



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

**Estudo de pavimentos permeáveis em zonas urbanas  
Avaliação da sua eficiência na redução do escoamento  
superficial**

**Cátia Filipa Galinho Carvalho**

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

Orientadora: Prof. Doutora Marisa Sofia Dinis de Almeida  
Coorientadora: Prof. Doutora Cristina Maria Sena Fael

Covilhã, junho de 2015



Ao meu avô, António Carvalho



# Agradecimentos

Este trabalho experimental foi desenvolvido no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil - Estruturas e Construção na Universidade da Beira Interior (UBI), no Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA), sob a orientação da Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida e da co-orientadora Professora Doutora Cristina Maria Sena Fael.

Para a realização deste trabalho foi fundamental a intervenção de inúmeras pessoas assim como entidades, aos quais expresso os meus seguintes agradecimentos:

À minha orientadora Professora Doutora Marisa Sofia Fernandes Dinis de Almeida e à minha co-orientadora Professora Doutora Cristina Maria Sena Fael pelo apoio, ajuda e disponibilidade prestadas, pelo constante incentivo e encorajamento e pela boa disposição em todas as situações.

À Universidade da Beira Interior pelas óptimas condições que sempre me proporcionou.

À CEPSA Portuguesa, SA pelos betumes disponibilizados para a realização deste trabalho.

Ao Srs. Félix, Albino, Luciano, Jorge e Jorge Bento, técnicos dos laboratórios de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura.

Aos meus amigos Etelvina, Cátia, Micael, Lídia e Jean que mesmo longe estão sempre presentes.

Aos meus colegas e amigos Marta, Flávio, Gediminas e Mohammad pela ajuda, companheirismo e sobretudo pelos momentos de boa disposição.

Em especial aos meus pais, à minha irmã, à minha avó, ao meu tio António Carvalho e ao meu namorado Tiago pela preocupação e incentivo ao longo de toda a minha formação académica.



## Resumo

O ritmo acelerado e desequilibrado da ocupação dos solos para urbanização e construção de infraestruturas tem vindo a provocar a sua degradação. A crescente impermeabilização dos solos é um dos principais fatores da sua degradação, eliminando grande parte da sua utilidade, o que constitui um motivo de preocupação. Os solos proporcionam uma vasta gama de funções, tais como, filtração da água para os aquíferos, remoção de contaminantes e redução da frequência e do risco de inundações e secas.

A União Europeia tem vindo a definir orientações no sentido de proporcionar melhores práticas no que respeita a limitar, atenuar ou compensar a impermeabilização dos solos de modo a manter as suas funções ecossistémicas. A utilização de superfícies permeáveis em alternativa à impermeabilização dos solos é uma das medidas a aplicar. O pavimento permeável devido à quantidade de vazios que possui, permite a infiltração da água na sua superfície reduzindo o volume de escoamento superficial e a probabilidade de ocorrência de picos de cheia.

A presente dissertação tem como objetivo central desenvolver e avaliar a eficiência de um pavimento permeável na redução do escoamento superficial tendo como referência o pavimento convencional. Neste sentido, o trabalho desenvolveu-se em duas fases: na primeira fase foram estudadas as diferentes camadas constituintes do pavimento, tendo sido construído um pavimento permeável e um impermeável (como referência). De acordo com os trabalhos de outros autores definiram-se os materiais a utilizar nas diferentes camadas, as respetivas espessuras, e no caso da camada de desgaste determinaram-se as características mecânicas do betão betuminoso drenante e denso. Na segunda fase construiu-se um simulador de chuva numa área do laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura da Universidade da Beira Interior, que permitiu a avaliação do desempenho hidráulico do pavimento desenvolvido, através da recolha de dados sobre o volume de escoamento superficial, a taxa de infiltração e a avaliação do coeficiente de escoamento superficial gerado pelos diferentes pavimentos.

Concluiu-se que a solução estudada para o pavimento permeável contribui para um aumento da permeabilidade e, conseqüentemente atua como um sistema mitigador dos efeitos de inundações nos centros urbanos, nomeadamente na aplicação em grandes áreas públicas ou privadas, estacionamento, parques, zonas de prática desportiva, passeios e ruas de baixo de tráfego.

## Palavras-chave

Escoamento superficial, pavimento permeável, simulador de chuva, zonas urbanas.



# Abstract

The growing urban occupation of soil through infrastructure constructions leads to increasing the degradation issue. The impermeabilization is one of the most important factors that can directly increase the degradation of the soil structure. Nevertheless, allowing decreasing properties of the soil structure. Properties of the soil directly influence on the utilization of the soil. For instance, increases of drainage to aquifers through the soil structure, resulting remove of contaminants and consequently, reduces the frequency and risk of floods and droughts.

The European Union suggested some guidelines for prevent impermeabilization of the soil in order to reach to the best solutions with respect to the limitations such as: mitigate or compensate the soil sealing in order to maintain their ecosystemic functions. One of the practical solutions that can assist to prevent impermeabilization of the soil is using of permeable surface. The permeable or porous pavement, due to the amount of pores it contains, allows the infiltration of water through its surface, reducing the volume of runoff and the probability of an overflow of stormwater.

The present research study was focused on the development and evaluation of an efficiency permeable pavement in order to reduce runoff when compared with the reference or dense asphalt pavement. The work was developed on two phases: in the first phase was investigated various constituent layers of the pavement, conducting one permeable and one impermeable pavement. Regarding the first phase of this study, the materials for the multilayered pavements were selected based on the suggestions from the literature. In this way, the thickness and material components of each layer was determined. Furthermore, mechanical properties of the porous and dense asphalts were assessed. In the second phase, a rainfall simulator was designed and created at laboratory of construction in the Department of Civil Engineering and Architecture at the University of Beira Interior, which allowed the direct evaluation of the hydraulic performance of the developed pavement, by collecting data on volume the runoff surface, the infiltration rate and evaluating the runoff coefficient generated by the different pavements.

The lessons learnt from this set of experiments, it can be conclude that, a permeable pavement, can act as a system to mitigate the effects of floods in urban centers and also it can be extended to the following applications: public areas, private parking, parks, complex, sidewalks and streets with lower traffic.

## Keywords

Runoff, permeable pavement, rainfall simulator, urban areas



# Índice

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Formulação do problema de pesquisa .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Metodologia .....	2
<b>CAPÍTULO 2 - PAVIMENTOS PERMEÁVEIS</b> .....	<b>3</b>
2.1. Introdução.....	3
2.2. Evolução dos pavimentos permeáveis .....	3
2.3. Tipo de pavimentos permeáveis .....	4
2.4. Camadas e materiais constituintes dos pavimentos permeáveis .....	6
2.4.1. Camada desgaste .....	6
2.4.2. Camada de base e sub-base.....	9
2.4.4. Geomembrana .....	10
2.4.3. Geotêxtil .....	10
2.4.5. Pó de Pedra .....	11
2.5. Problemas de colmatação .....	11
2.6. Manutenção .....	12
<b>CAPÍTULO 3 - SIMULADOR DE CHUVA</b> .....	<b>15</b>
3.1. Introdução.....	15
3.2. Tipos de Simuladores de Chuva .....	16
3.3. Simuladores de chuva aplicados a pavimentos permeáveis .....	17
3.4. Métodos de calibração de um Simulador de Chuva .....	22
3.4.1. Dimensão da gota .....	23
3.4.2. Distribuição espacial da chuva e intensidade média da precipitação .....	24
3.4.3. Energia Cinética.....	24
<b>CAPÍTULO 4 - TRABALHO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE RESULTADOS</b> .....	<b>27</b>
4.1. Introdução.....	27
4.2. Caracterização dos materiais utilizados .....	27
4.2.1. Agregados .....	27
4.2.1.1. Análise granulométrica.....	28
4.2.1.2 Massa Volúmica e absorção de água .....	28
4.2.2. Cal Hidráulica.....	30
4.2.2.1 Massa Volúmica .....	30

4.2.3. Ligante Betuminoso .....	31
4.2.4. Fibras Viatop Premium.....	31
4.3. Determinação da composição das misturas betuminosas.....	33
4.3.1. Fuso Granulométrico .....	33
4.3.2. Propriedades das misturas drenantes .....	33
4.3.3. Formulação das misturas .....	34
4.3.4. Determinação da quantidade inicial de betume .....	36
4.3.5. Escolha do teor ótimo de betume .....	37
4.3.5.1. Baridade máxima teórica .....	38
4.3.5.3. Ensaio Marshall .....	42
4.4. Ensaios de caracterização das misturas betuminosas .....	43
4.4.1. Ensaio cântabro com imersão em água .....	43
4.4.2. Ensaio de sensibilidade à água .....	46
4.4.3. Ensaio de Permeabilidade .....	48
4.5. Comparação de resultados entre misturas betuminosas drenantes e misturas betuminosas densas .....	53
4.6. Simulador de Chuva .....	54
4.6.1 Descrição do simulador de chuva .....	54
4.6.1. Seleção do tipo de simulador .....	55
4.6.2. Calibração do simulador de chuva .....	56
4.7. Execução dos pavimentos .....	59
4.8. Avaliação dos caudais .....	62
4.8.1. Pavimento permeável .....	65
4.8.2. Pavimento Impermeável .....	67
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>71</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>75</b>
<b>ACERVO NORMATIVO .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO I .....</b>	<b>83</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Pavimento permeável de infiltração (adaptado de <a href="http://www.paveshare.org/library/picp-design-sizing">http://www.paveshare.org/library/picp-design-sizing</a> ) .....	5
Figura 2.2 - Pavimento permeável de armazenamento (adaptado de <a href="http://www.paveshare.org/library/picp-design-sizing">http://www.paveshare.org/library/picp-design-sizing</a> ) .....	5
Figura 2.3 - Betão betuminoso drenante .....	7
Figura 2.4 - Betão poroso (Fonte: Hernandez,2008) .....	7
Figura 2.5 - Exemplo de blocos vazados .....	8
Figura 2.6 - Exemplo de blocos de betão .....	8
Figura 2.7 - Exemplos de tipos de blocos de calçada .....	9
Figura 2.8 - Camada de base e camada de sub-base (adaptado de Drainage Designe Manual, 2009) .....	9
Figura 2.9 - Tipos de agregados e fíler .....	10
Figura 2.10 - Geomembrana (Fonte: Virgiliis, 2009) .....	10
Figura 2.11 - Geotextil .....	11
Figura 2.12- Pó de pedra .....	11
Figura 3.1 - Sistema de aspersão à esquerda e tipo de aspersor à direita (Fonte: Spraying Systems Co.) .....	16
Figura 3.2 - Sistemas de gotejadores (Fonte: Tales,2008) .....	17
Figura 3.3 - Simulador de chuva desenvolvido por Suda <i>et al.</i> (1988) .....	18
Figura 3.4 - Simulador desenvolvido por Andersen <i>et al.</i> (1999) .....	18
Figura 3.5 - Simulador desenvolvido por Alessi <i>et al.</i> (2006) .....	19
Figura 3.6 - Simulador de chuva desenvolvido por Fontaneda (2014) .....	20
Figura 3.7- Simulador de chuva desenvolvido por Zhang (2006) .....	20
Figura 3.8 - Simulador de chuva desenvolvido por Silva e Campana. Fonte: Moura (2005) .....	21
Figura 3.9 - Simulador de chuva desenvolvido por Zhao (2014) .....	21
Figura 4.1 - Brita 5/15 à esquerda e brita 3/6 à direita .....	28
Figura 4.2 - Pó de pedra .....	28
Figura 4.3 - Cal hidráulica .....	30
Figura 4.4 - Fibras Viatop Premium .....	31
Figura 4.5 - Representação gráfica das baridades máximas teóricas .....	38
Figura 4.6 - a) Preparação da mistura betuminosa; b) compactador de impacto (DECA-UBI); c) desmoldagem dos provetes; d) provetes .....	39
Figura 4.7 - Representação gráfica das baridades médias das misturas .....	40
Figura 4.8 - Representação gráfica das porosidades dos provetes .....	41
Figura 4.9 - VMA por tipo de mistura betuminosa .....	41
Figura 4.10 - VFB por tipo de mistura betuminosa .....	42
Figura 4.11 - a) Proвете antes do ensaio Marshall; b) Proвете durante o ensaio Marshall; c) Provetes após o ensaio Marshall .....	43
Figura 4.12 - Deformação e estabilidade Marshall .....	43
Figura 4.13 - a) Máquina de desgaste de Los Angeles; b) Proвете antes do ensaio; c) Proвете depois do ensaio .....	44
Figura 4.14 - Ensaio a vácuo .....	46

Figura 4.15 - Ensaio de tração indireta .....	46
Figura 4.16 - Ensaio de permeabilidade vertical .....	49
Figura 4.17 - a) Provetes parafinados; b) Ensaio de permeabilidade horizontal.....	49
Figura 4.18 - Representação gráfica dos resultados dos coeficientes de permeabilidade.....	52
Figura 4.19 - Desenho esquemático do simulador de chuva.....	54
Figura 4.20 - Caixa coletora: a) croqui dos copos; b) Ensaio com os copos coletores .....	58
Figura 4.21 - Desenho esquemático do pavimento .....	59
Figura 4.22 - Sequência de montagem do pavimento .....	60
Figura 4.23 - Colocação da mistura na betoneira.....	61
Figura 4.24 - a) Compactação da mistura; b) Mistura betuminosa densa.....	62
Figura 4.25 - Mistura betuminosa drenante .....	62
Figura 4.26 - Simulador de chuva.....	63
Figura 4.27 - Seções de medição do caudal superficial e do caudal de infiltração.....	64
Figura 4.28 - Hidrograma de escoamento superficial e da taxa de infiltração resultantes de uma precipitação de 60 minutos. ....	66
Figura 4.29 - a) Hidrograma de escoamento superficial; b) da taxa infiltração .....	66
Figura 4.30 - Hidrograma do caudal de infiltração e da taxa de infiltração resultantes de uma precipitação de 60 minutos. ....	67
Figura 4.31 - Hidrogramas de escoamento superficial gerado pelo pavimento impermeável sujeito a três chuvadas com duração de 10 min. ....	68
Figura 4.32 - Hidrogramas de escoamento superficial gerado pelo pavimento impermeável sujeito a três chuvadas com duração de 40 min. ....	68

# Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Tabela resumo dos vários autores que utilizaram simuladores de chuva aplicados a pavimentos permeáveis .....	22
Tabela 4.2 - Massa volúmica das britas 3/6 e 5/15 e do pó de pedra .....	29
Tabela 4.3 - Absorção de água das britas 3/6 e 5/15 e do pó de pedra.....	30
Tabela 4.4 - Massa volúmica da cal hidráulica.....	30
Tabela 4.5 - Características do betume modificado elaster 13/60 .....	31
Tabela 4.6 - Características do granulado .....	32
Tabela 4.7 - Características do betume incluído no granulado.....	32
Tabela 4.8 - Características da fibra.....	32
Tabela 4.9 - Fuso granulométrico para betão betuminoso drenante (CE EP,2012) .....	33
Tabela 4.10 - Requisitos/Propriedades das misturas drenantes (CE EP,2012) .....	34
Tabela 4.11 - Requisitos para o ensaio Cântabro.....	34
Tabela 4.12 - Requisitos para o ensaio de Sensibilidade à água.....	34
Tabela 4.13 - Granulometria das misturas A,B e C estudadas .....	35
Tabela 4.14 - Granulometria das misturas D e E estudadas (%) .....	36
Tabela 4.15 - Percentagem de agregados para a formulação das misturas .....	36
Tabela 4.16 - Percentagem de betume inicial para as diferentes misturas.....	37
Tabela 4.17 - Ensaio Cântabro dos provetes do grupo imerso e do grupo a seco .....	45
Tabela 4.18 - Ensaio da sensibilidade à água .....	47
Tabela 4.19 - Permeabilidade Vertical $K_v$ .....	51
Tabela 4.20 - Permeabilidade horizontal $K_h$ .....	51
Tabela 4.21 - Resultados do tempo de escoamento e do coeficiente de permeabilidade .....	52
Tabela 4.22 - Categoria para os resultados obtidos da permeabilidade vertical e horizontal. ....	53
Tabela 4.23 - Resultados comparativos de misturas drenantes e misturas densas.....	53
Tabela 4.24 - Características dos aspersores estudados.....	55
Tabela 4.25 - Resultados para os diferentes tipos de aspersores estudados.....	55
Tabela 4.26 - Resultados das medições pelo método de vazão .....	57
Tabela 4.27 - Resultados do Coeficiente de Uniformidade Christiansen .....	58
Tabela 4.28 - Quantidades necessárias para a execução das camadas de desgaste .....	61
Tabela 4.29 - Resultados dos ensaios ao pavimento permeável.....	64
Tabela 4.30 - Resultados dos ensaios ao pavimento impermeável.....	65
Tabela 4.31 - Redução do caudal de ponta de cheia .....	69



# Lista de Acrónimos

BBD	Betão Betuminoso Drenante
BBDr	Beton Bitumineux Drainantes
CUC	Christiansen Uniformity Coefficient
DECA	Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura
EC	Energia Cinética
EN	Norma Europeia
EP	Estradas de Portugal
ITS	Indirect Tensile Strength
ITSR	Indirect Tensile Strength Ratio
JWD	Joss-Waldvogel Disdrometer
LCS	Laboratrio de Caminos de Santander
LNEC	Laboratório de Engenharia Civil
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NP	Norma Portuguesa
PA	Porous Asphalt
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PG3	Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes
VFB	Vazios nos agregados cheios de betume
VMA	Vazios na mistura de agregados
UBI	Universidade da Beira Interior
USA	United States of America



# Simbologia

A	Percentagem de agregados retidos no peneiro 2,36 mm
<i>a</i>	Área da secção do permeâmetro
Ab	Absorção de água
B	Percentagem de agregados que passa no peneiro 2,36 mm e fica retido no peneiro 0,075 mm; Conteúdo de ligante, em 100 % da mistura
C	Percentagem de agregados que passa no peneiro 0,075 mm
CUC	Coefficiente de Uniformidade de Christiansen
d	Diâmetro do provete ou
D	Diâmetro do provete
F	Fator de absorção dos agregados (entre 0 e 2%) Na falta de informação F=0,7%
h	Altura do provete; Altura do tubo; Altura do corpo de prova
H	Altura do provete
<i>h1</i>	Altura de água da face inferior do corpo de prova no início do ensaio, (cm)
<i>h2</i>	Altura de água da face inferior do corpo de prova no fim do ensaio
<i>Ir</i>	Intensidade de precipitação
ITS	Resistência à tração indireta
<i>ITSd</i>	Resistência média à tração indireta dos provetes secos
<i>ITSR</i>	Resistência conservada em tração indireta
<i>ITSw</i>	Resistência média à tração indireta dos provetes imersos
K	Constante, função da quantidade de material que passa no peneiro 0,075 mm
<i>k</i>	Coefficiente de permeabilidade
$K_h$	Coefficiente de permeabilidade horizontal
$K_v$	Coefficiente de permeabilidade vertical
N	Número de recipientes coletores
P	Resistência máxima média
P1	Peso do corpo de prova, saturado com superfície seca
P2	Peso do cesto de rede, imerso; Peso do corpo de prova seco, em estufa, a 105°C-110°C
P3	Peso do cesto de rede + corpo de prova, imerso
Pb	Percentagem de betume em relação ao peso total da mistura
$p_b$	Percentagem de betume
$p_i$	Percentagem do agregado <i>i</i> (em relação ao peso total da mistura)
PL	Valor da perda de partículas
<i>r</i>	Raio interno do tubo
S	Área da caixa coletora
t	Tempo de coleta
$t_v$	Tempo de escoamento de 1735 cm <sup>3</sup>
V	Volume de escoamento; Volume coletado

VFB	vazios nos agregados cheios de betume
$V_m$	Porosidade da mistura
VMA	Vazios na mistura de agregados
$W_1$	Massa da amostra inicial
$W_2$	Massa final da amostra
$X_i$	Lâmina de água precipitada em cada coletor
$\gamma$	Massa volúmica
$\rho_b$	Densidade do betume
$\rho_b$	Baridade do provete
Pb	Baridade saturada com superfície seca dos provetes
$\rho_B$	Massa volúmica do ligante
$P_b, \text{ dim}$	Baridade do provete
$\rho_i$	Densidade do agregado i
$\rho_m$	Baridade máxima teórica da mistura
$\rho_{\text{máx}}$	Baridade máxima teórica
$\bar{X}$	Lâmina média precipitada

# CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

## 1.1. Formulação do problema de pesquisa

Desde meados da década de 50 a superfície total das cidades da União Europeia sofreu um aumento de 78% em contrapartida a população apenas aumentou 33% (AEA,2006). O desenvolvimento massivo de zonas urbanas e a consequente impermeabilização dos solos pode influenciar significativamente os recursos hídricos levando a alterações ambientais das bacias hidrográficas, que podem afetar os ecossistemas e os serviços relacionados com a água. Atualmente as cidades europeias são afetadas por inundações e períodos de escassez de água, situação que se agrava com o aquecimento global.

Um dos fatores que influencia diretamente as inundações é a impermeabilização dos solos, ou seja, o solo não tem a capacidade de absorver a água da chuva, sobrecarregando o sistema convencional de drenagem de águas pluviais, causando inundações à superfície. Este aspeto torna-se mais gravoso quando ocorrem precipitações muito intensas.

Com o objetivo de atenuar os efeitos provocados pela impermeabilização dos solos podem ser utilizadas superfícies permeáveis. Estas superfícies mantêm a ligação entre a camada superficial do solo e as camadas subjacentes, reduzindo o escoamento à superfície, permitindo a infiltração das águas, contribuindo para melhorar a recarga dos aquíferos e baixar os custos do tratamento das águas pluviais.

O conceito de pavimento permeável foi desenvolvido em 1970, no Franklin Institute na Filadélfia, PA, USA (Tomaz, 2009). O pavimento permeável pode ter na sua superfície diversos tipos de materiais, tais como, blocos de betão, blocos vazados, betão poroso, betão betuminoso drenante ou asfalto poroso e blocos de calçada.

No desenvolvimento deste estudo optou-se por colocar na camada de desgaste um betão betuminoso drenante, tendo sido estudadas várias soluções para este material. O betão betuminoso drenante é constituído por agregado grosso com ausência de finos, criando um espaço vazio para o tornar altamente permeável à água. A percentagem de vazios no asfalto poroso é de cerca de 22-30%, enquanto no asfalto convencional é de 2-4%. A avaliação do desempenho hidráulico do pavimento foi aferida por recurso a um simulador de chuva.

## 1.2. Objetivos

O objetivo geral deste estudo experimental é analisar a viabilidade de utilização de um pavimento permeável de baixo custo e tecnologia simples, com vista ao controlo do escoamento superficial. Neste contexto, pretende-se desenvolver um pavimento permeável e avaliar o seu desempenho hidráulico, obtendo e comparando os coeficientes de escoamento e infiltração associados aos diferentes pavimentos em estudo.

## 1.3. Metodologia

A presente dissertação desenvolve-se em quatro etapas fundamentais: revisão bibliográfica, ensaios experimentais, análise de resultados e conclusão.

A primeira etapa consistiu numa pesquisa bibliográfica intensiva, enquadrando-se os aspetos mais importantes relacionados com os tipos de pavimentos permeáveis existentes, os tipos de materiais permeáveis utilizados, a manutenção e colmatação, de modo a poder desenvolver um pavimento permeável que possua características que possam contribuir para a redução do escoamento das águas de superfície. Ainda dentro da revisão bibliográfica realizaram-se inúmeras pesquisas bibliográficas relativamente a simuladores de chuva aplicados a pavimentos permeáveis, assim como as suas principais características, de forma a poder seleccionar corretamente o tipo de simulador de chuva a utilizar no presente estudo.

Posteriormente realizaram-se os ensaios experimentais. Nesta etapa foram definidos os procedimentos laboratoriais, as condições dos ensaios, a caracterização dos materiais e a montagem do equipamento experimental bem como a realização dos ensaios.

Em seguida analisaram-se os resultados obtidos de todo o processo experimental, ou seja, analisaram-se os resultados dos ensaios da mistura betuminosa drenante a aplicar no pavimento permeável comparando-os com os resultados mistura betuminosa densa de referência. Por fim, analisaram-se os resultados dos ensaios ao pavimento permeável, realizados com a ajuda de um simulador de chuva.

Em conclusão, foram sugeridas propostas para temas futuros a fim de dar continuidade ao estudo desenvolvido.

## CAPÍTULO 2 - PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

### 2.1. Introdução

Neste capítulo será abordado o tema dos pavimentos permeáveis com o objetivo de definir o que é um pavimento permeáveis, as suas propriedades e a sua funcionalidade. No decorrer do capítulo será desenvolvido o tema, com enfoque principal para o tipo de pavimentos permeáveis existentes, como se caracterizam as suas camadas constituintes e os seus problemas de colmatação e por fim como se executa a manutenção deste tipo de pavimentos.

*“O pavimento é a parte da estrada, rua ou pista, que suporta diretamente o tráfego e transmite as respectivas solicitações à infraestrutura: terreno, obras de arte, etc. Pode ser constituído por uma ou mais camadas, tendo, no caso mais geral, uma camada de desgaste e camadas de fundação. Cada uma destas camadas pode ser composta e construída por várias camadas elementares” (LNEC, 1962).*

Um pavimento permeável ou poroso é um tipo de pavimento que pelas suas propriedades permite a passagem de água e ar. As suas propriedades de permeabilidade e porosidade elevada permitem que este tipo de pavimento, onde quer que seja construído, influencie significativamente a hidrologia e melhore o ambiente. Os pavimentos permeáveis apresentam-se eficazes no que diz respeito à redução da taxa de escoamento superficial, volume e deterioração da qualidade da água (Diniz,1980).

Quando se executam obras de pavimentação, os pavimentos são aplicados para trabalhar como pavimentos impermeáveis, ou seja, não permitem a percolação de água no solo. Uma superfície impermeável é o oposto de uma superfície permeáveis, a água ao atingir um pavimento impermeável não é absorvida e acumula-se preenchendo as deformações da superfície, provocando danos na camada de desgaste.

A solução alternativa para o problema de drenagem das águas pluviais de zonas de estacionamento e outras áreas de baixo tráfego, encontra-se nos pavimentos permeáveis. O seu dimensionamento é realizado de forma a serem capazes de transmitir comodidade e segurança ao utilizador e uma boa capacidade estrutural para que possa suportar cargas e variações térmicas.

### 2.2. Evolução dos pavimentos permeáveis

O aumento significativo da população nos Estados Unidos alarmou os vários estados para uma necessidade de alteração dos sistemas de drenagem (Acioli,2005). Neste sentido, surgem os pavimentos permeáveis que têm sido construídos desde 1970 com sucessos e fracassos. O primeiro pavimento permeável desenvolvido com sucesso foi em 1971 no Franklin Institute

Research Laboratories, através do patrocínio da United States Environmental Protection Agency, que permitiu uma investigação exaustiva de uma base porosa e de uma sub-base porosa. A utilização de pavimentos permeáveis tem aumentado ao longo dos anos, a sua utilização tem sido principalmente em passeios, parques de estacionamento e zonas de lazer.

Na Europa o uso dos pavimentos permeáveis começa no ano 1967, em Farborough, Inglaterra, através da British Royal Air Force (Diniz,1980). Em 2002 foi publicado o primeiro livro dedicado aos pavimentos permeáveis, este livro destina-se a engenheiros, arquitetos paisagistas, autoridades locais, arquitetos, entidades de estrada, prestadores de serviços de saneamento, entre outros. O manual incide nos principais pontos que devem ser considerados aquando a execução dos pavimentos permeáveis, permite também uma leitura detalhada dos aspetos relacionados com a formulação e construção de pavimentos permeáveis e também a sua manutenção a longo prazo (Pratt *et al.*,2002).

Em 1982 foi colocado o primeiro pavimento permeável na Suíça, com uma constante monitorização para a sua avaliação de durabilidade (Nascimento, 2012). Devido ao frio rigoroso na Suíça, quando existe neve ou gelo nos pavimentos é necessária uma remoção constante, com a ajuda de sal extra, para que o pavimento possa estar o mais seco possível. A manutenção do pavimento é feita de 6 em 6 meses e o tempo de vida é de 8 a 12 anos (Vejdirektoratet, 2012).

Em Espanha, no ano de 1989, foi construído um pavimento permeáveis numa rua da urbanização da Vila Olímpica de Barcelona, esta obra de pavimentação não teve continuação. (Hernandez, 2008).

O uso de pavimentos permeáveis na Dinamarca deu-se por volta do ano 1970, mas rapidamente foi interrompida a sua execução devido ao seu insucesso, surgindo posteriormente a sua aplicação em 1990. Em 2005 foi criado um novo projeto chamado Transport 2005, que tinha como objetivo diminuir o ruído de tráfego até 2010, (Dennis *et al.* 2009).

### **2.3. Tipo de pavimentos permeáveis**

Os pavimentos permeáveis funcionam como dispositivos de armazenamento ou de infiltração, assegurando uma capacidade de suportar as cargas impostas. A diferença entre estes dois tipos de pavimentos permeáveis está na sua execução, um pavimento permeáveis de infiltração poderá ter ou não na sua constituição um geotêxtil que permite a infiltração direta das águas para a camada seguinte, ao contrário, um pavimento permeáveis de armazenamento contém uma geomembrana que ajuda a camada de sub-base no armazenamento das águas. Antes do dimensionamento de um pavimento permeável, quer seja para armazenar ou infiltrar água, é necessário considerar a quantidade de escoamento existente na área a construir e o escoamento suposto após a construção (Thelen, 1978).

Um pavimento permeável de infiltração recolhe parte ou totalidade da água proveniente da chuva, infiltrando-a através de uma camada superficial permeáveis conduzindo-a por meio de um reservatório de brita ou camada de sub-base para o solo natural, ou para um ponto de captação específico. Segundo CIRIA 1996 citado por Acioli (2005), os pavimentos permeáveis de infiltração apresentam alguns pontos positivos, ou seja, podem ser utilizados onde não exista rede de drenagem que possa receber o escoamento proveniente de outras fontes, não sobrecarregam a rede de drenagem, podem aumentar a recarga dos aquíferos, evitam acréscimo de custos no aumento da rede de águas pluviais e a sua construção é simples e rápida. Na figura 2.1 encontra-se representado um pavimento permeável de infiltração.

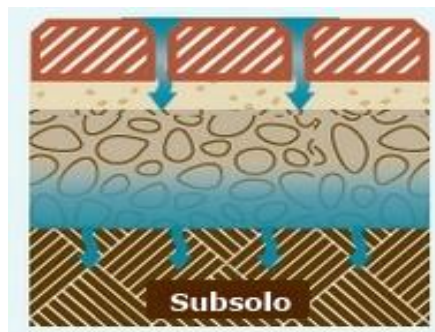


Figura 2.1 - Pavimento permeável de infiltração (adaptado de <http://www.paveshare.org/library/picp-design-sizing>)

O pavimento permeável de armazenamento como se ilustra na figura 2.2 tem como objetivo a retenção e regulação do escoamento pluvial e posteriormente a sua libertação de forma gradual. Um pavimento permeável com função de armazenamento evita a recarga dos aquíferos e impede que as águas sejam conduzidas para o sistema de drenagem convencional por vezes já saturados. A água armazenada, posteriormente, pode ser libertada para um sistema de drenagem específico através de tubagens inseridas no pavimento e não para o sistema de drenagem convencional, ou seja pode ser reutilizada para uso agrícola, uso industrial, lavagem de ruas, entre outros (Gomez, 2014). A reutilização das águas pluviais armazenadas no reservatório de um pavimento permeáveis proporciona um custo-benefício, isto é, estimula uma redução do consumo de água da rede pública e em paralelo contribui para um benefício ambiental (PRATT,1999).

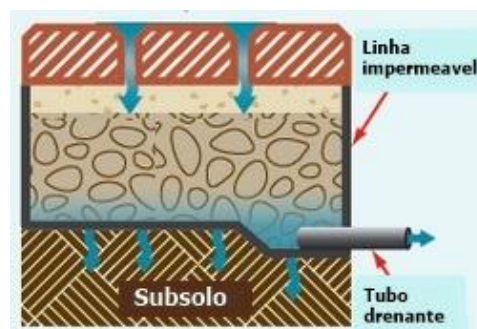


Figura 2.2 - Pavimento permeável de armazenamento (adaptado de <http://www.paveshare.org/library/picp-design-sizing>)

## 2.4. Camadas e materiais constituintes dos pavimentos permeáveis

Um pavimento permeável é formado por várias camadas, distinguindo-se pelas funções que cada uma delas desempenha. A determinação da espessura das diferentes camadas constituintes do pavimento permeáveis é determinada pela porosidade dos materiais que a constituem. A utilização correta dos materiais nas diferentes camadas dos pavimentos permeáveis permite que exista uma redução eficaz do escoamento superficial e um equilíbrio hídrico. Os materiais devem favorecer a passagem de água assim como o seu correto armazenamento.

### 2.4.1. Camada desgaste

A camada superficial ou camada de desgaste é a camada que está em contacto direto com o tráfego, devendo garantir uma superfície lisa, antiderrapante e assegurar um escoamento superficial eficiente. O material a aplicar na camada superficial depende da função a desempenhar, assim como da sua capacidade de infiltração. Existem inúmeras soluções para a aplicação de revestimento na camada superficial, podendo ser de betão betuminoso drenante, betão poroso, blocos vazados, blocos de betão e blocos de calçada.

#### Betão betuminoso drenante

O betão betuminoso drenante, também conhecido por asfalto poroso representado na figura 2.3, é uma mistura betuminosa a quente, sendo a sua estrutura completamente diferente das convencionais misturas densas. A mistura betuminosa drenante é constituída por uma pequena quantidade de agregados finos de areia ou fíler, o que permite obter uma elevada porosidade, superior a 20%. Nos últimos anos tem-se verificado uma tendência de incorporação de fibras celulósicas nas misturas betuminosas permitindo utilizar um conteúdo de betume relativamente elevado, sem escorrimento, proporcionando camadas betuminosas com altas prestações mecânicas, com segurança, conforto de uso e, simultaneamente, com maior durabilidade.

Devido à textura rugosa da superfície do betão betuminoso drenante e da elevada quantidade de poros, este diminui a aquaplanagem e permite uma boa visibilidade em dias chuvosos (Pittet *et al.* 2006). A colmatação é um dos problemas associado a este tipo de pavimentos permeáveis. Quando a junção entre o ligante e o agregado é fraca, o ligante betuminoso pode percolar pela superfície através dos poros acumulando-se na estrutura provocando um entupimento (Virgiliis, 2009). A acumulação de lixo, e outro tipo de impurezas no pavimento arrastados pela água, pode também provocar a colmatação dos poros. Para evitar este problema é necessária uma frequente manutenção do pavimento.



Figura 2.3 - Betão betuminoso drenante

### Betão Poroso

Uma alternativa ao betão betuminoso drenante é o betão poroso ilustrado na figura 2.4. Para que o betão seja poroso deve ter uma porosidade efetiva mínima 15% de vazios e máxima de 25% de vazios (Hernandez, 2008). O betão poroso apresenta uma resistência relativamente baixa, pelo que deve ser aplicado em zonas de baixa tensão, como passeios, estacionamentos e zonas de lazer (Acioli, 2005)



Figura 2.4 - Betão poroso (Fonte: Hernandez,2008)

### Blocos vazados

Os blocos vazados, como indica o nome são blocos com aberturas que permitem o preenchimento dessas mesmas aberturas com relva, areia, cascalho, entre outros elementos. O mais comum é a utilização de tufo de relva nas aberturas dos blocos vazados, sendo estes blocos constituídos por betão ou por grelhas de plástico. Quando o enchimento dos blocos vazados é feito com tufo de relva, as raízes devem estar colocadas abaixo da superfície dos blocos vazados, evitando possíveis esmagamentos (Acioli,2005). Em Portugal este tipo de blocos são muito utilizados, principalmente em zonas de estacionamento como ilustra a figura 2.5.



Figura 2.5 - Exemplo de blocos vazados

### Blocos de betão

Este tipo de blocos pré-fabricados são blocos de betão alinhados, como ilustra a figura 2.6, com juntas de modo a permitir a infiltração da água até ao reservatório do pavimento permeáveis. O assentamento dos blocos é executado sobre uma camada de areia, que permite uma maior porosidade e permeabilidade. Devido à sua elevada resistência e durabilidade, este tipo de pavimento pode suportar tráfego pesado (Virgiliis, 2009). A sua utilização é muito frequente em passeios e estacionamentos. Para uma boa durabilidade dos blocos de betão é necessária uma manutenção periódica para evitar que ervas cresçam nas suas juntas.



Figura 2.6 - Exemplo de blocos de betão

### Blocos de calçada

Os blocos de calçada são um tipo de pavimento composto por paralelepípedos de pedra natural, podem ser de calcário, basalto ou granito, como se pode ver na figura 2.7. São facilmente restaurados sempre que exista necessidade, são de fácil aplicação e moldagem. A taxa de infiltração neste tipo de blocos no geral é boa, no entanto, depende se a calçada é miúda ou grossa (Rocheta, 2011).



Figura 2.7 - Exemplos de tipos de blocos de calçada

#### 2.4.2. Camada de base e sub-base

A camada de base é a camada que se segue à camada de desgaste. Esta camada é importante para um bom funcionamento do pavimento, é ela que recebe as cargas impostas pela passagem do tráfego, que mais tarde são transferidas para o solo (Virgiliis,2009). Normalmente a camada de base é constituída por agregados.

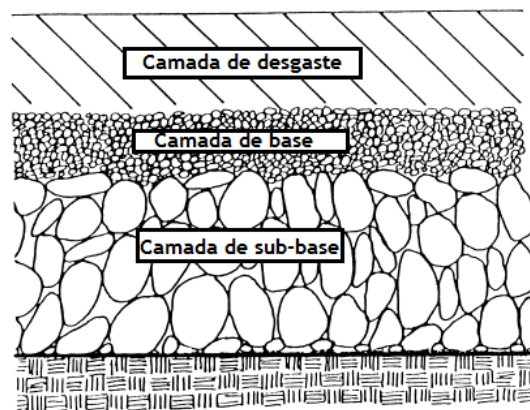


Figura 2.8 - Camada de base e camada de sub-base (adaptado de Drainage Designe Manual, 2009)

Na execução do pavimento permeáveis, quer seja de armazenamento, quer seja infiltração, é colocada uma camada de sub-base, seguinte à camada de base, que permite armazenar temporariamente a água vinda da chuva ou infiltra-la diretamente para o solo natural. Os materiais a utilizar na camada de sub-base são agregados com maior resistência e de maiores dimensões, esta camada necessita de redistribuir os esforços vindos da camada de base, assim como receber e armazenar a água. Consoante o objetivo do pavimento permeável, a camada de sub-base pode servir de reservatório ou de infiltração das águas pluviais. Na figura 2.8 estão representadas a camada de base e sub-base de um pavimento permeável.

## Agregados

Os agregados apresentados na figura 2.9, são materiais que possuem forma e volume diferentes consoante a sua necessidade de utilização. Em pavimentos permeáveis, os agregados podem ser utilizados como agregados finos, agregados grossos, agregados de granulometria extensa e fíleres.



Figura 2.9 - Tipos de agregados e fíler

### 2.4.4. Geomembrana

A geomembrana é um geossintético, consiste numa manta de liga plástica ou de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), elástica e flexível como ilustra a figura 2.10. Este tipo de manta é utilizada em pavimentos permeáveis direcionados para o armazenamento das águas pluviais, e é colocada a seguir à camada de sub-base, impedindo também a contaminação das águas para o solo natural (Virgili, 2009).



Figura 2.10 - Geomembrana (Fonte: Virgili, 2009)

### 2.4.3. Geotêxtil

Por definição, o geotêxtil é um material utilizado em contato com o solo ou com outros materiais aplicados. Em pavimentos permeáveis, o geotêxtil é aplicado como uma manta não-

tecida de filamentos de polipropileno que permite a passagem das águas de infiltração à seguinte camada, evitando a movimentação de pequenas partículas, ou seja, funciona como um filtro, o geotêxtil quando utilizado é colocado a seguir à camada de sub-base (Virgiliis, 2009). Na figura 2.11 estão apresentados vários tipos de geotêxtis não tecidos.



Figura 2.11 - Geotextil

#### 2.4.5. Pó de Pedra

O pó de pedra representado na figura 2.12 é um material fino que pode ser utilizado para substituir a areia. Este tipo de material confere resistência ao betão, mas no caso da sua aplicação em pavimentos permeáveis, é utilizado como amortecedor, impedindo que os agregados estejam em contato direto com a geomembrana (Virgiliis, 2009).



Figura 2.12- Pó de pedra

### 2.5. Problemas de colmatação

A colmatação pode ser definida de uma forma simples, consiste na redução de espaços vazios de um meio poroso que permite a infiltração de um determinado fluido. O processo de colmatação pode ocorrer de forma rápida ou lenta, dependendo do tipo de carga aplicada ao meio poroso.

O principal inconveniente dos pavimentos permeáveis é a colmatção, provocando uma redução da capacidade de infiltração do pavimento ao longo do tempo. A camada de desgaste é a camada que sofre problemas de colmatção, a colmatção ocorre de forma rápida, os poros são obstruídos pelos sedimentos arrastados pela água degradando o pavimento.

A quantidade de sedimentos presentes num pavimento permeável não depende só da quantidade de água que os envolve como também do tipo de revestimento aplicado no pavimento permeável. Quanto maior a granulometria do material utilizado e menor o volume de finos, menor é a probabilidade de colmatção (Acioli,2005).

A vida útil do pavimento permeável está ligada diretamente à colmatção, uma colmatção rápida leva a problemas de infiltração, o pavimento perde a sua função drenante e passa de pavimento permeável a impermeável. Quando esta situação ocorre, a única solução é retirar toda a camada de desgaste e colocar uma nova.

Em cidades em que o frio é rigoroso, a probabilidade de colmatção é superior, devido ao uso do sal para combater o gelo dos pavimentos. O processo de colmatção inicia ao fim de algum tempo de utilização, podendo variar entre 3 a 6 meses, dependendo do tipo de pavimento permeável, da frequência de utilização e das condições oferecidas.

Por outro lado, segundo Oliveira (1995), em situações reais a passagem do rodado do veículo provoca uma descolmatagem dos vazios à superfície devido à contínua sucção. Nas áreas em que não existe passagem do rodado, por exemplo nas bermas, os finos arrastados pela água podem proporcionar uma colmatagem, acumulando-se nos poros.

Aconselha-se o uso de pavimentos permeáveis para zonas de baixo tráfego, uma vez que o uso deste tipo de pavimentos para tráfego pesado pode provocar a sua desagregação na camada de desgaste, favorecendo uma rápida colmatção e também uma redução da capacidade de carga.

## **2.6. Manutenção**

A manutenção de um pavimento permeável deve planear-se em função dos resultados apresentados pelas inspeções periódicas realizadas com o objetivo de demonstrar o seu funcionamento (Hernandez, 2008).

Durante os primeiros meses seguintes à execução do pavimento permeável, este deve ser inspecionado inúmeras vezes para verificar o seu desenvolvimento. Se a rotina de inspeções consecutivas após os primeiros meses de funcionamento for positiva, as seguintes inspeções podem ser mais espaçadas.

A vida útil de um pavimento pode ser prolongada se este possuir uma rotina preventiva, que deve ser garantida pela entidade detentora do pavimento permeável, através de técnicos

especializados. O pavimento permeável pode ter mais ou menos necessidade de manutenção frequente, dependendo de diversos fatores, tais como, grandes tempestades, mudanças sazonais, condições de tráfego e condições de utilização.

A University of New Hampshire fornece um documento que permite uma orientação sobre como efetuar inspeções, assim como, atividades de manutenção adequadas ao pavimento permeável. Com base no documento da University of New Hampshire elaborou-se um “Guia de Inspeção e Manutenção de Pavimentos Permeáveis” apresentado no ANEXO I. Este Guia de Inspeção e Manutenção contém um suporte de informação sintetizada, que permite direcionar atividades de inspeção assim como programar atividades de manutenção (UNHSC,2011).

A inspeção visual da superfície do pavimento permeável após precipitação intensa, a verificação da necessidade de limpeza do pavimento, a averiguação de danos no pavimento devido à passagem de tráfego pesado, entre outras medidas, estão inseridas no Guia de Inspeção, seguidas de uma avaliação através do grau de satisfação ou insatisfação avaliadas pelo técnico responsável. A frequência de inspeção varia entre 2 a 4 vezes por ano, dependendo também do grau de utilização a que o pavimento está exposto.

As medidas preventivas são as atividades de manutenção, que permitem uma limpeza de rotina evitando medidas corretivas que acarretam maiores custos. Estas medidas de manutenção têm uma frequência de 2 a 4 vezes por ano ou quando necessário, dependendo da avaliação feita nas campanhas de inspeção visual. Nestas medidas constam limpezas do pavimento, desobstrução de poros, substituição de pequenas zonas danificadas, entre outras.



## CAPÍTULO 3 - SIMULADOR DE CHUVA

### 3.1. Introdução

O capítulo que se segue contém uma breve introdução sobre o que define um simulador de chuva, quais as suas características e qual a sua utilização. Na continuação do capítulo são definidos os tipos de simuladores de chuva, a sua aplicação em pavimentos permeáveis por vários autores e os métodos de calibração de um simulador de chuva.

O simulador de chuva tornou-se uma técnica muito eficiente nos estudos de erosão, infiltração e escoamento superficial, podendo ser utilizado em ambiente laboratorial ou de campo. É utilizado para produzir precipitações com características controladas, nomeadamente, intensidade, frequência espacial e temporal e duração, de modo idêntico ao da chuva natural. Este tipo de equipamento permite obter resultados com uma maior rapidez e eficiência quando comparados aos resultados obtidos com chuvas naturais, os quais podem levar 20 a 30 anos até se obterem resultados conclusivo. O simulador de chuva deve ser construído ou adaptado de acordo com as características do pavimento permeáveis a ensaiar, deve ser utilizado com conhecimento adequado e prudência (Tomaz, 1997).

O mais importante quando se utiliza um simulador de chuva não é produzir uma chuva perfeita, mas sim produzir uma chuva ideal, que forneça resultados confiáveis e úteis (Meyer, 1994). Os ensaios realizados a partir de um simulador de chuva fornecem dados que permitem avaliar o desempenho hidráulico, o volume de escoamento superficial, a taxa de infiltração e também o coeficiente de escoamento superficial gerado pelo pavimento em estudo.

Segundo Hudson (1993), a utilização de um simulador de chuva pode trazer vantagens fundamentais quando aplicado corretamente ao campo de estudo, mas também pode propiciar desvantagens quando utilizado inadequadamente ou aplicado a estudos inadequados a simuladores de chuva.

As vantagens e desvantagens de um simulador de chuva são apresentadas em seguida muito resumidamente:

Vantagens - Medições rápidas, não é necessário recorrer a chuva natural;

Capacidade de trabalhar com chuva constante;

Fácil manuseamento e configuração.

Desvantagens - aplicação em grandes áreas é muito dispendiosa e de mobilidade difícil;

Medições de escoamento em áreas de pequena escala não podem ser comparadas ou aplicadas a áreas de maior dimensão;

São muitos sensíveis ao vento.

## 3.2. Tipos de Simuladores de Chuva

Antes de proceder à caracterização dos tipos de simuladores de chuva existentes, é fundamental apresentar as suas características intrínsecas, para que se entenda o enquadramento desta ferramenta útil no estudo da infiltração e escoamento superficial. Segundo Meyer 1994 os simuladores apresentam as seguintes características principais: - Distribuição do tamanho das gotas o mais próximo da chuva natural; - Velocidade de impacto o mais próximo da chuva natural; - Intensidades de precipitação com intervalos de variação próximos da chuva natural; - Uma área de estudo suficiente para a realização dos ensaios; - Queda das gotas e intensidade de precipitação uniforme; - O impacto das gotas deve ser num ângulo próximo da vertical; - De fácil mobilidade.

A seleção do tipo de simulador de chuva é um fator decisivo no que diz respeito à produção de chuva simulada. O elemento produtor de chuva simulada deve atender a fatores compatíveis com o tipo de solo a utilizar, eficiência de aplicação, o tipo de intensidade e velocidade da chuva simulada, capacidade de abranger a área desejada.

Os simuladores de chuva podem dividir-se em dois grupos:

- i) Sistemas de aspersores ou nebulizadores (Andersen *et al.* 1999, Roberto Testezlaf 2005) - este tipo de sistema permite a formação de chuva a partir de um ou mais aspersores, com intensidade controlada e uniformidade de precipitação. O sistema de aspersão pode ainda ser dividido em dois grupos, sistema de aspersores rotativos e sistema de aspersores estacionários. A utilização dos sistemas de aspersores é a mais utilizada possuindo inúmeras vantagens, tais como, fácil adaptação às condições do terreno, fácil aplicação, possibilidade de ajustar a intensidade de aplicação aos diferentes tipos de solos, maior alcance, como inconveniente deste tipo de sistemas está o vento, que pode provocar irregularidade na precipitação a aplicar. Na figura 3.1 está ilustrado um tipo de sistema de aspersão e o seu correspondente aspersor.



Figura 3.1 - Sistema de aspersão à esquerda e tipo de aspersor à direita (Fonte: Spraying Systems Co.)

- ii) Sistemas de gotejadores - A precipitação é formada através de gotas como ilustra a figura 3.2 que saem a partir pequenos orifícios ou agulhas hipodérmicas, iniciando a queda com velocidade nula. Os gotejadores são instalados em disposição retangular, diretamente sobre uma placa de plástico e de caudal fixo. Este tipo de sistema possibilita controlar a intensidade de precipitação consoante o número de gotejadores instalados. No entanto a desvantagem que quanto maior o número de gotejadores, maior é a dispersão da intensidade de chuva simulada, o alcance é limitado pelo numero de gotejadores. Para além disso Andersen *et al.* (1999) refere que este sistema de gotejadores tem ainda a desvantagem associada à dificuldade da colocação dos gotejadores a uma altura que permita uma velocidade representativa da precipitação real.



Figura 3.2 - Sistemas de gotejadores (Fonte: Tales,2008)

### 3.3. Simuladores de chuva aplicados a pavimentos permeáveis

A utilização de simuladores de chuva começou por ser aplicada ao estudo da erosão, infiltração e escoamento superficial associado aos solos agrícolas. A obtenção de resultados rápidos e conclusivos e o fácil manuseamento de um simulador de chuva captou a atenção de vários investigadores, que aplicaram esta técnica ao estudo de pavimentos permeáveis, como o betão poroso, betão betuminoso drenante, blocos vazados, blocos de betão e blocos de calçada.

Suda *et al.* (1988) testaram um simulador de chuva numa área 2m x 2m num pavimento permeáveis de blocos de betão, a fim de obter resultados satisfatórios que permitissem que as águas pluviais se infiltrassem no solo. O simulador de chuva é constituído por um tanque de água, uma bomba, um medidor de caudal e um aspersor como ilustra a figura 3.3. As condições padrão para o ensaio experimental foram, intensidade de precipitação de 50 mm/h, com duração de 1 hora. Utilizaram a fórmula desenvolvida pela Tokyo Metropolitan Government para calcular a intensidade de precipitação produzida pelo simulador chuva  $i=5000/(t+40)$ , em que  $i$  é a intensidade de precipitação (mm/h) e  $t$  é a duração da precipitação. Os resultados obtidos permitiram concluir que este tipo de pavimento permeável comportou-se de forma eficaz, no que diz respeito à sua capacidade de evitar o escoamento superficial durante 60 minutos para uma intensidade de precipitação de 50 mm/h.

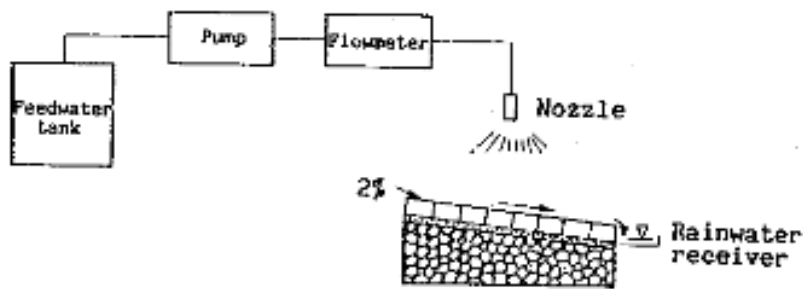


Figura 3.3 - Simulador de chuva desenvolvido por Suda *et al.* (1988)

Em 1999, Andersen *et al.* desenvolveram um estudo experimental que consistiu na construção de um modelo de um parque de estacionamento em betão poroso e de um simulador de chuva. O simulador de chuva divide-se em duas componentes fundamentais, o sistema formador de gotas e o sistema regulador de água como representado na figura 3.4. O sistema formador de gotas é constituído por 2 chapas em PVC, uma superior e outra inferior, a base superior contém 4 válvulas manuais de libertação de ar. Entre as duas chapas de PVC, existe uma tira lateral que as separa e permite o fornecimento de uma câmara de água. A chapa inferior foi perfurada para a colocação de tubos Tygon, imediatamente abaixo dos tubos Tygon passa uma linha que permite a formação de gotas de água que caem em queda livre para a superfície, sobre a placa inferior existe ainda uma válvula de entrada de água. O sistema regulador de água é composto por duas válvulas de pressão, um reservatório pressurizado, uma válvula de controlo de água, um coletor, uma caixa do simulador de chuva e uma válvula de libertação de ar. Para uma intensidade de precipitação de 15 mm/h com duração de uma hora a estrutura que compõe o pavimento consegue reter em média 55% do volume de precipitação. Para precipitações posteriores com a mesma intensidade no pavimento já molhado a capacidade de armazenamento é de 30%, com um intervalo de tempo mínimo entre as chuvas simuladas de 72 horas.

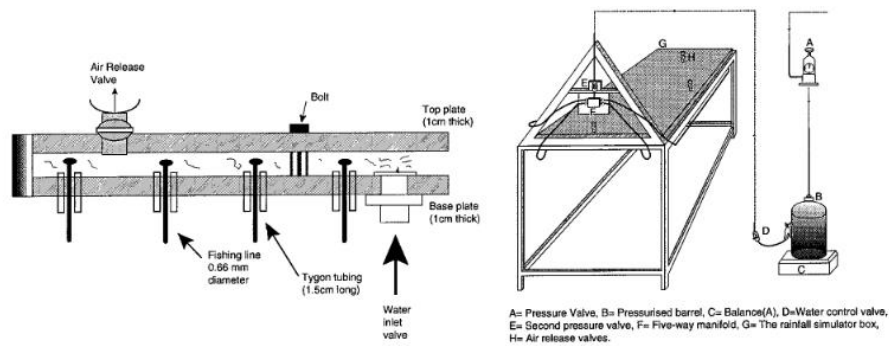


Figura 3.4 - Simulador desenvolvido por Andersen *et al.* (1999)

Araújo *et al.* (2000) simularam várias chuvadas sobre diferentes tipos de pavimentos, nomeadamente solo natural, superfícies semipermeáveis, superfícies impermeáveis e superfícies permeáveis. O simulador de chuva utilizado foi construído por Asseline e Valentin (1978), este tipo de simulador é constituído por uma torre metálica com cerca de 4m de altura,

com quatro faces laterais cobertas com um tecido resistente que protege o jato do aspersor do efeito do vento. O aspersor está colocado no topo da torre metálica e é alimentado por mangueiras através de um circuito hidráulico constituído por uma eletrobomba e num reservatório de água. Para controlar a pressão existe um manómetro colocado a jusante da bomba e a montante do aspersor. As precipitações simuladas foram variáveis com duração máxima 10 min e com intensidade máxima de precipitação de 111,9 mm/h. A chuva simulada foi aplicada sobre uma área de 1m<sup>2</sup>. O pavimento permeável apresentou um escoamento superficial praticamente nulo.

Alessi *et al.* (2006) utilizaram um simulador de chuva para comparar o escoamento superficial em dois tipos de pavimentos permeáveis. Para tal ensaiaram um pavimento permeável em asfalto poroso e outro em betão poroso, com simulações de precipitações com intensidades variáveis numa área de 1 m<sup>2</sup>. O simulador de chuva é composto por uma armação retangular que se sustenta por quatro pernas que permitem ajustar a altura entre 1,5 a 2,5 m sobre a superfície do pavimento permeáveis a ensaiar como se pode observar na figura 3.5. Para minimizar o efeito do vento foram colocados plásticos em todas as quatro faces laterais da armação do simulador de chuva. A simulação das gotas de chuva é feita através de um sistema de tubulações perfurado uniformemente fixo na base superior do simulador, estas tubulações recebem água bombeada através de um reservatório de 250 litros. Foram efetuados 7 testes para cada um dos pavimentos permeáveis, com durações entre 15 a 21 minutos e intensidades médias de 128.86 mm/h para o pavimento em blocos de betão e 138.63 mm/h para o pavimento em asfalto poroso. Ambos os pavimentos permeáveis apresentaram um bom desempenho no que diz respeito ao escoamento superficial.



Figura 3.5 - Simulador desenvolvido por Alessi *et al.* (2006)

Para o estudo detalhado do comportamento hidráulico de pavimentos permeáveis, Fontaneda (2014) utilizou um simulador de chuva portátil constituído por gotejadores como ilustra a figura 3.6. O simulador de chuva está dividido em duas partes, a câmara de chuva e a placa perfurada inferior. A câmara de chuva contém uma abertura superior pela qual é introduzida a água que é medida através de uma régua colocada numa das faces da câmara, a parte inferior contém uma

abertura ao qual se fixa a placa perfurada. A placa perfurada tem quatro filas com quatro furos cada uma, em cada furo estão colocados os gotejadores selados com silicone, que recebem a água vinda da camara de chuva. Para a união da camara de chuva e da placa perfurada foi colocada uma fita isolante para evitar perdas de água. A utilização do simulador de chuva em laboratório permitiu simulações com intensidades de precipitação de 100, 200 e 400 mm/h com duração de 15 minutos. Os pavimentos permeáveis ensaiados apresentaram uma capacidade de atenuar intensidades de chuva superior aos pavimentos convencionais.

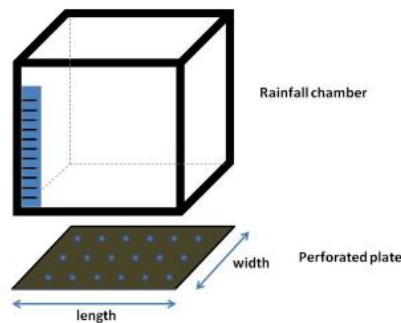


Figura 3.6 - Simulador de chuva desenvolvido por Fontaneda (2014)

O simulador de chuva desenvolvido em laboratório por Zhang (2006) foi utilizado para a simulação de precipitações num pavimento permeáveis de blocos de betão, colocados numa caixa metálica de 1,5 x 1,5 m, a fim de entender o mecanismo que influencia a capacidade de infiltração através da superfície permeáveis e de todas camadas do pavimento permeáveis em si. O simulador é composto por 25 aspersores, ou seja, 5 aspersores em cada fila, espaçados de igual modo e colocados diretamente sobre a área experimental de modo a alcançar uma área de 1,0 x 1,0 m, um sistema de medição de caudal e um reservatório com forma afunilada que recolhe a água proveniente do pavimento permeável a ensaiar. O simulador de chuva está apoiado com as quatro pernas diretamente sobre as chapas da caixa metálica dos blocos de betão como ilustra a figura 3.7. Foram realizados 7 ensaios, para os quais foram testados caudais compreendidos entre 1,4 l/min e os 7,4 l/min com duração entre 15 a 40 minutos dependendo do caudal. O pavimento permeável de blocos de betão não gerou escoamento superficial.



Figura 3.7- Simulador de chuva desenvolvido por Zhang (2006)

O simulador de chuva desenvolvido por Silva e Campana (2004), foi utilizado por Moura (2005) para simular precipitações de diferentes intensidades em diferentes pavimentos permeáveis, como superfície de relvado, superfície compactada, blocos maciços e blocos vazados. O simulador de chuva utilizado continha 22 aspersores espaçados uniformemente com projeção para uma área de estudo de  $1\text{m}^2$ , possibilitando fixar as intensidades de precipitação a serem simuladas, variando as intensidades entre 50 a 200 mm/h com duração de 10 minutos. O simulador possui uma armação metálica, composta por um motor, duas roldanas, uma correia, um manómetro colocado na entrada de água e o sistema rotativo de aspersores como representa a figura 3.8. Em geral todas as superfícies permeáveis apresentaram valores de infiltração e escoamento satisfatórios.

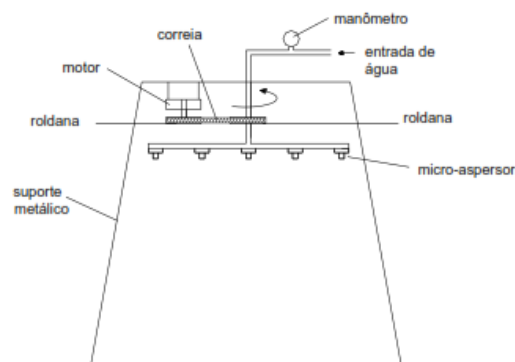


Figura 3.8 - Simulador de chuva desenvolvido por Silva e Campana. Fonte: Moura (2005)

O objetivo do estudo de Zhao (2014) consistia em poder monitorizar mudanças nos indicadores de pH, condutividade e a concentração de chumbo e zinco nas águas armazenadas em vários modelos de pavimento de asfalto poroso através da simulação de precipitações. O simulador de chuva possuía um aspersor com agulhas de injeção, um medidor de caudal acoplado a um sistema de controlo e um reservatório de água como ilustra a figura 3.9. A intensidade de precipitação aplicada sobre os 3 modelos de teste foi de 52,5 mm/h o que equivale a um caudal de 0.0026 l/s. As amostras de 2l recolhidas permitiram concluir que ambos os pavimentos de asfalto poroso apresentaram um aumento do pH e uma capacidade de remover o chumbo e zinco do escoamento superficial durante um longo período de armazenamento.

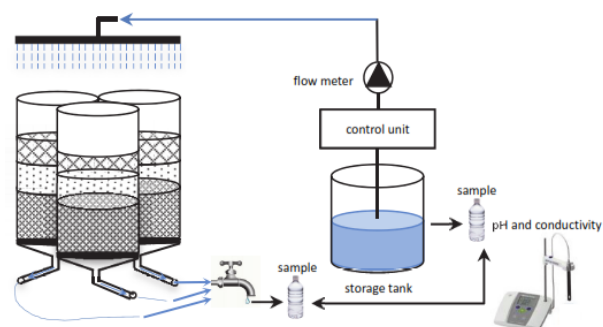


Figura 3.9 - Simulador de chuva desenvolvido por Zhao (2014)

Na tabela 3.1 encontram-se resumidas as principais características dos simuladores de chuva utilizados por vários autores.

Tabela 3.1 - Tabela resumo dos vários autores que utilizaram simuladores de chuva aplicados a pavimentos permeáveis

Autor	Tipo de simulador de chuva	Área de ensaio (m <sup>2</sup> )	Intensidades (mm/h)	Pressão (psi)	Duração da chuvada (min)
Suda et al. 1988	Aspersor	2 x 2	50	-	60
Andersen et al. 1999	Sistema de aspersores rotativos	6 x 6	15	0-5	30 60 120
Araujo et al. 2000	Aspersor	1 x 1	111,9	Constante	10
Alessi et al. 2006	Sistema de tubulações perfurado	1 x 1	128,86 138,63	-	15 a 21
Fontaneda 2014	Gotejadores	-	100 200 400	-	15
Zhang 2014	Sistema de tubulação com aspersores	1,5 x 1,5	-	-	15 a 40
Moura 2005	Sistema de aspersores	1 x 1	50 a 200	-	10
Zhao 2014	Aspersor com agulhas de injeção	0,018	52,5	-	-

### 3.4. Métodos de calibração de um Simulador de Chuva

Ao longo de vários estudos realizados quer a nível de pavimentos permeáveis quer em solos de agricultura, a calibração é de extrema importância, é através dela que se ajustam os parâmetros da dimensão das gotas, a distribuição espacial da chuva e a energia cinética. Diversos investigadores desenvolveram ao longo dos anos vários métodos de calibração de simuladores de chuva, com mais ou menos utilização nas investigações correntes existem os seguintes métodos: o do óleo, o da mancha, o da farinha, o do disdrômetro, o do laser ótico, o dos copos coletores e o método volumétrico de medição do caudal, entre outros.

### 3.4.1. Dimensão da gota

O método do óleo de Eigel & Moore (1983) citado por Kincaid *et al.* (1996) consiste em utilizar óleo de tratamento (STP-Scientifically Treated Petroleum) e óleo mineral colocados em placas de Petri que recolhem as gotas de chuva provenientes de um aspersor. Após a recolha das gotas nas placas de Petri, são fotografadas imediatamente para que se possa estimar com precisão o seu tamanho. Este método permite que as gotas de água suspensas no fluido viscoso, neste caso o óleo, assumam uma forma esférica devido à tensão superficial. O inconveniente deste método está nas gotas de maior tamanho que podem danificar o processo de registo fotográfico, uma vez que ao caírem sobre as gotas mais pequenas podem aglutinar-se ou dispersar as gotas já existentes nas placas de Petri (Pearson *et al.*, 1957).

O método da mancha consiste na queda de gotas de água sobre um papel de filtro absorvente e na medição do diâmetro da mancha resultante. De forma simplificada pode-se aplicar a seguinte expressão  $D=aS^{2/3}$ , em que D e S são os diâmetros da gota e mancha, respetivamente, (Magarvey, 1956). Apesar de ser um método simplista apresenta alguns inconvenientes, demora na análise dos dados, sobreposição de manchas no papel absorvente e não é possível fazer medições em tempo real (Salles, 1999).

Salako (1995) utilizou o método da farinha de Carter *et al.* (1974). Este método consiste na queda de gotas de água com tamanho conhecido sobre uma camada de farinha, o contacto entre as gotas de água e a farinha permite a formação de grânulos que primeiramente são secos ao ar livre e posteriormente secos no forno antes da pesagem. O tamanho da gota é calculado através da expressão  $D=(6W/\pi)^{1/3}$ , onde D é o diâmetro da gota de chuva em mm e W é a média do peso da gota em mg. Este método apresenta os mesmos inconvenientes que o método da mancha.

O método de Joss e Waldvogel (JWD) utiliza um disdrômetro na determinação da dimensão das gotas da chuva incidentes numa área de 50 cm<sup>2</sup>. Apesar de ser utilizado por várias entidades como a NASA, o disdrômetro apresenta vários défices, nomeadamente não contabiliza o número de pequenas gotas de chuva em chuvas fortes devido ao “tempo morto”, que significa um atraso na resposta ao sistema de controlo. A deteção de gotas menores é excluída devido à presença de ruído e gotas com tamanho maior que 5,0 a 5,5 mm de diâmetro não é reconhecida pelo disdrômetro. Outro problema está na exclusão de movimento vertical do ar, apenas contabiliza as gotas que caem em velocidade terminal (Tokay *et al.* 2003).

O método do laser ótico em comparação com os outros métodos, potencia a recolha de dados a alta velocidade, para além de medir a dimensão das gotas. Este método, tal como os restantes apresenta a desvantagem da sobreposição de imagens, ou seja, ao caírem várias gotas o laser ótico tem a tendência a assumir várias gotas numa só, reproduzindo uma imagem com gotas de maior dimensão, o que coloca em causa o tamanho real das gotas (Kincaid *et al.*, 1996).

### 3.4.2. Distribuição espacial da chuva e intensidade média da precipitação

Um método simples e económico para a calibração da intensidade real da chuva simulada é o método volumétrico de medição de vazão. Este método utilizado por Sousa (2011) consiste na colocação de duas caixas coletoras de chapa galvanizada de zinco, colocadas lado a lado e centradas através da referência dos aspersores a utilizar. Para coletar o volume de precipitação da caixa coletora foram realizados 5 ensaios, com 3 repetições cada e pressões distintas. Para o cálculo da intensidade real é utilizada a média dos volumes coletados.

Outro método de calibração utilizado por Sousa (2011) para calibrar um aspersor é o método dos copos coletores. Antes do início da precipitação produzida pelo aspersor, os copos são colocados e alinhados de igual forma. Após o ensaio experimental com duração de 10 minutos, é calculada a intensidade média produzida para diferentes pressões e medido o volume de água coletada em cada copo. A média aritmética das intensidades precipitadas em cada copo coletor permite calcular a intensidade média simulada. Posteriormente calcula-se o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), este coeficiente indica em percentagem se existe uniformidade de distribuição, esta percentagem final se acima de 70% é aceitável.

### 3.4.3. Energia Cinética

Segundo Salles *et al.* (2002) a energia cinética da chuva é um relevante indicador da capacidade da chuva em desagregar o solo. No entanto, a energia cinética não é um parâmetro meteorológico habitualmente avaliado. Para facilitar a ligação entre a energia cinética da chuva e a intensidade da chuva foram propostas fórmulas empíricas baseadas no tamanho e velocidades terminais das gotas.

O simulador de chuva desenvolvido por Sousa (2011) produz gotas com diâmetro mediano de 2,0 a 2,5 mm com o propósito de simular precipitações com energia cinética próxima de 25 J/m<sup>2</sup>/mm. A energia cinética foi avaliada tendo por base a altura do simulador e a precipitação simulada. Recorrendo à equação  $E_c = 3660 \times KE_i / I$ , em que  $E_c$  é a energia cinética em J/m<sup>2</sup>/mm,  $KE_i$  a energia cinética específica no tempo em J/m<sup>2</sup>/s e  $I$  é a intensidade de precipitação em mm/h, resulta uma energia cinética de 22,53 J/m<sup>2</sup>/mm, o que representa 90,12% da energia cinética da chuva natural.

A fim de analisar a erosividade associada aos perfis de precipitação Montebeller (2009) utilizou a seguinte fórmula para o cálculo da energia cinética  $E_c = 0,119 + 0,0873 \log(I)$ , em que  $E_c$  é a energia cinética por mm de chuva em MJ/ha/mm e  $I$  a intensidade de chuva em mm/h. A equação foi utilizada para cada segmento de 1 minuto considerando os valores de intensidade constantes. Para obter a energia cinética total para cada perfil, o resultado obtido foi multiplicado pela lâmina precipitada em cada segmento e realizado o somatório de todos os valores para o mesmo perfil de precipitação.

Para determinar as perdas de solo e água Carvalho *et al.* (2002) utilizaram um simulador de chuvas pendular. Este simulador permitiu através da regulação do tempo de movimentação do pendulo do simulador obter diferentes valores de energia cinética 138, 184, 229, 275 e 321 J/m que correspondem às intensidades de 30, 40,50, 60 e 70 mm/h. A energia cinética foi determinada a partir de um programa computacional desenvolvido por Alves Sobrinho (2001).

Por último Meyer *et al.* (1979) considera que uma altura de cerca de 3 metros é suficiente para garantir uma velocidade adequada de queda das gotas da chuva.



## **CAPÍTULO 4 - TRABALHO EXPERIMENTAL E ANÁLISE DE RESULTADOS**

### **4.1. Introdução**

Neste capítulo procede-se à descrição do estudo experimental desenvolvido no âmbito da presente dissertação. Tendo presente o objetivo do estudo, facilmente se depreende se tratar de um trabalho de cariz experimental, que consistiu no desenvolvimento de uma mistura betuminosa drenante destinada à aplicação em pavimentos permeáveis, à construção do pavimento permeável com a utilização da mistura betuminosa drenante desenvolvida e a construção de um simulador de chuva destinado a analisar a permeabilidade do referido pavimento.

O trabalho experimental foi desenvolvido em duas fases, numa primeira fase realizou-se a análise granulométrica, determinou-se massa volúmica e a absorção de água dos agregados. Numa segunda fase formulou-se a mistura betuminosa a desenvolver em laboratório e analisaram-se as composições das diferentes misturas desenvolvidas, ou seja, a baridade, a baridade máxima teórica e a porosidade, procedendo-se também à realização do ensaio de Estabilidade/Deformação Marshall. Com base na análise das composições das várias misturas e nos resultados dos ensaios Marshall procedeu-se à escolha da mistura com o teor ótimo de betume. Em seguida, realizaram-se vários provetes da mistura ideal para a realização dos ensaios Ensaio Cântabro, Sensibilidade à água e Permeabilidade. Em paralelo com a segunda fase construiu-se o molde do pavimento permeável a ensaiar, definiu-se as camadas constituintes do pavimento assim como as respetivas espessuras e desenvolveu-se o simulador de chuva aplicado ao pavimento permeável.

### **4.2. Caracterização dos materiais utilizados**

#### **4.2.1. Agregados**

Para o trabalho experimental foram utilizados 3 agregados com as denominações de brita 3/6, brita 5/15 e pó de pedra provenientes da pedreira da Capinha, no concelho do Fundão.

Nas figuras seguintes são apresentados os agregados denominados anteriormente.



Figura 4.1 - Brita 5/15 à esquerda e brita 3/6 à direita



Figura 4.2 - Pó de pedra

#### 4.2.1.1. Análise granulométrica

A análise granulométrica dos agregados foi realizada de acordo com a Norma Portuguesa NP EN 933-1:2000, Ensaio das propriedades geométricas dos agregados - Parte 1: Análise granulométrica - Método de peneiração. Os agregados foram colocados em peneiros com diferentes aberturas de malha e posteriormente vibrados num agitador mecânico durante 5 minutos.

#### 4.2.1.2 Massa Volúmica e absorção de água

A massa volúmica e a absorção de água foram determinadas segundo Norma Portuguesa EN 1097-6:2003, Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados - Parte 6: Determinação da massa volúmica e da absorção de água. Para a determinação da massa volúmica do agregado grosso brita 5/15 foi utilizado o método do cesto de rede metálica e para o agregado fino brita 3/6 e pó de pedra o método do picnómetro.

Segundo o método do cesto de rede metálica para a brita 5/15, a massa volúmica é calculada através da seguinte expressão:

$$\gamma = \frac{P_1}{P_1 + P_2 - P_3} \times 1000 \quad (\text{Kg/m}^3) \quad (4.1)$$

Em que:

$\gamma$  - massa volúmica em (kg/m<sup>3</sup>);

P1 - peso do corpo de prova, saturado com superfície seca;

P2 - peso do cesto de rede, imerso;

P3 - peso do cesto de rede + corpo de prova, imerso.

Segundo o método do picnómetro para a brita 3/6 e para o pó de pedra, a massa volúmica é calculada através da seguinte expressão:

$$\gamma = \frac{P1}{P1+P3-P2} \times 1000 \quad (\text{Kg/m}^3) \quad (4.2)$$

Em que:

$\gamma$  - massa volúmica (kg/m<sup>3</sup>);

P1 - massa do corpo de prova, saturado com superfície seca;

P2 - massa do balão + corpo de prova + água (até ao traço de referência);

P3 - massa do balão + água (até ao traço de referência).

Os resultados obtidos da massa volúmica de ambos os métodos são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 4.2 - Massa volúmica das britas 3/6 e 5/15 e do pó de pedra

Agregados	Massa volúmica (Kg/m <sup>3</sup> )
Brita 3/6	2619,0
Brita 5/15	2623,0
Pó de pedra	2549,0

A absorção de água é calculada através da seguinte expressão:

$$Ab = \frac{P1-P2}{P2} \times 100 \quad (\%) \quad (4.3)$$

Em que:

Ab - absorção de água (%);

P1 - peso do corpo de prova, saturado com superfície seca;

P2 - peso do corpo de prova seco, em estufa, a 105-110°C.

Os resultados obtidos da absorção de água são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 4.3 - Absorção de água das britas 3/6 e 5/15 e do pó de pedra

Agregados	Absorção de água (%)
Brita 3/6	1,6
Brita 5/15	1,6
Pó de pedra	3,8

#### 4.2.2. Cal Hidráulica

A cal hidráulica ou também designada como MARTIGANÇA HL 5 da SECIL, ilustrada na figura 4.3 utilizou-se no trabalho experimental funcionando como um ligante hidráulico proporcionando uma coesão da mistura betuminosa, ou seja, evita a fragmentação do pavimento. Os métodos de ensaio para determinar as propriedades da cal hidráulica foram realizados segundo a NP EN 459-1 (2010) no laboratório SECIL.



Figura 4.3 - Cal hidráulica

##### 4.2.2.1 Massa Volúmica

A massa volúmica da Cal Hidráulica foi determinada a partir da Especificação do LNEC E64-1968, E376-1993 e E377-1993 e recorreu-se ao método do Densímetro de Le Châtelier.

Os resultados obtidos da massa volúmica são apresentados na tabela seguinte:

Tabela 4.4 - Massa volúmica da cal hidráulica

Ligante Hidráulico	Massa Volúmica (Kg/m <sup>3</sup> )
Cal Hidráulica	2814,0

### 4.2.3. Ligante Betuminoso

Para as misturas betuminosas drenantes a quente utilizou-se o ligante, betume modificado elaster 13/60 da CEPISA Portuguesa Petróleos, S.A.. Os métodos de ensaio apresentados na tabela 4.5 realizaram-se para determinar as propriedades do betume modificado elaster e foram realizados pelo Laboratório Controlo Qualidade em Matosinhos.

Tabela 4.5 - Características do betume modificado elaster 13/60

Betume Modificado Elaster 13/60 (PMB 45/80-60)						
Ensaio	Método	Resultado	Limites		Unidade	
			Min	Max		
Penetração 25 °C, 100gr, 5 seg	EN1426	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	-	%	

### 4.2.4. Fibras Viatop Premium

As Fibras Viatop Premium ilustradas na figura 4.4 são grânulos constituídos por uma mistura de fibras naturais de celulose com betume. A sua utilização proporciona um aumento de durabilidade e desempenho das misturas betuminosas, nomeadamente no betão betuminoso drenante que pelo facto de não terem finos apresentam menor superfície de contacto entre os agregados grossos. Nas tabelas 4.6, 4.7 e 4.8 estão especificadas as características das Fibras Viatop Premium.



Figura 4.4 - Fibras Viatop Premium

Tabela 4.6 - 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 4.7 - 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)
Temp. de amolecimento (teste de anel e bola, EN 1427)	46/54 ° C

Tabela 4.8 - Características da fibra

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

## 4.3. Determinação da composição das misturas betuminosas

### 4.3.1. Fuso Granulométrico

O fuso granulométrico adotado corresponde a uma mistura betuminosa drenante a quente PA 12,5 (BBd) para camadas de desgaste. O fuso apresentado na tabela 4.9 está indicado no Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal, com a rubrica 14.03.2.42.

Tabela 4.9 - Fuso granulométrico para betão betuminoso drenante (CE EP,2012)

Peneiros Serie base + Serie 2 (mm)	Rubrica 14.03.2.4.2	
	Percentagem acumulada do material passado	
20	1,4D	100
12,5	D	90 - 100
10	(o1)	55 - 75
4	(o1)	12 - 30
2	2	11 - 18
1	(o2)	6 - 14
0,063	0,063	2 - 5

Legenda:

D - abertura do peneiro superior que pode reter material, em milímetros;

(o1) - peneiro extra opcional entre D e 2 mm;

(o2) - peneiro extra opcional entre 2 e 0,063 mm.

### 4.3.2. Propriedades das misturas drenantes

Na tabela 4.10 apresentam-se os requisitos/propriedades exigidos pelo Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal, com a rubrica 14.03.2 para as misturas drenantes. Nas tabelas 4.11 e 4.12 estão referenciados os requisitos para misturas drenantes do ensaio Cântabro e do ensaio de Permeabilidade exigidos pelo *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3, OC 29/2011)*.

Tabela 4.10 - Requisitos/Propriedades das misturas drenantes (CE EP,2012)

Requisitos/Propriedades	Referência normativa	Rubrica 14.03.2.4.2
		PA 12,5 (BBd)
Porosidade, V <sub>m</sub> (%)	EN 12697-8	V <sub>min</sub> 22-V <sub>máx</sub> 30
Vazios na mistura de agregados (VMA), min. (%)	EN 12697-8	VM <sub>Amin</sub> NR
% de ligante, min. (%)	-	B <sub>min</sub> 4,0
Sensibilidade à água, ITS <sub>R</sub> , min. (%)	EN 12697-12	Categoria a declarar
Permeabilidade <i>in situ</i> (permeâmetro LCS). (s)	NLT 327	10-30
Ensaio Cântabro húmido, máx.(%)	EN-12697-17	≤ 25

Tabela 4.11 - Requisitos para o ensaio Cântabro

Ensaio Cântabro	Categoria de tráfego pesado		
	T00 a T1	T2 a T3	T4
Imersão (24h a 60°C)	35	40	-

Tabela 4.12 - Requisitos para o ensaio de Sensibilidade à água

Ensaio sensibilidade à água	Valor
Resistência conservada %	≥ 85

### 4.3.3. Formulação das misturas

Na sequência do fuso granulométrico adotado formularam-se as misturas betuminosas drenantes de modo a que a curva granulométrica de cada mistura cumpra o fuso especificado no Caderno de Encargos das Estradas de Portugal referido na tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Granulometria das misturas A,B e C estudadas

Abertura da malha	Misturas			Fuso PA 12,5 (BBd)
	A	B	C	
20	100	100	100	100
12,5	95,4	95	95	90 - 100
10	71,5	69	68	55-75
4	18,4	14,9	13	12 - 30
2	13,7	12,1	11	11 - 18
1	10,5	9,7	9	6 - 14
0,063	3,9	4,6	5	2 - 5

Na tabela 4.13 estão referenciadas três misturas estudadas, em todas elas a percentagem de material que passa nos peneiros encontra-se dentro do fuso definido pelo caderno de encargos das Estradas de Portugal. No entanto, ao proceder-se ao cálculo da baridade máxima teórica da mistura, da baridade dos provetes e da porosidade verificou-se que os provetes não cumprem os requisitos de porosidade exigidos pelo caderno de encargos das Estradas de Portugal para misturas abertas (Fuso PA 12,5).

Efetuarão-se novas formulações de misturas betuminosas drenantes, em todas elas verifica-se que a percentagem de material que passa nalguns peneiros encontra-se fora do fuso granulométrico definido pelo caderno de encargos das Estradas de Portugal como se apresenta na tabela 4.14, mas cumpre a porosidade exigida. Na formulação da mistura designada “F”, foram introduzidas 0,5 % de fibras celulósicas a fim de melhorar as características da mistura.

Tabela 4.14 - Granulometria das misturas D e E estudadas (%)

Abertura da malha	Misturas		Fuso PA 12,5 (BBd)
	D	E	
20	100	100	100
12,5	95	94	90 - 100
10	67	66	55-75
4	8	6	12 – 30
2	7	5	11 – 18
1	6	5	6 – 14
0,063	3,9	4,6	2 – 5

Na tabela 4.15, apresentam-se as composições das misturas em percentagem referidas nas tabelas anteriores.

Tabela 4.15 - Percentagem de agregados para a formulação das misturas

Misturas	Brita 5/15 (%)	Brita 3/6 (%)	Pó de pedra (%)	Cal hidráulica (%)	Fibras Viatop Premium (%)	Total
A	80,0	5,0	13,0	2,0	-	100
B	87,0	0	10,0	3,0	-	100
C	89,0	0	7,0	4,0	-	100
D	94,0	0	3,0	3,0	-	100
E	96,0	0	0	4,0	-	100
F	96,0	0	0	3,5	0,5	100

#### 4.3.4. Determinação da quantidade inicial de betume

Para calcular a quantidade de betume inicial a utilizar nas misturas betuminosas, utilizou-se a seguinte expressão:

$$Pb = 0,035 \times A + 0,045 \times B + K \times C + F \quad (4.4)$$

Em que:

*Pb* - 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% passados no peneiro 0,075 mm

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

$K = 0,2$  para =5% passados no peneiro 0,075 mm

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

Na tabela 4.16 são apresentadas as quantidades de betume inicial utilizadas nas diferentes misturas betuminosas estudadas.

Tabela 4.16 - Percentagem de betume inicial para as diferentes misturas

Misturas	Percentagem de betume inicial (%)
A	4,1
B	4,3
C	4,1
D	3,9
E	3,5
F	3,5

#### 4.3.5. Escolha do teor ótimo de betume

Após a formulação das misturas e da determinação da quantidade inicial de betume procedeu-se à preparação dos provetes consoante as percentagens de agregados adotadas na tabela 4.15 e as quantidades de betume apresentadas na tabela 4.16. Para poder escolher o teor ótimo de betume foram produzidas misturas com uma variação de  $\pm 0,5$  % na percentagem de betume. A escolha do teor ótimo de betume envolve vários parâmetros definidos pelo Caderno de Encargos das Estradas de Portugal (EP,2012) e no *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, OC29/2011). Os parâmetros considerados são a baridade, a porosidade e o ensaio Marshall. Após a produção dos três teores de betume da mistura A verificou-se que esta não cumpria a porosidade, parâmetro essencial nas misturas drenantes.

Desta forma, as misturas B e C apenas foram produzidas com o teor inicial de betume analisando-se de seguida o parâmetro da porosidade. Uma vez que a porosidade das misturas B e C estava abaixo do valor indicado no Caderno de Encargos procedeu-se a nova formulação das misturas obtendo-se as misturas D e E.

#### 4.3.5.1. Baridade máxima teórica

O cálculo da baridade máxima teórica realizou-se segundo a norma EN 12697-5:2002, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density*, procedimento C utilizado na determinação da porosidade. Os resultados da baridade máxima teórica apresentam-se na figura 4.5

A baridade máxima teórica foi determinada através da seguinte expressão:

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{1}{\frac{p_b}{100 \times \rho_b} + \sum_{i=1}^N \frac{p_i}{100 \times \rho_i}} \quad (4.5)$$

Em que:

$\rho_{m\acute{a}x}$  - baridade máxima teórica;

$p_b$  - percentagem de betume;

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

$\rho_b$  - massa volúmica do betume;

$\rho_i$  - massa volúmica do agregado i.

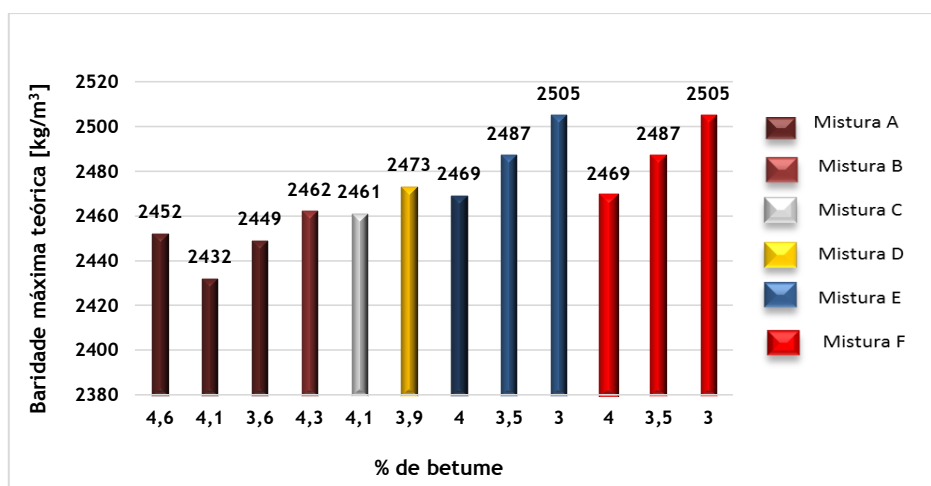


Figura 4.5 - Representação gráfica das baridades máximas teóricas

#### 4.3.5.2. Baridade

A baridade e a porosidade são dois parâmetros que permitem avaliar as características das misturas betuminosas, para tal, é necessário a produção de provetes.

Na produção dos provetes utilizaram-se moldes *Marshall* com 101.4 mm de diâmetro e cerca de 1200 g de mistura para cada provete. Os agregados, o betume elaster 13/60 e os moldes colocaram-se inicialmente na estufa a uma temperatura a 180°C, durante 60 minutos, com exceção das fibras que se adicionaram à temperatura ambiente.

Após 60 minutos em estufa pesaram-se os agregados e o betume consoante as quantidades determinadas na formulação e misturaram-se manualmente como se ilustra na figura 4.6. No caso das misturas que incluem as fibras, estas misturam-se previamente com os agregados e só depois é adicionado o betume elaster.

O molde é retirado da estufa e untado com óleo, posteriormente coloca-se um filtro de papel e insere-se a mistura betuminosa. De seguida procede-se à compactação dos provetes no compactador de impacto aplicando-se 50 pancadas em cada face. A desmoldagem dos provetes realizou-se após 4 horas.

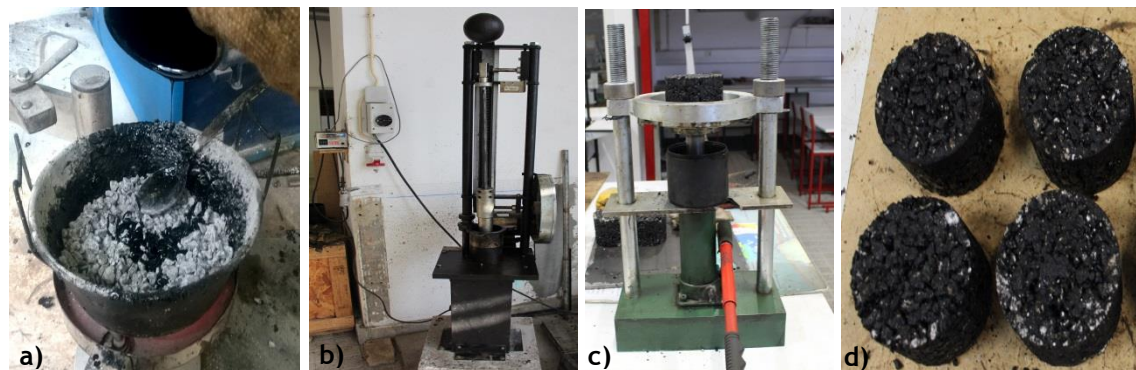


Figura 4.6 - a) Preparação da mistura betuminosa; b) compactador de impacto (DECA-UBI); c) desmoldagem dos provetes; d) provetes

O cálculo da baridade dos provetes efetuou-se através da norma 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 - SSD*, procedimento que integra a medida geométrica do volume aparente. Na figura 4.7 apresentam-se os resultados das baridades médias.

A baridade foi determinada através da seguinte expressão:

$$Baridade (\rho_b, dim) = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} * h * d^2} \quad (4.6)$$

Em que:

$\rho_b, dim$  - baridade do provete ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ );

$m_1$  - massa do provete seco (g);

$h$  - altura do provete (mm);

$d$  - diâmetro do provete (mm).

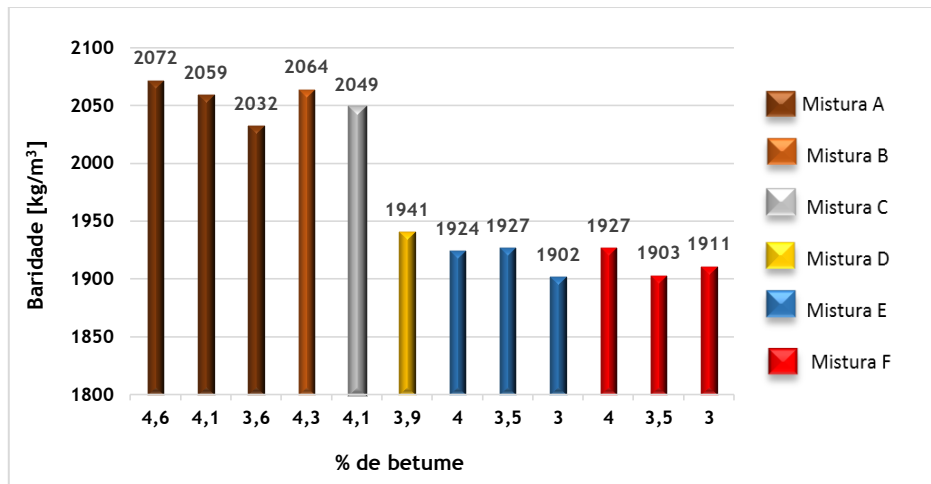


Figura 4.7 - Representação gráfica das baridades médias das misturas

#### 4.3.5.3. Porosidade, VMA e VFB

O cálculo da baridade máxima teórica e da baridade permite determinar a porosidade das misturas betuminosas produzidas. Para determinar a porosidade 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*. Através da expressão 4.7 foi possível determinar a porosidade das misturas. Utilizando a expressão 4.8 determinou-se os vazios na mistura de agregados (VMA) assim como os vazios preenchidos com betume (VFB) através da expressão 4.9. O VMA traduz-se pelo volume dos vazios intergranulares entre as partículas de agregados compactados de uma mistura betuminosa.

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad (4.7)$$

Em que :

$V_m$  - porosidade da mistura (%);

$\rho_m$  - baridade máxima teórica da mistura (Kg/m<sup>3</sup>);

$\rho_b$  - baridade do provete (Kg/m<sup>3</sup>).

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} \quad (4.8)$$

$$VFB = \frac{B \times \frac{\rho_b}{\rho_B}}{VMA} \times 100 \quad (4.9)$$

Em que:

VMA - vazios na mistura de agregados (%);

VFB - vazios nos agregados cheios de betume (%);

$V_m$  - porosidade da mistura (%);

B - conteúdo de ligante, em 100 % da mistura (%);

$\rho_b$  - baridade saturada com superfície seca dos provetes ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$\rho_B$  - massa volúmica do ligante ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

A porosidade estabelecida pelo caderno de encargos das Estradas de Portugal varia de 22% a 30%. As inúmeras tentativas de obter formulações de misturas betuminosas de modo a cumprir o fuso e a porosidade não foram bem-sucedidas, ou seja, as misturas A,B e C que cumpriam o fuso granulométrico não cumpriam a porosidade requerida, que ficava apenas pelos 18%. Uma vez que o objetivo deste trabalho é desenvolver misturas betuminosas drenantes para aplicação na camada de desgaste do pavimento permeável, o cumprimento da porosidade é essencial. Assim, decidiu-se formular novas misturas betuminosas tendo este aspeto como prioritário, conseguindo-se uma porosidade variável entre os 22% e os 24% para as misturas E e F. As variações de porosidades das várias misturas betuminosas estão referidas de modo elucidativo na representação gráfica na figura 4.8 assim como a porosidade mínima exigida de 22%. Os resultados obtidos para o VMA através da expressão 4.8 apresentam-se na figura 4.9.

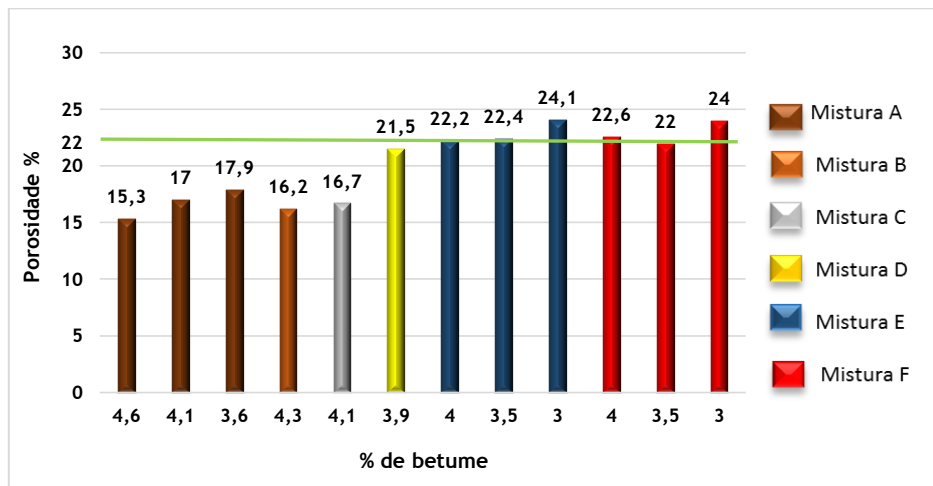


Figura 4.8 - Representação gráfica das porosidades dos provetes

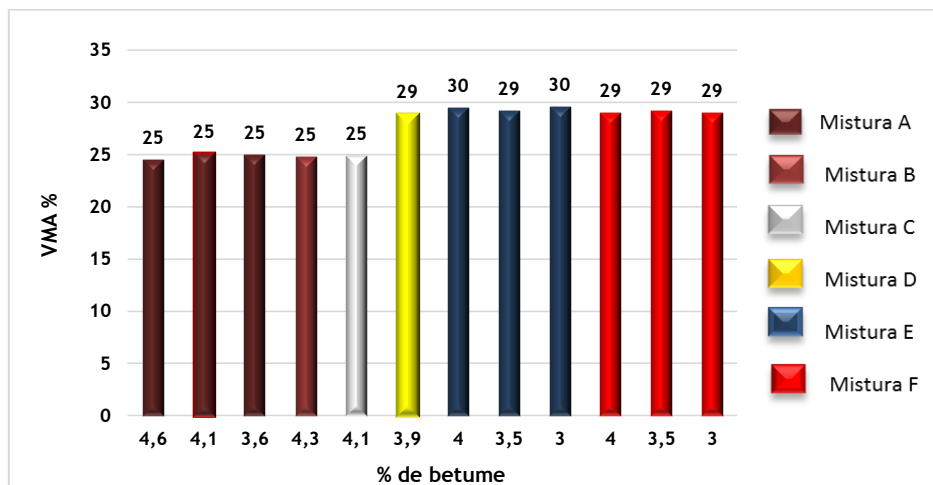


Figura 4.9 - VMA por tipo de mistura betuminosa

Analisando o gráfico dos vazios da mistura de agregados (VMA) verifica-se que existe um aumento gradual idêntico ao gráfico da figura 4.9 das porosidades. Os valores das misturas A, B, C e D representados na figura são semelhantes, todas elas contêm pó de pedra o que influencia os resultados obtidos. As misturas E e F apresentam maior número de vazios na mistura e semelhantes valores, não contendo nenhuma delas pó de pedra. A introdução de fibras na mistura F não interfere no volume de vazios entre as partículas de agregados. Os resultados obtidos para o VFB através da expressão 4.9 apresentam-se na figura 4.10.

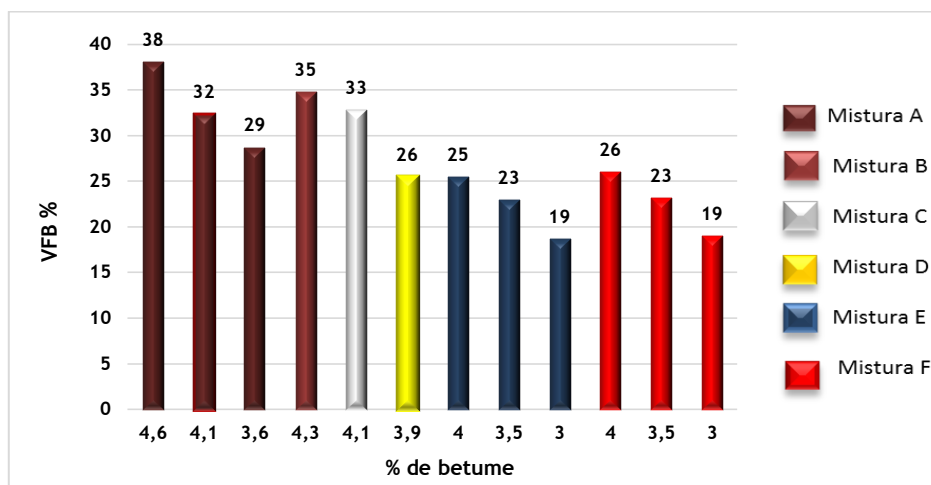


Figura 4.10 - VFB por tipo de mistura betuminosa

Em relação aos vazios preenchidos com betume (VFB) verifica-se que quanto maior a porosidade das misturas menor é o seu valor.

#### 4.3.5.3. Ensaio Marshall

A realização do ensaio Marshall permite obter resultados de estabilidade e deformação em função da percentagem de betume aplicado nos três tipos de misturas produzidas. O método Marshall foi realizado recorrendo-se norma EN 12697-34:2004, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test*.

Os provetes utilizados para o ensaio Marshall são os mesmos utilizados para determinar os parâmetros da baridade máxima teórica, baridade e porosidade.

Antes da realização do ensaio, os provetes são colocados num banho de imersão em água a 60 °C durante sensivelmente 40 a 60 minutos. Após o período de imersão são retirados e colocados um a um na máquina de compressão, e comprimidos a uma velocidade constante de  $50 \pm 2$  mm/min até à rotura como se ilustra na figura 4.11.



Figura 4.11 - a) Provete antes do ensaio Marshall; b) Provete durante o ensaio Marshall; c) Provetes após o ensaio Marshall

Na figura 4.12 apresentam-se os resultados de estabilidade e deformação do ensaio Marshall em função do teor de betume, para as duas misturas betuminosas E e F que cumpriram os requisitos de porosidade.

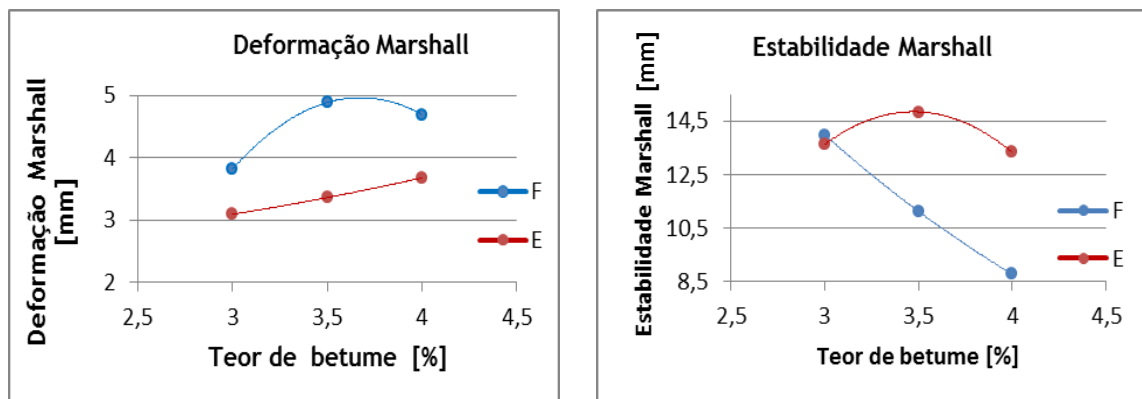


Figura 4.12 - Deformação e estabilidade Marshall

No caderno de encargos não são definidos valores limite para o ensaio Marshall para as misturas drenantes (PA 12.5) desta forma, seleccionou-se o teor ótimo de betume com base no valor mínimo exigido para o teor de ligante apresentado na tabela 4.10.

Na secção seguinte apresentam-se os ensaios de caracterização das misturas betuminosas drenantes sem fibras (E) e com fibras (F) com 4% de betume, considerado o teor ótimo de ligante.

## 4.4. Ensaio de caracterização das misturas betuminosas

### 4.4.1. Ensaio cântabro com imersão em água

O ensaio cântabro tem como finalidade avaliar a perda por desgaste da mistura betuminosa a utilizar na camada de desgaste do pavimento para tal recorreu-se à norma 12697-17:2004,

*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part17: Particle loss of porous asphalt specimen e ao Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3, OC 29/2011).*

O ensaio realizou-se com 8 provetes Marshall, divididos em dois grupos consoante as suas baridades, um grupo de 4 provetes imersos 24 horas a uma temperatura de 60 °C e colocados posteriormente em estufa a 25 °C durante 24 horas, e um grupo de 4 provetes a seco colocados em estufa a 25°C durante 48 horas.

Concluído o processo de acondicionamento dos grupos imerso e seco, os provetes são pesados e de seguida colocados um a um na máquina de desgaste de Los Angeles, submetidos a 300 voltas sem esferas de aço com uma rotação de 300 rpm e pesados no final de cada ciclo como se ilustra na figura 4.13.

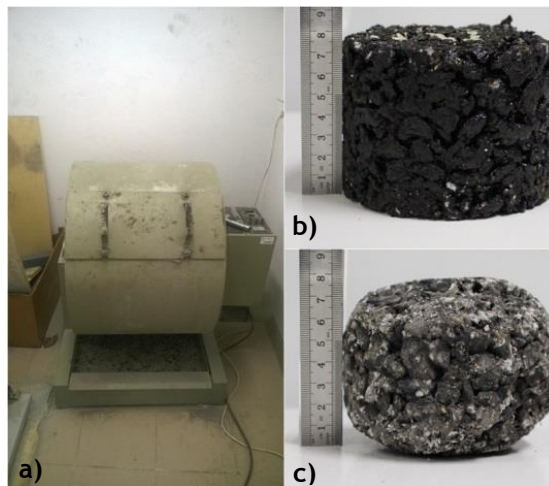


Figura 4.13 - a) Máquina de desgaste de Los Angeles; b) Provete antes do ensaio; c) Provete depois do ensaio

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

$$PL = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100 \quad (4.10)$$

Em que:

PL - valor da perda de partículas (%);

$W_1$  - massa da amostra inicial (g);

$W_2$  - massa final da amostra (g).

Na tabela 4.17 apresentam-se os resultados obtidos para a perda de desgaste das misturas betuminosas drenantes.

Tabela 4.17 - Ensaio Cântabro dos provetes do grupo imerso e do grupo a seco

Misturas	Provetes	Baridade (Kg/m <sup>3</sup> )	Massa (g)		Perda por desgaste (%)
			Antes do ensaio	Depois do ensaio	
E	Provetes secos	1907	1076,2	862,3	16,8
		1906	1097,9	974,3	
		1864	1082,0	875,0	
	Provetes imersos	1931	1031,4	591,4	41,0
		1927	1099,2	671,0	
		1940	1191,6	697,9	
F	Provetes secos	1860	1194,1	995,3	22,1
		1817	1166,1	899,6	
		1848	1167,6	854,1	
	Provetes imersos	1936	1211,1	828,8	32,8
		1902	1201,2	846,8	
		1866	1188,4	744,5	

O Caderno de Encargos impõe que a perda por desgaste seja  $\leq 25\%$ , o que significa que a mistura E e F não cumprem a perda por desgaste dos provetes imersos, o que não acontece com os provetes a seco em que ambos cumprem os requisitos.

Por outro lado consultando o *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, OC29/2011) a mistura betuminosa drenante F cumpre os requisitos para a perda por desgaste dos provetes imersos e a seco. A percentagem para a perda por desgaste segundo o Pliego é de  $\leq 35\%$  ou  $\leq 40\%$  dependendo do tipo de tráfego.

Verifica-se ainda que a adição de fibras incrementou consideravelmente a resistência ao desgaste nos provetes imersos passando estes a cumprir os requisitos preconizados na norma espanhola.

#### 4.4.2. Ensaio de sensibilidade à água

A norma europeia 12697-12:2003, *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens* foi a norma utilizada para a realização do ensaio da sensibilidade à água. O objetivo do ensaio de sensibilidade consiste em determinar o efeito do condicionamento em água na resistência à tração em compressão diametral de misturas betuminosas.

Para a concretização do ensaio são fabricados 8 provetes Marshall e separados em dois grupos de acordo com as baridades calculadas. O grupo imerso de 4 provetes é submetido previamente a um vácuo em água a  $20 \pm 5$  °C durante  $30 \pm 5$  minutos com uma pressão de  $6,7 \pm 0,3$  kPa e só depois colocados em banho com água a  $40 \pm 1$  °C durante 68 a 72 horas como se ilustra na figura 4.14. De seguida colocaram-se em água a 15 °C durante duas horas. O grupo seco de 4 provetes foi sujeito a uma temperatura de  $20 \pm 5$  °C também de 68 a 72 horas de seguida colocaram-se em ambiente seco a 15 °C durante duas horas.



Figura 4.14 - Ensaio a vácuo

Decorrido todo o processo anteriormente descrito, os provetes foram submetidos à compressão diametral para o cálculo da tração indireta. A carga foi aplicada aos provetes com uma velocidade constante  $50 \pm 2$  mm/min de acordo com a norma 12697-23:2003 *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*. Na figura 4.15 apresenta-se o ensaio da tração indireta.



Figura 4.15 - Ensaio de tração indireta

A resistência conservada em tração indireta (ISTR - Indirect Tensile Strength Ratio) calculou-se através da seguinte expressão:

$$ISTR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (4.11)$$

Em que:

*ISTR* - Resistência conservada em tração indireta, (%);

*ITS<sub>w</sub>* - resistência média à tração indireta dos provetes imersos, (KPa);

*ITS<sub>d</sub>* - resistência média à tração indireta dos provetes secos, (KPa).

A resistência à tração indireta (ITS - Indirect Tensile Strength) para o grupo de provetes imersos e o grupo de provetes secos calcula-se através da seguinte expressão:

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (4.12)$$

Em que:

ITS - resistência à tração indireta (kPa);

P - resistência máxima média (kN);

D - diâmetro do provete (mm);

H - altura do provete (mm).

Os resultados obtidos para o ensaio da sensibilidade à água apresentam-se na tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Ensaio da sensibilidade à água

Misturas	Ensaio de tração indireta EN 12697 - 23:2003		Provetes imersos	Provetes secos
E	P	kN	3,3	5,1
	D	mm	101,4	101,4
	H	mm	73,9	74,4
	ITS	kPa	290,0	420,0
	ISTR	%	69	
F	P	kN	4,4	5,3
	D	mm	101,4	101,4
	H	mm	77,0	76,6
	ITS	kPa	410,0	430,0
	ISTR	%	95	

P - Valor médio da resistência máxima; ITS - Valor médio da resistência à tração indireta;

Para o ensaio da sensibilidade à água o Caderno de Encargos não define valores para as camadas drenantes. Relativamente ao Pliego, o valor mínimo referido é de  $\geq 85\%$  o que significa que apenas a mistura F cumpre este requisito.

#### 4.4.3. Ensaio de Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade tem como objetivo determinar a permeabilidade das misturas betuminosas drenantes, através do ensaio de permeabilidade vertical e horizontal com a ajuda de um permeâmetro tipo LCS. Para a realização do ensaio de permeabilidade recorreu-se à norma europeia 12697-19:2004 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 19: Permeability of specimen e à norma espanhola NLT327/00, Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes com el permeâmetro LCS.

O ensaio da permeabilidade vertical consiste em colocar o provete no interior de uma manga de borracha deixando as faces do provete livres, ajustando posteriormente essa mesma manga com o provete no permeâmetro. Para garantir que nenhuma água vazasse pelo interior da manga, colocou-se um o-ring em volta desta para exercer pressão e também duas abraçadeiras, uma na junta entre o provete e o permeâmetro e outra junto à face livre do provete como se apresenta na figura 4.16. Com o provete e o permeâmetro devidamente vedados iniciou-se o ensaio, enchendo-se com água o permeâmetro acima da marca superior e cronometrou-se o tempo que a água demorou a descer desde a marca superior até à marca inferior, ou seja, o tempo necessário para que se escoe um volume de  $1735 \text{ cm}^3$ .

$$V = \pi \times r^2 \times h = \pi \times \left(\frac{9.4}{2}\right)^2 \times 25 = 1735 \text{ cm}^3 \quad 4.13$$

Em que :

$V$  - volume de escoamento, ( $\text{cm}^3$ );

$r$  - raio interno do tubo, (cm);

$h$  - altura do tubo, (cm);



Figura 4.16 - Ensaio de permeabilidade vertical

Para o ensaio da permeabilidade horizontal parafinaram-se todos os provetes numa das faces, e de seguida colocou-se um a um no permeâmetro com a face parafinada voltada para baixo, cada provete foi fixo com a ajuda de uma fita de borracha e uma abraçadeira na junta entre o provete e o permeâmetro. O procedimento experimental é o mesmo da permeabilidade vertical, encheu-se com água o permeâmetro acima da marca superior e cronometrou-se o tempo que a água demorou a descer desde a marca superior até à marca inferior, como se ilustra na figura 4.17.

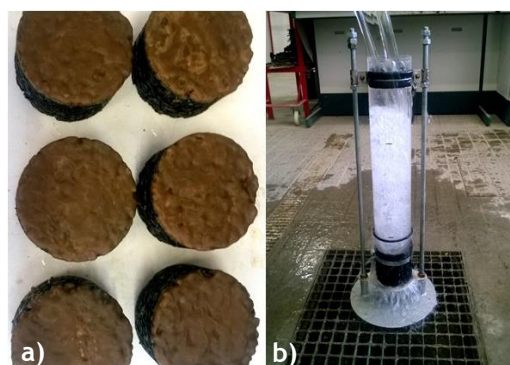


Figura 4.17 - a) Provetes parafinados; b) Ensaio de permeabilidade horizontal

Para determinar o coeficiente de permeabilidade utilizou-se a Lei de Darcy através da seguinte expressão:

$$k = 2,303 \frac{ah}{At_v} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (4.14)$$

Em que:

$k$  - Coeficiente de permeabilidade, (cm/s);

$a$  - Área da secção do permeâmetro, (cm<sup>2</sup>);

$A$  - Área da secção do corpo de prova, (cm<sup>2</sup>);

$h$  - Altura do corpo de prova, (cm);

$t_v$  - Tempo de escoamento de 1735 cm<sup>3</sup>, (s);

$h_1$  - Altura de água da face inferior do corpo de prova no início do ensaio, (cm);

$h_2$  - Altura de água da face inferior do corpo de prova no fim do ensaio, (cm).

Os valores seguintes foram adotados para a determinação do coeficiente de permeabilidade:

$$a = \frac{\pi}{4} \times 9,4^2 = 69,40 \text{ cm}^2$$

$$A = \frac{\pi}{4} \times 10,16^2 = 81,07 \text{ cm}^2$$

$$h_1 = 35 + h \text{ cm}$$

$$h_2 = 10 + h \text{ cm}$$

O coeficiente de permeabilidade foi calculado através da seguinte expressão:

$$k = 1,956 \times \frac{h}{t} \times \log \left( \frac{35 + h}{10 + h} \right) \quad (4.15)$$

A norma EN 12697-19 define que os resultados devem estar compreendidos entre  $0,5 \times 10^{-3}$  m/s e  $3,5 \times 10^{-3}$  m/s. Segundo a norma EN 13108-7:2006, *Bituminous mixtures - Material specifications - Part 7: Porous Asphalt* existem categorias para a permeabilidade vertical e horizontais apresentadas nas tabelas 4.19 e 4.20.

Tabela 4.19 - Permeabilidade Vertical  $K_v$

Mínimo para permeabilidade vertical ( $10^{-3}$ m/s)	Categoria - $K_v$
4	$K_{v4,0}$
3,5	$K_{v3,5}$
3	$K_{v3,0}$
2,5	$K_{v2,5}$
2	$K_{v2,0}$
1,5	$K_{v1,5}$
1	$K_{v1,0}$
0,5	$K_{v0,5}$
0,1	$K_{v0,1}$
Não requerido	$K_{vNR}$

Tabela 4.20 - Permeabilidade horizontal  $K_h$

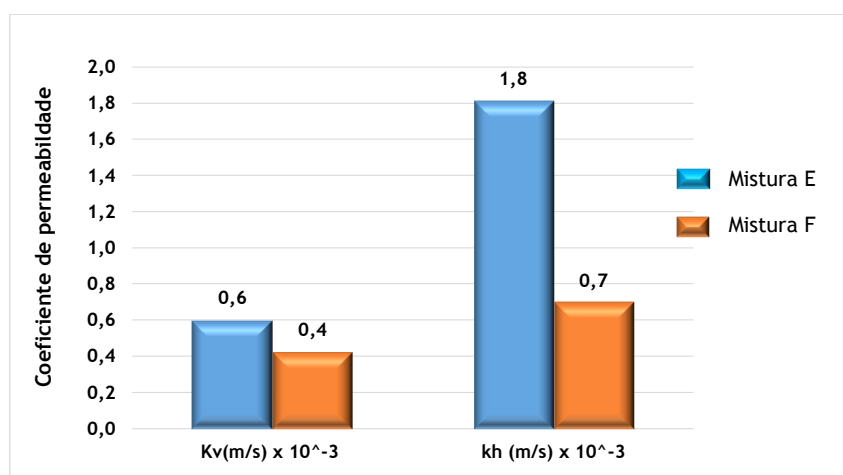
Mínimo para permeabilidade horizontal ( $10^{-3}$ m/s)	Categoria - $K_h$
4	$K_{h4,0}$
3,5	$K_{h3,5}$
3	$K_{h3,0}$
2,5	$K_{h2,5}$
2	$K_{h2,0}$
1,5	$K_{h1,5}$
1,0	$K_{h1,0}$
0,5	$K_{h0,5}$
0,1	$K_{h0,1}$
Não requerido	$K_{hNR}$

Na tabela 4.21 apresentam-se o tempo de escoamento e o coeficiente de permeabilidade obtidos para as misturas E e F.

Tabela 4.21 - Resultados do tempo de escoamento e do coeficiente de permeabilidade

Misturas	Tempo de escoamento		Coeficiente de Permeabilidade ( $10^{-3}$ m/s)		Porosidade (%)
	$t_v$ (s)	$t_h$ (s)	$K_v$ (m/s)	$k_h$ (m/s)	
E	9,0	5,3	0,6	1,8	22
F	13,9	7,9	0,4	0,7	23

Na figura 4.18 apresenta-se a representação gráfica dos resultados dos coeficientes de permeabilidade.



$K_v$ - coeficiente de permeabilidade vertical;  $K_h$ - coeficiente de permeabilidade horizontal.

Figura 4.18 - Representação gráfica dos resultados dos coeficientes de permeabilidade

Os resultados apresentados indicam que a permeabilidade vertical exibiu tempos de escoamento mais elevados comparativamente com a permeabilidade horizontal como espectável. Quanto maior for o tempo de escoamento, menor é o coeficiente de permeabilidade.

A mistura E apresenta tempos de escoamento inferiores à mistura F mas o coeficiente de permeabilidade é mais elevado, o que significa que a introdução de fibras influencia os resultados de permeabilidade.

Recorrendo às tabelas 4.19 e 4.20 estabeleceram-se categorias para os resultados obtidos da permeabilidade vertical e horizontal. A categoria estabelecida para cada resultado obtido da permeabilidade vertical e horizontal apresenta-se na tabela 4.22.

Tabela 4.22 - Categoria para os resultados obtidos da permeabilidade vertical e horizontal.

Misturas	Permeabilidade vertical ( $K_v \times 10^{-3}$ )	Categoria $k_v$	Permeabilidade horizontal ( $K_h \times 10^{-3}$ )	Categoria $k_h$
E	0,6	0,5	1,8	1,5
F	0,4	0,1	0,7	0,5

#### 4.5. Comparação de resultados entre misturas betuminosas drenantes e misturas betuminosas densas

As misturas betuminosas densas são muito utilizadas na camada de desgaste dos pavimentos rodoviários, funcionando como um pavimento impermeável.

Para poder avaliar corretamente a mistura betuminosa drenante PA 12,5 com 4% de betume foram produzidos provetes de uma mistura betuminosa a quente AC 14 Surf BB com 5,4 % de betume de modo a poder comparar os resultados de cada uma das misturas betuminosas. Na tabela 4.23 apresentam-se os resultados dos ensaios realizados às misturas betuminosas drenantes e às misturas betuminosas densas.

Tabela 4.23 - Resultados comparativos de misturas drenantes e misturas densas

Ensaios de caracterização		Mistura Drenante PA 12,5		Mistura Densa AC 14 Surf
		Mistura E	Mistura F	
Porosidade (%)	Vm	22	23	3,8
Ensaio Marshall	Estabilidade	3,7	8,8	24,9
	Deformação	13,3	4,7	4,9
Ensaio Sensibilidade á água (%)	ITSR	67	95	96
Ensaio Cântabro (Perda por desgaste %)	Provetes imersos	41	32,8	7,9
	Provetes secos	16,8	22,1	5,7
Ensaio da Permeabilidade (m/s)	kv	0,6	0,4	0,02
	kh	1,8	0,7	0,1

Para a avaliação da mistura betuminosa drenante e densa consultou-se o Caderno de Encargos Tipo Obra das Estradas de Portugal, com a rubrica 14.03.2. Consultou-se também o *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3, OC 29/2011)* para

os ensaios Cântabro e de Sensibilidade. De uma maneira geral, e como esperado a mistura betuminosa densa de referência (AC 14 Surf) apresenta valores de acordo com as suas propriedades. No que diz respeito às características que influenciam a permeabilidade das misturas, ou seja, porosidade e permeabilidade, as diferenças verificadas entre as misturas drenantes (E e F) e a misturas AC 14 Surf são notórias. De acordo com a norma europeia 12697-19:2004 *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 19: Permeability of specimen*, que define que os resultados devem estar compreendidos entre  $0,5 \times 10^{-3}$  m/s e  $3,5 \times 10^{-3}$  m/s, constata-se que a mistura densa não está incluída neste intervalo.

## 4.6. Simulador de Chuva

### 4.6.1 Descrição do simulador de chuva

O simulador de chuva utilizado nos ensaios é do tipo aspersor, foi desenvolvido especificamente para este estudo, e tem capacidade de gerar precipitações com intensidades variáveis sobre uma área de  $1,0 \text{ m}^2$ . O simulador é constituído por uma armação tubular apoiada em quatro pernas reguláveis, para proporcionar uma altura que varia entre 2,0 m e 3,0 m sobre a superfície do pavimento. No centro da armação a uma altura de 2,70 m acima do pavimento, foi colocado um bico aspersor Fulljet B3/8HH-9,5 com 2,6 mm de diâmetro do orifício, produzido pela Spraying Systems Company monitorizado por um manómetro de glicerina instalado a montante dele. O aspersor é alimentado por uma tubagem de polietileno BD de 4 KGS e 5/8 de diâmetro através de bombagem de água a partir de um reservatório de 1000 l, para tal utilizou-se uma eletrobomba horizontal Pentax Ultra U 5-200/7 de 1,5KW de potência nominal e ainda uma válvula de esfera em latão posicionada a jusante da bomba, de modo a controlar a água que circula para os aspersores. Na figura 4.19 apresenta-se o desenho esquemático do simulador de chuva. Este foi instalado no laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) da Universidade da Beira Interior (UBI). Tratando-se de um laboratório aberto houve necessidade de proteger o simulador de chuva com plástico de modo a garantir não haver interferência das condições climáticas externas no que concerne ao vento.

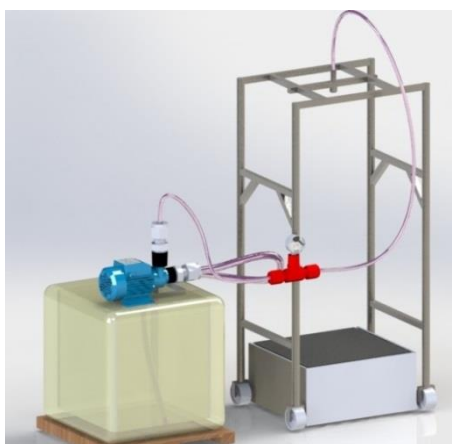


Figura 4.19 - Desenho esquemático do simulador de chuva

#### 4.6.1. Seleção do tipo de simulador

Para o estudo em causa, e tendo em consideração a importância da energia cinética da chuva, o tipo de simulador que mais se adequa é o sistema de aspersores. Segundo Bertoni et al. (1990), os simuladores de chuva constituídos por aspersores de bico pressurizados apresentam uma maior probabilidade de atingirem a velocidade terminal o mais próximo possível da chuva natural. Para intensidades de precipitação elevadas este tipo de simuladores possibilitam um espectro de diâmetros de gotas e energias próximas das reais. O sistema de aspersores permite obter uma distribuição mais uniforme e uma capacidade de descarga maior que os gotejadores (Sousa, 2011).

Para a seleção do aspersor, foram adquiridos quatro tipos diferentes com as características apresentadas na tabela 4.24, tendo sido testados individualmente, e cujos resultados se encontram resumidos na tabela 4.25. Os aspersores colocaram-se a 2,70 m de altura e centrados no pavimento. Tal como referido no ponto 3.4.3 esta altura permite garantir uma velocidade adequada de queda das gotas de chuva, tal como referido por Meyer *et al.* (1979).

Tabela 4.24 - Características dos aspersores estudados

	Diâmetro (mm)	Padrão	Ângulo de pulverização	Pressão (bar)
Fulljet 3/4HH- 2.5	4,9	cone cheio	15° a 125°	0,34 a 10
Fulljet B3/8HH-9.5	2,6	cone cheio	15° a 125°	0,34 a 10
Veejet HB3/8U-80100	2	leque ou plano	15° a 80°	0,34 a 35
Veejet HB1/2U-80100	6,2	leque ou plano	25° a 65°	0,34 a 35

Tabela 4.25 - Resultados para os diferentes tipos de aspersores estudados

Aspersores	Pressão (bar)	Tempo (min)	Volume (l)	S (m <sup>2</sup> )	Ir (mm/h)
Fulljet 3/4HH- 2.5	0,5	5,0	38,5	1	427,1
Fulljet B3/8HH-9.5	0,5	20,0	40,7	1	112,9
Veejet HB3/8U-80100	0,5	3,0	40	1	739,6
Veejet HB1/2U-80100	0,5	5,0	40	1	443,8

O procedimento adotado para a seleção do aspersor a utilizar no simulador de chuva passou inicialmente pela revisão bibliográfica dos tipos de aspersores mais utilizados neste tipo de estudos e posteriormente pela avaliação visual dos padrões de aspersão, como o tipo de cone e o raio molhado e pela intensidade de precipitação produzida. Assim, realizou-se um ensaio para cada aspersor apresentado na tabela 4.25 para uma pressão constante de 0,5 bar. A análise realizada permitiu constatar que o aspersor Fulljet 3/4HH-2.5 apresenta um ângulo de pulverização elevado e um padrão de cone cheio abrangendo uma vasta área, mas apresenta uma elevada intensidade. Em relação aos aspersores Veejet HB3/8U-80100 e HB1/2U-80100 com padrão de leque apresentam elevadas intensidades e um ângulo de pulverização inferior aos aspersores Fulljet. O aspersor selecionado foi o Fulljet B3/8HH-9.5, este aspersor apresenta um padrão de cone cheio, um ângulo de pulverização elevado e uma intensidade de precipitação razoável para uma pressão inicial de 0,5 bar.

A intensidade de precipitação foi avaliada através de uma caixa coletora com área em planta igual à do pavimento e com capacidade 80 l que foi colocada em cima do pavimento. Através do manómetro posicionou-se a pressão em 0,5 bar e iniciou-se o teste experimental. Cronometrou-se o ensaio experimental até que a caixa coletasse cerca de 40 l. Para o cálculo da intensidade de precipitação utilizou-se a seguinte expressão:

$$I_r = \frac{V}{S} \times 60 \quad (4.16)$$

Em que:

$I_r$  - intensidade de precipitação (mm/h);

$V$  - volume coletado (l);

$S$  - área em planta da caixa coletora (m<sup>2</sup>);

$t$  - tempo de coleta (min).

## 4.6.2. Calibração do simulador de chuva

### 4.6.2.1. Método de calibração da intensidade real de chuva simulada

Para a calibração da intensidade real de chuva simulada, definida como a intensidade efetivamente precipitada sobre a área em estudo, adaptou-se o método da medição de vazão descrito por Sousa (2011).

O método da medição de vazão consiste em coletar um volume de precipitação em função de uma determinada pressão (Sousa, 2011). Para coletar o volume de precipitação utilizou-se uma caixa coletora metálica com área de 1,0 m<sup>2</sup> com capacidade para coletar 80 l.

O simulador de chuva foi colocado sobre a caixa coletora a uma altura de 2,70 m e centrado o aspersor com base no centro da caixa coletora.

Os ensaios foram realizados para as pressões de 0,5 bar, 0,7 bar, 0,9 bar, 1,1 bar, 1,6 bar e 2,1 bar, com a duração da simulação de 10 min e duas repetições. Após cada teste calculou-se a intensidade real da chuva simulada através da expressão 4.16. Na tabela 4.26 apresentam-se os resultados das medições.

Tabela 4.26 - Resultados das medições pelo método de vazão

Pressão (bar)	Tempo (min)	Volume (l)	S (m <sup>2</sup> )	Ir (mm/h)
0,5	10	28,0 28,3	1	168,0
0,7	10	29,0 30,0	1	174,0
0,9	10	32,0 31,0	1	186,0
1,1	10	35,0 34,5	1	207,0
1,6	10	38,5 36,5	1	219,0
2,1	10	44,0 43,5	1	261,0

Os resultados apresentados na tabela 4.26 permitem determinar a relação entre a pressão de serviço e a intensidade real simulada. Como é possível constatar, à medida que se aumenta a pressão a intensidade de precipitação também aumenta para um tempo constante de 10 minutos.

#### 4.6.2.2. Método dos copos coletores

A uniformidade de distribuição da chuva simulada foi aferida através do cálculo do Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) descrito por colocar Sousa (2011).

Para o ensaio de avaliação da distribuição espacial da precipitação gerada pelo aspersor Fulljet B3/8HH-9.5 foram colocados 25 copos de recolha da precipitação sobre a área de 1,0 m<sup>2</sup>, distribuídos numa malha de 5 X 5 e espaçados de 20 cm como se ilustra na figura 4.20. Com o aspersor colocado a 2,70 m de altura e após se obter no manómetro a pressão pré-definida, deu-se início ao ensaio experimental. O ensaio dava-se por concluído quando o primeiro copo coletor se enchesse totalmente. Após cada ensaio mediram-se as alturas de água e os volumes de água coletados em cada copo e foi avaliado o Coeficientes de Uniformidade de Christiansen através da expressão 4.17, apresentando-se os resultados na tabela 4.27.

$$CUC (\%) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})}{n \times \bar{X}} \quad (4.17)$$

Em que:

CUC - coeficiente de Uniformidade Christiansen;

$X_i$  - lâmina de água precipitada em cada coletor;

$\bar{X}$  - lâmina média precipitada;

$n$  - número de recipientes coletores.

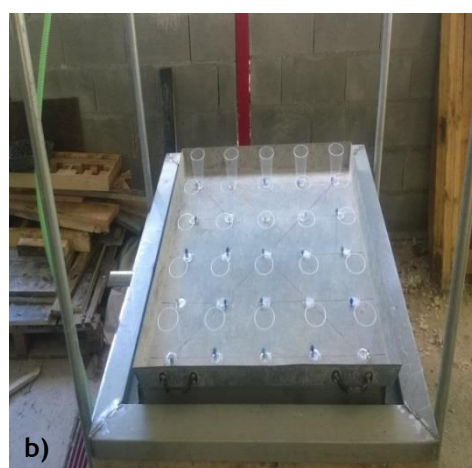
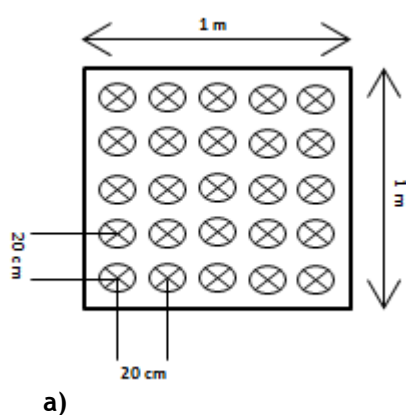


Figura 4.20 - Caixa coletora: a) croqui dos copos; b) Ensaio com os copos coletores

Tabela 4.27 - Resultados do Coeficiente de Uniformidade Christiansen

Altura do simulador (m)	Pressão (bar)	CUC (%)
2,7	0,5	60
2,7	0,7	64
2,7	0,9	66
2,7	1,1	68≈70
2,7	1,6	70
2,7	2,1	72

De acordo com os resultados da tabela 4.27 é possível concluir que a pressão de serviço e o CUC são diretamente proporcionais. Ou seja, à medida que se aumenta a pressão o Coeficiente de Uniformidade também aumenta, bem como o ângulo de pulverização que quanto maior é a pressão maior área abrange devido à sua característica de cone cheio. Segundo Minguntanna

(2009), valores de CUC acima de 70% são considerados aceitáveis em relação à uniformidade de distribuição em simuladores de chuva. Face aos resultados obtidos, somente as pressões de 1,1 bar, 1,6 bar e 2,1 bar atendem ao referido requisito. Face ao exposto, apenas essas foram consideradas no presente estudo.

#### 4.7. Execução dos pavimentos

Os pavimentos foram construídos no recinto do laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) da Universidade da Beira Interior (UBI).

O molde para a colocação das várias camadas dos pavimentos, tem uma área de 1m<sup>2</sup> e 52 cm de altura. É constituído por 2 peças retangulares de betão armado que podem ser movidas consoante o objetivo do ensaio, permitindo que a compactação das camadas seja gradual. A colocação das camadas do pavimento permeável foi executada com base na consulta de diversos autores que desenvolveram estudos em pavimentos permeáveis (Alessi *et al.* 2006, Plínio 2009, Hernandez 2008, Virgiliis 2009, Araujo 2000, Acioli 2005). Na figura 4.21 apresenta-se o desenho esquemático do pavimento.

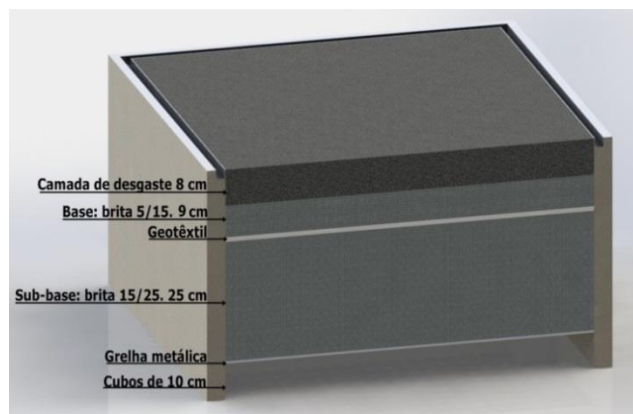


Figura 4.21 - Desenho esquemático do pavimento

A execução das camadas constituintes dos dois pavimentos construídos difere apenas na camada de desgaste e são descritas nos seguintes pontos:

- No fundo do molde colocaram-se quatro cubos de granito com 10x10 cm de modo a perfazer a altura necessária. De seguida colocou-se uma grelha metálica perfurada;
- Sub-base: constituída por brita 15/25, com uma espessura de 25 cm;
- Entre a sub-base e a base colocou-se um geotêxtil;
- Base: constituída por brita 5/15, com uma espessura de 9 cm;
- Camada de desgaste: executada em betão betuminoso drenante (PA 12,5) ou betão betuminoso denso (AC 14 Surf) com espessura de 8 cm.

Na figura 4.22 apresenta-se a sequência de montagem do pavimento.



Figura 4.22 - Sequência de montagem do pavimento

Para a execução da camada de desgaste do pavimento permeável e do pavimento de referência calcularam-se as quantidades necessárias das diferentes composições das misturas betuminosas. Ambas as camadas de desgaste possuem uma espessura de 8 cm.

Na tabela 4.28 apresentam-se as quantidades de material necessário a utilizar na execução da camada de desgaste de ambos os pavimentos, tendo-se produzido um total de 187,8 kg de mistura de referência e 160,4 kg de mistura drenante.

Tabela 4.28 - Quantidades necessárias para a execução das camadas de desgaste

	Mistura de referência	Mistura drenante
Brita 5/15 (kg)	106,6	148,0
Cal hidráulica (kg)	3,6	5,4
Pó de Pedra (kg)	67,5	-
Fibras Viatop (kg)	-	0,7
Betume convencional 35/50 (kg)	10,1	-
Betume elaster 13/60 (kg)	-	6,2

Ambas as misturas betuminosas realizaram-se no laboratório de Construção do Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura (DECA) da Universidade da Beira Interior (UBI).

Para a execução da mistura betuminosa densa os agregados e o betume convencional 35/50 colocaram-se inicialmente nas estufas a uma temperatura a 180°C, durante 60 minutos. Após 60 minutos nas estufas pesaram-se os agregados e o betume consoante as quantidades determinadas e misturaram-se na betoneira como se ilustra na figura 4.23.



Figura 4.23 - Colocação da mistura na betoneira

A mistura betuminosa densa foi colocada na betoneira por duas vezes devido à elevada quantidade de agregados. Depois de misturada a primeira quantidade na betoneira, retirou-se a mistura e colocou-se nas estufas para que a temperatura se mantivesse até a segunda mistura estar preparada. De seguida juntaram-se as duas partes e colocou-se a mistura betuminosa densa no molde do pavimento e procedeu-se à compactação. Após a compactação da mistura verificou-se que esta não ficou homogénea apresentando na sua superfície zonas com bastantes

vazios. Isto deveu-se ao facto dos finos terem ficado retidos na betoneira uma vez que o betume arrefeceu rapidamente. Constatou-se também que a grande quantidade de agregados, nomeadamente o pó de pedra dificultou o processo da mistura. A utilização do pavimento com a mistura betuminosa densa ficou sem efeito porque não cumpriu o requisito de impermeabilidade.

A figura 4.24 ilustra o processo de compactação e a mistura betuminosa densa compactada no molde do pavimento onde são assinaladas as zonas com falta de finos.

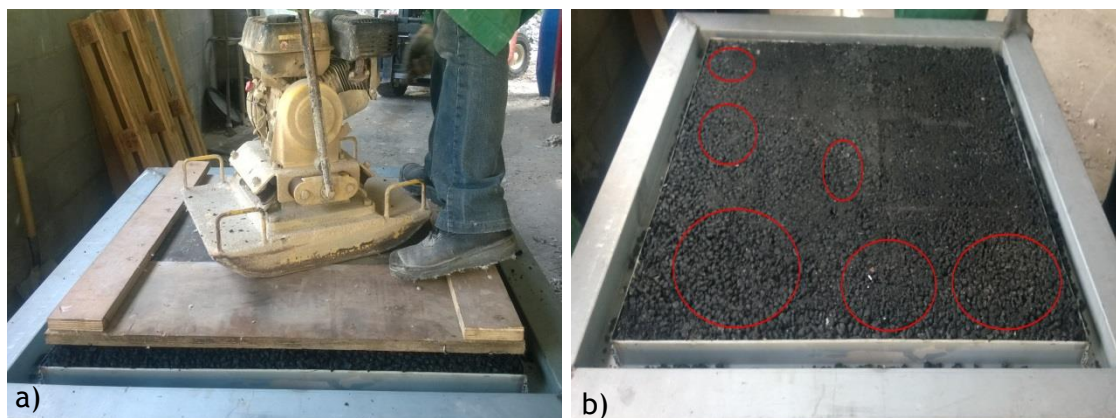


Figura 4.24 - a) Compactação da mistura; b) Mistura betuminosa densa

O procedimento para a execução da mistura betuminosa drenante foi semelhante ao descrito anteriormente para a mistura betuminosa densa. A concretização da mistura betuminosa drenante ocorreu sem problemas, uma vez que esta mistura não possui finos, o que facilita a mistura na betoneira assim como a conservação da temperatura. Na figura 4.25 apresenta-se a mistura betuminosa drenante executada.



Figura 4.25 - Mistura betuminosa drenante

## 4.8. Avaliação dos caudais

Após a execução dos pavimentos, o trabalho teve como objetivo principal avaliar e comparar o escoamento superficial gerado pelos dois tipos de pavimentos em estudo: o pavimento

permeável e o pavimento impermeável (considerado como pavimento de referência) quando sujeitos a precipitações de intensidade constante e suficientemente longas. Para o pavimento permeável avaliou-se o escoamento superficial bem como os caudais de infiltração e à saída do aspersor. Para o pavimento de referência estudou-se o caudal à saída do aspersor e o escoamento superficial. A figura 4.26 ilustra o simulador de chuva desenvolvido em laboratório, bem como os seus integrantes.



Figura 4.26 - Simulador de chuva

Em cada ensaio, o caudal testado foi obtido através da regulação da válvula de seccionamento existente a jusante da bomba, correspondente a uma dada pressão pré-definida no manómetro de glicerina instalado a montante do aspersor (1,1 bar, 1,6 bar ou 2,1 bar). As pressões e os respetivos caudais mantiveram-se constantes para ambos os pavimentos.

Uma vez atingida a pressão pré-definida, à qual correspondente o início do ensaio, condição que permanece inalterada no seu decurso, procede-se à medição do caudal à saída do aspersor. A avaliação dos caudais foi realizada por recursos ao método volumétrico, ou seja o caudal foi obtido dividindo o volume recolhido pelo correspondente tempo de recolha.

Para avaliar o caudal à saída do aspersor colocou-se, antes de se iniciar o ensaio e de forma temporária, um tubo junto do bico do aspersor do simulador. Uma vez estabelecida a pressão, e estabilizado o caudal, de seguida desviou-se a água para um copo medidor e cronometrou-se o tempo que o copo medidor demorou a encher. Anotado o volume e o tempo para a determinação do caudal do aspersor, retirou-se o tubo do bico do aspersor e procedeu-se à simulação da chuva para a determinação do caudal superficial e do caudal de infiltração do pavimento permeável. No instante que se retirou o tubo do bico do aspersor deu-se início a uma nova cronometragem, ou seja, cronometrou-se o tempo que a água demorou a chegar ao tubo superior e ao tubo inferior, ou seja às secções de análise do escoamento superficial e de

infiltração. Como ilustra a figura 4.27, o tubo superior permite obter o escoamento superficial e o tubo inferior o caudal de infiltração.



Figura 4.27 - Seções de medição do caudal superficial e do caudal de infiltração

O escoamento superficial recolheu-se através de copos medidores de 5 em 5 minutos e anotado o peso de cada recolha. O caudal de infiltração cronometrou-se e pesou-se consoante o tempo de recolha de água através do copo medidor devido à sua grande afluência. A simulação teve duração de 60 minutos. Após os 60 minutos desligou-se a bomba e continuou-se a cronometrar até caudal. O procedimento foi semelhante para as três pressões ensaiadas.

Para a realização do ensaio experimental correspondente ao pavimento de referência houve necessidade de se impermeabilizar o pavimento permeável com um plástico. A utilização deste procedimento alternativo resultou do insucesso na concretização do pavimento de referência em laboratório, tal como descrito no ponto 4.7. Com o pavimento totalmente impermeabilizado os ensaios decorreram de forma análoga ao descrito para os pavimentos permeáveis.

Posteriormente aos ensaios experimentais processaram-se e analisaram-se os dados recolhidos. Na tabela 4.29 e 4.30 apresentam-se os resultados dos ensaios no que concerne aos valores máximos gerados pelo pavimento permeável e impermeável, respetivamente, bem como o caudal avaliado à saída do aspersor.

Tabela 4.29 - Resultados dos ensaios ao pavimento permeável

Duração (min)	Caudal à saída do aspersor (l/h)	Ir (mm/h)	Escoamento superficial (l/h)	Caudal de infiltração (l/h)	Coefficiente de escoamento (-)
60	276,0	207,0	2,9	233,7	0,01
60	327,0	219,0	4,1	232,0	0,02
60	400,0	261,0	4,0	360,0	0,01

Os resultados apresentados na tabela 4.29 correspondem às três pressões estudadas para o pavimento permeável com duração de 60 minutos. Como esperado, o aumento da pressão significa um aumento dos caudais do aspersor, o escoamento superficial e o caudal infiltração. Relativamente ao coeficiente de escoamento ele varia entre 0,01 e 0,02 o que significa que o pavimento permeável correspondeu às expectativas no que toca à sua porosidade e consequente capacidade de infiltração.

Tabela 4.30 - Resultados dos ensaios ao pavimento impermeável

Duração (min)	Ir (mm/h)	Caudal à saída do aspersor (l/h)	Escoamento superficial (l/h)	Coeficiente de escoamento (-)
10	207,0	276,0	192,0	0,94
10	219,0	327,0	211,0	0,97
10	261,0	400,0	232,0	0,90
40	207,0	276,0	190,0	0.86
40	219,0	327,0	216,0	0.99
40	261,0	400,0	242,0	0.92

Tratando-se da análise de um pavimento impermeável é expectável que o coeficiente de escoamento tomasse o valor unitário, i.e. que toda a chuva se transformasse em escoamento, ainda assim foi avaliado de modo a aferir o rigor dos resultados.

#### 4.8.1. Pavimento permeável

Para avaliar a eficiência do pavimento permeável que se traduz pela capacidade de redução do escoamento superficial, realizaram-se 3 ensaios experimentais com intensidades constantes com duração de 60 minutos. Estes ensaios permitiram obter dados sobre as intensidades de precipitação bem como as durações de precipitação. Com base na recolha dos dados referidos anteriormente é possível determinar o coeficiente de escoamento, que resulta da razão entre o volume escoado e o precipitado. No que diz respeito taxa de infiltração, esta obtém-se através da diferença entre a intensidade de precipitação e o escoamento superficial, a qual diminui ao longo do tempo até atingir um valor constante. Como exemplo, na figura 4.28 apresenta-se o hidrograma correspondente ao escoamento superficial para a pressão de 1,6 e duração de 60 minutos. Na figura 4.29 apresentam-se os gráficos do escoamento superficial e da taxa de infiltração de modo a proporcionar uma análise individual.

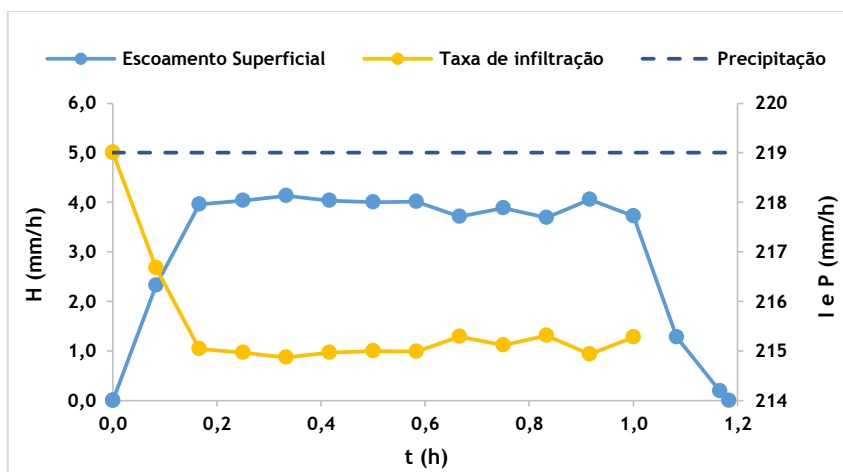


Figura 4.28 - Hidrograma de escoamento superficial e da taxa de infiltração resultantes de uma precipitação de 60 minutos.

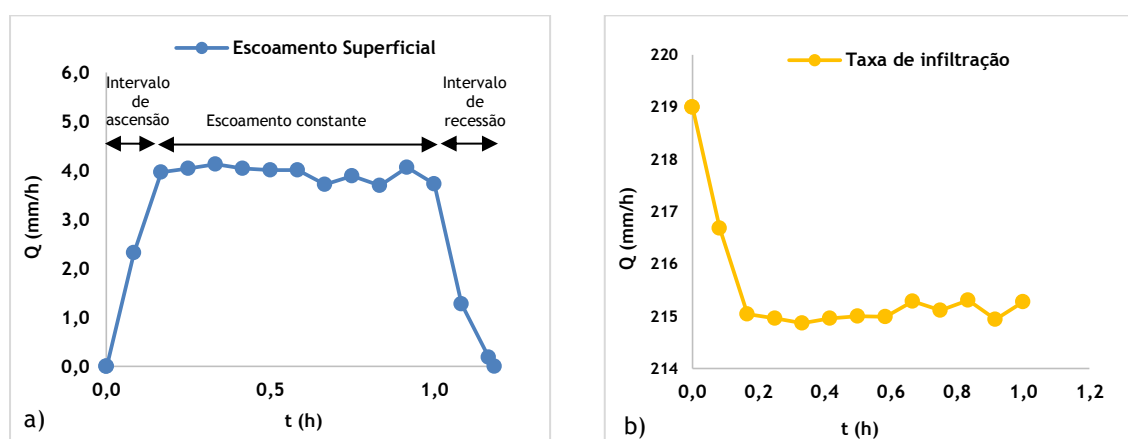


Figura 4.29 - a) Hidrograma de escoamento superficial; b) da taxa infiltração

Na figura 4.29 identificam-se as fases distintas descritas nos pontos seguintes, segundo (Moura, 2005):

- i) Intervalo de ascensão: ocorre um acréscimo do caudal escoado em consequência da diminuição da taxa de infiltração e do incremento da altura média da lâmina de água na área em estudo;
- ii) Escoamento constante: troço no qual o valor máximo do caudal é proximamente constante;
- iii) Intervalo de recessão: diminuição do escoamento superficial após terminar a precipitação.

Na figura 4.30 apresentam-se os resultados obtidos das recolhas efetuadas no tubo inferior, correspondente ao caudal designado como de infiltração no pavimento permeável e a taxa de infiltração obtida através da precipitação e do hidrograma do escoamento superficial. A zona

assinalada a vermelho corresponde ao escoamento permanente, onde o escoamento superficial estabiliza para um valor aproximadamente constante, ficando o sistema em equilíbrio e as perdas são devidas somente à infiltração.

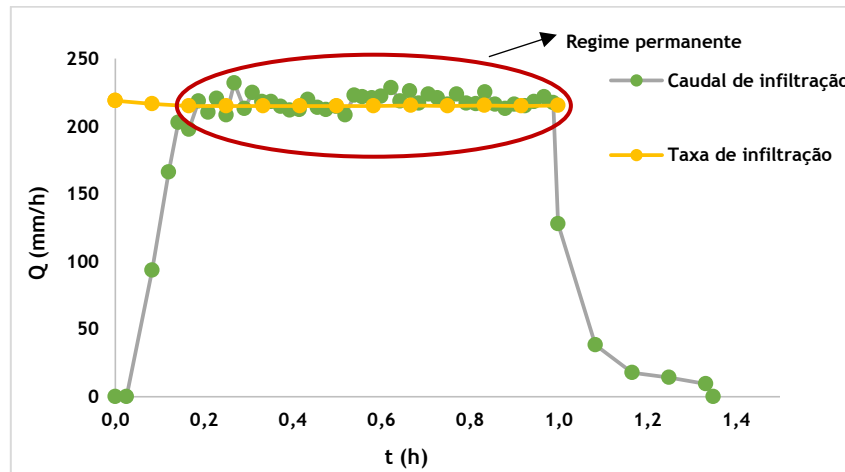


Figura 4.30 - Hidrograma do caudal de infiltração e da taxa de infiltração resultantes de uma precipitação de 60 minutos.

Na figura 4.30 confirma-se o espectável, ou seja, que o caudal de infiltração possui um andamento semelhante à taxa de infiltração, correspondente ao regime permanente, o que significa que o pavimento é capaz de absorver quase a totalidade da precipitação, gerando um menor volume de escoamento superficial, menor caudal de ponta de cheia e consequentemente menor coeficiente de escoamento em relação a um pavimento convencional.

#### 4.8.2. Pavimento Impermeável

Na caracterização do pavimento impermeável foram ensaiadas 3 precipitações com intensidades constantes e com duração de 10 e 40 min. Na figura 4.31 apresenta-se o hidrograma de escoamento superficial resultante das precipitações com duração igual a 10 min.

Na figura 4.31 permite verifica-se que os hidrogramas de escoamento superficial apresentam um andamento semelhante para as três condições de ensaio, observando-se valores máximos do caudal de ponta crescentes com a intensidade de precipitação ( $\approx 192$  l/h,  $\approx 211$  l/h e  $\approx 232$  l/h). A figura 4.32 exibe um comportamento semelhante ao descrito para o hidrograma da figura 4.31, apresentando valores máximos do caudal de ponta crescente com a intensidade de precipitação ( $\approx 190$  l/h,  $\approx 216$  l/h e  $\approx 242$  l/h).

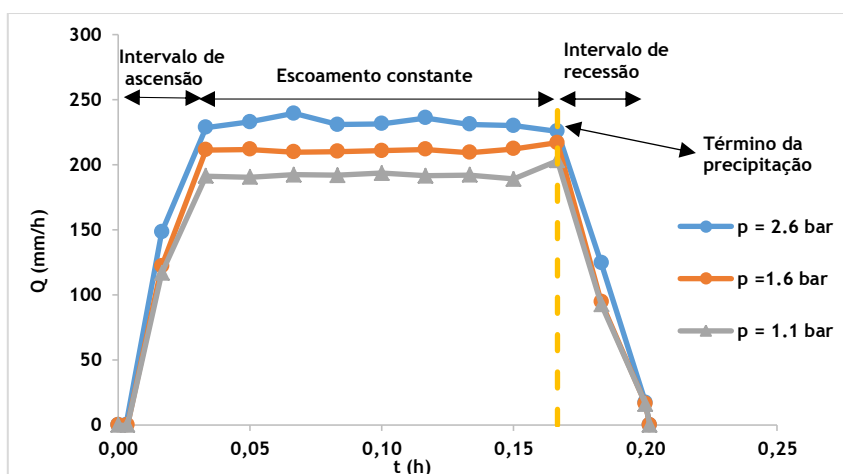


Figura 4.31 - Hidrogramas de escoamento superficial gerado pelo pavimento impermeável sujeito a três chuvadas com duração de 10 min.

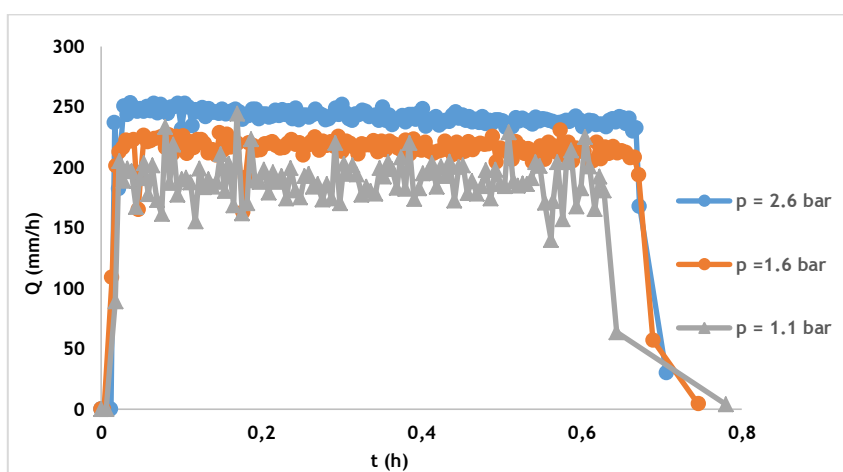


Figura 4.32 - Hidrogramas de escoamento superficial gerado pelo pavimento impermeável sujeito a três chuvadas com duração de 40 min.

Na figura 4.31 identificam-se fases distintas descritas nos pontos seguintes:

- iv) Intervalo de ascensão: aumento de caudal estimulado pelo incremento do escoamento, que ocorre durante o tempo de crescimento;
- v) Escoamento constante: troço no qual o valor máximo do caudal é aproximadamente constante;
- vi) Intervalo de recessão: diminuição do escoamento superficial após terminar a precipitação.

Comparam-se ainda os caudais de ponta de cheia entre os dois pavimentos, ao qual se conclui que para intensidades de precipitação ( $\approx 207$  l/h,  $\approx 219$  l/h e  $\approx 261$  l/h) o pavimento permeável reduz o pico de cheia em 98%. Na tabela 4.31 apresentam-se os resultados para a redução do caudal de ponta de cheia.

Tabela 4.31 - Redução do caudal de ponta de cheia

I <sub>r</sub> (mm/h)	Escoamento superficial máximo (mm/h)		% de redução
	Pavimento permeável	Pavimento impermeável	
207	2,9	190,0	98,6
219	4,1	216,0	98,2
261	4,0	242,0	98,4



## CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento do estudo efetuado, tendo em vista a aplicação de pavimentos permeáveis em zonas urbanas e a avaliação da sua eficiência na redução do escoamento superficial. Apresentam-se também propostas para trabalhos futuros.

Para este estudo realizaram-se inicialmente duas misturas betuminosas drenantes sem fibras (mistura E) e com fibras (mistura F) e uma mistura betuminosa densa de modo a poder compara-las. Para isso, concretizaram-se diversos ensaios de caracterização das misturas betuminosas, nomeadamente o ensaio cântabro, sensibilidade à água e o ensaio da permeabilidade.

O ensaio cântabro permitiu avaliar a resistência à desagregação das misturas betuminosas drenantes e densas. Segundo o Caderno de Encargos, a mistura E e F não cumprem a perda por desgaste dos provetes imersos, o que não acontece com os provetes a seco em que ambos cumprem os requisitos. O Caderno de Encargos impõe que a perda por desgaste seja  $\leq 25\%$ . Consultando o *Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes* (PG-3, OC29/2011) a mistura betuminosa drenante F cumpre os requisitos para a perda por desgaste dos provetes imersos e a seco. A percentagem máxima para a perda por desgaste segundo o PG-3 é de 35 % ou 40 % dependendo do tipo de tráfego. Relativamente à mistura betuminosa densa de referência (AC 14 Surf) os valores obtidos cumpriram os requisitos quer do Caderno de Encargos quer no PG-3, (OC29/2011).

O ensaio de sensibilidade permitiu determinar o efeito do condicionamento em água na resistência à tração em compressão diametral de misturas betuminosas. Para este ensaio, o Caderno de Encargos não define valores para as camadas drenantes. No PG-3, (OC29/2011) o valor mínimo referido é de  $\geq 85\%$  o que significa que apenas a mistura F cumpre este requisito com um valor de 95%. A mistura betuminosa densa obteve um valor de 96% cumprindo os requisitos.

Em relação ao ensaio de permeabilidade, os resultados obtidos para as misturas drenantes (E e F) e para a mistura AC 14 Surf diferem consideravelmente. Apenas às misturas drenantes foram atribuídas categorias de acordo com o preconizado na norma europeia *12697-19:2004 Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 19: Permeability of specimen* que define que os resultados devem estar compreendidos entre  $0,5 \times 10^{-3}$  m/s e  $3,5 \times 10^{-3}$  m/s. Constata-se que a baixa permeabilidade da mistura densa não está incluída neste intervalo, como era de esperar.

Após a caracterização e análise descritas anteriormente das misturas betuminosas drenantes e densa, procedeu-se à execução dos pavimentos. Para tal, estudaram-se vários autores que desenvolveram trabalhos em pavimentos permeáveis de modo a poder dimensionar corretamente cada uma das camadas. Assim, no presente estudo optou-se por construir um pavimento permeável e um impermeável (como referência) em que apenas diferem na camada de desgaste. Em paralelo à execução dos pavimentos, construiu-se um simulador de chuva com a finalidade de recolher dados sobre o volume de escoamento superficial, a taxa de infiltração e avaliar o coeficiente de escoamento superficial gerado pelos diferentes pavimentos.

Testaram-se vários tipos de aspersores para o simulador de chuva, realizando-se um ensaio para cada aspersor. Selecionou-se o aspersor Fulljet B3/8HH-9.5, que apresenta um padrão de cone cheio, um ângulo de pulverização elevado e uma intensidade de precipitação considerável.

Posteriormente procedeu-se à calibração do simulador de chuva através método de calibração da intensidade real de chuva simulada e do método dos copos coletores. Conclui-se que à medida que se aumenta a pressão a intensidade de precipitação também aumenta e que a pressão de serviço e o CUC são diretamente proporcionais.

Calibrado o simulador e dimensionado o pavimento avaliaram-se os caudais. Para o pavimento permeável avaliaram-se os seguintes caudais: superficial, de infiltração e à saída do aspersor. Para o pavimento de referência estudou-se o caudal à saída do aspersor e o superficial.

O desempenho hidráulico do pavimento permeável mostrou-se satisfatório, uma vez que o pavimento não gerou escoamento superficial significativo, reduzindo conseqüentemente o pico de cheia.

Ao longo do estudo realizado conclui-se também que por questões de resistência estrutural e de manutenção, este tipo de pavimento deve ser utilizado em zonas de parque de estacionamento, zonas de prática desportiva, passeios e ruas de baixo de tráfego.

De acordo com a experiência adquirida ao longo do estudo, consideram-se relevantes as seguintes propostas para temas futuros:

- i) Técnicas de prevenção à colmatação deste tipo de pavimentos;
- ii) Análise dos custos associados à manutenção de um pavimento permeável;
- iii) Avaliação do comportamento do CUC face à ação do vento e sua a uniformidade de distribuição da chuva sob diferentes pressões;
- iv) Estudo da capacidade de redução da carga de poluentes pelo uso de pavimentos permeáveis;
- v) Desenho de novos modelos experimentais à escala real;

- vi) Estudo da aplicação da água armazenada em pavimentos de armazenamento;
- vii) Estudo da resistência dos materiais constituintes do pavimento permeável quanto à durabilidade frente aos sucessivos períodos de molhagem e secagem.



## BIBLIOGRAFIA

**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.

**Alessi, F.; kokot, P.; Gomes, J. (2006).** Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso. Revista da Vinci, Núcleo de Ciências Exatas e Tecnológicas do Centro Universitário Positivo - UnicenP, volume III.

**Andersen, C.T.; Foster, I.D.L; Pratt, C.J. (1999).** The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: development of a laboratory simulation experiment. Hydrological Processes.

**Araújo, P.; Tucci, C.; Goldenfum, J. (2000).** Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial. Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. Porto Alegre, Brasil.

**Bertoni, J.; Lombardi, F. (1990).** Conservação do solo. Livro, 2ª edição, São Paulo.

**Carvalho, D.; Montebeller, C.; Cruz E.; Ceddl, M.; Lana, A.(2001).** Perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho Amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.3. Campina Grande, Brasil.

**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.

**AEA, 2006:** Urban sprawl in Europe - The ignored challenge. Relatório da Agência Europeia do Ambiente 10/2006.

**Estradas de Portugal, S.A. (2012):** Caderno de Encargos Tipo Obra, Capítulo 14.03 - Pavimentação, Características dos materiais. Estradas de Portugal, S.A., Vol. 3, janeiro.

**Fontaneda, MSC. L. (2014).** Análisis de la infiltración de agua de lluvia en firmes permeables com superficies de adoquines y aglomerados porosos para el controle en origen de

inundaciones. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, España;

**Gary, R.; Brown, P.E.(2008).** Pennsylvania Asphalt Pavement Association. Porous Asphalt Pavements Guide. RT Environmental Services, Inc. On Behalt of the Pennsylvania Asphalt Pavement Association.

**Gomez, E. (2010).** Estudio de un aparcamiento de firmes filtrantes para la mejora de la gestion sostenible de las aguas urbanas mediante el almacenamiento y valorizacion del agua de lluvia. Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Escuela Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, España.

**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.

**Herngren, L.; Goonetilleke, A.; Ayoko G.(2004).** Investigation of urban water quality using artificial rainfall. Proceedings of the International Conference: Watershed 2004, Dearborn Michigan, CD Rom Publication.

**Hudson, N.W.; (1993).** Field measurement of soil erosion and runoff. Silsoe Associates. Ampthill, Bedford. United Kingdom. Food and Agriculture of the United Nations.

**Isidoro, J. (2012).**Modelling the influence of storm movement and wind-driven rainfall on overland flow in urban areas. Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

**Kincadaid, D. C.; Solomon, K.H.; Oliphant, J. C. (1996).** Drop size distributions for irrigation sprinklers American Society of Agricultural Engineers, VOL. 39.

**Lima, J.; Martins, C.; Mendes, M.; Abreu, J.; Almeida, J.; Lima, I. (2010).** Hidrologia urbana. Conceitos básicos. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), Lisboa, Série Cursos Técnicos, nº 1.

**Lima, J.; Nunes, M. (1995).** Modelação numérica de simuladores de chuva. Revista Cadernos de Geografia, *Instituto de Estudos Geográficos, F.L.U.C.*

**LNEC, (1962).** Vocabulário de estradas e aeródromo-Especificação E1,Lisboa,1962.

**Magarvey, R. H. (1956).** Stain Method of drop-size determination. Acadia University and Nova Scotia Research Foundation. Journal of Meteorology.

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

**Meyer, L. D. (1994).** Rainfall simulators for a rainfall research. Soil Erosion Research Methods- Soil and Water Conservation Society (U.S.), R.Lal-Google livros.

**Meyer, L. D.; Harmon, W. C. (1979).** Multiple-intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. Transactions of the ASAE, St. Joseph.

**Miguntanna, N.S (2009).** Determining a Set of Surrogate Parameters to Evaluate Urban Stormwater Quality. Faculty of Built Environment and Engineering. University of Technology, Australia.

**Montebeller, C. (2009).** Influência dos perfis de precipitação nas perdas de solo e água. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

**Oliveira, F.; Montenegro, A.; Monteiro, A.; Silva D. (2013).** Avaliação de um simulador de chuva de intensidade variável. XIII jornada de ensino, pesquisa e extensão - JEPEX 2013 - UFRPE: Recife, 09 a 13 de dezembro.

**Oliveira, I. (1995).** Misturas Betuminosas Drenantes. Estudo da Influência de Alguns Parâmetros da Composição. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

**Pavidren.** Betão Betuminoso Drenante, Pavimentos de Elevada Qualidade, Grupo Pavia, Tecnobet, Ligantes e misturas betuminosas, SA.

**Pearson, J. E.; Martin G. E. (1957).** An evaluation of raindrop sizing and counting instruments. In cooperation with Department of General Engineering University of Illinois. Scientific Report N0.1. Illinois State Water Survey and the University of Illinois Urbana, Illinois.

**Pittet, M.; Arnaud, L.; Junod, A.; Dumont, A. G.; Poulikakos, L. D.; Gubler, R.; Partl, M.; Vaud, C.; Simond, E. (2006).** Mechanical Properties of Porous Asphalt, Recommendations for Standardization. Swiss Federal Laboratory for Materials Testing and Research, Empa, Dübendorf, Switzerland. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) - Laboratoire des voies de circulation (LAVOC). Dezembro, 2006.

**PG-3, 2011. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) (OC29/2011). Artículo 542 - Mezclas betuminosas en caliente tipo hormigón betuminoso. Ministeriode 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.

**Pratt, C.J., Wilson S.; Cooper P. (2002).** Source control using constructed pervious surfaces. Hydraulic, structural and water quality performance issues. London: CIRIA; CIRIA C582.

**Rocheta, V. (2011).** Perdas no processo de precipitação - Escoamento em zonas urbanas - Estudos da Infiltração em calçada à portuguesa. Tese de Mestrado, Escola de ciências e tecnologia, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

**Salako, F. K. (1995).** Susceptibility of coarse-texture soils to soil erosion by water in the tropics. Department of Soil Science and Agricultural Mechanisation, University of Agriculture, Abeokuta, Nigeria.

**Sales, T. (2008).** Pavimento permeável com superfície em blocos de concreto de alta porosidade. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

**Salles, C.; Poesen, J.; Borselli, L.; (1999).** Measurement of simulated drop size distribution with an optical spectro Pluviometer: Sample size considerations. Laboratory for Experimental Geomorphology, K.U. Leuven. Belgium.

**Sousa, JR. S. F. (2011).** Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuva para estudos ambientais. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Brasil.

**Souza, M. (2004).** Desenvolvimento e Utilização de um Simulador de Chuvas para estudos de atributos físicos e químicos do solo relacionados a impactos ambientais. Jaguari+unia, EMBRAPA.2004.18p.

**Spraying Systems Co. Experts in Spray Technology.** Referências técnicas. Acedido em 03 de Dezembro 2014, em <http://www.spray.com/literature/literature.aspx?category=SprayNozzles&page=SprayNozzles>.

**Suda, S.; Susumo Y.; Osamu K.; Minoru, H. (1988).** Development and Application of Permeable Paving Concrete Block; Sanyo Concrete Industries CO., LTD. Japan Tadao Kunimura.

**Testezlaf, R. (2005).** Técnica de Irrigação. Acedido em 15 de Fevereiro de 2015, em <http://www.ocw.unicamp.br/index.php?id=390>.

**Thelen, E.; Howe Fielding L. (1978).** Porous Pavement. Including the Principles of Development and a Porous Pavement Design Manual. Philadelphia - Pa : Franklin Institute Press.

**Tokay, A.; Wolff K. R.; Bashor P.; Dursun O.K. (2003).** On the measurement errors of the Joss-Waldvogel discrometer. American Meteorology Society Radar Meteorology Conference. USA.

**Tomàs, P. (1997).** Modelos de previsão da erosão hídrica em solos agrícolas. Tese de Douramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

**Tomaz, P. (2009).** Curso de Manejo de águas pluviais. Capítulo 60 - Pavimento Poroso. Acedido em 10 de Janeiro de 2015, em [http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo60\\_pavimento\\_poroso.pdf](http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/capitulo60_pavimento_poroso.pdf).

**Tossel, R. W.; Dickinson, W. T.; Rudra R.P.; Wall G.J. (1987).** A portable rainfall simulator. Land Resource Science Department, and School of Engineering, University of Guelph, Guelph, Ontario N1G 2W1; and Agriculture Canada. Ontario Institute of Pedology, Guelph. Ontario N1G 2W.

**UNHSC, (2011).** University of New Hampshire Stormwater Center. Porous Pavement Routine Maintenance Guidance and Checklist. Acedido em 10 de Janeiro de 2015, em <http://www.unh.edu/unhsc/specs-and-fact-sheets-0>.

**University of Maryland Extension (2011).** Permeable Pavement Fact Sheet information for Howard County, Maryland Homeowners.

**Vejdirektoratet, (2012):** European Experience. Winter Service of Porous Asphalt. Report from a scanning tour May 2011. Technical Note 123-2012. Ministry of Transport.

**Virgilis, A. (2009).** Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias. Tese de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

**Wible, D.; P.E., L.E.E.D.A.P.** Porous pavement/ Groundwater Recharge. Acedido em 12 de Fevereiro de 2015, em <http://www.paveshare.org/library/picp-design-sizing>.

**Zhang, J. (2006).** A laboratory scale study infiltration from Pervious Pavements. Tese de Mestrado; School of Civil, Environmental and Chemical Engineering; RMIT University; China.

## 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 12697-12:2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens.
EN 12697-23:2003	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens.
EN 12697-34:2004	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 34: Marshall test.
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.
EN 13108-7:2006	<i>Bituminous mixtures - Material specifications - Part 7: Porous Asphalt</i>
EN 12697-19:2004	Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 19: Permeability of specimen
NLT 327:2000	Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS.



ANEXO I

<b>Guia de Inspeção e Manutenção de Pavimentos Permeáveis</b>			
Um pavimento permeável apresenta características muito próprias, pelo que é necessário efetuar inspeções e manutenções periódicas, para que exista um funcionamento e durabilidade eficaz. Este Guia de Inspeção e Manutenção contém um suporte de informação, que permite orientar campanhas de inspeção visual assim como programar atividades de manutenção. A frequência de manutenção deste tipo de pavimento varia consoante a necessidade de utilização, as condições de tráfego e o tipo de clima.			
<b>Guia de Inspeção</b>			
<b>Atividade</b>	<b>Satisfação (S) ou Insatisfação (I)</b>		<b>Frequência de inspeção</b>
Verificar a existência de acumulação de água na superfície após queda de chuva intensa.	S	I	2 a 4 vezes por ano, dependendo do grau de utilização.
Verificar a acumulação de detritos na superfície do pavimento.	S	I	
Verificar a necessidade de uma lavagem da superfície do pavimento.	S	I	
Verificar se existem danos no solo devido à passagem de tráfego pesado.	S	I	
Em zonas de queda de neve, verificar a colmatação do pavimento devido ao uso de sal.	S	I	
Verificar a existência pontual de acréscimo de cargas não dimensionadas.	S	I	
<b>Guia de manutenção</b>			
<b>Atividade</b>	<b>Frequência de manutenção</b>		
Remoção de água acumulada na superfície do pavimento permeável.	Quando necessário		
Limpeza do pavimento com jatos de pressão.	2 a 4 vezes por ano.		
Aspiração do pavimento para desobstrução dos poros.	2 a 4 vezes por ano.		
Utilização de um soprador para remover folhas e lixo acumulado.	Quando necessário		
Reparação de zonas danificadas do pavimento permeável.	Quando necessário		