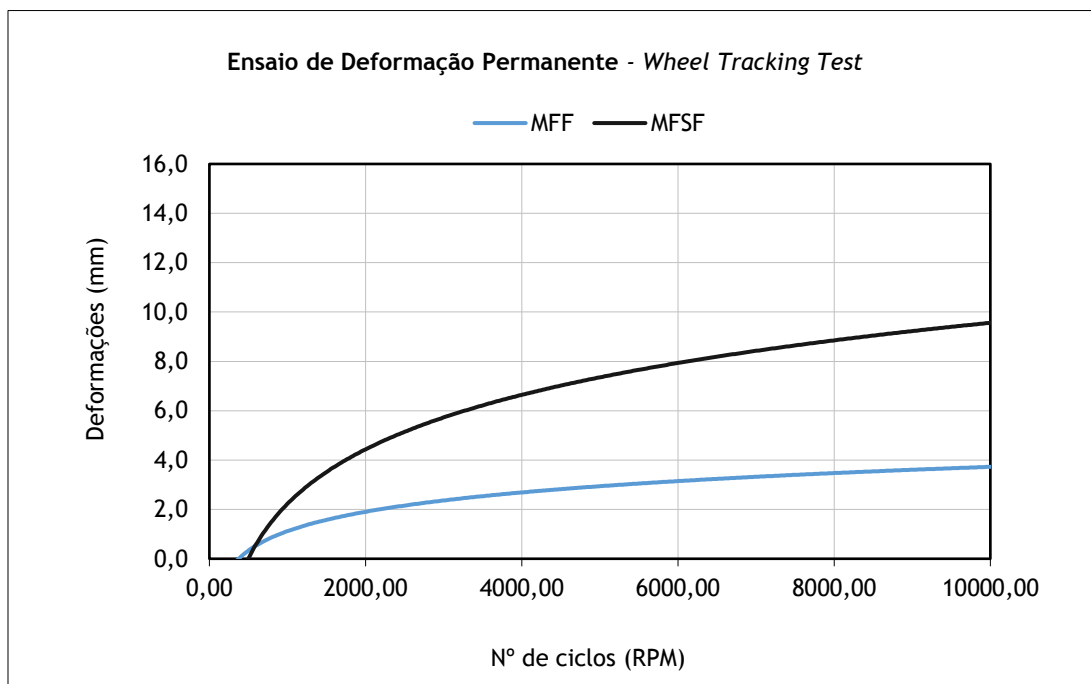


Figura 4.20 - Linha de tendência logarítmica para as deformações máximas obtidas no ensaio de simulação de pista (*wheel tracking*) para as misturas finas com e sem adição de fibras celulósicas.

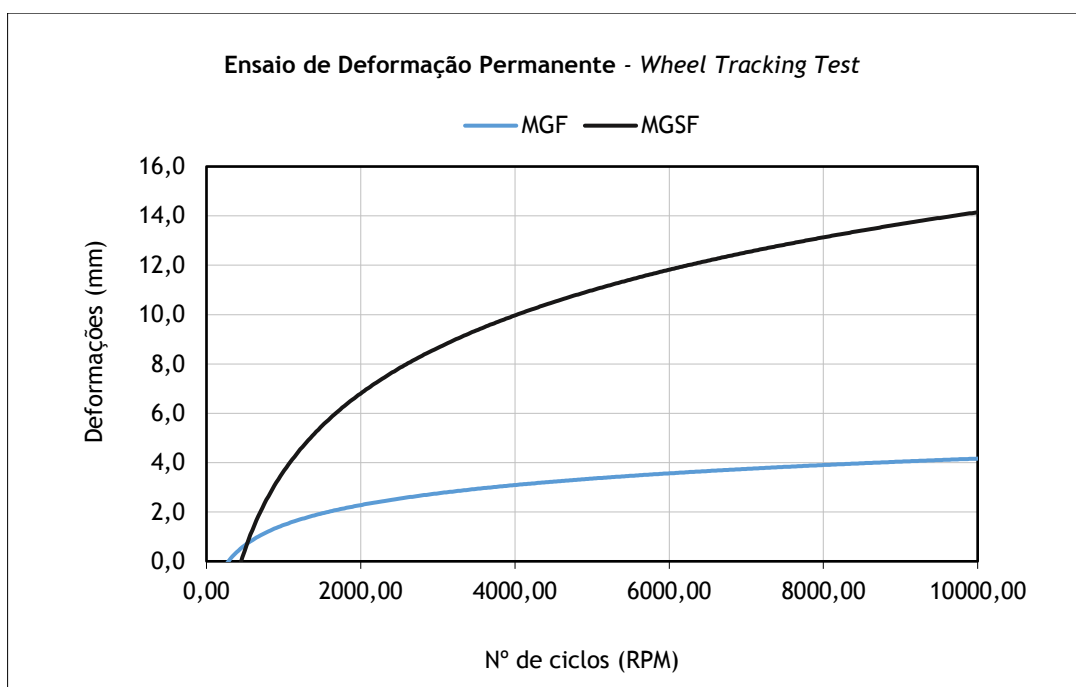


Figura 4.21 - Linha de tendência logarítmica para as deformações máximas obtidas no ensaio de simulação de pista (*wheel tracking*) para as misturas grossas com e sem adição de fibras celulósicas.

Analisando as curvas obtidas observa-se uma clara diferença no andamento das linhas de tendência logarítmicas. Na generalidade, as misturas sem adição de fibras apresentam um pior comportamento à deformação permanente, verificando-se uma deformação nas lajetas bastante superior em comparação com as misturas com adição de fibras.

Para o cálculo da variação da deformação permanente, recorreu-se à seguinte equação:

$$WTS_{air} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \quad (4.8)$$

Onde,

WTS_{air} - Declive máximo da rodeira [$\text{mm}/10^3$ ciclos];

d_{10000} - profundidade da rodeira após 10 000 ciclos [mm];

d_{5000} - profundidade da rodeira após 5 000 ciclos [mm].

Na Tabela 4.22 são apresentados os resultados obtidos para o declive máximo de rodeira (WTS_{air}) e a profundidade média de rodeira (RD).

Tabela 4.22 - Resultados do ensaio à deformação permanente (média de duas lajetas).

| Misturas | Teor de Betume [%] | RD [mm] | WTS _{air} [mm/10 ³ ciclos] |
|----------------------------------|--------------------|---------|--|
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 5,2 | 4,9 | 0,49 |
| Mistura Fina Sem Fibras - MFSF | 4,7 | 10,9 | 0,84 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 5,1 | 5,2 | 0,45 |
| Mistura Grossa Sem Fibras - MGSF | 4,6 | 14,0 | 0,09 |

Analisando os resultados obtidos do ensaio *wheel tracking* a adição de fibras revelou ser favorável no desempenho mecânico das misturas à deformação permanente. Contrariando os resultados obtidos por outros investigadores, verificou-se, no presente estudo, que para maiores percentagens de betume o comportamento à deformação permanente melhorou. Este fenómeno só foi possível graças às propriedades das fibras que permitem reter o betume. Deste modo, para altas temperaturas, as lajetas com adição de fibras e maior percentagem de betume apresentaram um melhor comportamento. Nas misturas sem adição de fibras verificou-se que o betume funcionou como um lubrificante nas ligações dos agregados, aumentando assim a profundidade de rodeira.

Pelo facto das fibras celulósicas permitirem o aumento da percentagem de betume sem que ocorresse o escorrimento deste durante a fase de mistura e, conseqüentemente, um melhor comportamento à deformação permanente, um aumento do teor de ligante traduz-se num aumento significativo da durabilidade da mistura.

Relativamente às misturas grossas, comparativamente com as finas, observa-se que a elevada porosidade traduz-se num aumento do cavado de rodeira.

Uma vez que não existem valores preconizados para este tipo de misturas, decidiu-se comparar os resultados do presente estudo com os obtidos por Oliveira (2003) na sua investigação em misturas drenantes, com betume do tipo CAP-20, modificado com polímeros do tipo SBS. Na Tabela 4.23, apresenta-se um resumo dos resultados obtidos por Oliveira (2003) comparados com os obtidos durante a realização da presente dissertação.

Tabela 4.23 - Resultados do ensaio à deformação permanente (comparação com Oliveira (2003)).

| Misturas | Teor de Betume [%] | Baridade [kg/m ³] | Porosidade [%] | Número de Ciclos | % de Deformação | RD [mm] |
|----------------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------|------------------|-----------------|---------|
| Faixa IV - Oliveira | 4,0 | 1720 | 31 | 1 000 | 15,0 | 7,5 |
| Faixa V - Oliveira | 4,0 | 1810 | 28 | 10 000 | 15,0 | 7,5 |
| | | | | | | |
| Mistura Fina Com Fibras - MFF | 5,2 | 1810 | 23 | 10 000 | 12,3 | 4,9 |
| Mistura Fina Sem Fibras - MFSF | 4,7 | 1830 | 24 | 10 000 | 27,3 | 10,9 |
| Mistura Grossa Com Fibras - MGF | 5,1 | 1750 | 27 | 10 000 | 13,0 | 5,2 |
| Mistura Grossa Sem Fibras - MGSF | 4,6 | 1780 | 27 | 10 000 | 35,0 | 14,0 |

Da análise dos resultados apresentados na tabela anterior, verifica-se que um aumento da porosidade leva, conseqüentemente, a uma maior percentagem de deformação das lajetas. No estudo levado a cabo por Oliveira não foi possível, na faixa IV, atingir os 10 000 ciclos de deformação uma vez que a mistura se deformou excessivamente.

Do presente estudo é possível concluir que a adição de fibras celulósicas na formulação elaborada inicialmente induz a uma melhoria bastante significativa no comportamento de misturas à deformação permanente, permitindo assim uma utilização deste tipo de misturas com garantias de bom funcionamento e conseqüente segurança para os utentes, no que diz respeito a fenómenos de hidroplanagem resultantes dos cavados de rodadura.

CAPÍTULO 5 - Considerações finais

5.1 Conclusões

A elevada impermeabilização do solo, resultante maioritariamente da construção de edifícios e pavimentos rodoviários, combinada com eventos de precipitação curta e intensa, leva a graves problemas de inundação no interior das zonas urbanas tal como constatado em vários países ao longo dos anos. Neste sentido, têm vindo a procurar-se soluções alternativas que possibilitem que o solo recupere a sua capacidade de infiltração original, tais como o dimensionamento de pavimentos permeáveis. A utilização de misturas betuminosas drenantes nas camadas superficiais dos pavimentos, surge como uma medida pouco abordada nas normas europeias e, especialmente, portuguesas, daí ser fundamental o seu estudo e análise comportamental.

Tendo em conta o aumento do tráfego pesado, o aumento das cargas por eixo e a utilização de rodados simples com pneus de pressão de enchimento elevada, a caracterização de misturas betuminosas drenantes à deformação permanente merece um estudo aprofundado, dado estes fatores serem bastante prejudiciais à formação do cavado de rodeira.

As principais conclusões obtidas no decorrer do presente trabalho encontram-se, de forma sumária, descritas seguidamente.

- A presença de fibras celulósicas nas misturas betuminosas drenantes, levou a uma diminuição da perda de massa por desgaste no que diz respeito aos provetes secos, por outro lado, nos provetes húmidos verificou-se uma perda de massa por desgaste muito superior comparativamente com as misturas sem fibras. Conclui-se que a presença de fibras é um fator vantajoso pois permite aumentar os teores de betume nas misturas, sem que se verifique o escorrimento do mesmo, e, assim, aumentar a sua durabilidade. No entanto, nas misturas com adição de fibras, sujeitas à presença de água a uma temperatura de 60 °C, a perda de massa por desgaste revelou-se muito superior.

- No que diz respeito ao ensaio cântabro húmido, verificou-se que para uma temperatura da água de 20 °C, a perda por desgaste das misturas com fibras celulósicas apresenta valores bastante inferiores aos realizados a uma temperatura de 60 °C, na ordem dos 50 %. Concluiu-se assim, que a temperatura da água é um fator bastante relevante no comportamento de misturas com adição de fibras celulósicas.

- Relativamente à caracterização das misturas, no que diz respeito ao módulo de rigidez por tração indireta, verificou-se que a adição de fibras não induz em nenhuma alteração

significativa. Foram obtidos valores na ordem dos 2151 MPa para a mistura grossa com fibras e 2282 MPa para a mistura grossa sem fibras, para a mistura fina com fibras obtiveram-se valores de 1947 MPa e de 1946 MPa para a mistura fina sem fibras.

- Na caracterização das lajetas, de forma análoga aos provetes cilíndricos, foi analisada a baridade e a porosidade. Dos resultados obtidos concluiu-se que a porosidade das lajetas apresenta valores superiores aos obtidos nos provetes cilíndricos utilizados para o ensaio de tração indireta. Este fenómeno surge devido ao processo de compactação utilizado ter sido diferente. A compactação surge assim como um fator com bastante influência na baridade das misturas e, conseqüentemente, na porosidade. A temperatura de produção e compactação das misturas betuminosas drenantes, também é um fator que influencia os resultados da baridade e da porosidade. Por essa razão, o controlo da temperatura durante estas duas fases foi sempre realizado de forma cuidada de modo a cumprirem-se os valores indicados pelo fornecedor do ligante.

- O ensaio de simulação, *wheel tracking test*, realizou-se tendo em conta o preconizado para equipamento pequeno e acondicionamento ao ar, procedimento B, adotando-se uma temperatura de ensaio de 60 °C e aplicando-se a cada lajeta 10 000 ciclos de carga. Analisando as linhas de tendência resultantes do ensaio em cada uma das misturas, observou-se uma clara diferença no andamento das mesmas. Na generalidade, as misturas sem adição de fibras apresentam um pior comportamento à deformação permanente, verificando-se uma deformação nas lajetas bastante superior em comparação com as misturas com adição de fibras.

- Do ensaio de deformação permanente resultaram valores para o declive máximo de rodeira (WTS_{air}) e para a profundidade média de rodeira (RD). Da análise dos resultados obtidos constatou-se que valores reduzidos de declive máximo de rodeira (WTS_{air}) não são indicadores de bom ou mau comportamento das misturas, mas sim um indicador do crescimento da deformação tendo em conta a profundidade de rodeira já obtida. No caso da mistura grossa sem fibras, a mistura com maior deformação, com uma profundidade de rodeira de 14,0 mm, o declive máximo de rodeira (WTS_{air}) é o que toma um valor inferior, indicando que a mistura não irá sofrer um aumento da profundidade de rodeira muito acentuado, caso o número de ciclos se prolongue.

- Analisando os resultados obtidos do ensaio *wheel tracking* a adição de fibras revelou ser favorável no desempenho mecânico das misturas à deformação permanente. Contrariando os resultados obtidos por outros investigadores, verificou-se no presente estudo que para maiores percentagens de betume o comportamento à deformação permanente melhorou. Este fenómeno só foi possível graças às propriedades das fibras que permitiram reter o betume. As misturas com adição de fibras e maior percentagem de betume, apresentaram um melhor comportamento. Nas misturas sem adição de fibras verificou-se que o betume funcionou como um lubrificante nas ligações dos agregados, aumentando assim a profundidade de rodeira.

- Ainda dos resultados obtidos, constatou-se que um aumento da porosidade leva a uma maior percentagem de deformação das lajetas. Este tipo de comportamento está associado ao fenómeno de densificação na mistura betuminosa que ocorre enquanto se verifica redução de volume.

Com vista a dar resposta ao objetivo principal desta dissertação, acerca da viabilidade da adição de fibras celulósicas em misturas drenantes, pode concluir-se que a adição de fibras celulósicas na formulação elaborada ao longo da presente investigação, induz numa melhoria bastante significativa no comportamento das misturas à deformação permanente, permitindo assim a sua utilização com garantias de bom funcionamento e consequente segurança para os utentes. Deste modo, é possível reduzir a problemática dos cavados de rodeira que induzem a fenómenos prejudiciais de hidroplanagem.

5.2 Trabalhos futuros

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento sobre pavimentos betuminosos permeáveis, sobretudo no que diz respeito à camada superficial de mistura betuminosa drenante, indicam-se algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Realização de um troço experimental com o fim de avaliar o comportamento das misturas estudadas em situações de tráfego e condições atmosféricas reais;
- Estudo de novos fusos granulométricos para as misturas drenantes, PA (*Porous Asphalt*);
- Utilização de outros tipos de fibras em misturas betuminosas drenantes, com o intuito de se poder comparar os resultados obtidos com as fibras celulósicas;
- Realização de mais ensaios de pista de laboratório, utilizando novas formulações de misturas betuminosas drenantes, de forma a obter resultados mais favoráveis;
- Desenvolvimento de especificações sobre pavimentos betuminosos permeáveis, no que diz respeito ao seu desempenho mecânico, nomeadamente resultados do ensaio *wheel tracking*;
- Criação de software de dimensionamento de camadas a aplicar em pavimentos betuminosos permeáveis, desde a mistura betuminosa drenante até à camada de reservatório;
- Avaliação da qualidade da água infiltrada nos pavimentos betuminosos permeáveis e estudo de possível aproveitamento das águas drenadas pelos mesmos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acioli, L. (2005). “Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte”. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Antunes e Freire (2006). “Avaliação do comportamento à deformação permanente de misturas betuminosas com base nas normas de ensaio europeias”. 4º Congresso Rodoviário Português. Lisboa.

Azzout, Y., Barraud, S., Cres, F.N., Alfakih, E. (1994). “Techniques alternatives en assainissement pluvial”. Paris: Technique et Documentation - Lavoisier. 372 p.

Barbosa, F. (2012). “Contribuição para o estudo do desempenho de misturas betuminosas temperadas”. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico. Lisboa.

Basch, E.; Brana, R; Briggs, E.; Chang, C.; Iyalla, A.; Logsdon, D.; Meinke, R.; Moomjy, M.; Price, O.D.; Sinckler, S. (2012). “Roadmap for pervious pavement in New York city. A strategic plan for the New York city department of transportation”. Master of Science in Sustainability Management. Columbia University School of Continuing Education.

Branco, F., Pereira, P., Picado-Santos, L. (2011). “Pavimentos Rodoviários”. Coimbra. Almedina.

Brown, S. F. and Gibb, J. M. (1996). “Validation experiments for permanent deformation testing of bituminous mixtures”. Asphalt Pavement Technology. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist. Vol. 65. pp. 255 259.

Cahill Associates. “Porous Pavement Operation and Maintenance Protocol”. San Diego County Facilities, San Diego, USA.

Cahill, T.; Adams, M.; Marm, C. (2003). “Porous Asphalt: The right choice for porous pavements”. Hot Mix Asphalt Technology.

Campos (1998). “Análise do comportamento de trecho piloto de revestimento poroso com asfalto modificado por polímero”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Capitão, S. (2003). “Caracterização Mecânica de Misturas Betuminosas de Alto Módulo de Deformabilidade”. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra.

Carvalho, C. (2015). “Estudo de pavimentos permeáveis em zonas urbanas: Avaliação da sua eficiência na redução do escoamento superficial”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

CE EP (2014). “Caderno de Encargos Tipo Obra - Características dos materiais”. Estradas de Portugal, S.A., Vol. 5, Capítulo 14.03, Setembro.

CEPSA (2014). “Manual de Pavimentação”. 3ª Edição., março, 2014.

Certoma (2011). <http://www.certoma.pt/Limpeza-Urbana.html> consultado a 15/03/2016.

Chen, J.; Chen, S; Liao, M. (2015). “Laboratory and field evaluation of porous asphalt concrete”. Asian Transport Studies. Vol. 3, Issue 3. Pag 298-311.

Collins, Kelly Alyssa (2007). “A Field Evaluation of Four Types of Permeable Pavement with Respect to Water Quality Improvement and Flood Control”. (Under the direction of Dr. William F. Hunt.)

COST 334 (2001). “COST 334 Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres, Final Report of the Action”. European Commission, Directorate General Transport, Office for official Publications of the Europeans Communities, Luxembourg.

DG TREN (2003). “European Energy and Transport Trends to 2030”. European Commission, Directorate-General Energy and Transport, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

DG TREN (2004). “European Union Energy and Transport in Figures: Statistical Pocketbook 2004”. European Commission, Directorate-General Energy and Transport, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Dhalla, S. and Zimmer, C. (2010). “Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide”. Toronto and Region Conservation Authority. Credit Valley Conservation Authority. Version 1.0.

Diniz, E. (1980). “Porous Pavement. Phase I. Design and Operational Criteria”. Municipal environmental Research Laboratory. USA.

Drainage Manual (2009). “Drainage Design and Erosion Control Manual for Olympia”. Volume V. Stormwater Treatment BMPs. Olympia, USA.

Duarte, M. (2014). “Resistência às Deformações Permanentes de Misturas Betuminosas com Betumes Temperados”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

Dumke (2005). “Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Elvik, R. and Greibe, P. (2005). “Road safety effects of porous asphalt: a systematic review of evaluation studies”. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 37, pag. 515-522.

EPA (1999). “Storm Water Technology Fact Sheet, Porous Pavement”. EPA 832-F-99-023 Office of Water, Washington, D.C.

Ferguson, B.K. (2005). “Porous pavements. Boca Raton: CRC Press. Taylor & Francis. Integrative Studies in Water Management and Land Development”; 6. Series Editor Robert L. France. ISBN: 0-8493-2670-2.

Ferreira, A e Picado-Santos, L. (2007). “A Gestão da Qualidade das Redes Rodoviárias - O estado de arte e os desenvolvimentos futuros”. *Ingenium*, 98.

FHWA (2015). “Porous Asphalt Pavements with Stone Reservoirs”. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration.

Freire, A. (2002). “Deformação permanente de misturas betuminosas em pavimentos rodoviários”. Tese de doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil e Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra, Portugal, janeiro.

Gardete (2006). “Comparação de Ensaio Laboratoriais para a Caracterização de Misturas Betuminosas à Deformação Permanente”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da F.C.T. da Universidade de Coimbra, Coimbra, fevereiro.

Gardete, D. e Santos, Picado-Santos, L. (2006). “Caracterização de misturas betuminosas à deformação permanente em laboratório”. IV Congresso Rodoviário Português, Estoril, Portugal, 5 a 7 abril.

Gonçalves, F.J.; Ceratti, J.; Somacal, L., (2000). “Investigação do desempenho de misturas asfálticas convencionais e modificadas com polímeros: proposição de um estudo envolvendo ensaios acelerados de pavimentos com um simulador linear de tráfego”. In: Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico. São Paulo, Brasil.

Grabowski, W and Slowik, M. (2004). “Performance of Creep of the Polymer Modified Binders in the Laboratory Conditions”. *Proceedings of the 3rd Eurasphalt and Eurobetume Congress*, Viena, Book II, pp. 1638-1644.

Hernandez, J. (2008). “Estudio, análisis y diseño de secciones permeables de firmes para vías urbanas con un comportamiento adecuado frente a la colmatación y con la capacidad portante necesaria para soportar tráficos ligeros”. Tesis doctoral. Universidad de Cantabria, Santander, España.

Homem, T. (2002). “Comportamento de misturas asfálticas porosas com ligantes modificados por polímeros e adição de fibras”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Huet, A.; De Boissoudy; Gramsammer, C.; Baudin, A.; Samanos, J. (1990). “Experiments with Porous Asphalt on the Nantes Fatigue Test Track. Transportation Research Record, nº 1265. pp. 54-58. National Research Council, Whashington.

Interpave (2010). “Permeable pavements: guide to the design, construction and maintenance concrete block permeable pavements”. Edition 6. Uniclass L534:L217. Acedido em 20 de Janeiro de 2016, em <http://www.paving.org.uk>.

Jiang e Xiao (2012). “Hamburg Wheel Tracking Test for Porous Asphalt Concrete”. Applied Mechanics and Materials Vols. 178-181. pp 1338-1343. Trans Tech Publications, Switzerland.

Junior, T. (2008). “Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas”. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Khan, A., Wahab, A., Asi, I. and Ramadhan, R. (1998). “Comparative Study of Asphalt Concrete Laboratory Compaction Methods to Simulate Field Compaction”. Construction and Building Materials, Elsevier Science, vol. 12, pp. 373-384.

Korkealaakso, J., Kuosa, H., Niemeläinen, E. Tikanmäki, M. (2014). “Review of pervious pavement dimensioning, hydrological models and their parameter needs”. Climate Adaptive Surfaces CLASS. VTT-R-08227-13. Finland.

Lebens, M. (2012). “Porous Asphalt Pavement Performance in Cold Regions”. Minnesota Department of Transportation Research Services. Local Road Research Board.

Lebens, M. and Troyer, B. (2012). “Porous Asphalt Pavement Performance in Cold Regions”. Minnesota Department of Transportation. Minnesota, USA.

Mallick, R. B.; Khandal, P. S.; Cooley Jr., L. A.; Watson, D. E. (2000). “Design, construction, and performance of new generation of open-graded friction courses”. National Center for Asphalt Technology. Auburn University. NCAT Report nº 2000-1.

Marchioni, M. e Silva, C. (2010). “Dimensionamento de Pavimentos Intertravados Permeáveis”. 40ª RAPV - Reunião Anual de Pavimentação, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 26-28 Outubro 2010.

Martinho, F.; Lanchas, S.; Nunez, R.; Batista, F.; Miranda, H. (2013). “A experiencia portuguesa em misturas betuminosas do tipo SMA com fibras celulósicas”. VII Congresso Rodoviário Português, 10-12 Abril 2013, Lisboa.

Mendes, S. F. (2011). “Caracterização mecânica de misturas betuminosas a aplicar em infraestruturas de transportes”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal.

NAPA (2009). “Porous Asphalt Pavements for Stormwater Management”. National Asphalt Pavement Association.

Oliveira, C. (2003). “Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante”. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-111ª/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 87 p.

Pais, J.C.; Pereira, P.A.A.; Azevedo, M.C.M. (2000). “Ensaios mecânicos para caracterização de misturas betuminosas”. 1º Congresso Rodoviário Português - Estrada 2000, Lisboa, 2000, p. 639-649.

PAVIDREN. “Betão Betuminoso Drenante. Pavimentos de elevada qualidade”. Grupo Pavia. Acedido em 20 de Janeiro de 2016, em <https://www.forma-te.com/finish/26-construcao-civil/16196-pavidren>

Pereira, P. e Picado Santos, L. (2002). “Pavimentos Rodoviários”. Edição de autor (ISBN 972-8692-02-1), Braga.

Perez-Jiménez, F. and Gordillo, J. (1990). “Optimization of Porous Mixes Through the Use of Special Binders”. Transportation Research Record, nº 1265. pp. 59-68. National Research Council, Washington.

PG-3 (2013). “Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (OC29/2011)”. Artículo 542 - Mezclas betuminosas en caliente tipo hormigón betuminoso. Ministerio de Fomento, Dirección General de Carreteras, España.

Pratt, C.J. (1999). “Use of permeable, reservoir pavement constructions for stormwater treatment and storage for re-use”. School of The Built Environment, Coventry University, Coventry, CV1 5FB, UK.

Prowell, B.D. (1999). “Selection and evaluation of performance-graded asphalt binders for Virginia”. Virginia Transportation Research Council. Charlottesville, Virginia

Santucci, L. (2001). “Rut Resistant Asphalt Pavements”. Technology Transfer Program and Pavement Specialists, Pavement Research Center, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.

Scholz, M. and Grabowiecki, P. (2007). “Review of permeable pavement systems. Building and Environment”. Vol.42, pag. 3830 - 3836.

Shueler, T. (1987). “Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban” BMPs.

Tomaz, P. (2009). “Curso de Manejo de águas pluviais. Capítulo 60 - Pavimento Poroso”. Acedido em 10 de Janeiro de 2016, em: http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo60_pavimento_poroso.pdf

Tota-Maharaj, K (2010). Geothermal paving systems for urban runoff treatment and renewable energy efficiency. Tese de Doutorado, The University of Edinburgh, Scotland, U.K.

UNHSC (2009). “UNHSC Design Specifications for Porous Asphalt Pavement and Infiltration Beds”. University of New Hampshire Stormwater Center. Durham, New Hampshire.

Virgiliis, A. (2009). “Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias”. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Watanabe (1995).”Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes”. Water Science and Technology, vol. 32, 1, pp. 25-32.

Wilson, M. (2002). “Laboratory study of entrapment and transport of particulates through permeable pavers”. MEng report, University of Guelph.

Yang and Jiang (2003). “Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials”. Cement and Concrete Research. Vol. 33. pag. 381-386.

ACERVO NORMATIVO

| | |
|--------------------------|---|
| EN 12697-5:2002 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density. |
| EN 12697-6:2003 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens. |
| EN 12697-8:2003 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens. |
| EN 12697-17:2004 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 17: Particle loss of porous asphalt specimen. |
| EN 12697-22:2003 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 22: Wheel tracking. |
| EN 12697-25:2003 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt. Cyclic compression test. |
| EN 12697-26:2003 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness. |
| EN 12697-34:2004 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test. |
| EN 12697-35:2003 | Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 35: Laboratory mixing. |
| NP EN 459-1:2010 | Cal de construção - Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade. |
| NP EN 933-1:2000 | Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração. |
| NP EN 1097-6:2003 | Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. |

