



**UNIVERSIDADE DE ÉVORA
ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**PERDAS NO PROCESSO DE PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO EM
ZONAS URBANAS – ESTUDO DA INFILTRAÇÃO EM CALÇADA À
PORTUGUESA**

Vera Lúcia da Silva Rocheta

**Dissertação
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
(HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS)**

ORIENTADOR: Professor Doutor João Pedroso de Lima
CO-ORIENTADOR: Professor Jorge Manuel G. P. Isidoro

Outubro de 2011

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Resumo

A construção urbana interfere nas perdas envolvidas no processo de precipitação-escoamento através da impermeabilização de vastas áreas como ruas, estacionamento e passeios. A utilização de pavimentos permeáveis contribui para a diminuição do escoamento superficial e favorece a recarga dos aquíferos, quando comparados com pavimentos impermeáveis.

O presente trabalho visa a quantificação das perdas por infiltração em pavimentos de Calçada à Portuguesa constituída por blocos miúdos e grossos. Para tal, realizaram-se ensaios em campo com um infiltrómetro de duplo anel e em laboratório recorrendo a um mini-simulador de chuva.

Os resultados obtidos revelaram que, nos locais ensaiados, a calçada miúda conduz a taxas de infiltração superiores comparativamente com a calçada grossa, para aproximadamente a mesma área de juntas. Verificou-se também que o pavimento com juntas paralelas à direcção do escoamento possui maior capacidade de infiltração do que o pavimento com juntas a 45° com o escoamento, para os talhões de calçada analisados.

Abstract

Losses on the rainfall-runoff process in urban areas - Small scale infiltration on Portuguese Cobblestone Pavement

Rapid urban growth interferes with losses involved in rainfall-runoff process due to the imperviousness of streets, parking lots and sidewalks. The use of permeable paving helps to reduce surface runoff favouring groundwater recharge, when compared with impervious surfaces.

The main objective of this study is to quantify the small scale infiltration losses through portuguese cobblestone pavements with small and coarse blocks. Field measurements with a double ring infiltrometer and laboratory simulations using a small rainfall simulator were performed.

These experiments demonstrated that, for the tested sites, the small blocks pavement promoted higher infiltration rates when compared to the coarse blocks pavement, for approximately the same bracket area. It was also noted that the pavements with brackets parallel to the runoff direction had higher infiltration capacity when comparing to the pavements with brackets at 45° with the runoff, for the tested pavement designs.

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Palavras chave

Calçada à Portuguesa
Pavimentos permeáveis
Infiltração
Infiltrómetro
Mini-simulador de chuva

Keywords

Portuguese cobblestone pavement
Permeable pavements
Infiltration
Infiltrometer
Small rainfall simulator

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Agradecimentos

É imprescindível que o presente trabalho se inicie com o agradecimento a todos aqueles que contribuíram para a concretização do mesmo, em particular:

- Ao Professor Doutor João Pedroso de Lima do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente) pela sua disponibilidade e orientação deste trabalho;
- Ao Professor Jorge Manuel G. P. Isidoro pela co-orientação e apoio prestado à realização do trabalho;
- Aos engenheiros Pedro Evangelista, Marcos Torrado e Romeu Gerardo e ainda ao Hugo Semião pela cooperação na realização dos ensaios;
- Aos meus pais e noivo pelo incentivo e apoio incondicional que sempre demonstraram.

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Índice geral

1. Introdução.....	1
2. Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas.....	3
2.1. Balanço hidrológico	3
2.1.1. Intercepção	5
2.1.2. Evaporação.....	5
2.1.3. Transpiração.....	5
2.1.4. Infiltração	6
2.2. Impacto da urbanização no ciclo hidrológico	6
2.2.1. Medidas de minimização.....	8
2.2.1.1 Pavimentos permeáveis	8
2.2.1.2 Pavimentos em Calçada à Portuguesa	10
3. Infiltração	15
3.1. Escoamento de água no solo	15
3.1.1. Lei de Darcy.....	15
3.1.2. Condutividade hidráulica	17
3.1.2.1 Determinação da condutividade hidráulica com base em infiltrómetros.....	20
3.2. Descrição física da infiltração e equações que a regem	21
3.2.1. Equação de Horton	25
3.2.2. Equação de Philip	27
3.2.3. Método de Green-Ampt.....	28
3.2.4. Modelo de Kostiaikov.....	29
3.3. Equipamentos de medição de infiltração	30
3.3.1. Medição de infiltração com base na precipitação real	30
3.3.2. Simuladores de chuva.....	32
3.3.2.1 Mini-simulador de chuva	35
3.3.2.2 Exemplos da aplicação de simuladores de chuva ao estudo de pavimentos.....	37
3.3.3. Infiltrómetros de inundação.....	40

3.3.3.1	Infiltrómetro de duplo anel.....	43
3.3.3.2	Exemplos da aplicação de infiltrómetros de inundação ao estudo dos pavimentos.....	45
3.3.4.	Resumo dos resultados dos ensaios de infiltração em pavimentos permeáveis.....	46
4.	Materiais e métodos.....	51
4.1.	Materiais.....	51
4.1.1.	Calçada à Portuguesa.....	51
4.1.2.	Equipamento.....	54
4.1.2.1	Ensaio de caracterização	54
4.1.2.2	Ensaio de campo.....	55
4.1.2.3	Ensaio laboratoriais.....	58
4.2.	Métodos	61
4.2.1.	Ensaio de caracterização	61
4.2.1.1	Ensaio de infiltração no solo.....	61
4.2.1.2	Ensaio granulométricos	62
4.2.1.3	Ensaio de absorção dos blocos.....	63
4.2.2.	Ensaio de campo	63
4.2.2.1	Ensaio preliminares	63
4.2.2.2	Ensaio com carga hidráulica variável	63
4.2.2.3	Ensaio com carga hidráulica constante	65
4.2.3.	Ensaio laboratoriais.....	67
4.2.3.1	Determinação da intensidade de precipitação.....	67
4.2.3.2	Preparação do talhão de pavimento.....	69
4.2.3.3	Realização do ensaio.....	71
5.	Resultados.....	73
5.1.	Ensaio de caracterização.....	73
5.1.1.	Ensaio de infiltração no solo.....	73
5.1.2.	Ensaio granulométricos.....	74
5.1.3.	Ensaio de absorção de água dos blocos	75
5.2.	Ensaio de campo.....	77
5.2.1.	Ensaio preliminares.....	77

5.2.2. Ensaios com carga hidráulica variável	78
5.2.3. Ensaios com carga hidráulica constante	79
5.2.4. Resumo dos resultados obtidos	81
5.2.5. Análise dos resultados de campo	82
5.2.5.1 Variação das taxas de infiltração durante a série de ensaios.	82
5.2.5.2 Comparação dos resultados dos ensaios de campo com a equação de Horton.....	83
5.2.5.3 Relação entre as taxas de infiltração na calçada miúda e na calçada grossa	87
5.2.5.4 Relação entre os resultados dos ensaios com carga variável e constante	87
5.2.5.5 Relação entre os valores de condutividade hidráulica saturada	89
5.2.5.6 Relação entre os ensaios na calçada e no respectivo solo de base	90
5.2.5.7 Comparação entre os resultados de campo e os valores da literatura	92
5.3. Ensaios laboratoriais	94
5.3.1. Comparação entre os resultados laboratoriais e os valores da literatura.....	100
6. Conclusão.....	103
Referências bibliográficas	105
Anexos	109

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Índice de tabelas

Tabela 3.1 – Valores de condutividade hidráulica de alguns solos típicos, para a água à temperatura de 20°C, adaptado de Lencastre <i>et al.</i> (1984).....	19
Tabela 3.2 – Parâmetros de infiltração do método Green-Ampt para vários tipos de solos, adaptado de Ven Te Chow <i>et al.</i> (1988).....	29
Tabela 3.3 – Resumo dos valores de taxa de infiltração final obtidos na literatura.	47
Tabela 3.4 – Resumo dos valores de coeficientes de escoamento obtidos na literatura.....	49
Tabela 4.1 – Área de juntas e respectiva densidade de blocos de calçada por cada tipologia de pavimento.	53
Tabela 4.2 – Determinação da intensidade de precipitação.	69
Tabela 4.3 – Densidade de blocos de calçada por cada talhão de pavimento.	71
Tabela 5.1 – Frações constituintes dos solos e respectivas percentagens.	75
Tabela 5.2 – Massas determinadas no ensaio de absorção.	75
Tabela 5.3 – Absorção de água dos blocos de calçada.....	76
Tabela 5.4 – Tabela resumo dos ensaios de campo com infiltrómetro.	81
Tabela 5.5 – Coeficiente da equação de Horton para cada ensaio.....	83
Tabela 5.6 – Média das taxas de infiltração máximas e das taxas de infiltração finais para cada série de ensaios.	88
Tabela 5.7 – Taxa de infiltração final dos pavimentos em calçada e dos pavimentos permeáveis semelhantes descritos na literatura (ver gráfico 5.20).....	93
Tabela 5.8 – Coeficientes de escoamento dos pavimentos em calçada e dos pavimentos permeáveis semelhantes descritos na literatura (ver Gráfico 5.26).	101

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Índice de figuras

Figura 2.1 – Diagrama de Horton, adaptado de Lencastre <i>et al.</i> (1984).	4
Figura 2.2 – Impactos devido à urbanização: a) no balanço hídrico, b) no escoamento superficial e c) na resposta da geometria do escoamento, adaptado de Moura (2005).	7
Figura 2.3 – Área construída em espaços urbanos contemporâneos, adaptado de Ferguson (2005).	8
Figura 2.4 – Exemplos de pavimentos permeáveis: a) agregados, b) pavimentos relvados, c) células plásticas, d) blocos com juntas abertas (Illgen <i>et al.</i> , 2007), e) grelhas de betão, f) betão poroso (Ferguson, 2005), g) betão betuminoso poroso (Ferguson, 2005) e h) Calçada à Portuguesa.....	9
Figura 2.5 – Assentamento de calçada miúda: a) passeio e b) elemento decorativo.	12
Figura 2.6 – Formas de assentamento de calçada: a) quadrado, b) leque, c) malhete e d) sextavado, adaptado de Henriques <i>et al.</i> (2009).	13
Figura 2.7 – Elementos decorativos em calçada miúda disposta em fiada.	14
Figura 2.8 – Pavimento em calçada disposta em quadrado mostrando a utilização de: a) pedra miúda e meia perda e b) diferentes cores em elemento decorativo.	14
Figura 2.9 – Elementos decorativos em calçada miúda disposta em malhete.	14
Figura 3.1 – Processos de escoamento de água no solo, adaptado de Ven Te Chow <i>et al.</i> (1988).	15
Figura 3.2 – Representação esquemática da experiência de Darcy, adaptado de Dieleman <i>et al.</i> (1979).	16
Figura 3.3 – Esquema do processo de infiltração no ensaio com infiltrómetro, adaptado de Ritzema (1994).	21
Figura 3.4 – Zonas com diferentes teores de humidade durante a infiltração, adaptado de Ven Te Chow <i>et al.</i> (1988).	22
Figura 3.5 – Diagrama representativo da capacidade de infiltração: a) sem ocorrência de escoamento superficial, b) com a ocorrência de escoamento superficial, adaptado de Delleur (1999).	23
Figura 3.6 – Curvas de taxa de infiltração para os cenários típicos, adaptado de Delleur (1999).	24
Figura 3.7 – Identificação dos parâmetros necessários ao cálculo da constante k.	26
Figura 3.8 – Valores médios de velocidade de infiltração obtidos em campo e calculados por modelos empíricos, adaptado de Paixão (2004).	26

Figura 3.9 – Comparação de curvas teóricas de capacidade de infiltração com a curva observada num solo franco-siltoso a argiloso pesado, inicialmente seco e revestido com uma cobertura herbácea, adaptado de Lencastre <i>et al.</i> (1984).	27
Figura 3.10 – Pavimento permeável em betão com circulação de ar e água: a) concluído e b) estrutura, adaptado de Wang <i>et al.</i> (2010).....	32
Figura 3.11 – Hidrograma e curva de infiltração resultantes de uma precipitação constante, adaptado de Lencastre <i>et al.</i> (1984)	33
Figura 3.12 – Vista de nebulizadores: a) real e b) esquemática, adaptado de de Lima <i>et al.</i> (2002).	34
Figura 3.13 – Exemplo de simulador de chuva rotativo: a) fotografia e b) esquema, adaptado de Moura (2005).....	35
Figura 3.14 – Representação em corte do mini-simulador, adaptado de Kamphorst (1987).	36
Figura 3.15 – Ensaio de infiltração na calçada, adaptado de Illgen <i>et al.</i> (2007)	39
Figura 3.16 – Esquema de aplicação de infiltrómetro de tubo, adaptado de Raghunath (2006).	41
Figura 3.17 – Apresentação de infiltrómetro de tensão: a) real e b) esquemática, adaptado de Pott (2001).	42
Figura 3.18 – Infiltrómetro de duplo anel em: a) corte e b) planta, adaptado de Raghunath (2006).	43
Figura 4.1 – Pavimentos em calçada estudados: a) calçada miúda e b) calçada grossa.....	51
Figura 4.2 – Localização dos ensaios em pavimento de calçada: a) miúda e b) grossa (Universidade do Algarve).....	52
Figura 4.3 – Área de juntas nos pavimentos em calçada da Universidade do Algarve: a) miúda e b) grossa.	53
Figura 4.4 – Locais de recolha de solo para os ensaios granulométricos relativos aos pavimentos em calçada: a) miúda e b) grossa.	54
Figura 4.5 – Blocos de calçada utilizados na determinação da massa volúmica e absorção de água: a) calçada miúda e b) calçada grossa.....	55
Figura 4.6 – Pormenor da adaptação do infiltrómetro aos ensaios no pavimento.	56
Figura 4.7 – Limnómetro de ponta com régua micrométrica.	56
Figura 4.8 – Reservatórios de abastecimento aos anéis do infiltrómetro nomeadamente: a) para o anel interior e b) para o anel exterior.	57
Figura 4.9 – Válvula controlada por bóia para obtenção de carga constante.	57
Figura 4.10 – Mini-simulador de chuva em representação: a) real e b) esquemática, adaptado de Eijkelkamp (2005).....	58

Figura 4.11 – Disposição do equipamento para simulação de precipitação: a) real e b) esquemática.	59
Figura 4.12 – Recipiente de plástico obturado para construção do talhão de pavimento em vista: a) superior e b) lateral.....	60
Figura 4.13 – Pavimento em calçada miúda com: a) juntas na direcção do escoamento e b) juntas a 45° com o escoamento.	60
Figura 4.14 – Pavimento em calçada grossa com: a) juntas na direcção do escoamento e b) juntas a 45° com o escoamento.	61
Figura 4.15 – Ensaio de infiltração no solo: a) colocação do infiltrómetro e b) infiltrómetro cravado no solo.	62
Figura 4.16 – Camada base para o infiltrómetro constituída por massa de moldar sobre a calçada grossa.....	64
Figura 4.17 – Disposição do equipamento em ensaio com carga hidráulica variável.....	64
Figura 4.18 – Esquema da disposição do equipamento em ensaio com carga hidráulica variável.	65
Figura 4.19 – Esquema hidráulico dos ensaios de campo com carga hidráulica variável com indicação do trajecto da água na instalação.	65
Figura 4.20 – Disposição do equipamento em ensaio com carga hidráulica constante.....	66
Figura 4.21 – Esquema da disposição do equipamento em ensaio com carga hidráulica constante.	66
Figura 4.22 – Esquema hidráulico dos ensaios de campo com carga hidráulica constante com indicação do trajecto da água na instalação.	67
Figura 4.23 – Determinação da intensidade de precipitação.	68
Figura 4.24 – Esquema da constituição dos talhões de pavimento: a) calçada miúda e b) calçada grossa.....	70
Figura 4.25 – Esquema hidráulico dos ensaios de laboratório com indicação do trajecto da água na instalação.....	72
Figura 5.1 – Curvas granulométricas dos solos analisados.	74
Figura 5.2 – Calçada miúda com juntas paralelas à direcção do escoamento: a) antes da série de ensaios e b) após a série de ensaios.	98
Figura 5.3 – Relevos de juntas em calçada miúda com juntas paralelas à direcção do escoamento.	98
Figura 5.4 – Calçada miúda com juntas a 45° com o escoamento: a) antes da série de ensaios e b) após a série de ensaios.	98
Figura 5.5 – Relevos de juntas em calçada miúda com juntas a 45° com o escoamento.	99
Figura 5.6 – Calçada grossa com juntas na direcção do escoamento: a) antes da série de ensaios, b) no final da quinta chuva e c) após a série de ensaios.....	99

Figura 5.7 – Relevos de juntas em calçada grossa com juntas na direcção do escoamento.	99
Figura 5.8 – Calçada grossa com juntas a 45° com o escoamento: a) após a primeira chuva, b) no final da sexta chuva e c) após a série de ensaios.	100
Figura 5.9 – Relevos de juntas em calçada grossa com juntas a 45° com o escoamento.	100

Índice de gráficos

Gráfico 5.1 – Resultado dos ensaios de infiltração realizados nos solos ⁽¹⁾	73
Gráfico 5.2 – Taxas de infiltração na calçada miúda resultantes dos ensaios preliminares com: a) carga hidráulica variável e b) carga hidráulica constante.	77
Gráfico 5.3 – Taxa de infiltração em ensaios com carga variável em calçada miúda.....	78
Gráfico 5.4 – Taxa de infiltração em ensaios com carga variável em calçada grossa.....	79
Gráfico 5.5 – Taxa de infiltração em ensaios com carga constante em calçada miúda.	80
Gráfico 5.6 – Taxa de infiltração em ensaios com carga constante em calçada grossa ⁽¹⁾	80
Gráfico 5.7 – Taxas de infiltração inicial (f_0), final (f_c) e média (f_m) para cada ensaio em função da data de execução.....	82
Gráfico 5.8 – Adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga variável em calçada miúda.....	84
Gráfico 5.9 – Adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga variável em calçada grossa.....	84
Gráfico 5.10 – Adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga constante em calçada miúda.....	85
Gráfico 5.11 – Adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga constante em calçada grossa.....	85
Gráfico 5.12 – Pormenor da adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga constante em calçada grossa.....	86
Gráfico 5.13 – Coeficiente de determinação para avaliar a adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas em campo.....	86
Gráfico 5.14 – Taxa de infiltração média resultante dos ensaios com: a) carga hidráulica variável e b) carga hidráulica constante.....	87
Gráfico 5.15 – Taxa de infiltração média resultante dos ensaios em: a) calçada miúda e b) calçada grossa.	88
Gráfico 5.16 – Condutividade hidráulica saturada de cada ensaio e valor médio por série de ensaios.	89
Gráfico 5.17 – Comparação entre valores máximos, médios e mínimos de condutividade hidráulica saturada por cada série de ensaios.	90
Gráfico 5.18 – Comparação entre as curvas de infiltração na calçada e no respectivo solo obtidas com base em ensaios com: a) carga variável e b) carga constante.....	91
Gráfico 5.19 – Comparação entre a condutividade hidráulica saturada na calçada e no respectivo solo.....	92

Gráfico 5.20 – Comparação entre os valores de taxa de infiltração final dos pavimentos em calçada ensaiados e os valores obtidos na bibliografia para pavimentos semelhantes (calçada, blocos de betão, grelhas e chão compacto).	94
Gráfico 5.21 – escoamento superficial resultante da simulação de precipitação nos quatro talhões de pavimento.....	95
Gráfico 5.22 – Valores médios de escoamento superficial.	96
Gráfico 5.23 – Caudais máximos escoados ao longo das simulações.....	96
Gráfico 5.24 – Coeficientes de escoamentos de cada uma das simulações.....	97
Gráfico 5.25 – Variação do coeficiente de escoamento consoante a tipologia do pavimento e a orientação das juntas com o escoamento.....	97
Gráfico 5.26 – Comparação entre os valores do coeficiente de escoamento dos pavimentos em calçada ensaiados e os valores constantes na literatura para pavimentos semelhantes (calçada e blocos de betão).....	102

1. INTRODUÇÃO

A construção em zonas urbanas induz alterações no ciclo hidrológico interferindo nos processos que o constituem. O acelerado crescimento urbano e a utilização de pavimentos que impermeabilizam áreas como ruas, estacionamento e passeios reduz a infiltração de água no solo, contribui para a ocorrência de cheias e para a poluição difusa através do transporte de sedimentos e poluentes (e. g., de Lima *et al.*, 2010). Como tal, é importante o conhecimento das perdas envolvidas no processo de precipitação-escoamento que ocorrem nas bacias urbanas, nomeadamente, a intersecção, a transpiração, a evaporação e principalmente a infiltração. Esta última é definida pelo movimento vertical da água em direcção ao interior do solo gerado pela acção da força da gravidade e pelo efeito da capilaridade (e. g., Lencastre *et al.*, 1984). O impacto que as áreas pavimentadas exercem sobre a diminuição da capacidade de infiltração das bacias urbanas implica a concepção de sistemas de drenagem eficientes que contemplem medidas de controlo na fonte, como por exemplo o recurso a pavimentos permeáveis. A utilização destes pavimentos, ao permitir a infiltração, favorece a redução do caudal escoado superficialmente e a melhoria da qualidade da água, contribuindo consequentemente para o aumento da recarga das águas subterrâneas (e. g., Gregory, 2004).

Um dos tipos de pavimentos permeáveis mais utilizados em Portugal é a Calçada à Portuguesa, cuja aplicação variada abrange áreas pedonais, estacionamento e vias públicas, entre outros. Trata-se de um pavimento formado por pedras de várias dimensões, geralmente de calcário e com forma de paralelepípedo, colocadas de modo artesanal cuja flexibilidade de uso resulta por vezes em elaborados padrões decorativos. Este tipo de pavimento originário de Portugal, tal como o nome indica, surgiu no século XIX e encontra-se disseminado um pouco por todo o mundo (e. g., Marta, 2006).

O principal objectivo deste trabalho é a análise, no âmbito da hidrologia urbana, das perdas por infiltração em dois tipos de pavimentos de Calçada à Portuguesa constituídos por calçada miúda e calçada grossa, assentes em fiada. Com base nos ensaios realizados em campo e em laboratório foi verificada a influência da dimensão e da orientação, relativamente à direcção do escoamento, dos elementos de calçada na capacidade de infiltração destes pavimentos.

Nos ensaios de infiltração realizados em campo foi utilizado um infiltrómetro de duplo anel, segundo duas metodologias distintas: carga hidráulica variável e carga hidráulica constante. Estes ensaios permitiram a determinação das taxas de infiltração dos pavimentos, as quais diminuem ao longo do tempo até atingir um valor constante coincidente com a condutividade hidráulica saturada (e. g., Lencastre *et al.*, 1984). Nos ensaios com carga hidráulica variável a taxa de infiltração foi dada pela diminuição do nível de água no anel interior do infiltrómetro. Para a realização dos ensaios com carga hidráulica constante, o nível da água no anel interior do infiltrómetro foi controlado por um reservatório de alimentação graduado. Este trabalho de campo foi complementado com a realização de ensaios de caracterização, não só dos blocos de calçada, através da determinação da percentagem de juntas e da capacidade de absorção

de água, como também das características do solo de base do pavimento. O estudo deste solo integrou a sua análise granulométrica e a determinação da condutividade hidráulica saturada.

Em laboratório foi utilizado o mini-simulador de chuva desenvolvido por Kamphorst (1987) para a análise do escoamento superficial sobre quatro tipos de pavimentos em calçada. Estes resultaram da combinação de pavimentos de calçada miúda ou pavimentos de calçada grossa, dispostos com juntas paralelas à direcção do escoamento ou com juntas a 45° com a direcção do escoamento.

Este trabalho divide-se essencialmente em duas partes, designadamente, através da contextualização do tema (três primeiros capítulos) e da apresentação e análise dos ensaios realizados.

No segundo capítulo, após feita a apresentação introdutória do trabalho, é caracterizado o impacte das zonas urbanas no processo de precipitação-escoamento, evidenciando-se a relevância da utilização dos pavimentos permeáveis, em alternativa aos pavimentos impermeáveis, como medidas de minimização destes efeitos.

A infiltração, sobre a qual versa o conteúdo do trabalho, é enunciada no terceiro capítulo. É realizada a descrição física do fenómeno e são apresentadas as equações que o regem, assim como os equipamentos que permitem a sua determinação. A utilização de cada uma das metodologias para a determinação da infiltração é enquadrada nos estudos existentes no âmbito dos pavimentos permeáveis. No fim deste capítulo é apresentada a compilação da informação recolhida na literatura sobre a taxa de infiltração final e o coeficiente de escoamento dos vários pavimentos permeáveis.

No quarto capítulo descrevem-se os ensaios realizados tanto em campo como em laboratório, apresentando-se os materiais e os métodos utilizados.

Os resultados dos ensaios efectuados são apresentados no quinto capítulo, demonstrando-se as relações entre as características dos pavimentos em calçada (*i. e.*, dimensão e orientação dos blocos) e a sua capacidade de infiltração.

2. PERDAS NO PROCESSO DE PRECIPITAÇÃO-ESCOAMENTO EM ZONAS URBANAS

Nas zonas urbanas as bacias hidrográficas são elementos complexos e com grande variabilidade espacial no que respeita às suas características fisiográficas. As modificações decorrentes do processo de urbanização expressas nas extensas áreas impermeabilizadas e nas alterações à topografia natural geram um significativo impacto no ciclo hidrológico. Justifica-se assim a importância do estudo hidrológico destas áreas para a prevenção de ocorrências indesejáveis provocadas pelo escoamento superficial através da adopção de medidas de minimização dos efeitos negativos gerados pelo processo de urbanização (*e. g.*, de Lima *et al.*, 2010).

2.1. Balanço hidrológico

O ciclo hidrológico é o processo relacionado com o movimento e as trocas de água nos seus diferentes estados físicos que ocorrem continuamente no tempo. Neste processo a água evapora-se dos oceanos e da superfície da terra para passar a fazer parte da atmosfera. O vapor de água que se gera é transportado, sobe, condensa e precipita sobre a terra e os oceanos. A água precipitada pode ser interceptada pela vegetação, formar escoamento superficial ou subterrâneo ou infiltrar-se. Muita da água que é interceptada ou que escoam superficialmente regressa depois à atmosfera por evaporação. A infiltração contribui para a recarga das águas subterrâneas as quais emergem mais tarde à superfície, originando o escoamento superficial (*e. g.*, Ven Te Chow *et al.*, 1988). Este é posteriormente direccionado para os oceanos ou evapora continuando assim o ciclo hidrológico representado na Figura 2.1.

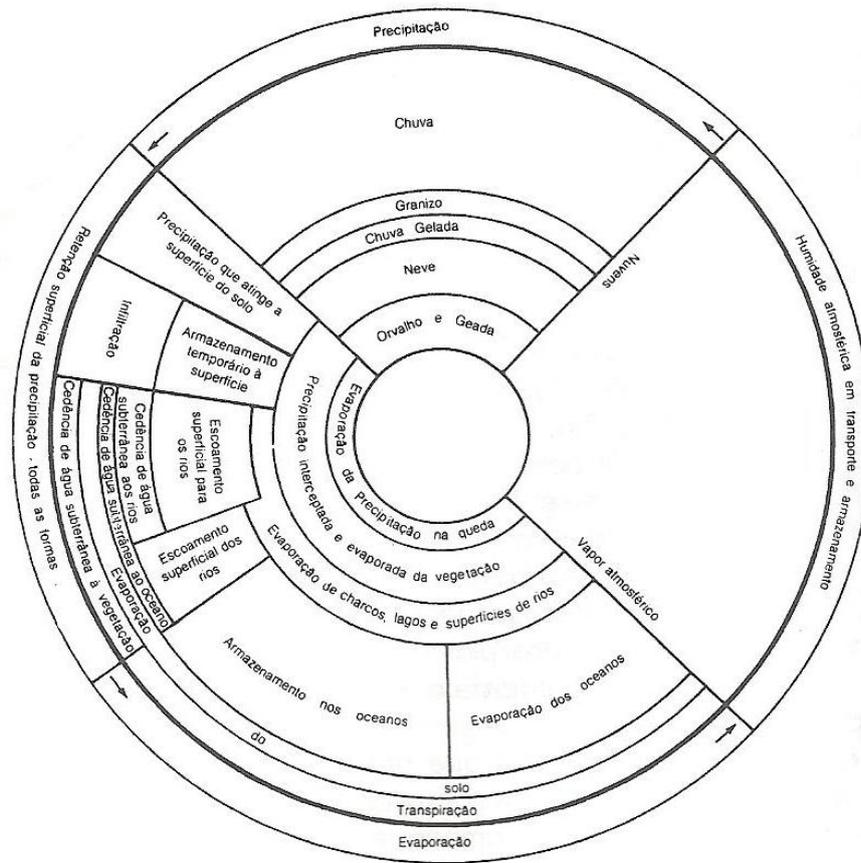


Figura 2.1 – Diagrama de Horton, adaptado de Lencastre *et al.* (1984).

No ciclo hidrológico o princípio da conservação da massa demonstra-se através da equação do balanço hidrológico que relaciona as afluências e efluências de água ocorridas num determinado espaço e período de tempo, com a variação do volume de água no interior desse espaço, durante o intervalo de tempo referido. Assim, a sua equação pode ser apresentada da seguinte forma (e. g., Lencastre *et al.*, 1984):

$$\int_t^{t+\Delta t} q_a(t)dt - \int_t^{t+\Delta t} q_e(t)dt = S(t + \Delta t) - S(t) \quad (2.1)$$

Na Equação (2.1) $q_a(t)$, $q_e(t)$ e $S(t)$ representam as leis de variação com o tempo das afluências, das efluências e do armazenamento de água respectivamente no interior do espaço (e. g., Lencastre *et al.*, 1984).

No processo de precipitação-escoamento as perdas identificadas são a interceptação, a evaporação, a transpiração e a infiltração. Retirando estas perdas à precipitação, obtém-se a parcela que irá provocar o escoamento superficial (e. g., Raghunath, 2006).

2.1.1. Intercepção

A intercepção constitui a parcela de precipitação que é impedida de atingir o solo, sendo que a quantidade de precipitação que é interceptada depende da natureza da cobertura do terreno. Este processo dá-se pela copa das árvores, pela manta morta vegetal assim como pelos telhados, estradas e outros elementos existentes em zonas urbanizadas (e. g., Lencastre *et al.*, 1984). A intersecção é elevada no início da precipitação e decresce gradualmente com o decorrer desta, apresentando valores na ordem de 0.5 mm a 2 mm por chuvada (e. g., Raghunath, 2006).

2.1.2. Evaporação

O processo de passagem da água do estado líquido ao estado gasoso denomina-se de evaporação. Esta ocorre tanto nas massas de água (e. g., lagos, albufeiras de barragens, reservatórios, linhas de água) como também na água existente à superfície do solo, especialmente quando o nível freático se encontra até um metro de profundidade (e. g., Raghunath, 2006). Os factores que a influenciam são: a energia, a diferença de tensão de vapor entre a camada vizinha da superfície de água e a atmosfera, a velocidade do vento, a temperatura do ar e da água e a sua salinidade (e. g., Lencastre *et al.*, 1984). O aumento da temperatura e da velocidade do vento, assim como a redução da humidade e da quantidade de sais dissolvidos conduzem a valores de evaporação mais elevados (e. g., Raghunath, 2006). Segundo Ven Te Chow *et al.* (1988) 61 % da precipitação que ocorre sobre o solo evapora e apenas 39 % gera escoamento.

2.1.3. Transpiração

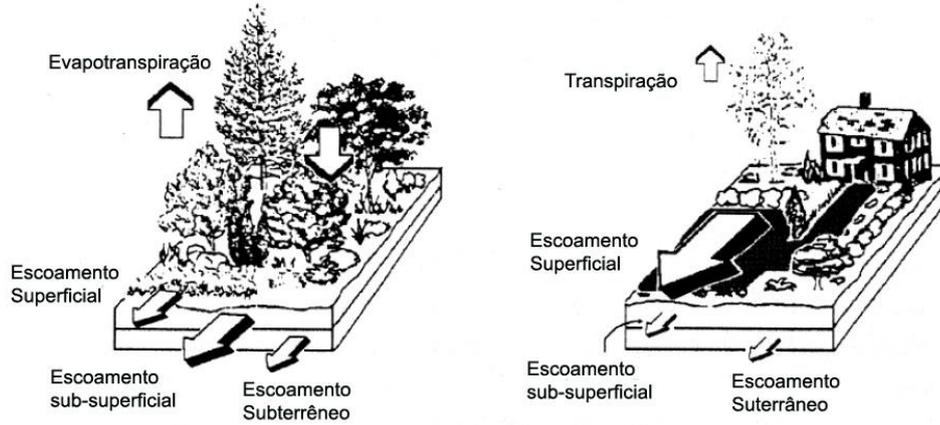
Transpiração é o processo pelo qual o vapor de água se perde a partir das folhas das plantas e é encaminhado para a atmosfera. Esta é uma das maiores causas de perdas em regiões húmidas. Ao conjunto da evaporação e da transpiração denomina-se de evapotranspiração (e. g., Raghunath, 2006). A determinação da evapotranspiração é necessária em diversas áreas, nomeadamente, na hidrologia, na agronomia, na silvicultura, na gestão de rega e na modelação de ecossistemas, entre outras. Devido à complexidade das interações entre o solo, as plantas e a atmosfera, a evapotranspiração é uma das componentes do ciclo hidrológico mais difíceis de determinar (e. g., Xu *et al.*, 2005).

2.1.4. Infiltração

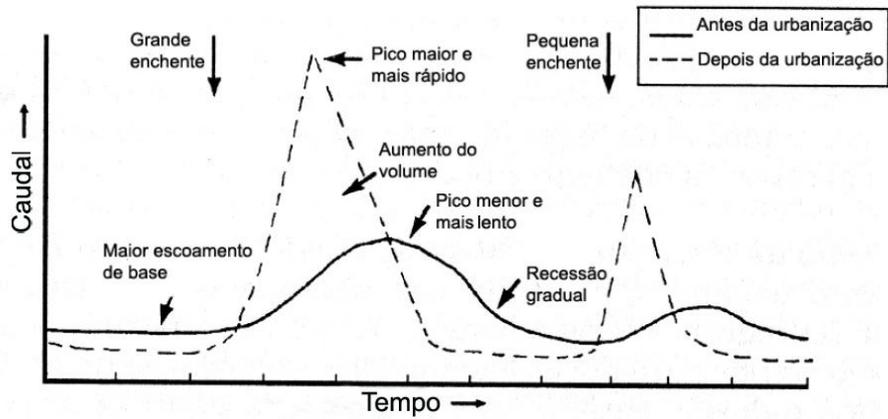
A penetração de água no solo proveniente da superfície denomina-se de infiltração e é uma das mais importantes perdas do ciclo hidrológico. A quantificação da infiltração é importante para a gestão da água (e. g., recarga dos níveis freáticos, rega de culturas), para o dimensionamento de estruturas de drenagem, para a determinação do escoamento superficial e para a implementação de medidas de redução da poluição gerada pelo transporte de sedimentos (e. g., Delleur, 1999). A infiltração é o processo sobre o qual versa este estudo pelo que será desenvolvido de forma aprofundada, juntamente com a apresentação dos ensaios realizados para a sua determinação, no Capítulo 3.

2.2. Impacto da urbanização no ciclo hidrológico

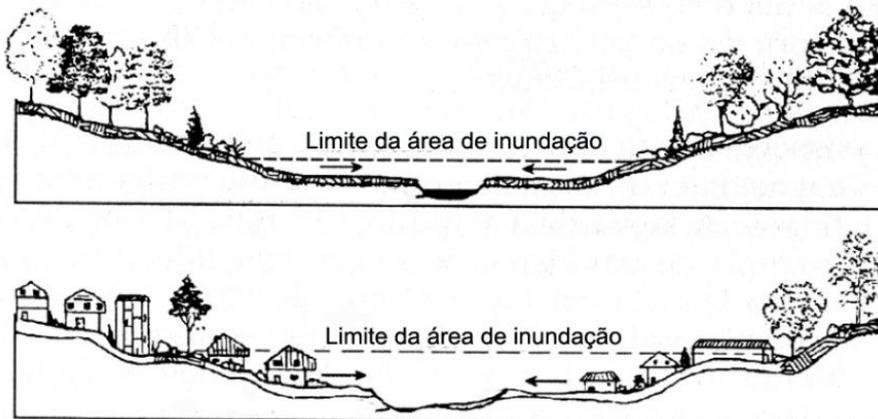
Nas zonas urbanas verifica-se a substituição da vegetação pela construção, impermeabilizando-se grandes superfícies como ruas, estacionamento pavimentados e coberturas de edifícios. Desta forma o processo de urbanização diminui o potencial de infiltração do solo, reduz a recarga dos aquíferos subterrâneos, aumenta o escoamento superficial e reduz a evapotranspiração, interferindo nos processos envolvidos no ciclo hidrológico. Estas estruturas impermeáveis caracterizam-se também por uma baixa rugosidade hidráulica contribuindo para o aumento da velocidade de escoamento superficial e da poluição difusa através do transporte de sedimentos e poluentes (e. g., de Lima *et al.*, 2010). Como consequência destas alterações, verificam-se as cheias, a erosão nos canais de escoamento, o deslizamento de terras, o sub-dimensionamento dos sistemas de drenagem e a destruição de habitats aquáticos (e. g., Booth *et al.*, 1997). Os pavimentos impermeáveis evitam, para além destes aspectos, a evaporação da humidade das camadas de solo impedindo o seu arrefecimento. São geralmente constituídos por materiais de elevada condutibilidade térmica e capacidade de reflexão dos raios solares superior à das superfícies não pavimentadas, pelo que, contribuem para o aumento da temperatura e diminuição da humidade do ar que se faz sentir nas zonas intensamente urbanizadas (e. g., Wang *et al.*, 2010). Este efeito denomina-se de “ilhas de calor” urbanas e deve-se em 90 % aos materiais de construção e apenas em 10 % às emissões de veículos e geração de energia através das diversas actividades em edifícios e fábricas (e. g., Ferguson, 2005). A Figura 2.2 mostra as alterações hidrológicas ocorridas na passagem de uma área rural para uma área urbana (e. g., Moura, 2005).



a)



b)



c)

Figura 2.2 – Impactos devido à urbanização: a) no balanço hídrico, b) no escoamento superficial e c) na resposta da geometria do escoamento, adaptado de Moura (2005).

2.2.1. Medidas de minimização

O crescimento das zonas urbanas implica a implementação de um sistema de drenagem eficiente que contemple medidas de controlo na fonte. Estas medidas passam pela adopção de pavimentos permeáveis nas zonas pavimentadas, e pela criação de estruturas que favoreçam a infiltração, como por exemplo: trincheiras (valas pouco profundas, preenchidas com pedra que servem de reservatório subterrâneo), canais relvados (evitam grandes velocidades de escoamento e consequentemente diminuem a erosão provocada pela água) e bacias de retenção. As bacias de retenção são constituídas essencialmente por espaços abertos onde o escoamento é armazenado e infiltra gradualmente no solo, no entanto este sistema pode apresentar alguns inconvenientes. Segundo Gregory (2004), a aplicação destas soluções na Flórida mostram que a água estagnada nestas áreas é propícia ao desenvolvimento de insectos, crescimento de vegetação e acumulação de resíduos. Como tal, é importante a adopção de medidas que em vez de encaminharem o escoamento superficial para um ponto e o armazenarem em áreas de maior infiltração, compreendam a razão do aumento do escoamento nas zonas urbanas e o reduzam, como por exemplo através da adopção de pavimentos permeáveis como alternativa aos pavimentos impermeáveis.

2.2.1.1 Pavimentos permeáveis

Segundo Ferguson (2005), nas bacias urbanas os pavimentos impermeáveis são responsáveis por dois terços do excesso de escoamento superficial, da diminuição das reservas de água subterrânea e do aumento de temperatura no efeito de “ilha de calor” urbano. Como é possível observar na Figura 2.3 os pavimentos ocupam mais de metade da área urbana construída, como tal, a adopção de pavimentos permeáveis é uma das principais medidas de controlo da água neste meio (e. g., Ferguson, 2005).

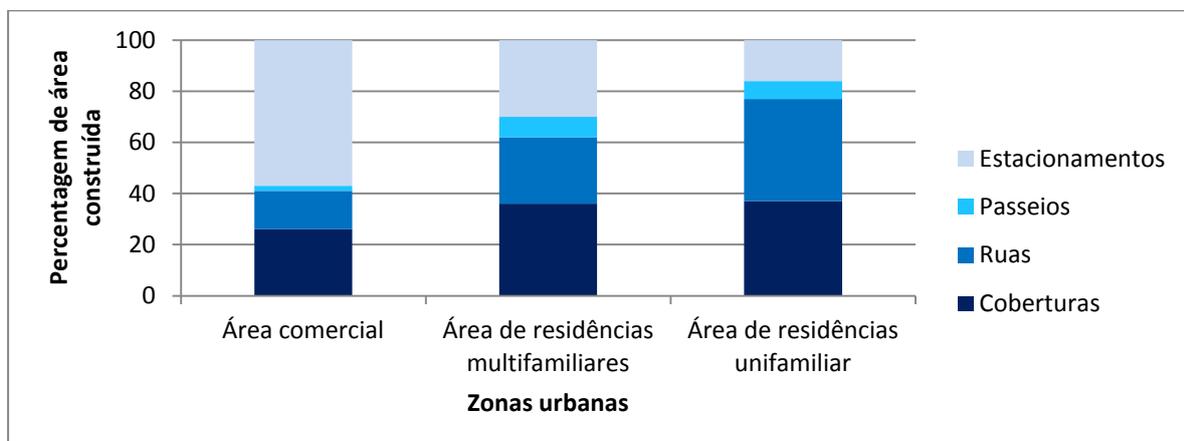


Figura 2.3 – Área construída em espaços urbanos contemporâneos, adaptado de Ferguson (2005).

Os pavimentos permeáveis dividem-se essencialmente em dois tipos, nomeadamente os pavimentos porosos, definidos como aqueles cujo material permite a infiltração da água, e os pavimentos que apesar de não serem constituídos por materiais porosos permitem a infiltração da água através das juntas entre os elementos que os constituem (e. g., Gregory, 2004).

A Figura 2.4 apresenta alguns dos pavimentos permeáveis existentes, onde se inclui a Calçada à Portuguesa, analisada neste estudo:

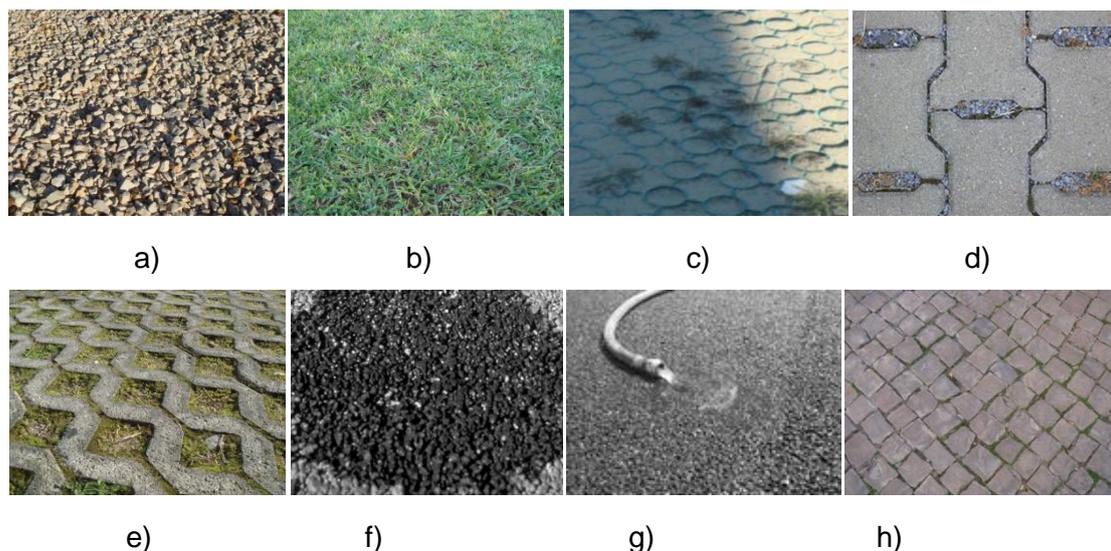


Figura 2.4 – Exemplos de pavimentos permeáveis: a) agregados, b) pavimentos relvados, c) células plásticas, d) blocos com juntas abertas (Illgen *et al.*, 2007), e) grelhas de betão, f) betão poroso (Ferguson, 2005), g) betão betuminoso poroso (Ferguson, 2005) e h) Calçada à Portuguesa.

Os pavimentos permeáveis são geralmente constituídos por diferentes camadas. Primeiramente é opcional a colocação de uma membrana que funcione como filtro sobre o solo de forma a impedir o movimento ascendente das suas partículas. De seguida é adicionada uma camada de agregado grosseiro cujos vazios de grandes dimensões armazenam temporariamente a água aquando do processo de infiltração. Coloca-se depois uma outra camada de material mais fino em cima da qual é assente o revestimento do pavimento. Caso o revestimento seja construído com base em blocos estes são agrupados, com juntas preenchidas com solo, brita ou relva (e. g., Gregory, 2004).

Estes pavimentos contribuem para a manutenção do ciclo hidrológico natural ao permitir a infiltração da água no solo, reduzindo o escoamento superficial e favorecendo a recarga dos lençóis freáticos. Têm também um papel importante no controlo da poluição difusa ao permitir que os poluentes se infiltrem juntamente com a água (desde que em quantidades admissíveis), e sejam filtrados pelo solo. Os pavimentos permeáveis que incorporam relva permitem o arrefecimento da superfície do solo através da evapotranspiração (e. g., Ferguson, 2005). Wang *et al.* (2010) mostraram, através de estudos feitos em diferentes tipos de pavimentos

permeáveis de blocos, que a temperatura superficial era idêntica à temperatura de betão betuminoso comum durante o dia. No entanto, após a precipitação verificaram que os pavimentos permeáveis em situação de saturação poderiam baixar em 8 °C as temperaturas ambientes superiores a 30 °C, durante um dia. Os pavimentos permeáveis contribuem ainda para a segurança na condução em auto-estradas. Pagotto *et al.* (2000) realizou um trabalho experimental numa auto-estrada na França construída com betão betuminoso com mais de 20 % de poros e verificou que este tipo de pavimento, ao diminuir a quantidade de água acumulada na via, não só reduzia as situações de perda de aderência dos pneus das viaturas como também a quantidade de salpicos, melhorando as condições de condução,

Os problemas mais comuns associados ao uso de pavimentos permeáveis incluem a má aplicação e instalação e os assentamentos diferenciais (*e. g.*, Booth *et al.*, 1997). Apesar dos referidos benefícios destes pavimentos, a sua utilização deve ter em conta o local de aplicação. Esta não é indicada em zonas onde prevaleçam demasiados agentes poluidores cuja infiltração possa contaminar aquíferos. O seu uso deve também ser condicionado nos locais onde a existência de elevadas quantidades de sedimentos possa obstruir as suas juntas, diminuindo a eficiência dos pavimentos, ou ainda, em zonas com grandes declives ou sujeitas a elevadas cargas viárias.

Segundo Ferguson (2005) a importância dos pavimentos permeáveis reflecte-se nas várias publicações desenvolvidas com o avanço da tecnologia. A *United States Environmental Protection Agency* suportou pesquisas que culminaram na publicação de diversos livros. A *Florida Concrete and Products Association* publicou diversos guias sobre betão poroso baseado em vários ensaios. Para os blocos e grelhas, diversos produtores incentivaram a investigação tendo o seu trabalho sido divulgado pelo *Interlocking Concrete Pavement Institute*.

2.2.1.2 Pavimentos em Calçada à Portuguesa

A Calçada à Portuguesa é um dos pavimentos permeáveis mais utilizados em Portugal o qual já atravessou fronteiras para Espanha e França entre outros países da União Europeia, Brasil, Austrália, Estados Unidos da América, Macau, Japão e China. Pela importância cultural deste pavimento e pela extensa área que ocupa, graças à possibilidade de aplicação em inúmeros locais, foram avaliadas as suas aptidões como pavimento permeável (*e. g.*, Marta, 2006).

Para uma melhor compreensão das características construtivas deste tipo de pavimento faz-se neste capítulo uma apresentação sumária de acordo com Henriques *et al.* (2009).

A Calçada à Portuguesa é um pavimento composto por paralelepípedos de pedra natural, assentes e dispostos no solo de forma mais ou menos homogénea o qual constitui uma

herança histórica resultante das tecnologias de construção romanas cuja aplicação se generalizou sobretudo no século XX. O grande impulsionador deste tipo de pavimento foi o governador do Castelo de S. Jorge, o tenente general Eusébio Furtado, que entre 1840 e 1846 transformou a fortaleza e os seus arredores em lugares de passeio introduzindo os motivos decorativos e a calçada disposta em mosaico. Originária de Lisboa, a Calçada à Portuguesa é constituída por paralelepípedos geralmente de calcário, material predominante na zona. Os calcários mais explorados para a construção da calçada são os brancos, os cinzentos e os negros, sendo ainda de referir o calcário rosa de uso menos frequente. Para além do calcário é também utilizado o basalto nas regiões onde este predomina, no entanto, o seu uso não é tão comum pois a dureza desta matéria-prima dificulta o corte.

Uma das vantagens deste tipo de pavimento relaciona-se com o facto de poder ser facilmente restaurado sempre que exista a necessidade da sua remoção para a realização de obras em infraestruturas sob ele existentes ou em caso de abatimento do substrato. A sua aplicação estende-se a zonas de circulações de peões assim como a ruas e praças com circulação restrita de veículos.

Os blocos de calçada distinguem-se consoante as suas dimensões, em calçada: grossa, meia pedra, miúda e miudinha. A Tabela 4.1 revela as dimensões dos blocos relacionando-as com a respectiva espessura da camada de base e a largura de juntas.

Tabela 4.1 – Dimensões dos blocos de calçada segundo as tipologias mais comuns e respectivas espessuras de camada de pó-de-pedra, ou de areia, e largura das juntas, adaptado de Henriques *et al.* (2009).

Tipologias	Dimensões dos blocos de calçada	Espessura da camada de pó-de-pedra/areia	Largura das juntas entre as pedras
	(cm)	(cm)	(cm)
Miudinha	4 a 5	4 a 7	0.5
Miúda	5 a 7	7 a 10	0.5 a 1
Meia pedra	9 a 11	10 a 15	0.5 a 1.5
Grossa	12 a 13	10 a 15	0.5 a 2

A construção da calçada nas zonas de circulação viária (*e. g.*, ruas, garagens e estacionamentos) recorre normalmente à utilização de pedra grossa ou meia pedra. A calçada miúda é frequentemente utilizada em passeios e circuitos para peões, enquanto que a calçada miudinha destina-se geralmente a trabalhos artísticos.

O processo da colocação da Calçada Portuguesa envolve diversas fases, nomeadamente:

- Compactação do piso, sendo que, caso este não apresente a coesão necessária deve ser aplicada uma sub-base compactada constituída por agregado britado de granulometria extensa;
- Distribuição de uma camada de pó-de-pedra ou areia para evitar deformações do pavimento e libertação dos blocos;
- Colocação das pedras com juntas de dimensões adequadas para a respectiva tipologia (Figura 2.5). Juntas com dimensão inferior a 5 mm são difíceis de preencher contribuindo para a sensação de oscilação do pavimento durante o caminhar. Por outro lado, juntas de dimensão excessiva diminuem o efeito de travamento das pedras e permitem que estas se soltem mais facilmente;
- Estabelecimento de uma camada de pó-de-pedra, areia ou em algumas situações, mistura de areia e cimento sobre as pedras para o preenchimento das juntas, espalhando-a com vassouras ou rolos. Quando a camada base incorpora cimento este constitui normalmente 25 % do total da mistura;
- Compactação da calçada com placa vibratória, maço ou cilindro. Este procedimento deve ser antecedido pela rega do pavimento que contribui para que o preenchimento de juntas se faça de forma mais eficiente;
- Colocação de areia fina sobre a calçada e escovagem para remoção de sujidades e detritos gerados durante a construção.



a)



b)

Figura 2.5 – Assentamento de calçada miúda: a) passeio e b) elemento decorativo.

Um dos aspectos que caracteriza a Calçada à Portuguesa é a possibilidade de ser assente segundo diferentes padrões (Figura 2.6), nomeadamente:

- Quadrado ou fiada – consiste num trabalho geométrico de alinhamento de pedras de dimensões aproximadamente iguais cobrindo a superfície. Esta é, actualmente, a forma mais comum de assentamento;
- Leque – técnica de aplicação menos frequente constituída por elementos de diferentes formatos dispostos em forma de leque como elementos decorativos;
- Malhete – padrão feito de pedras irregulares e de tamanho variável, aplicadas livremente de modo a encaixarem convenientemente. Trata-se de um tipo de trabalho já em desuso;
- Sextavado – este padrão caracteriza-se pela utilização de pedras com forma hexagonal regular e largura diametral de 5 cm, sendo utilizado no calcetamento artístico.

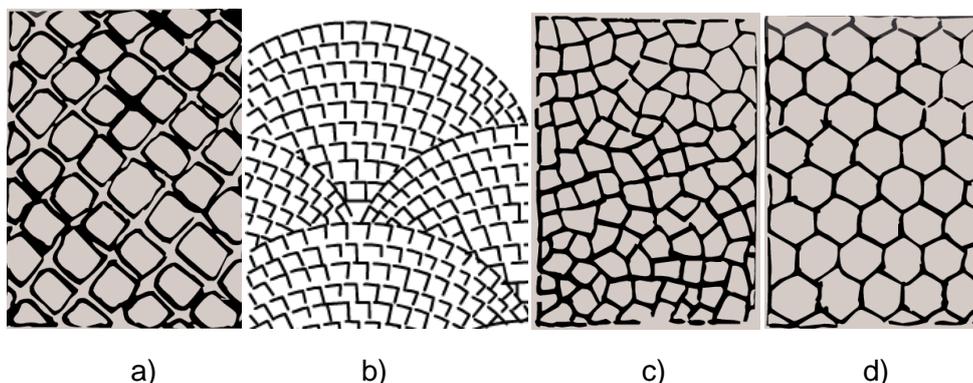


Figura 2.6 – Formas de assentamento de calçada: a) quadrado, b) leque, c) malhete e d) sextavado, adaptado de Henriques *et. al.* (2009).

Tendo em conta a diversidade de pavimentos em calçada existentes adoptaram-se neste estudo as duas tipologias de pavimento em calçada mais comuns dispostas em quadrado, nomeadamente a calçada miúda e a calçada grossa.

As Figuras 2.7 a 2.9 mostram alguns dos padrões e elementos de decorativos em calçada existentes na cidade de Faro.



Figura 2.7 – Elementos decorativos em calçada miúda disposta em fiada.



a)

b)

Figura 2.8 – Pavimento em calçada disposta em quadrado mostrando a utilização de: a) pedra miúda e meia pedra e b) diferentes cores em elemento decorativo.



Figura 2.9 – Elementos decorativos em calçada miúda disposta em malhete.

3. INFILTRAÇÃO

3.1. Escoamento de água no solo

No solo a água escoa através de três importantes processos: infiltração da água superficial, escoamento subsuperficial (ou escoamento não saturado) e escoamento subterrâneo (também denominado de escoamento saturado). Na Figura 3.1 estão esquematizados estes diferentes processos (Ven Te Chow *et al.*, 1988).

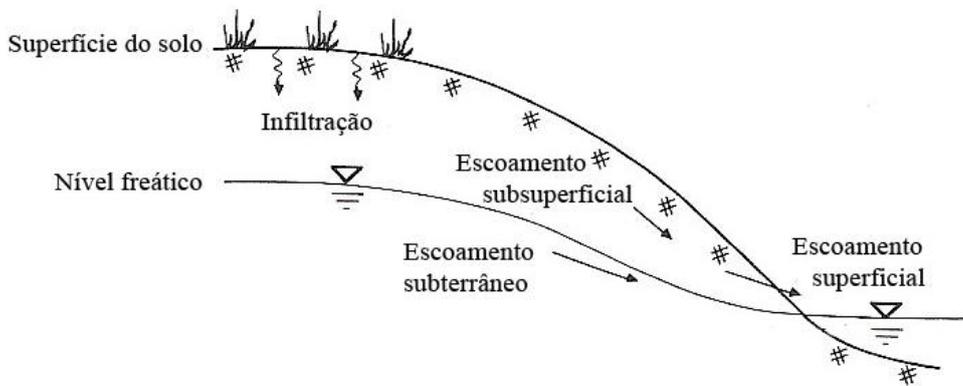


Figura 3.1 – Processos de escoamento de água no solo, adaptado de Ven Te Chow *et al.* (1988).

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica relativa ao processo de infiltração no solo para a sua melhor compreensão no contexto dos ensaios realizados. Apresentam-se também as metodologias mais comuns para a sua determinação dando particular relevância às técnicas adoptadas nos ensaios de campo e nos ensaios laboratoriais realizados no âmbito deste estudo, enquadrando-as ainda nos estudos existentes no âmbito da hidrologia sobre pavimentos permeáveis.

3.1.1. Lei de Darcy

Henry Darcy estabeleceu em 1856 uma lei que rege o escoamento subterrâneo. A experiência realizada por Darcy é esquematizada na Figura 3.2, sendo que, para cada uma das secções [1] e [2] são esquematizadas as respectivas cotas geométricas (z_1) e (z_2) e alturas piezométricas, dependentes estas da pressão em cada ponto (p_1) e (p_2), da massa volúmica do líquido (ρ) e da aceleração da gravidade (g) (e. g., Dieleman *et al.* 1979).

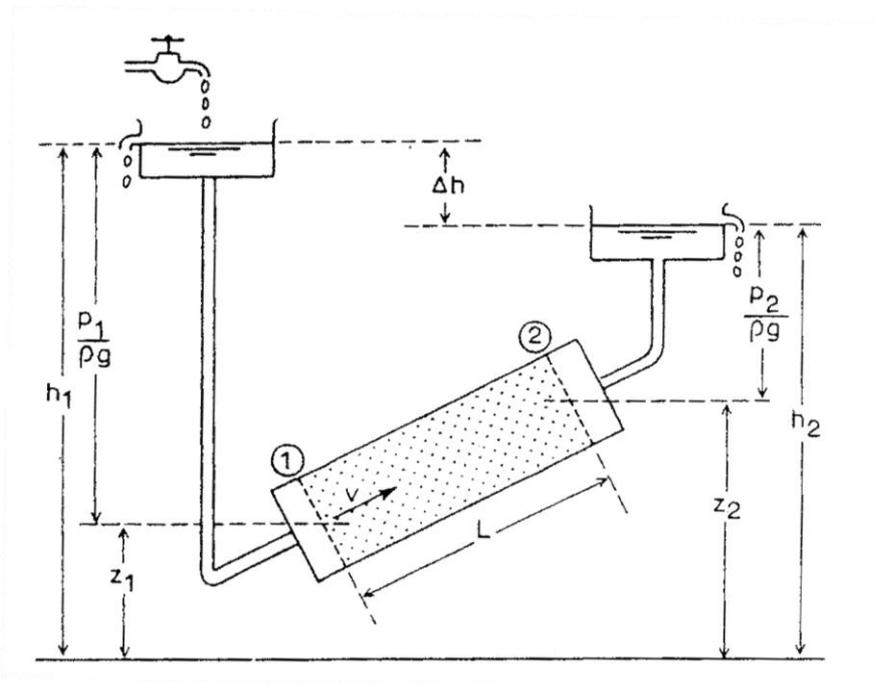


Figura 3.2 – Representação esquemática da experiência de Darcy, adaptado de Dieleman *et al.* (1979).

A Lei de Darcy define que, num sistema unidimensional, o volume de água que passa através de uma amostra de solo por unidade de tempo é directamente proporcional à diferença de carga hidráulica (Δh) entre as secções de entrada [1] e de saída [2] da amostra e à condutividade hidráulica do solo (K), sendo inversamente proporcional ao comprimento da amostra atravessada (e. g., Das, 2008). A referida proporcionalidade é verificável na seguinte expressão matemática (e. g., Dieleman *et al.*, 1979):

$$Q = K \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A \quad (3.1)$$

Sendo:

Q – caudal percolado pela amostra (m^3/s)

K – condutividade hidráulica (m/s)

Δh – diferença de carga hidráulica ($\Delta h = h_1 - h_2$) (m)

L – comprimento da amostra (m)

A – área da secção transversal da amostra (m^2)

O termo $\Delta h/L$ representa a diferença de carga por unidade de comprimento e é denominado de Gradiente Hidráulico (i). Desta forma a Lei de Darcy é apresentada pela Equação (3.2), sendo que V corresponde à Velocidade Média do escoamento da água através do solo saturado e o sinal negativo indica que este se faz na direcção da carga hidráulica decrescente (e. g., Lencastre *et al.*, 1984):

$$V = -K \cdot i \quad (3.2)$$

A Lei de Darcy é válida tanto para solos saturados como para solos não saturados, sendo que, independentemente do grau de saturação do solo a água percola na direcção do gradiente hidráulico (e. g., Smith, 2003; Santos, 2004).

Para um sistema tridimensional Freeze e Cherry desenvolveram a seguinte equação que define o escoamento em solos, denominada de equação de Richard (e. g., Smith, 2003):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[K_x \cdot \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left[K_y \cdot \frac{\partial \psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[K_z \cdot \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (3.3)$$

Sendo:

θ – teor de humidade do solo (percentagem de água existente no solo expressa em função da massa ou do volume de solo seco) (e. g., Delleur, 2008)

ψ – pressão da água nos poros (tensão de sucção gerada pelo potencial de capilaridade) (m) (e. g., Lencastre *et al.*, 1984)

K_x, K_y, K_z – condutividade hidráulica na direcção expressa no índice (m/s)

t – tempo (h)

3.1.2. Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica, também denominada de coeficiente de permeabilidade, corresponde à propriedade do solo que condiciona a facilidade com que a água atravessa os seus poros (e. g., Delleur, 1999). A sua determinação estabelece-se pela comparação entre o escoamento subterrâneo e o escoamento laminar num tubo estreito e circular de raio uniforme. Este último pode ser expresso pela fórmula de Hagen-Poiseuille (e. g., Dieleman *et al.*, 1979):

$$Q = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot g}{8 \cdot \mu} \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (3.4)$$

Sendo:

Q – caudal (m³/s)

R – raio do tubo (m)

ρ – massa volúmica do líquido (kg/m³)

g – aceleração da gravidade (m/s)

μ – viscosidade dinâmica (Pa·s)

Δh – diferença de carga hidráulica (m)

L – comprimento do tubo (m)

Determinando a velocidade de escoamento em função da expressão anterior e comparando-a com a Equação (3.2) obtem-se a equação que traduz a condutividade hidráulica (e. g., Dieleman *et al.*, 1979).

$$K = \frac{d_s^2 \cdot \rho \cdot g}{32 \cdot \mu} \quad (3.5)$$

Em que:

d_s – diâmetro médio dos poros do solo (m)

A condutividade hidráulica depende de vários factores, entre eles (e. g., Delleur, 1999; Bagarello *et al.*, 2007):

- As propriedades do líquido, como a sua viscosidade cujo aumento contribui para a diminuição da condutividade hidráulica e a densidade cujo aumento confere valores de condutividade superiores;
- A percentagem de vazios, uma vez que o seu aumento contribui para um valor mais elevado de condutividade hidráulica;
- A forma e o tamanho das partículas de solo, sendo que os solos granulares apresentam valores de condutibilidade hidráulica superiores aos dos solo finos;

- O teor de humidade, cujo aumento conduz a valores mais elevados de condutividade hidráulica;
- A composição das partículas de solo. Em areias e siltes esta característica não é relevante, no entanto, em argilas é um dos factores mais importantes, aumentando a condutividade hidráulica com a espessura da camada de água higroscópica que envolve as lamelas de solo;
- A estrutura do solo, pelo que os solos granulares finos com uma estrutura homogénea têm um coeficiente de condutividade superior comparativamente com os solos com estrutura dispersa. Por sua vez, a estrutura dos solos é afectada pelo uso do solo, pela actividade dos organismos nele existentes e pelos processos que envolvem a sua compactação.

Tendo em conta os factores que influenciam a condutividade hidráulica é natural que o seu valor apresente diferenças não só entre camadas de solo, como também dentro da própria camada (e. g., Ritzema, 1994). Estas variações de condutividade hidráulica reflectem-se inclusive nas diferentes direcções x, y e z (tal como se verificou na Equação (3.3)) devido à anisotropia dos solos. O grau de anisotropia depende da sua textura, estrutura e porosidade geradas pela deposição do solo e a actividade biológica e predomina nos solos argilosos comparativamente com os solos granulares (e. g., Das, 2008). No entanto, apesar da condutividade hidráulica depender das características particulares de cada solo é possível correlacionar de forma aproximada os seus valores com a textura do mesmo, tal como é indicado na Tabela 3.1 (e. g., Lencastre *et al.*, 1984):

Tabela 3.1 – Valores de condutividade hidráulica de alguns solos típicos, para a água à temperatura de 20°C, adaptado de Lencastre *et al.* (1984).

Tipos de solos	Condutividade hidráulica (mm/h)		
Argila	≤ 0.036		
Silte	0.36	a	18
Areia siltosa	3.6	a	72
Areia fina	36	a	180
Areia (mistura)	180	a	360
Areia grossa	360	a	36000

O máximo valor de condutividade hidráulica denomina-se de Condutividade Hidráulica Saturada (K_s) e é atingido quando o teor de humidade do solo alcança um valor igual à porosidade.

Bagarello *et al.* (2007) utilizaram nos seus ensaios de campo dois infiltrómetros de anel simples, um com carga variável e outro de pressão, porém a condutividade hidráulica pode ser

determinada com base noutras metodologias de campo ou laboratoriais. Castanheira *et al.* (2000) compararam diferentes métodos de determinação da condutividade hidráulica, nomeadamente:

- Furo de sonda invertido, processo a partir do qual se determina essencialmente a componente horizontal da condutividade hidráulica saturada que ocorre através das paredes do tubo;
- Permeâmetro de Guelph, instrumento com o qual se determina a condutividade hidráulica saturada com base num furo feito no solo dentro do qual o nível de água se mantém constante pelo principio da garrafa de Mariotte (*e. g.*, Pott, 2001). Este equipamento permite também medir o potencial matricial e a sorvidade do solo. O potencial matricial é gerado pelos fenómenos de tensão superficial, capilaridade e absorção que resultam da interacção entre as partículas sólidas do solo e a água. Por sua vez, a sorvidade, originalmente denominada de “sorptivity” e traduzida em 1984 por Melo, corresponde a um parâmetro característico do solo dado em função do seu potencial de sucção (*e. g.*, Moura 2005; Silva *et al.*, 2005);
- Infiltrómetro de tensão (também denominado de permeâmetro de disco) no qual a infiltração se processa pela aplicação de uma pressão de sucção;
- Infiltrómetro de anel simples ou duplo, consistindo na colocação sobre o solo de um ou dois anéis metálicos, respectivamente, dentro dos quais é aplicada água para que se possa avaliar o processo de infiltração.

Nos ensaios de campo a condutividade hidráulica foi determinada com base num infiltrómetro de duplo anel.

Castanheira *et al.* (2000) verificaram que os ensaios laboratoriais fornecem valores de condutividade saturada mais elevados do que os obtidos nos métodos de campo. Dos vários equipamentos utilizados o permeâmetro de Guelph foi o que registou os valores mais baixos de condutividade hidráulica saturada.

No Capítulo 3.3.3 serão descritos de forma mais pormenorizada os infiltrómetros aqui referidos.

3.1.2.1 Determinação da condutividade hidráulica com base em infiltrómetros.

Tal como referido no Capítulo 1, nos ensaios de campo realizados foi utilizado um infiltrómetro de duplo anel para a determinação da condutividade hidráulica saturada a partir da velocidade média da água no solo. Com a aplicação de água dentro do infiltrómetro e consequente

infiltração da mesma verifica-se ao longo do tempo a criação de um bolbo de solo saturado delimitado por uma frente molhada que o separa do solo seco (Figura 3.3).

Considerando um ponto por baixo da frente molhada à distância L da superfície do solo a partir da qual a água se infiltra, a carga hidráulica à superfície do solo é dada por $L + h$, sendo h a altura de água no infiltrómetro. Desta forma o gradiente hidráulico (i) corresponde a $(L + h)/L$. Quando a taxa de infiltração se apresenta constante, L possui um valor elevado e o gradiente de velocidade aproxima-se da unidade, pelo que, com base na Lei de Darcy, observa-se que a velocidade média de escoamento (V) no solo saturado coincide com a condutividade hidráulica saturada (e. g., Ritzema, 1994).

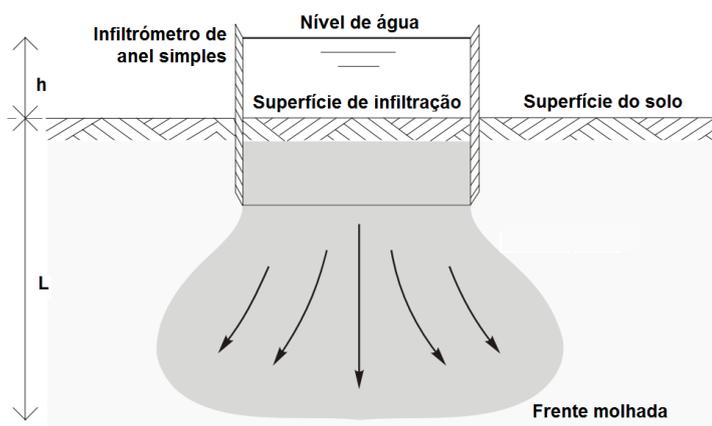


Figura 3.3 – Esquema do processo de infiltração no ensaio com infiltrómetro, adaptado de Ritzema (1994).

3.2. Descrição física da infiltração e equações que a regem

A infiltração é o movimento vertical da água para o interior do solo que ocorre pela acção da força da gravidade e pelo efeito da capilaridade. No processo de infiltração existem diferentes zonas caracterizadas pelo teor de humidade, nomeadamente: a zona de saturação perto da superfície, a zona de transmissão com escoamento não saturado e teor de humidade relativamente homogéneo e uma zona molhada onde o teor de humidade decresce em profundidade. É também possível definir uma frente molhada onde a diferença de teor de humidade do solo é tão grande que se assemelha a uma descontinuidade entre o solo húmido superior e o solo seco inferior (Ven Te Chow *et al.*, 1988). A distribuição do teor de humidade no solo durante o processo de infiltração é apresentada na Figura 3.4.

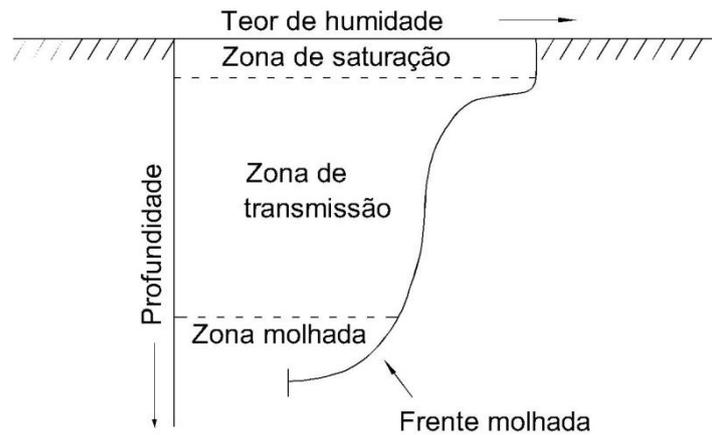


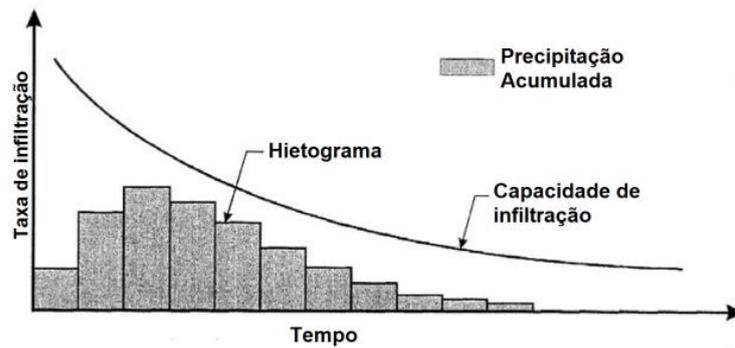
Figura 3.4 – Zonas com diferentes teores de humidade durante a infiltração, adaptado de Ven Te Chow *et al.* (1988).

A taxa segundo a qual a água entra no solo a partir da superfície denomina-se de Taxa de Infiltração (f), por sua vez a altura de água acumulada que se infiltra durante um determinado período designa-se de Infiltração Acumulada (F). Assim a taxa de infiltração corresponde à variação da infiltração acumulada ao longo do tempo (e. g., Ven Te Chow *et al.*, 1988):

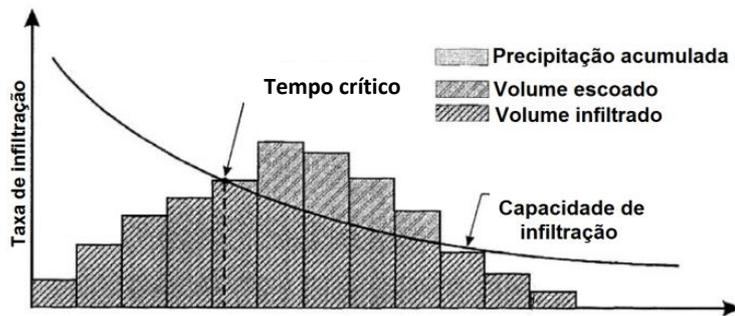
$$f = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3.6)$$

A taxa de infiltração deve ser diferenciada da capacidade de infiltração a qual corresponde à quantidade máxima de água que um solo pode absorver por unidade de tempo. Por sua vez a taxa de infiltração é a quantidade real de água infiltrada no solo por unidade de tempo. Os seus valores coincidem quando a intensidade de precipitação é superior à curva de capacidade de infiltração (e. g., Moura, 2005).

Com o início da precipitação toda a água se infiltra no solo. À medida que a precipitação continua, a capacidade de infiltração do solo diminui. Se a intensidade de precipitação ao longo de todo o evento for constantemente inferior à capacidade de infiltração do solo em cada instante, ocorre a infiltração da totalidade da água (Figura 3.5 a). No entanto se a intensidade de precipitação for superior à capacidade de infiltração dá-se início ao escoamento superficial (Figura 3.5 b). Este pode ser determinado pela diferença entre a infiltração acumulada e a capacidade de infiltração do solo. O ponto a partir do qual se dá o início do escoamento denomina-se Tempo Crítico (e. g., Delleur, 1999).



a)



b)

Figura 3.5 – Diagrama representativo da capacidade de infiltração: a) sem ocorrência de escoamento superficial, b) com a ocorrência de escoamento superficial, adaptado de Delleur (1999).

A Figura 3.6 revela as curvas da taxa de infiltração para os três cenários típicos possíveis durante o processo de infiltração pela acção de precipitação com intensidade constante e para um solo com condutividade hidráulica saturada homogénea. Quando a intensidade de precipitação é inferior à capacidade de infiltração final do solo, independentemente da duração do evento toda a precipitação infiltra-se, pelo que não ocorre escoamento superficial (caso A). Quando a intensidade de precipitação é superior à capacidade de infiltração final, mas ainda não foi atingida a capacidade de infiltração do solo nesse instante, não ocorre escoamento superficial (Caso B). Este dá-se início quando, após decorrido o tempo crítico, é atingida a capacidade de infiltração nesse instante e a partir desse momento a taxa de infiltração continua a descer até atingir um valor constante denominado de Taxa de Infiltração Final (Caso C) (e. g., Moura, 2005).

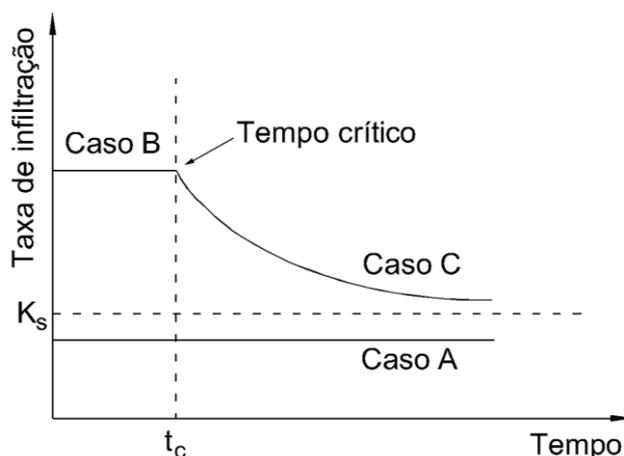


Figura 3.6 – Curvas de taxa de infiltração para os cenários típicos, adaptado de Delleur (1999).

A taxa de infiltração de determinado solo é influenciada por diversos factores entre eles: a intensidade e a duração da precipitação, as características da superfície, a profundidade do nível freático e ainda as propriedades do solo tais como o teor de humidade, a porosidade e o grau de compactação. As características da superfície do solo que influenciam as taxas de infiltração são a inclinação do terreno, a rugosidade, a estrutura, a cobertura por fragmentos rochosos e elementos vegetais, o uso do solo e a formação de crosta superficial (e. g., Martínez-Zavala *et al.*, 2008). A cobertura vegetal protege o solo do impacto da precipitação e provoca alterações biofísicas no mesmo, aumentando a porosidade e favorecendo assim a infiltração (e. g., Raghunath, 2006; de Lima *et al.*, 2010). Os fragmentos rochosos, como partículas minerais com diâmetro de 2 mm ou superior aumentam também a porosidade e rugosidade da superfície contribuindo para a infiltração, fenómeno identificado por Martínez-Zavala *et al.* (2008) nos seus ensaios de campo. A maioria destes factores faz-se sentir tanto no solo como nos pavimentos permeáveis, sendo que, relativamente às características superficiais apenas se aplicam as condicionantes provocadas pelo declive e pela dimensão das juntas, e pelo seu grau de obstrução por processos de compactação e acumulação de solos finos. A importância destas características está patente no trabalho realizado Illgen *et al.* (2007) ao verificar a influência destes factores na capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis.

São várias as equações analíticas e semi-empíricas que descrevem o processo de infiltração em solos homogéneos, entre elas, a equação definida por: Green e Ampt em 1911, Kostiakov em 1932, Horton em 1940, Kostiakov e Lewis em 1945, Philip em 1957, Mein e Larson em 1973, Kao e Hunt em 1996. Destas apenas serão aprofundadas as equações de Green e Ampt, Horton, Kostiakov e Philip por serem as mais frequentemente enunciadas na bibliografia.

3.2.1. Equação de Horton

Horton em 1933, considerando que a infiltração se inicia com uma taxa de infiltração f_0 e decresce até atingir uma taxa de infiltração final constante f_c , descreveu o processo através da seguinte fórmula empírica (e. g., Ven Te Chow *et al.*, 1988):

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t} \quad (3.7)$$

Sendo:

f_0 - taxa de infiltração inicial (m/s)

f_c - taxa de infiltração final, para um tempo tendendo para o infinito (m/s)

k - coeficiente empírico (s^{-1})

f - taxa de infiltração depois do tempo t (m/s)

t - tempo decorrido desde o início da chuva (s)

A infiltração acumulada ao fim de um tempo t é dada por (e. g., Lencastre *et al.*, 1984):

$$F = f_c \cdot t - \frac{f_0 - f_c}{k} \cdot (e^{-k \cdot t} - 1) \quad (3.8)$$

O coeficiente k depende do tipo de solo (e. g., Paixão *et al.*, 2004; Moura, 2005). Segundo Raghunath (2006) esta constante pode ser determinado com base na seguinte expressão:

$$k = \frac{f_0 - f_c}{F_c} \quad (3.9)$$

Correspondendo F_c à área localizada abaixo da curva de infiltração tal como é apresentada na Figura 3.7.

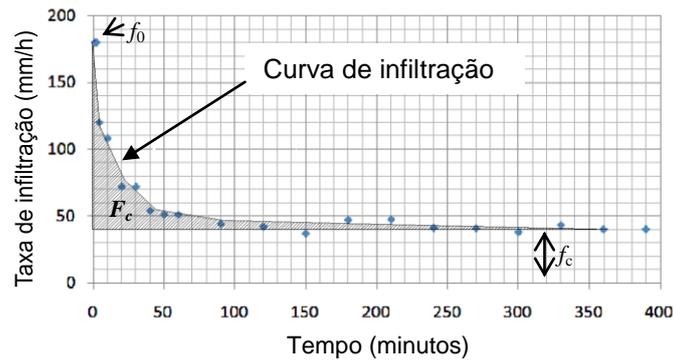


Figura 3.7 – Identificação dos parâmetros necessários ao cálculo da constante k.

Esta equação foi adaptada aos resultados de campo realizados com o infiltrómetro de duplo anel tendo-se determinado o coeficiente k através metodologia descrita.

Paixão *et al.* (2004) comparam os modelos empíricos de Kostiakov e Kostiakov-Lewis com a equação de Horton e verificaram que desta resultavam em média os valores de taxa de infiltração que mais se assemelhavam aos resultados obtidos nos 65 ensaios de campo executados com infiltrómetro de anel simples com carga constante em solos de textura arenosa. A Figura 3.8 mostra os resultados tanto dos ensaios de campo como também dos modelos empíricos analisados por estes autores:

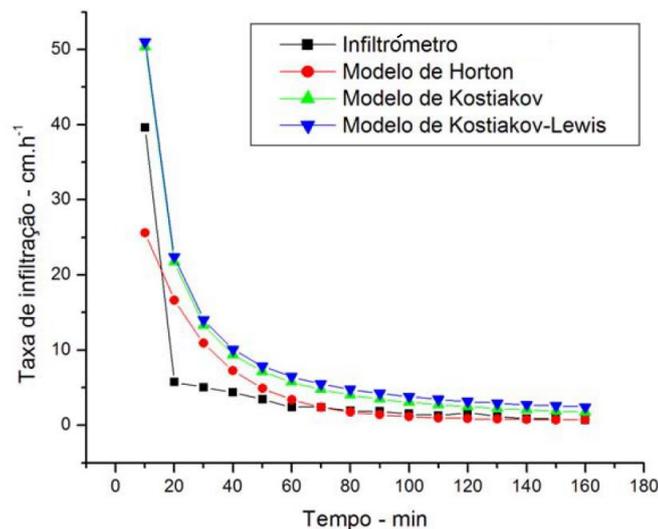


Figura 3.8 – Valores médios de velocidade de infiltração obtidos em campo e calculados por modelos empíricos, adaptado de Paixão (2004).

3.2.2. Equação de Philip

Philip em 1957 desenvolveu a seguinte equação para o cálculo da infiltração acumulada (e. g., Ven Te Chow *et al.*, 1988):

$$F = S \cdot t^{1/2} + K \cdot t \quad (3.10)$$

Sendo:

F – infiltração acumulada (m)

S – sorvidade ($\text{m/s}^{3/2}$)

t – tempo (h)

K – condutividade hidráulica do solo saturado (m/s)

A taxa de infiltração pode ser obtida pela variação da expressão (3.10) ao longo do tempo:

$$f = \frac{1}{2} \cdot S \cdot t^{-1/2} + K \quad (3.11)$$

A taxa de infiltração tende para a condutividade hidráulica à medida que o tempo aumenta (e. g., Gregory, 2004). Os dois termos na equação de Philip representam, respectivamente, o efeito do potencial de sucção do solo e da carga gravítica (e. g., Ven Te Chow *et al.*, 1988). Na Figura 3.9 são apresentadas de forma comparativa as curvas representativas da taxa de infiltração segundo as equações de Philip e Horton.

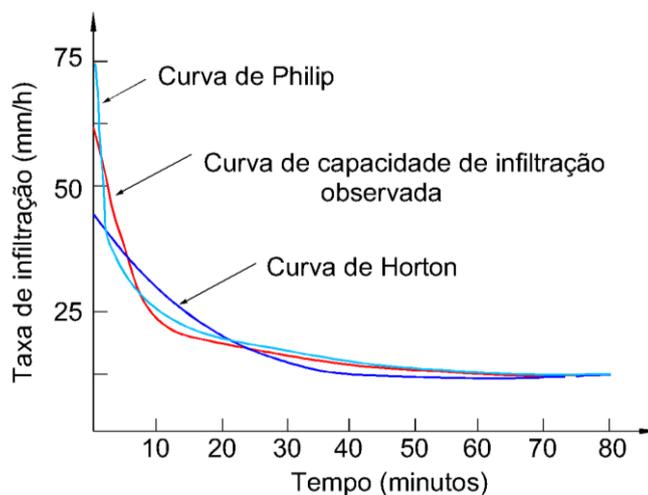


Figura 3.9 – Comparação de curvas teóricas de capacidade de infiltração com a curva observada num solo franco-siltoso a argiloso pesado, inicialmente seco e revestido com uma cobertura herbácea, adaptado de Lencastre *et al.* (1984).

Segundo Paixão *et al.* (2004) Philip descreve o modelo de Horton como relativamente inadequado para representar um decréscimo muito rápido da infiltração mas no entanto propício à representação da realidade para ensaios mais longos.

Moura (2005) realizou ensaios de infiltração com um simulador de chuva em pavimentos e utilizou os seus resultados para determinar as equações de Horton e Philip através do ajuste manual dos parâmetros da equação. Em praticamente todos os ensaios realizados por Moura a equação de Horton apresentou valores mais próximos das taxas de infiltração obtidas através dos ensaios de campo do que a equação de Philip.

3.2.3. Método de Green-Ampt

Green e Ampt representaram, em 1911, a infiltração através de uma simplificação do processo esquematizado na Figura 3.4, considerando para tal a infiltração gerada com base numa carga hidráulica de pequena altura colocada à superfície. Segundo Green e Ampt com o decorrer do processo da infiltração verifica-se a existência de uma zona húmida (englobando a zona de saturação, a zona de transmissão e a zona molhada) que se estende ao longo de toda a profundidade, aumentando o seu teor de humidade para um valor igual ao da porosidade à medida que a frente molhada desce. A separação entre a zona húmida e o solo com teor de humidade inicial é feita pela frente molhada. A taxa de infiltração é então dada pela seguinte expressão (e. g., Ven Te Chow *et al.*, 1988):

$$f = K \cdot \left(\frac{\psi \cdot \Delta\theta}{F} + 1 \right) \quad (3.12)$$

Sendo:

f – taxa de infiltração (m/s)

K – condutividade hidráulica (m/s)

ψ – carga de sucção da água nos poros localizados na frente molhada (m)

$\Delta\theta$ – variação do teor de água no solo, correspondente à porosidade efectiva

F – infiltração acumulada (m)

A Tabela 3.2 apresenta os parâmetros de infiltração do método Green-Ampt para vários tipos de solos.

Tabela 3.2 – Parâmetros de infiltração do método Green-Ampt para vários tipos de solos, adaptado de Ven Te Chow *et al.* (1988).

Tipo de solo	Porosidade efectiva	Carga de sucção na frente molhada (cm)	Condutividade hidráulica (cm/h)
Areia	0.417 (0.354-0.480)	4.95 (0.97-25.36)	11.78
Areia margosa	0.401 (0.329-0.473)	6.13 (1.35-27.94)	2.99
Marga arenosa	0.412 (0.283-0.541)	11.01 (2.67-45.47)	1.09
Marga	0.434 (0.334-0.534)	8.89 (1.33-59.38)	0.34
Marga siltosa	0.486 (0.394-0.578)	16.68 (2.92-95.39)	0.65
Marga argilo arenosa	0.330 (0.235-0.425)	21.85 (4.42-108)	0.15
Marga argilosa	0.309 (0.279-0.501)	20.88 (4.79-91.10)	0.10
Marga argiloso siltosa	0.432 (0.347-0.517)	27.30 (5.67-131.50)	0.10
Argila arenosa	0.321 (0.207-0.435)	23.90 (4.08-140.20)	0.06
Argila siltosa	0.423 (0.334-0.512)	29.22 (6.13-139.40)	0.05
Argila	0.385 (0.269-0.501)	31.63 (6.39-156.50)	0.03

Os números entre parêntesis sob cada parâmetro são um intervalo de valores relativo ao valor fornecido [(Raw *et al.*, 1983) citado em Ven Te Chow *et al.* (1988)]

3.2.4. Modelo de Kostiakov

Em 1932 Kostiakov propôs a seguinte equação empírica para estimar a capacidade de infiltração (e. g., Delleur, 1999):

$$f = a \cdot t^{-b} \quad (3.13)$$

Sendo:

f – taxa de infiltração depois do tempo t (m/s)

a, b – constante empírica

t – tempo decorrido desde o início da chuva (s)

Trata-se de uma equação largamente utilizada graças à sua simplicidade apesar de, para eventos de precipitação bastante longos, projectar taxas de infiltração finais que tendem para zero (e. g., Delleur, 1999).

Silva *et al.* (2005) ajustaram os resultados dos seus ensaios de infiltração realizados em campo num solo mediterrânico a diversas equações (Philip, Green e Ampt, Kostiakov, Kostiakov-Lewis e Horton) verificando que a equação de Kostiakov foi a que melhor se ajustou aos valores obtidos nos vários ensaios. Segundo os autores este facto deveu-se por um lado às características particulares dos ensaios de infiltração (de curta duração) e por outro lado à maior facilidade de adaptação que esta equação apresenta nos processos de optimização matemática, relativamente às outras expressões estudadas.

3.3. Equipamentos de medição de infiltração

Existem várias abordagens para a medição da infiltração, nomeadamente através da análise de hidrogramas de escoamento por acção da precipitação real ou gerada por simuladores de chuva e pelo recurso a infiltrómetros. De seguida descrevem-se estas abordagens enquadrando-as nos estudos realizados em pavimentos permeáveis referidos na bibliografia. No final deste capítulo é apresentado o resumo dos valores de taxas de infiltração finais e coeficientes de escoamento obtidos nos vários estudos assim como as principais conclusões retiradas dos mesmos.

3.3.1. Medição de infiltração com base na precipitação real

A adopção desta metodologia implica a medição precisa dos valores de precipitação (e. g., Ven Te Chow, 1964). Esta técnica não requer a avaliação directa da infiltração em campo mas sim a leitura contínua de caudais de escoamento de uma determinada bacia. Consegue-se com esta técnica de campo determinar a capacidade de infiltração média de áreas mais extensas do que as permitidas pelas restantes metodologias (e. g., Hills, 1970).

Como exemplo dos estudos de infiltração em pavimentos permeáveis com base em precipitações reais pode citar-se o trabalho de Pagotto *et al.* (2000), Brattebo *et al.* (2003), Wang *et al.* (2010) e Ball *et al.* (2010).

Pagotto *et al.* (2000) recolheram dados durante dois anos, após análise de 99 eventos de precipitação com um total de 494 mm de água numa auto-estrada na França, antes e depois de se substituir o pavimento em betão betuminoso de uso corrente por um pavimento de betão betuminoso poroso com mais de 20 % de poros. O betão betuminoso poroso com 30 mm de espessura foi colocado no pavimento de uma ponte sobre uma superfície impermeável. A área de escoamento analisada possuía cerca de 3200 m², correspondendo a uma secção recta com um declive de cerca de 1.2 %. Para cada evento foi registada a duração, a altura de precipitação, a intensidade média, a intensidade máxima num período de 6 minutos e a duração do período seco precedente à precipitação. O escoamento foi recolhido em canais condutores e encaminhado para medição de caudal. Foi também verificado o volume de água drenado, a duração do escoamento, o caudal máximo escoado no canal assim como o tempo de resposta (*i. e.*, intervalo entre o início da chuva e o início do escoamento). Pela análise dos hidrogramas resultantes dos ensaios verificou-se que os tempos de resposta são em média duas vezes superiores no caso do pavimento poroso devido à sua capacidade de armazenamento, o que retarda o escoamento. Este factor conduz também a uma redução do caudal máximo tendo-se registado valores de 6.2 l/s para o pavimento convencional e 5.5 l/s para o pavimento poroso.

Brattebo *et al.* (2004) analisaram a infiltração através dos seguintes tipos de pavimentos: grelha plástica preenchida com gravilha, grelha plástica preenchida com relva, grelhas de betão com relva no interior dos seus vazios e blocos de betão com juntas abertas. Os pavimentos constituíam uma área de oito lugares de estacionamento, com seis anos de uso diário, sobre a qual foi medido não só o escoamento superficial como também o escoamento subsuperficial e registados os valores de precipitação. A recolha de dados foi feita de forma individualizada para cada tipo de pavimento, para o que, cada parcela foi delimitada de forma a garantir que apenas escoasse sobre a sua superfície a água sobre ela precipitada. Os ensaios decorreram durante cerca de 4 meses tendo sido registada uma precipitação total de 570 mm distribuída por 15 eventos. Verificou-se a infiltração quase total em todos os pavimentos registando-se apenas 3 % de volume precipitado escoado superficialmente.

Wang *et al.* (2010) monitorizaram a precipitação sobre o pavimento de uma zona de passeio pedestre em Taiwan durante seis meses registando o escoamento e a infiltração. Testaram vários tipos de pavimentos nomeadamente: pavimentos permeáveis compostos por blocos de material reciclado como cerâmica e vidro, entre outros, e um pavimento composto por uma estrutura com caixa de ar subterrânea para passagem de água, apresentada na Figura 3.10.

Neste estudo os pavimentos apresentaram taxas de infiltração superior a 360 mm/h tendo-se registado uma infiltração de 80 % em eventos de precipitação com menos de 35 mm.

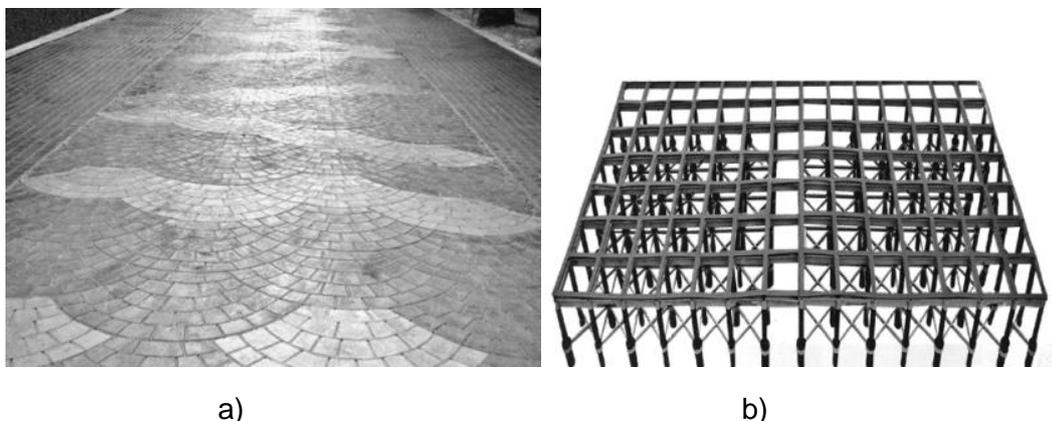


Figura 3.10 – Pavimento permeável em betão com circulação de ar e água: a) concluído e b) estrutura, adaptado de Wang *et al.* (2010).

3.3.2. Simuladores de chuva

Os simuladores de chuva foram descritos por Rowe em 1940, Packer em 1957, Dortignac em 1951, Adams *et al.* em 1957, Bertrand e Parr em 1961, Morin em 1967, Selby em 1970, DePloey *et al.* em 1976, Luk *et al.* em 1986 e Bowyer-Bower e Burt em 1989 (*e. g.*, Hills, 1970; Andersen *et al.*, 1999).

Com base na recolha do escoamento superficial resultante da utilização de um simulador de chuva obtém-se o hidrograma da chuva simulada. A capacidade de infiltração, por sua vez, pode ser obtida através da diferença entre a intensidade de precipitação e o caudal escoado (Figura 3.11) (*e. g.*, Hills, 1970; Martínez-Zavala *et al.* 2008).

A Figura 3.11 mostra a relação entre a infiltração e o escoamento superficial em função do tempo, para uma chuva constante onde se podem identificar as seguintes fases (*e. g.*, Moura, 2005):

- Escoamento nulo: fase correspondente ao tempo de crítico, na qual todo o volume precipitado infiltra-se no solo ou acumula-se nas suas depressões;
- Ascensão, fase durante a qual ocorre o aumento do caudal escoado devido à diminuição da taxa de infiltração, e ao aumento da altura média da lâmina de água em movimento na parcela;

- Escoamento constante: em que o valor máximo do caudal é constante durante este período;
- Recessão: fase correspondente ao esvaziamento com conseqüente decréscimo do escoamento superficial após terminar a precipitação.

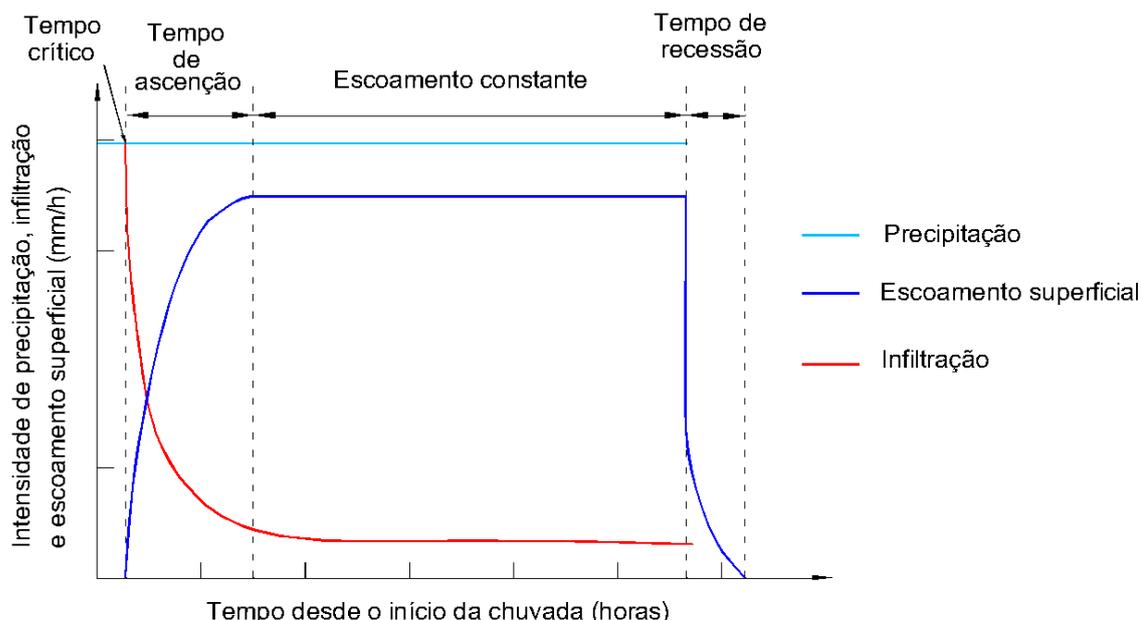


Figura 3.11 – Hidrograma e curva de infiltração resultantes de uma precipitação constante, adaptado de Lencastre *et al.* (1984)

Com base no hidrograma correspondente ao escoamento superficial e conhecendo-se a intensidade e a duração da precipitação que o origina é possível determinar o Coeficiente de Escoamento (*e. g.*, Titos *et al.*, 1997). Este corresponde ao quociente entre o volume escoado e o volume precipitado, dependendo da infiltração, da evaporação e da interceptação (*e. g.*, Moura, 2005). Para além da determinação deste coeficiente os simuladores de chuva são também utilizados na avaliação das relações entre as diversas variáveis como a precipitação, as características do solo, a sua cobertura vegetal, a microtopografia e a erosão (*e. g.*, Titos *et al.*, 1997).

Em 1958 Meyer e McCune, entre outros investigadores, estabeleceram as características preconizadas para os simuladores, nomeadamente (*e. g.*, Titos *et al.*, 1997):

- Criação de gotas de tamanho e velocidade terminal de queda semelhantes às da chuva natural, sendo que relação entre a energia cinética da precipitação simulada e da chuvada real deve superior a 75 % (*e. g.*, Sobrinho *et al.*, 2002);

- Produção de precipitação composta por gotas perfazendo todas o mesmo ângulo de impacto com a superfície de solo;
- Simulação da chuva fixando valores de intensidade e duração;
- Aplicação da chuva de forma uniforme sobre toda a área em estudo e de modo contínuo;
- Possibilidade de mobilidade dos simuladores;
- Capacidade de simulação sobre áreas preferencialmente superiores a 0.50 m², pois segundo Sobrinho *et al.* (2002) áreas inferiores reduzem a representatividade dos resultados.

Os simuladores de chuva dividem-se essencialmente em três grupos:

- Sistemas de nebulizadores (aspersores) - Caracterizam-se pela criação de precipitação a partir de um ou mais nebulizadores, sendo a intensidade de precipitação controlada através da pressão de funcionamento (e. g., Andersen *et al.*, 1999). Na Figura 3.12 é esquematizado um sistema com três nebulizadores.

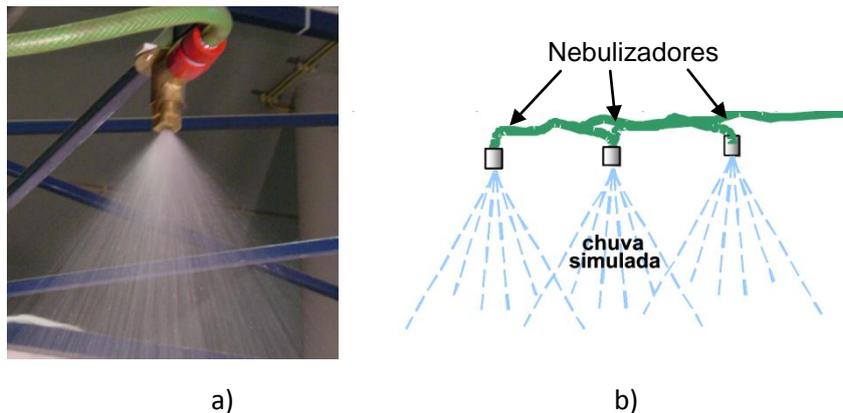


Figura 3.12 – Vista de nebulizadores: a) real e b) esquemática, adaptado de de Lima *et al.* (2002).

- Sistemas rotativos - Baseiam-se nos desenhos de Morin, Goldberg e Seginer que em 1967 criaram um simulador, aplicável a áreas quadradas com 1.5 m de lado, com um disco giratório (com ranhuras) situado por baixo da abertura de saída de água. A intensidade da chuva era controlada com base na pressão da água e no ângulo de abertura das ranhuras (e. g., Titos *et al.*, 1997). Os sistemas de rotação permitem a distribuição da precipitação sobre áreas maiores do que os sistemas fixos, no entanto a intensidade de precipitação diminui com a distância ao ponto de rotação, problema que pode ser controlado pela criação de vários pontos de rotação com nebulizadores, analisando os respectivos raios de acção (e. g., Andersen *et al.*, 1999). A Figura 3.13

mostra o simulador de rotação utilizado por Moura (2005) nos seus ensaios sobre pavimentos permeáveis.

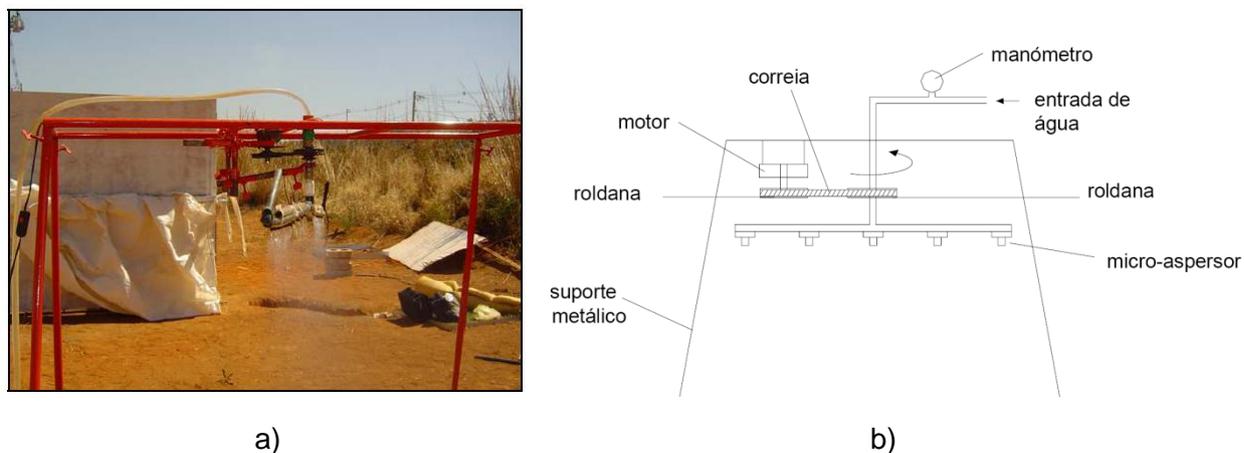


Figura 3.13 – Exemplo de simulador de chuva rotativo: a) fotografia e b) esquema, adaptado de Moura (2005).

- Sistemas de gotejamento – Sistema utilizado essencialmente sobre áreas de reduzida dimensão no qual as gotas se formam a partir de pequenos capilares ou agulhas hipodérmicas. A maior desvantagem destes equipamentos relaciona-se com a dificuldade de colocação do elemento formador de gotas a uma altura adequada de forma a permitir que estas atinjam uma velocidade representativa da precipitação real (e. g., Andersen *et al.*, 1999). O reduzido tamanho destes simuladores é a sua maior vantagem, facilitando-se o seu transporte para campo (e. g., Titos *et al.*, 1997). Neste tipo de sistemas enquadra-se o mini-simulador desenvolvido por Kamphorst (1987) e fabricado por Eijkelkamp – Agrisearch Equipment utilizado nos ensaios laboratoriais realizados no âmbito deste trabalho.

3.3.2.1 Mini-simulador de chuva

Estes simuladores podem ser utilizados não só em laboratório como também em campo para a determinação da infiltração e das características de erosão das superfícies sobre as quais são aplicados. Trata-se do simulador mais pequeno da série de simuladores desenvolvidos pela Universidade de Agricultura de Wageningen nos Países Baixos (Eijkelkamp, 2005).

Na Figura 3.14 observa-se a aplicação deste mini-simulador aos ensaios de campo em solo, para o qual foi originalmente desenvolvido. A sua aplicação ao estudo do escoamento sobre

pavimentos em laboratório implicou algumas modificações da estrutura de apoio ao mini-simulador tal como se descreve no Capítulo 4.1.2.3. Para a utilização sobre o solo, em campo, a estrutura que compõe o mini-simulador é constituída essencialmente por três elementos (Kamphorst, 1987):

- Elemento A, o qual corresponde ao simulador propriamente dito, que consiste num reservatório com base composta por capilares, a partir dos quais são formadas as gotas, e um tubo de arejamento regulador da carga hidráulica baseado no princípio da garrafa de Mariotte para o controlo da intensidade de precipitação. Esta técnica permite que a carga hidráulica sobre a placa formadora de gotas seja definida pela posição do tubo de arejamento e não pelo nível da água no reservatório, garantindo-se assim um caudal constante através dos capilares. Para que se consiga uma adequada distribuição da chuva deve ser promovido o movimento da base formadora de gotas no plano horizontal;
- Elemento B, que consiste num suporte para o reservatório de produção de precipitação que confere também protecção ao vento.
- Elemento C, composto por uma moldura metálica cravada no solo cuja finalidade é impedir os movimentos laterais do escoamento superficial e encaminhá-lo para um único ponto de recolha.

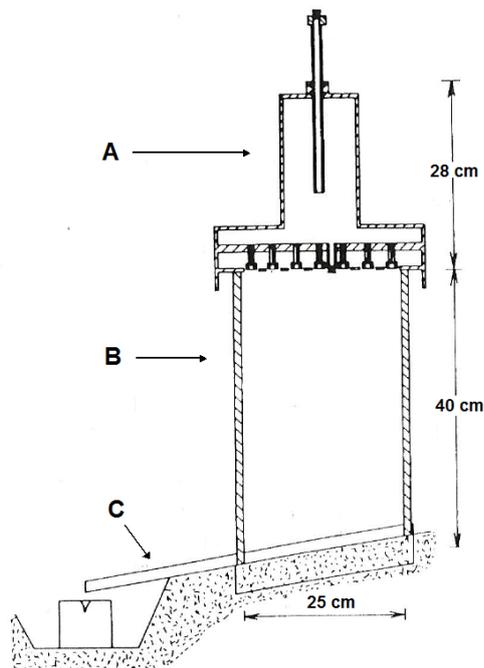


Figura 3.14 – Representação em corte do mini-simulador, adaptado de Kamphorst (1987).

Schiettecatte *et al.* (2005) realizaram ensaios de campo em solos com o mini-simulador de Kamphorst e um simulador de chuva de nebulizadores, verificando que o primeiro conduz a taxas de infiltração superiores por ser aplicado a uma área menor sendo mais significativa a perturbação gerada ao cravar a moldura metálica para recolha da água. Desta forma, as taxas de infiltração determinadas com recurso a simuladores de chuva de nebulizadores aproximam-se mais da realidade.

3.3.2.2 Exemplos da aplicação de simuladores de chuva ao estudo de pavimentos

São exemplos da aplicação de simuladores de chuva ao estudo da infiltração em pavimentos permeáveis os trabalhos feitos por Andersen *et al.* (1999), Araújo *et al.* (2000), Moura (2005), Alessi *et al.* (2006) e Illgen *et al.* (2007).

Andersen *et al.* (1999) utilizaram um simulador de chuva em laboratório para estudar um modelo à escala real de um lugar de estacionamento revestido por pavimento permeável. O modelo foi sujeito a simulações de eventos de precipitação com diferentes intensidades e durações tendo o processo hidrológico sido monitorizado durante um período de dezoito meses. Os resultados demonstraram que a evaporação, drenagem e retenção são bastante influenciadas pelo material que compõe a camada de base do pavimento e pela capacidade de retenção de água por parte dos blocos de revestimento. Os resultados revelaram que em média 55 % do volume precipitado pode ser retido na estrutura que compõe o pavimento, considerando uma precipitação com 15 mm/h de intensidade durante uma hora. Para uma precipitação com características idênticas, simulada após 72 h, a capacidade de retenção do volume precipitado por parte do pavimento foi de 30 %.

Araújo *et al.* (2000) efectuaram simulações de chuva com duração de 10 minutos e intensidade de 110 mm/h em módulos com 1 m² de área compostos por diferentes tipos de pavimentos urbanos: solo compactado, pavimento impermeável de betão, calçada, blocos de betão industrializado, blocos de betão vazados preenchidos com areia e pavimento de betão poroso. O pavimento em calçada apresentou um coeficiente de escoamento de 0.60, 11 % inferior ao obtido no solo compactado. O volume de escoamento na calçada apresentou-se também inferior ao escoado no pavimento de blocos de betão. As possíveis causas para tal diferença foram: a maior percentagem de área de juntas, o facto do pavimento de calçada ser mais irregular e a possibilidade de ocorrência de fuga de água através do elemento metálico que tinha como objectivo a delimitação da área de estudo. A irregularidade do pavimento causada por depressões nas juntas contribuiu para o aumento da capacidade de retenção de água

Moura (2005) utilizou simuladores de chuva em parcelas experimentais também de 1 m² para avaliar o escoamento superficial e a taxa de infiltração em terreno compactado, blocos maciços, blocos vazados e terreno relvado. O simulador utilizado neste estudo caracterizou-se pelo movimento rotacional de 22 aspersores distanciados de forma diferente para que fosse conseguida uma distribuição uniforme da precipitação. Este simulador permitiu fixar as intensidades de precipitação a serem simuladas ente 50 mm/h e 200 mm/h. Para cada parcela experimental foram realizadas simulações com pelo menos duas intensidades diferentes de precipitação. Os resultados revelaram que a superfície relvada apresenta um valor de infiltração final de 88 mm/h. Por sua vez o solo compactado contribui bastante para o aumento do escoamento superficial pelo que a taxa de infiltração final obtida foi de 38 mm/h. As superfícies de blocos vazados apresentaram-se bastante eficientes no controlo do escoamento superficial, revelando valores elevados de infiltração que são apresentados na tabela resumo do presente capítulo (Tabela 3.3). Observou-se ainda que a compactação do material de base do pavimento, os maiores declives, a colmatção da superfície por sedimentos e a passagem de veículos contribuíram para o aumento do coeficiente de escoamento.

Alessi *et al.* (2006) utilizaram simuladores de chuva para avaliarem o coeficiente de escoamento superficial gerado por dois tipos de pavimentos permeáveis: pavimentos revestidos por blocos de betão e asfalto poroso. Foram realizadas simulações de precipitações com intensidades variáveis sobre uma área de 1 m² de pavimento. O simulador utilizado foi constituído por uma armação rectangular, apoiada sobre quatro pernas de alturas reguláveis (1.5 m a 2.5 m) sobre a superfície dos pavimentos. As quatro faces laterais da armação foram cobertas por plásticos para minimizar o efeito do vento sobre as gotas de chuva. Na parte superior do simulador foi fixado um sistema de tubulações perfurado uniformemente para geração das gotas de chuva. Os resultados obtidos mostraram um desempenho idêntico para os dois tipos de pavimentos. Os valores de coeficiente de escoamento superficial médios para o pavimento de blocos de betão e asfalto poroso foram de 0.37 e 0.35 respectivamente.

Illgen *et al.* (2007) analisaram o escoamento superficial e a infiltração em pavimentos permeáveis de pequenas dimensões. A metodologia do estudo baseou-se na elaboração de ensaios de campo e laboratoriais assim como a simulação por elementos finitos. Foram ensaiados vários pavimentos, nomeadamente blocos comuns de betão, lajetas de betão com pequenas juntas, blocos justapostos e calçada com juntas não uniformes. Em laboratório foram feitos cerca de 120 testes com diferentes condições de fronteira para cada tipo de pavimento. Foi analisada a intensidade de precipitação, períodos de seca, variados níveis de obstruções de superfície, diferentes declives e diferentes características de material de base. Foi ainda utilizado um programa baseado em elementos finitos para modelar o movimento de água, calor e vários solutos no meio poroso em duas dimensões. Relativamente à infiltração na calçada os resultados de Illgen *et al.* (2007) mostram valores de taxa de infiltração final na ordem dos 79 mm/h. Os resultados dos ensaios em calçada são apresentados na Figura 3.15.

Os resultados dos diferentes ensaios demonstraram bastante variabilidade no espaço e no tempo. Segundo estes autores, os factores que influenciam a capacidade de infiltração, são os seguintes:

- O nível de obstrução das juntas, sendo este o factor de maior importância;
- A intensidade de precipitação, apesar de, para pavimentos com grande nível de obstrução a infiltração ser sensivelmente independente da intensidade de precipitação;
- O tamanho das aberturas, pois pavimentos de blocos com ranhuras de 7 a 10 mm têm grandes capacidades de infiltração;
- O declive, que só é importante para pavimentos com permeabilidade baixa;
- A capacidade de infiltração do material das juntas;
- A duração da chuva, sendo que esta apenas é importante em eventos de curta duração. A capacidade de infiltração dos pavimentos diminui nos primeiros 30 minutos e depois mantém-se sensivelmente constante.

Pela análise dos vários ensaios foi verificado que os coeficientes de escoamento não são um valor fixo pois dependem da intensidade da precipitação, e do estado de obstrução do pavimento.

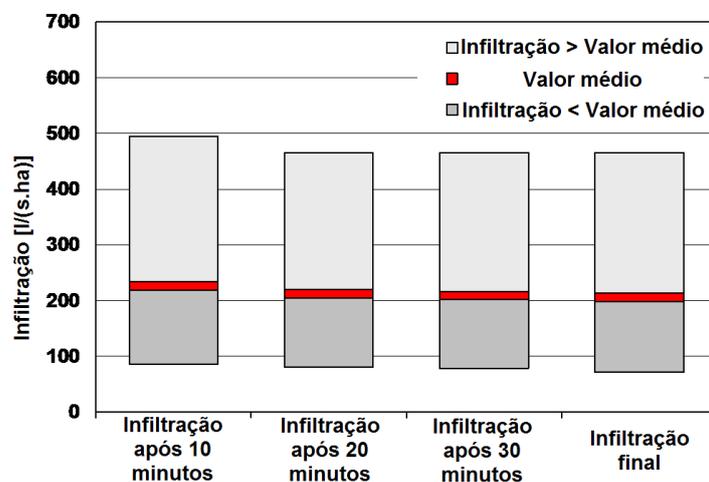


Figura 3.15 – Ensaio de infiltração na calçada, adaptado de Illgen *et al.* (2007)

3.3.3. Infiltrómetros de inundação

Os ensaios com infiltrómetros consistem na deposição de água num cilindro sem fundo, que funciona simultaneamente como fronteira do ensaio e reservatório, e medição da perda de água através do solo a partir da qual se determina a taxa de infiltração (e. g., Hills, 1970). Os infiltrómetros foram concebidos para a determinação da taxa de infiltração no solo sobre o qual são cravados, como tal a sua aplicação em pavimentos requereu algumas adaptações. Esta metodologia não simula o efeito gerado pela queda das gotas de água na superfície como tal considera-se que consiste na medição da penetração da água em condições controladas. No entanto esta técnica é muito utilizada graças às suas vantagens, nomeadamente: permite as medições *in situ* evitando os problemas relacionados com a recolha e transporte das amostras sendo também mais simples, económico, fácil de transportar e necessitando menos quantidade de água do que os simuladores de chuva (e. g., Filguera *et al.*, 2006).

As desvantagens apresentadas pelos infiltrómetros são (e. g., Hills, 1970):

- A alteração da estrutura do solo por acção da colocação dos infiltrómetros (não aplicável aos ensaios em pavimentos);
- O escoamento lateral em movimentos não verticais, cujo problema pode ser contornar das seguintes formas:
 - Utilizar um duplo cilindro à volta no cilindro central de forma a criar uma zona de barreira limitando assim a infiltração do anel interior a movimentos verticais (e. g., Gregory *et al.*, 2005). Castanheira *et al.* (2000) verificaram que os resultados obtidos nos seus ensaios apresentavam um desvio padrão menor com a utilização do infiltrómetro de duplo anel do que com o infiltrómetro de anel simples. Esta metodologia implica o uso de maiores quantidades de água comparativamente com as restantes, no entanto foi a utilizada nos ensaios de campo realizados no âmbito deste trabalho;
 - Escavar secções à volta da área onde o teste é efectuado para a análise virtual do bolbo de humidade provocado pelo ensaio e recolha de amostras. Esta técnica foi utilizada por Marshall e Stricker em 1950 no entanto não é viável em ensaios em pavimentos existentes pois implicaria a destruição destes;
 - Aumentar o diâmetro do cilindro usado para que a quantidade de água infiltrada lateralmente seja desprezável em relação à área onde ocorre infiltração vertical. Esta metodologia tem as desvantagens de necessitar de maior quantidade de água e de gerar uma maior perturbação do solo aquando da colocação dos infiltrómetros. Segundo Gregory *et al.* (2005) um anel com 15 cm de diâmetro produz resultados com aproximadamente 30 % de erro enquanto que infiltrómetros com 50 cm de diâmetro produzem erros de aproximadamente 20 %

comparativamente com os valores que seriam obtidos com um infiltrómetro de diâmetro infinito;

- Calibrar as curvas de infiltração para os infiltrómetros de forma a corrigir o valor da taxa de infiltração obtida em campo. Este método implica trabalho de laboratório através da recolha de amostras de solo e ensaios de infiltração com diferentes tamanhos de cilindros de forma a estabelecer uma correlação entre valores e poder extrapolar a taxa de infiltração para um cilindro de tamanho infinito. No entanto esta metodologia apresenta também algum erro, uma vez que não considera a forma gerada pelo bolbo de infiltração *in situ*.
- A drenagem de água na superfície de contacto entre o solo e o infiltrómetro como consequência da introdução de ar no solo devido ao movimento de inserção do infiltrómetro (não aplicável aos ensaios em pavimentos);
- O facto de não simular o efeito da energia cinética das gotas da precipitação, no entanto este é mais relevante em solo recentemente cultivado do que em solos cobertos, como é o caso dos pavimentos.

Os infiltrómetros de inundação permitem um bom controlo da carga hidráulica. De seguida apresentam-se os infiltrómetros de inundação mais comuns:

- Tubos, constituídos por cilíndricos com geralmente cerca de 23 cm de diâmetro e 46 cm a 61 cm de comprimento, cravados no solo até uma profundidade de 38 cm a 53 cm. A água é posteriormente colocada a partir de provetas graduadas de forma a manter uma carga constante. A determinação da infiltração é conseguida pelas leituras consecutivas dos valores da proveta (e. g., Ven Te Chow, 1964). A Figura 3.16 apresenta o esquema deste equipamento no solo pelo que naturalmente se observa que a sua utilização em pavimentos existentes não é viável;

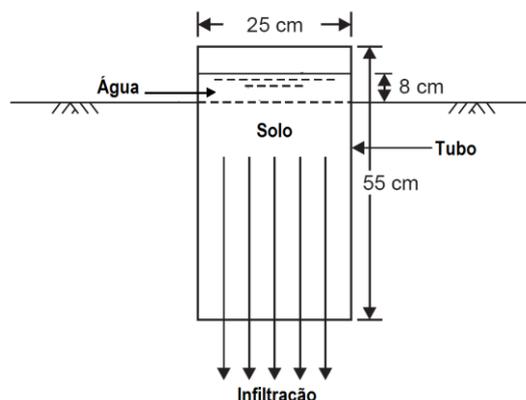


Figura 3.16 – Esquema de aplicação de infiltrómetro de tubo, adaptado de Raghunath (2006).

- Infiltrómetros de tensão, também conhecidos como permeâmetros de disco, podendo possuir um ou dois discos. O infiltrómetro de disco único (Figura 3.17) é composto essencialmente por dois reservatórios, um para o abastecimento de água necessária ao processo de infiltração e outro de despressurização. Este último possui uma ligação ao exterior e outra ao reservatório de abastecimento, o qual, por sua vez, está ligado ao disco que se encontra em contacto com o solo. As medições da infiltração são feitas com base nas variações de nível de água registadas no reservatório de abastecimento. Este infiltrómetro permite assim realizar medições de infiltração sujeitas a um potencial negativo pelo que a água infiltra no solo mais lentamente do que nos infiltrómetros de anel em que esta é colocada à superfície do terreno. Desta forma é possível controlar de forma diferenciada a infiltração de água nos vazios que constituem o solo (e. g., Pott, 2001). Bagarello *et al.* (2007) compararam com base em ensaios de campo um infiltrómetro de tensão de anel simples com um infiltrómetro de anel simples com carga variável e verificaram que os resultados de ambos eram bastante semelhantes. Desta forma o infiltrómetro de anel simples com carga variável é uma técnica bastante vantajosa pela sua simplicidade de execução.

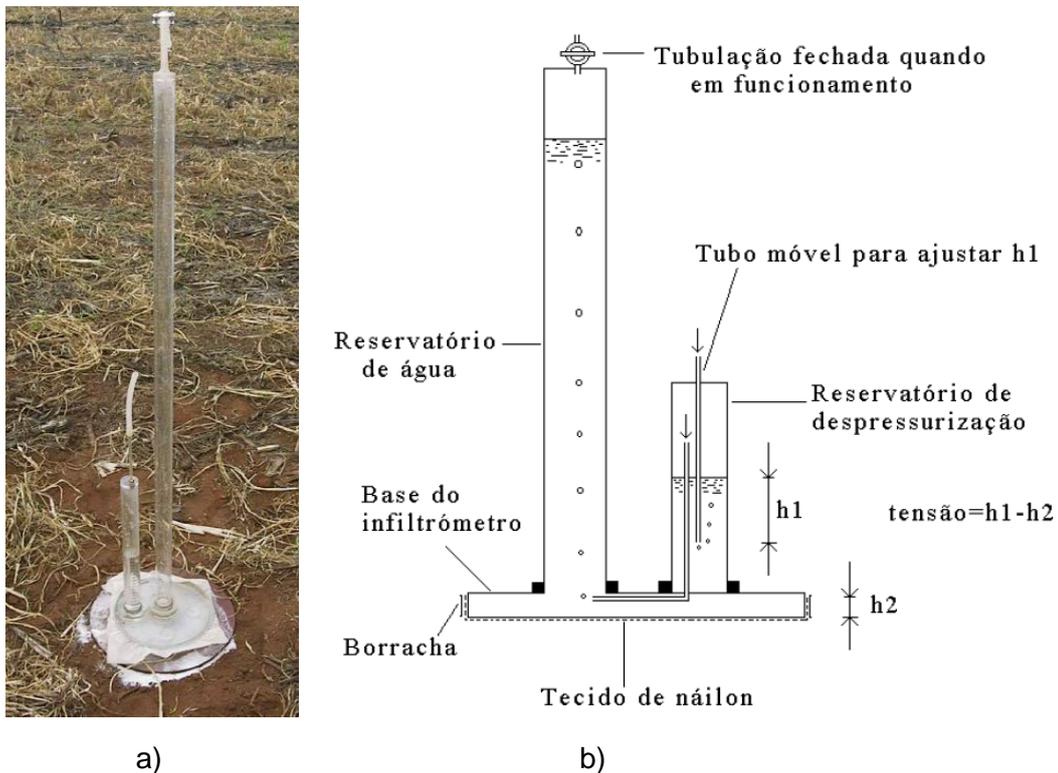


Figura 3.17 – Apresentação de infiltrómetro de tensão: a) real e b) esquemática, adaptado de Pott (2001).

- Infiltrómetros de anel, compostos como o próprio nome indica por um ou dois anéis metálicos concêntricos com procedimentos de aplicação idênticos. Este foi o equipamento utilizado nos ensaios de campo.

3.3.3.1 Infiltrómetro de duplo anel

O colocação em campo do infiltrómetro é distinta consoante se pretenda avaliar a infiltração no solo ou em pavimentos, no entanto, em ambos impera o objectivo de garantir que não existam fugas de água dos anéis. Ao contrário dos infiltrómetros com tubos, estes são cravados no terreno à profundidade mínima necessária para que seja garantido o efeito pretendido (e. g., Ven Te Chow, 1964). Segundo Gregory (2004) esta profundidade é cerca de 5 cm. Nos ensaios realizados sobre o pavimento a estanquidade foi garantida pela aplicação de silicone na superfície de contacto entre este e o infiltrómetro.

Os diâmetros dos anéis podem adoptar diferentes valores. As normas da ASTM (*American Society for Testing and Materials*) especificam diâmetros interiores e exteriores de 30 cm e 60 cm respectivamente (e. g., Gregory, 2005). Nos infiltrómetros de anéis concêntricos a infiltração é medida no anel central. A Figura 3.18 apresenta de forma esquemática este tipo de infiltrómetro.

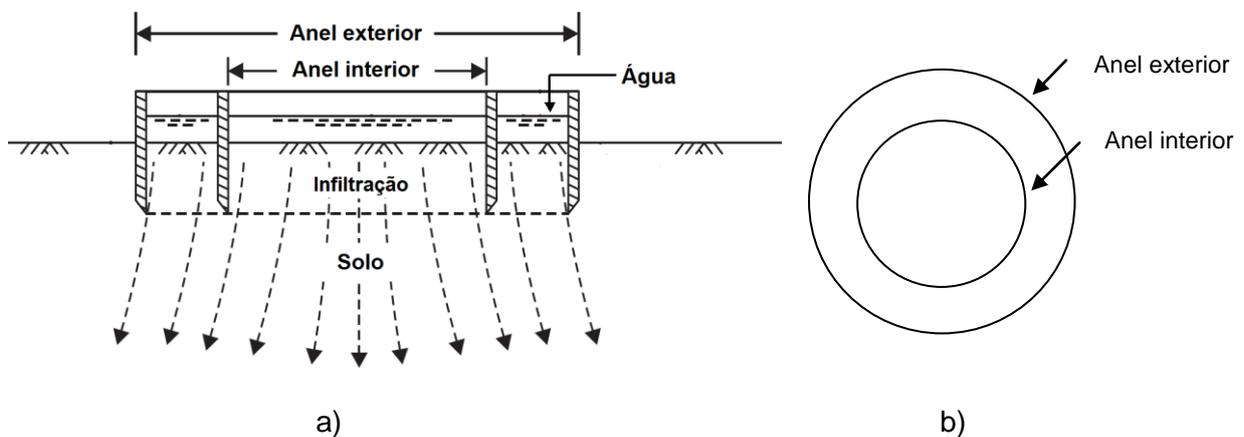


Figura 3.18 – Infiltrómetro de duplo anel em: a) corte e b) planta, adaptado de Raghunath (2006).

Após a colocação da água no interior de ambos os anéis do infiltrómetro, que Raghunath (2006) define entre 2.5 cm a 15 cm, o procedimento para a determinação da taxa de infiltração pode desenvolver-se das seguintes formas:

- Ensaios com carga hidráulica variável, nos quais é medido o tempo que o nível da água no anel interior leva a descer (e. g., Gregory *et al.*, 2005). A seguinte equação

apresenta a forma como foi determinada a taxa de infiltração nos ensaios de campo a partir desta metodologia:

$$f = \frac{(N_{i+1} - N_i)}{t_{i+1} - t_i} \quad (3.14)$$

Sendo:

f – taxa de infiltração (m/s)

N_{i+1} – distância medida entre uma referência fixa e o nível da água no anel interior do infiltrómetro no instante $i + 1$ (m)

N_i – distância medida entre uma referência fixa e o nível da água no anel interior infiltrómetro no instante i (m)

t_{i+1} – tempo de ensaio no instante $i + 1$ (s)

t_i – tempo de ensaio no instante i (s)

- Ensaios com carga hidráulica constante, em que, como o próprio nome indica a carga hidráulica no infiltrómetro é mantida inalterável e é registado o volume de água utilizado para a conservação do nível no anel interior. Para que o nível da água se mantenha constante pode-se recorrer a uma válvula de bóia, tal como foi utilizado nos ensaios de campo, utilizar um sistema derivado da garrafa de Mariotte ou um aparelho controlado electronicamente (*e. g.*, Gregory *et al.*, 2005). O sistema da garrafa de Mariotte funciona como um reservatório de alimentação permitindo que a libertação de água ocorra como resposta às condições de infiltrabilidade da superfície durante todo o ensaio. Gregory *et al.* (2005) efectuaram ensaios comparativos entre a recarga de água no anel interior de forma manual e recorrendo ao princípio da garrafa de Mariotte e verificaram que no primeiro caso os resultados de taxa de infiltração aumentaram. Tal foi justificado com base no erro humano implícito no procedimento. Em ambas as metodologias adoptadas por Gregory *et al.* (2005) a recarga de água do anel exterior foi feita de forma manual. A equação seguinte revela a forma como foi calculada a infiltração nos ensaios de campo com carga constante

$$f = \frac{-(N_{i+1} - N_i)}{t_{i+1} - t_i} \cdot \frac{A_{reserv}}{A_{anel\ int}} \quad (3.15)$$

Sendo:

f – taxa de infiltração (m/s)

N_{i+1} – Nível da água medido no reservatório de abastecimento ao anel interior no instante $i+1$ (m)

N_i – Nível da água medido no reservatório de abastecimento ao anel interior no instante i (m)

t_{i+1} – tempo de ensaio no instante $i+1$ (s)

t_i – tempo de ensaio no instante i (s)

A_{reserv} – área do reservatório de abastecimento do anel interior do infiltrómetro (m²)

$A_{anel\ int}$ – área do anel interior do infiltrómetro (m²)

Segundo Gregory (2005), nos solos grosseiros os ensaios com carga hidráulica variável produzem taxas de infiltração mais baixas do que os ensaios com carga hidráulica constante, no entanto, nos solos finos estes ensaios fornecem resultados muito semelhantes.

3.3.3.2 Exemplos da aplicação de infiltrómetros de inundação ao estudo dos pavimentos

Para além da aplicação destes infiltrómetros a solos é de referir a sua utilização em estudos para determinação da capacidade de infiltração em pavimentos permeáveis.

Bean *et al.* (2004) utilizaram infiltrómetros de duplo anel com o diâmetro interior e exterior de 30 cm e 80 cm respectivamente, em 27 locais com pavimentos permeáveis de grelhas e pavimentos justapostos de betão para determinar a taxa de infiltração destes. Para superar o facto dos infiltrómetros não poderem ser cravados no pavimento, ao contrário do que acontece com o solo, estes foram selados à superfície do pavimento usando argamassa. Foram realizados ensaios com carga hidráulica variável partindo de uma lâmina de água inicial de 125 a 175 mm. O teste foi considerado completo quando o anel interior ficou seco com um máximo de 45 minutos de ensaio. Foram realizados testes iniciais sobre as condições existentes de pavimento e após a remoção da camada superficial de obstrução das juntas de forma a simular o efeito de manutenção. Os resultados em grelhas de betão indicaram taxas de infiltração de 80 mm/h e de 50 mm/h consoante a existência ou não de manutenção. O pavimento justaposto, por sua vez apresentou uma infiltração superior, verificando-se que neste tipo de pavimento o solo de base é o aspecto mais relevante para a taxa de infiltração.

Gregory (2004) utilizou um infiltrómetro de duplo anel, cujo anel interior possuía 30 cm e o anel exterior 60 cm, para verificar a taxa de infiltração em grelhas de betão poroso e blocos de betão com juntas abertas, localizados em estrada e em zona de estacionamento, respectivamente. Foram realizados ensaios com carga constante, durante duas horas, recorrendo a uma garrafa de Mariotte para manter o nível constante no anel interior e controlando manualmente o nível da água no anel exterior. A selagem entre o infiltrómetro e o pavimento foi feita com argila bentonítica. Como forma de comparação foi também verificada a infiltração numa zona de relva através de um infiltrómetro de duplo anel de diâmetros inferiores, nomeadamente 15 cm e 30 cm para o anel interior e exterior, respectivamente. Gregory (2004) verificou que o pavimento de blocos de betão poroso localizado no parque de estacionamento permitia uma taxa de infiltração final média (7 mm/h) inferior à taxa de infiltração final média do mesmo tipo de pavimento localizado na estrada circundante a uma rotunda (232 mm/h). O coeficiente de variação entre os resultados obtidos para a zona de circulação da rotunda apresentou-se bastante elevado uma vez que nesta área é evidente o efeito de compactação gerado pela passagem das rodas dos veículos aproximadamente sempre pelo mesmo local. No pavimento de blocos com juntas abertas, a elevada infiltração impossibilitou que o ensaio se prolongasse no tempo devido à dificuldade existente na manutenção do nível de água no infiltrómetro. Foi apenas efectuado um ensaio de 10 minutos com um abastecimento de 12000 mm/h tendo-se verificado insuficiente dada a elevada taxa de infiltração. Esta deve-se ao facto da camada existente entre o solo e revestimento ser composta por um agregado de grandes dimensões e pela existência de células de drenagem no pavimento. Logo, apenas se iniciará escoamento neste tipo de pavimento quando toda a camada de base do revestimento estiver saturada. A infiltração na relva revelou-se bastante superior relativamente ao pavimento permeável localizado no estacionamento, mas mais aproximada aos valores do pavimento permeável localizado na rotunda.

3.3.4. Resumo dos resultados dos ensaios de infiltração em pavimentos permeáveis

Dos estudos atrás referidos sobre os comportamentos hidráulicos dos pavimentos permeáveis resultaram valores não só de taxas de infiltração como também de coeficientes de escoamento.

Para além dos estudos anteriormente enunciados é de referir o trabalho de Hunt, Stevens e Mayes em 2002 sobre um pavimento permeável num parque de estacionamento, tendo os autores obtido coeficientes de escoamento entre 0.2 e 0.5. Rushton em 2001 comparou também diferentes pavimentos num parque de estacionamento e concluiu que o coeficiente de escoamento médio de um pavimento betuminoso era de 0.58, e que para o pavimento permeável este valor era de 0.1 (e. g., Ball *et al.*, 2010).

Ferguson (2005) compilou a informação relativa a uma pesquisa de sete anos com base nos estudos realizados sobre pavimentos permeáveis nos Estados Unidos da América e divulgou-a numa publicação denominada “*Porous Pavements*”. Esta contém uma apresentação dos pavimentos permeáveis a nível construtivo, estrutural e hidrológico.

As Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam o resumo dos valores de taxas de infiltração e coeficiente de escoamento, respectivamente, contidos na literatura.

Tabela 3.3 – Resumo dos valores de taxa de infiltração final obtidos na literatura.

Tipo de pavimento		Taxa de infiltração final (mm/h)	Referência	
Agregado solto	partículas de dimensão uniforme com 2.5 cm	12700.00	Ferguson, 2005	
	partículas de dimensão uniforme com 1.3 cm	381.00	Ferguson, 2005	
Relva em solo argiloso com 2 a 10 anos de idade	estrutura do solo alterada durante a plantação	5 a 28	Ferguson, 2005	
	estrutura do solo não alterada durante a plantação	48 a 99	Ferguson, 2005	
Relva		88 a 124	Moura, 2005	
Calçada		79	Illgen et al,2007	
Blocos com juntas abertas (0.2 cm a 0.51 cm)	juntas preenchidas com solo base	234	Ferguson, 2005	
	6 anos após a construção	104	Ferguson, 2005	
Bloco maciço	base não compactada	declive de 2 %	66 a 70	Moura, 2005
		declive de 7 %	29 a 31	Moura, 2005
	base compactada	declive de 2 %	36 a 37	Moura, 2005
		declive de 6 %	48 a 52	Moura, 2005
Blocos vazados	base não compactada	declive de 2 %	117 a 118	Moura, 2005
		declive de 7 %	106 a 108	Moura, 2005
	base compactada	declive de 2 %	80 a 85	Moura, 2005
		declive de 6 %	93 a 96	Moura, 2005

Tabela 3.3 – Resumo dos valores de taxa de infiltração final obtidos na literatura (continuação).

Tipo de pavimento			Taxa de infiltração final (mm/h)	Referência
Bloco maciço com juntas não colmatadas	base não compactada	declive de 2 %	14 a 17	Moura, 2005
		declive de 7 %	7 a 13	Moura, 2005
	base compactada	declive de 2 %	12 a 13	Moura, 2005
		declive de 6 %	14 a 28	Moura, 2005
Blocos vazados com juntas não colmatadas	base não compactada	declive de 2 %	49 a 67	Moura, 2005
		declive de 7 %	24 a 52	Moura, 2005
	base compactada	declive de 2 %	23 a 24	Moura, 2005
		declive de 6 %	17 a 18	Moura, 2005
Blocos de betão ⁽¹⁾ poroso	localizado num parque de estacionamento		7	Gregory, 2004
	Localizado no pavimento circundante a uma rotunda		232	Gregory, 2004
Grelhas de betão ⁽¹⁾ com células vazias ocupando 10 % da área	vazios preenchidos com agregados de 0.3 cm a 0.5 cm		1016	Ferguson, 2005
	vazios preenchidos com agregados de 2 mm a 5 mm	0.1 anos após a instalação	239	Ferguson, 2005
		2 anos após a instalação	155	Ferguson, 2005
		4.5 anos após a instalação	122	Ferguson, 2005
		8 anos após a instalação	105	Ferguson, 2005
	Dois anos após a instalação	vazios preenchidos com agregados de 2 mm a 5 mm	155	Ferguson, 2005
		vazios preenchidos com agregados de 1 mm a 3 mm	102	Ferguson, 2005
		vazios preenchidos com agregados de até 2 mm	71	Ferguson, 2005

⁽¹⁾ Refere-se a betão hidráulico.

Tabela 3.3 – Resumo dos valores de taxa de infiltração final obtidos na literatura (continuação).

Tipo de pavimento		Taxa de infiltração final (mm/h)			Referência
Betão ⁽¹⁾ Poroso	devidamente construído	17018	a	22860	Ferguson, 2005
	com vibração excessiva	32	a	610	Ferguson, 2005
Betão betuminoso poroso	imediatamente após a construção	4318	a	12700	Ferguson, 2005
	após 3 a 4 anos	381	a	991	Ferguson, 2005
Betão ⁽¹⁾ denso		5.1x10 ⁻⁵			Ferguson, 2005
Betão betuminoso denso		1.5x10 ⁻³			Ferguson, 2005
Chão compactado		38	a	64	Moura, 2005

Tabela 3.4 – Resumo dos valores de coeficientes de escoamento obtidos na literatura.

Tipo de pavimento			Coeficiente de escoamento			Referência
Agregado			0.3	a	0.7	Ferguson, 2005
Relva, mais de 50 % coberto de erva			0.05	a	0.53	Ferguson, 2006
Calçada			0.6			Araújo <i>et al.</i> , 2000
Blocos de betão ⁽¹⁾			0.78			Araújo <i>et al.</i> , 2000
Blocos de juntas abertas	vazios preenchidos com agregados de 0.5 cm a 2.0 cm		0.3	a	0.5	Ferguson, 2007
Blocos vazados			0.5			Araújo <i>et al.</i> , 2000
Bloco maciço com juntas colmatadas	base não compactada	declive de 2 %	0.13	a	0.39	Moura, 2005
		declive de 7 %	0.48	a	0.74	Moura, 2005
	base compactada	declive de 2 %	0.53	a	0.69	Moura, 2005
		declive de 6 %	0.34	a	0.53	Moura, 2005
Blocos vazados com juntas colmatadas	base não compactada	declive de 2 %	0.0074	a	0.24	Moura, 2005
		declive de 7 %	0.096	a	0.1	Moura, 2005
	base compactada	declive de 2 %	0.31	a	0.35	Moura, 2005
		declive de 6 %	0.3	a	0.33	Moura, 2005
Bloco maciço com juntas não colmatadas	base não compactada	declive de 2 %	0.81	a	0.82	Moura, 2005
		declive de 7 %	0.8	a	0.93	Moura, 2005
	base compactada	declive de 2 %	0.79	a	0.88	Moura, 2005
		declive de 6 %	0.71	a	0.83	Moura, 2005
Blocos vazados com juntas não colmatadas	base não compactada	declive de 2 %	0.37	a	0.4	Moura, 2005
		declive de 7 %	0.63	a	0.67	Moura, 2005
	base compactada	declive de 2 %	0.63	a	0.76	Moura, 2005
		declive de 6 %	0.75	a	0.81	Moura, 2005

⁽¹⁾ Refere-se a betão hidráulico.

Tabela 3.4 – Resumo dos valores de coeficientes de escoamento obtidos na literatura (continuação).

Tipo de pavimento		Coeficiente de escoamento			Referência
Blocos de betão ⁽¹⁾		0.37			Alessi <i>et al.</i> , 2006
Betão betuminoso poroso		0.35			Alessi <i>et al.</i> , 2006
Betão betuminoso poroso	após instalação	0.12	a	0.4	Ferguson, 2008
	3 a 4 anos após a instalação	0.18	a	0.29	Ferguson, 2009
Pavimento impermeável de betão ⁽¹⁾		0.95			Araújo <i>et al.</i> , 2000
Solo compactado		0.66			Araújo <i>et al.</i> , 2000
Betão ^(*) denso		0.75	a	0.97	Ferguson, 2010

⁽¹⁾ Refere-se a betão hidráulico

Em suma os vários autores verificaram que os pavimentos permeáveis contribuem efectivamente para a redução do escoamento superficial ao favorecerem a infiltração, quando comparados com os pavimentos impermeáveis. A capacidade de infiltração destes é bastante influenciada pelas características do material que compõe a sua camada de base e pelas propriedades da superfície de revestimento. Estas propriedades estão directamente ligadas à dimensão, composição e nível de colmatação das juntas entre elementos assim como ao declive da superfície e à existência de depressões que contribuam para a retenção de água.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

4.1.1. Calçada à Portuguesa

Os ensaios realizados no âmbito deste trabalho decorreram em dois tipos de pavimentos em calçada localizados no Campus da Penha da Universidade do Algarve. Foram escolhidos os pavimentos com o padrão de assentamento e o tamanho de blocos mais comum. Como tal analisaram-se pavimentos constituídos por blocos de calcário, dispostos em quadrado, segundo as seguintes tipologias (Figura 4.1):

- Calçada miúda - localizada na zona de passeio existente nas traseiras do edifício do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do Instituto Superior de Engenharia (ISE), Universidade do Algarve (UAlg);
- Calçada grossa - situada no parque de estacionamento das traseiras do edifício da Escola Superior de Educação e Comunicação (ESEC), Universidade do Algarve (UAlg).

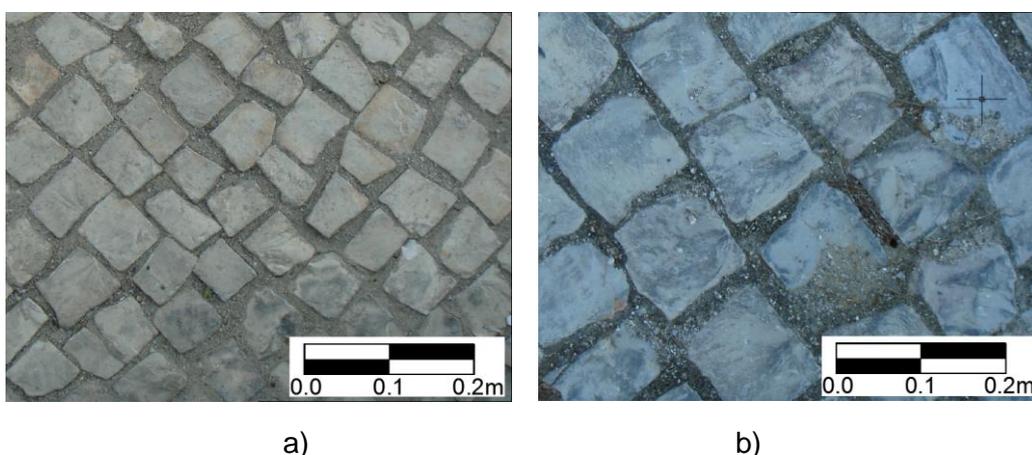


Figura 4.1 – Pavimentos em calçada estudados: a) calçada miúda e b) calçada grossa.

Na Figura 4.2 é apresentada a localização de cada uma das áreas de ensaios.

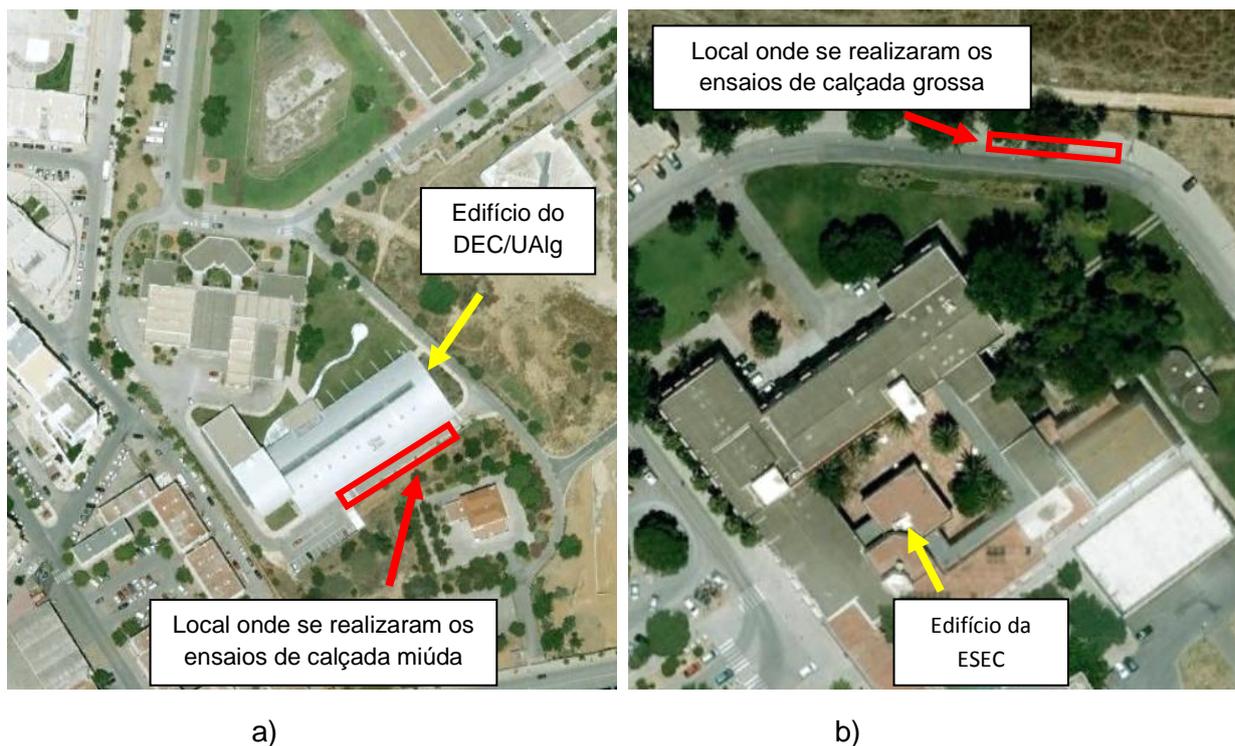


Figura 4.2 – Localização dos ensaios em pavimento de calçada: a) miúda e b) grossa (Universidade do Algarve).

Para cada uma das tipologias de calçada foi determinada a densidade de blocos, dada pelo quociente entre a área ocupada por estes e a área total de pavimento analisada. Esta análise realizou-se não só nos pavimentos estudados na UAlg, como também em seis outros locais no concelho de Loulé (Anexo A). Nestes locais foi identificada a calçada miúda num passeio particular (Local 1) e em duas outras áreas de passeio público (Locais 2 e 3). A análise dimensional da calçada grossa foi feita em três zonas de estacionamento distintas, denominadas de Local 1, 2 e 3. A Figura 4.3 revela a área de juntas existente em cada um dos pavimentos em calçada sujeitos a ensaios de infiltração na UAlg, delimitada pelo diâmetro do anel exterior do infiltrómetro.

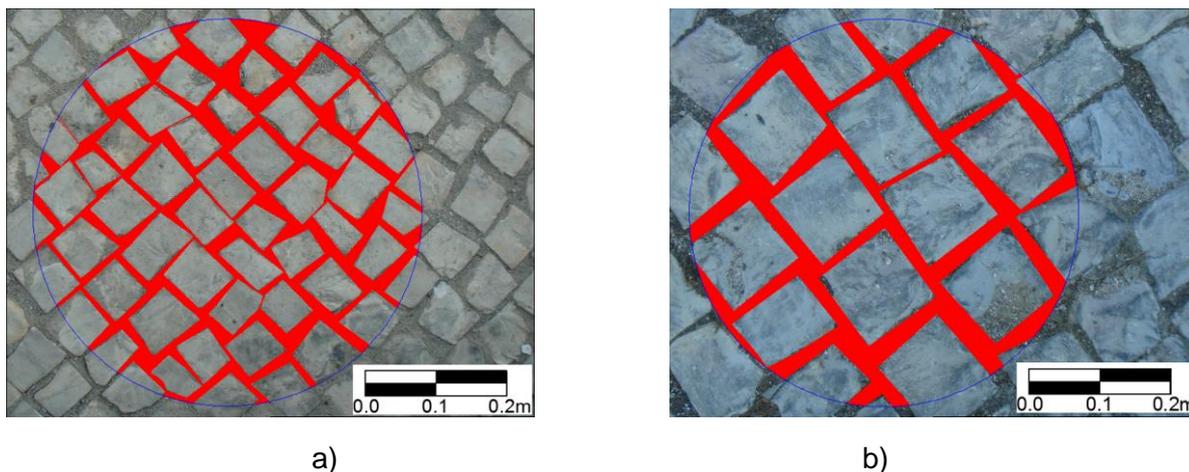


Figura 4.3 – Área de juntas nos pavimentos em calçada da Universidade do Algarve: a) miúda e b) grossa.

Na Tabela 4.1 são referidos os valores das áreas de juntas e das densidades de blocos de calçada nos oito locais observados.

Tabela 4.1 – Área de juntas e respectiva densidade de blocos de calçada por cada tipologia de pavimento.

Tipo de calçada	Localização	Área total (m ²)	Área de juntas (m ²)	Área de blocos (m ²)	Densidade de blocos (%)
Calçada miúda	UAlg	0.238	0.065	0.172	72.6
	Local 1	0.238	0.054	0.184	77.4
	Local 2	0.238	0.061	0.176	74.3
	Local 3	0.238	0.049	0.189	79.6
Calçada grossa	UAlg	0.238	0.064	0.173	72.9
	Local 4	0.238	0.054	0.184	77.5
	Local 5	0.238	0.051	0.187	78.7
	Local 6	0.238	0.049	0.189	79.6

Verificou-se que a área de juntas é muito semelhante para ambos os tipos de calçada. A densidade de blocos é praticamente independente do tamanho destes e corresponde a cerca de 75 % da área de pavimento. Por outro lado, segundo Henriques *et al.* (2009) as dimensões das juntas estão relacionadas com questões construtivas, logo não se justificou a análise da variação da área de juntas no impacto na permeabilidade destes pavimentos, já que se trata de um parâmetro inalterável.

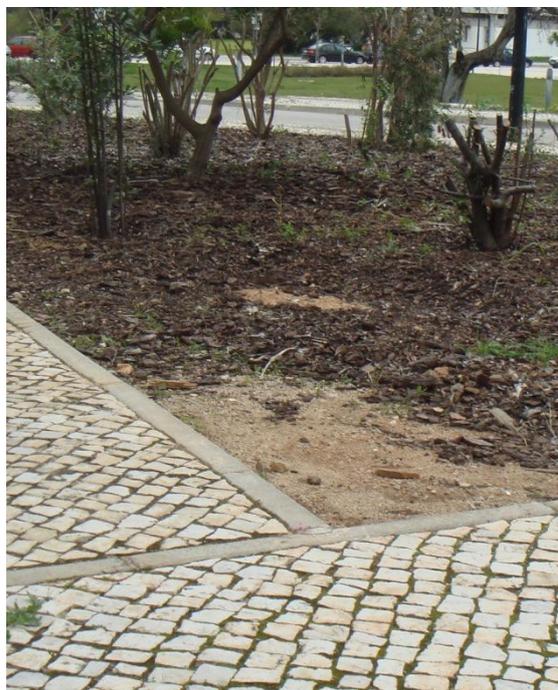
4.1.2. Equipamento

4.1.2.1 Ensaios de caracterização

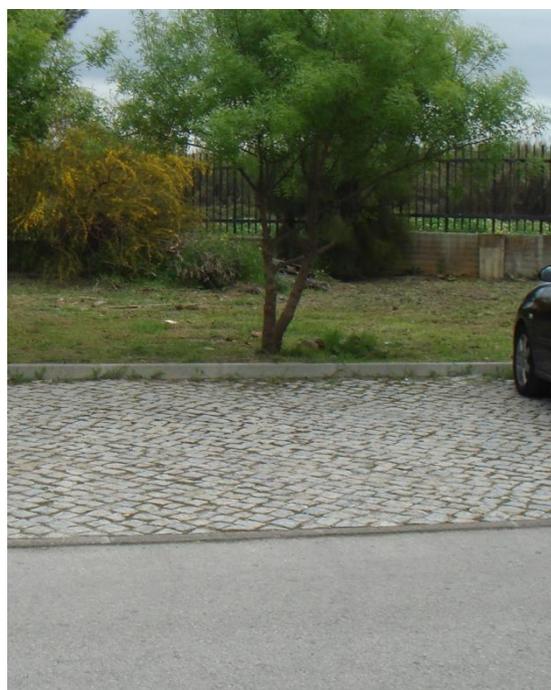
Para caracterizar os pavimentos estudados em campo foram realizados ensaios de:

- Infiltração e granulométricos aos solos das zonas ajardinadas adjacentes por se admitir serem idênticos aos que constituem a camada base de cada pavimento (Figura 4.4).
- Absorção de água por parte dos blocos de calçada.

Para a determinação da taxa de infiltração nos solos realizaram-se dois ensaios, nas imediações de cada um dos pavimentos, com carga hidráulica variável e constante. Foi utilizado: um infiltrómetro constituído por dois anéis com diâmetros de 54.5 cm e de 30.0 cm com extremidade inferior biselada para facilitar o processo de cravação assim como uma marreta e uma tábua de madeira. Os referidos ensaios apenas diferiram dos realizados nos pavimentos quanto à instalação do infiltrómetro, pelo que o restante material utilizado será descrito pormenorizadamente no Capítulo 4.1.2.2.



a)



b)

Figura 4.4 – Locais de recolha de solo para os ensaios granulométricos relativos aos pavimentos em calçada: a) miúda e b) grossa.

A análise granulométrica dos dois tipos de solos baseou-se na Especificação LNEC – E 239 – 1970 denominada: “Solos, análise granulométrica por peneiração húmida”. Esta análise foi realizada no Laboratório de Geotecnia do DEC/UAlg e consistiu na determinação quantitativa da distribuição por tamanhos das partículas do solo. Para a realização dos ensaios foi utilizada, não só a série de peneiros ASTM de malha quadrada, como também uma balança, uma estufa, um copo de precipitação e um frasco de lavagem por esguicho.

Para a determinação da absorção de água dos blocos de calçada foi utilizada a Norma portuguesa NP EN 1097-6 de 2003 para “Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 6 – Determinação da massa volúmica e da absorção de água”. Utilizaram-se 10 blocos de calçada miúda e 7 de blocos de calçada grossa, recolhidos a partir dos respectivos pavimentos analisados em campo (Figura 4.5) e o seguinte equipamento: uma estufa ventilada, uma balança hidrostática e um termómetro.

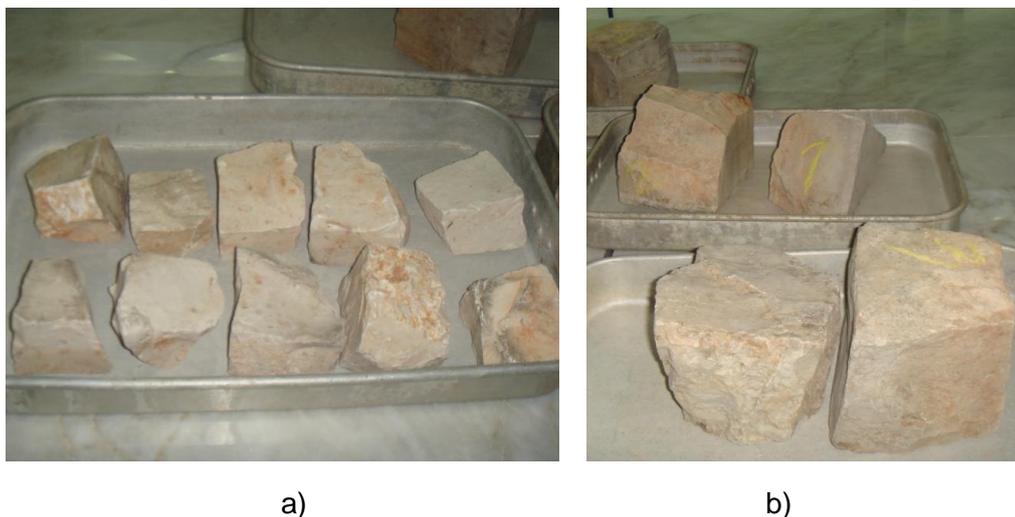


Figura 4.5 – Blocos de calçada utilizados na determinação da massa volúmica e absorção de água: a) calçada miúda e b) calçada grossa.

4.1.2.2 Ensaio de campo

Realizaram-se em campo, sobre os dois tipos de pavimentos em calçada, doze ensaios com um infiltrómetro de duplo anel.

O infiltrómetro utilizado nos pavimentos foi o mesmo com o qual se realizaram os ensaios no solo, apesar de ter sido sujeito a algumas adaptações. Na base de cada anel, foi apertada com uma cinta, uma borracha para aumentar a superfície de contacto entre a extremidade do

infiltrómetro e o pavimento (Figura 4.6). A aderência entre esta borracha e o infiltrómetro foi conseguida com silicone para evitar a passagem da água por percolação entre os dois elementos.

Para a colocação do infiltrómetro sobre os pavimentos foi utilizado o seguinte material: silicone, massa de moldar, duas tábuas de madeira, 4 cubos em betão com 8 kg e 2 cubos de betão com 20 kg cada.



Figura 4.6 – Pormenor da adaptação do infiltrómetro aos ensaios no pavimento.

Nos ensaios com carga hidráulica variável utilizou-se um limnímetro de ponta com régua micrométrica, visível na Figura 4.7, para medição do nível de água no anel interior.



Figura 4.7 – Limnímetro de ponta com régua micrométrica.

Nos ensaios com carga hidráulica constante a manutenção do nível de água no infiltrómetro foi feita (Figura 4.8):

- No anel interior, através de um reservatório cilíndrico graduado com 19 cm de diâmetro e 50 cm de altura;
- No anel exterior, utilizando um reservatório com capacidade de 25 l.

Cada um dos reservatórios foi ligado ao respectivo anel por uma tubagem sendo o abastecimento de água controlado por uma válvula accionada por bóia (Figura 4.9).



a)



b)

Figura 4.8 – Reservatórios de abastecimento aos anéis do infiltrómetro nomeadamente: a) para o anel interior e b) para o anel exterior.



Figura 4.9 – Válvula controlada por bóia para obtenção de carga constante.

Em todos os ensaios foi também utilizado: um termómetro, um cronómetro, um pano absorvente e um recipiente graduado de dimensão semelhante ao anel interior do infiltrómetro.

4.1.2.3 Ensaios laboratoriais

Para complementar os resultados obtidos nos ensaios de campo foram realizados, no Laboratório de Hidráulica do DEC/UAlg, quarenta ensaios recorrendo a um mini-simulador de chuva sobre quatro diferentes talhões de pavimento.

O mini-simulador de chuva, desenvolvido por Kamphorst (1987) e comercializado pela Eijkelkamp – Agrisearch Equipment, representado na Figura 4.10, consiste num reservatório de água cilíndrico (1) com capacidade para aproximadamente 2300 ml, ligado a uma plataforma com 49 capilares (2) a partir dos quais se formam as gotas de chuva. A carga hidráulica (h) sobre os capilares pode ser alterada com base na posição do tubo de arejamento (3) definindo-se assim a intensidade de precipitação desejada. O tubo de entrada de ar possui na sua extremidade uma tampa para controlo da duração da precipitação (4). O abastecimento do reservatório é feito através de um orifício localizado na base (5). Segundo o manual do mini-simulador elaborado pelo fabricante, as gotas formadas possuem um diâmetro de 5.9 mm e uma massa de 0.106 g, sendo a energia cinética da chuva em média de 35.4 J/mm para uma altura de queda das gotas aproximadamente de 400 mm.

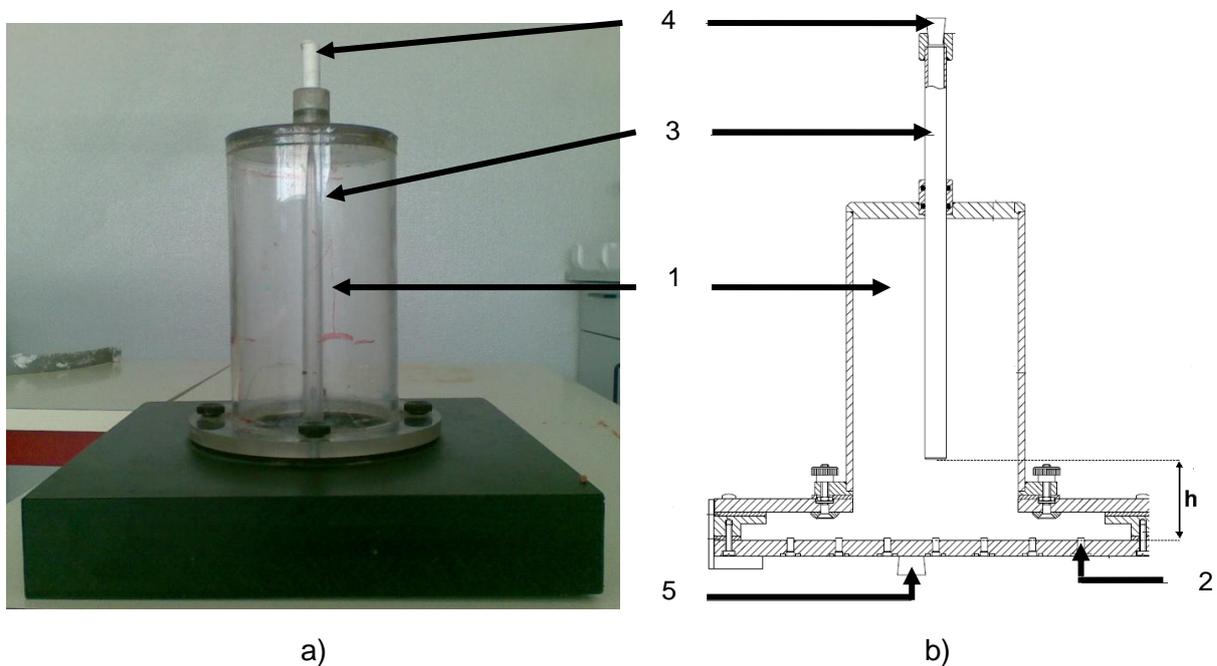


Figura 4.10 – Mini-simulador de chuva em representação: a) real e b) esquemática, adaptado de Eijkelkamp (2005).

A estrutura desenvolvida em laboratório para apoio do mini-simulador e construção do talhão de pavimento é apresentada na Figura 4.11. O mini-simulador (1) foi colocado sobre uma calha metálica suspensa (2) de forma a facilitar a sua movimentação e a distribuição espacial das gotas. Para impedir que a precipitação ocorresse fora do pavimento foi colocado sobre este um suporte acrílico (3). O escoamento foi recolhido através de uma moldura metálica que encaminhava a água para um único ponto de captação (4). A referida moldura encontrava-se colada e vedada com silicone sobre um recipiente, obturado no fundo, onde se construíram os talhões de pavimento (5). Sob este recipiente instalou-se um outro receptáculo para recolha da água percolada através da calçada (6). O recipiente que continha os talhões de pavimento é apresentado na Figura 4.12.

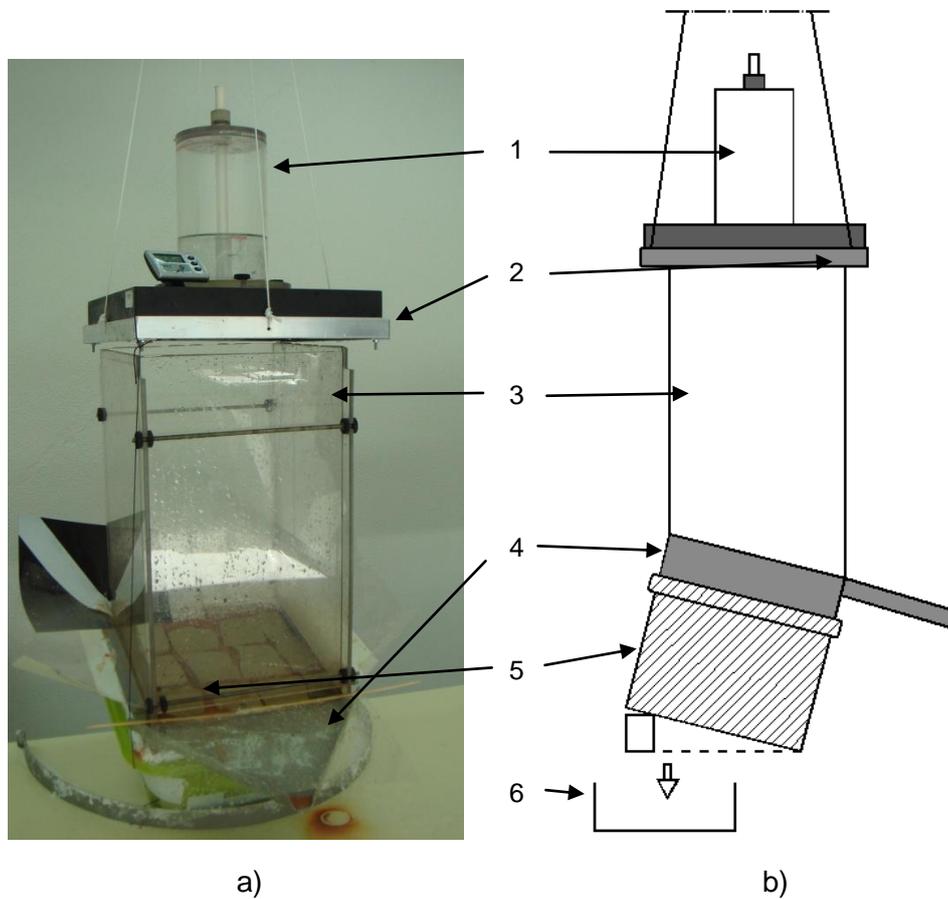


Figura 4.11 – Disposição do equipamento para simulação de precipitação: a) real e b) esquemática.

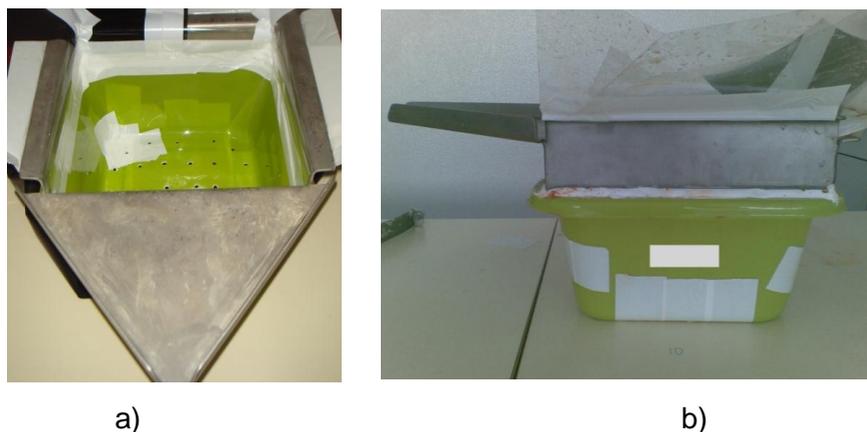


Figura 4.12 – Recipiente de plástico obturado para construção do talhão de pavimento em vista: a) superior e b) lateral.

Os talhões de pavimento criados em laboratório, com superfície quadrada com 25 cm de lado e uma profundidade de 20 cm, foram os seguintes (Figura 4.13 e 4.14):

- Calçada miúda com as juntas paralelas à direcção do escoamento;
- Calçada miúda com as juntas a 45° com a direcção do escoamento;
- Calçada grossa com as juntas paralelas à direcção do escoamento;
- Calçada grossa com as juntas a 45° com a direcção do escoamento.

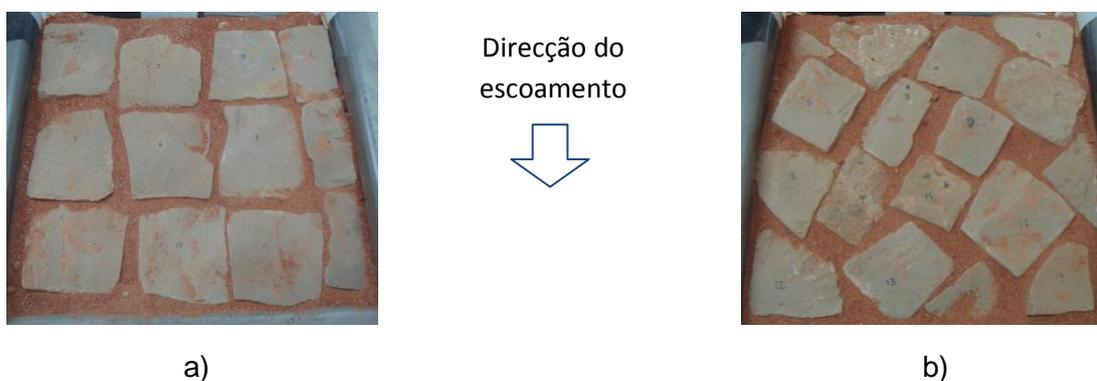


Figura 4.13 – Pavimento em calçada miúda com: a) juntas na direcção do escoamento e b) juntas a 45° com o escoamento.



Figura 4.14 – Pavimento em calçada grossa com: a) juntas na direcção do escoamento e b) juntas a 45° com o escoamento.

Para a construção de cada um dos talhões e realização dos ensaios foram utilizados: blocos de calçada miúda ou grossa previamente talhados para o local, pó-de-pedra, solo argiloso, uma manta geotextil com 0.0625 m² de área, uma marreta, um cronómetro, uma balança de precisão, quinze recipientes para recolha das amostras devidamente numerados e uma régua para medição do micro-relevo.

4.2. Métodos

4.2.1. Ensaios de caracterização

4.2.1.1 Ensaios de infiltração no solo

O local para realização dos ensaios foi limpo superficialmente de forma a retirar a camada orgânica sem perturbar a estrutura do solo. Cravaram-se no solo, de forma concêntrica, os dois anéis do infiltrómetro até uma profundidade de cerca de 5 cm com recurso a uma marreta aplicada indirectamente sobre os anéis do infiltrómetro através de uma tábua (Figura 4.15). A tábua teve como objectivo evitar danos no infiltrómetro assim como distribuir o esforço para que este penetrasse no solo uniformemente, em todo o seu diâmetro, minimizando a alteração da estrutura do solo nas superfícies de contacto com o infiltrómetro.



Figura 4.15 – Ensaio de infiltração no solo: a) colocação do infiltrómetro e b) infiltrómetro cravado no solo.

Após a colocação do infiltrómetro a metodologia para a realização dos ensaios com carga hidráulica constante e variável foi idêntica à utilizada nos ensaios no pavimento pelo que será apresentada no Capítulo 4.2.2.

4.2.1.2 Ensaios granulométricos

A especificação adoptada divide o processo de análise granulométrica em duas fases, nomeadamente, a análise da fracção de solo retida e passada no peneiro de 2.00 mm (nº 10). Para analisar a fracção retida no peneiro de 2.00 mm foi efectuada a peneiração do solo previamente seco na estufa com peneiros de malha de abertura superior. Determinaram-se em seguida as massas das fracções retidas em cada um dos peneiros.

A fracção que passou no peneiro de 2.00 mm foi seca em estufa registando-se a sua massa. Colocou-se o solo no copo de precipitação, adicionaram-se 250 cm³ de água com 0.5 g de hexametáfosfato de sódio, previamente dissolvido, agitou-se, ficando depois a repousar durante uma hora. A suspensão foi transferida para um peneiro de 0.074 mm, lavada com um jacto de água e posteriormente colocada na estufa. Depois de seca, esta fracção de solo foi peneirada nos peneiros de 0.841 mm, 0.420 mm, 0.250 mm, 0.105 mm e 0.074 mm determinando-se as massas de cada parcela retida.

4.2.1.3 Ensaio de absorção dos blocos

Para a realização deste ensaio os blocos de calçada miúda e grossa foram imersos em água durante 24 h. Após este período foram colocados num cesto submerso em água e pesados, determinando-se a massa do cesto e do conjunto. Mediu-se a temperatura da água e pesaram-se também os blocos saturados após ter sido limpa a sua superfície. Por fim, estes foram colocados na estufa durante 48 h e pesados novamente após secagem.

4.2.2. Ensaio de campo

4.2.2.1 Ensaio preliminares

O trabalho de campo iniciou-se com a realização de ensaios preliminares no pavimento em Calçada à Portuguesa localizado nas traseiras do edifício do DEC/UAlg. Estes tiveram como objectivo identificar não só os materiais que melhor garantissem a estanquidade entre o infiltrómetro e o pavimento como também todos os parâmetros necessários aos futuros ensaios (*i. e.*, carga hidráulica inicial, periodicidade de recolha de dados e duração do ensaio/critério de paragem do mesmo).

Para conseguir a estanquidade do sistema foram testadas as três seguintes técnicas: aplicação de material vedante entre o infiltrómetro e o pavimento, construção de uma base nivelada para os anéis do infiltrómetro e colocação de uma carga sobre os mesmos. Após seis ensaios verificou-se que a estanquidade só era conseguida pela utilização de todas as técnicas em simultâneo.

4.2.2.2 Ensaio com carga hidráulica variável

Deu-se início a cada ensaio escolhendo um local com características representativas da área envolvente e eliminaram-se as partículas de maiores dimensões que dificultassem a aderência entre a base do infiltrómetro e o pavimento (*i. e.*, folhas e elementos soltos). Criou-se uma base circular, representada na Figura 4.16, para cada um dos anéis do infiltrómetro preenchendo com massa de moldar as juntas entre as pedras de calçada e colocou-se sobre cada base um fio de silicone instalando-se de seguida o infiltrómetro. Inspeccionou-se a zona de ligação entre o pavimento e o infiltrómetro preenchendo com silicone todos os vazios ainda existentes e colocaram-se sobre o equipamento 6 cubos de betão.



Figura 4.16 – Camada base para o infiltómetro constituída por massa de moldar sobre a calçada grossa.

Após instalado o equipamento, tal como indicado nas figuras 4.17 e 4.18, encheu-se o anel exterior do Infiltrómetro (1) e o anel interior (por esta ordem) com 15 cm de água, tendo o cuidado de minimizar a erosão. Deu-se início ao ensaio, registando-se as variações do nível de água em intervalos de tempo progressivos de 1 minuto, 10 minutos, 30 minutos e 1 hora através do limnómetro de ponta com régua micrométrica (2). Terminou-se o ensaio após se obterem taxas de infiltração aproximadamente constantes, determinando-se assim a condutividade hidráulica saturada. Nos ensaios em que a carga hidráulica no anel interior atingiu os 3 cm antes do fim do ensaio foi necessário repor o nível de água para 15 cm em ambos os anéis. Determinou-se a temperatura da água no infiltómetro e colocou-se ao lado deste um recipiente graduado para a medição da evaporação.

Todo o procedimento foi repetido ao longo da série de três ensaios feitos sobre cada um dos tipos de calçada. A Figura 4.19 apresenta o esquema hidráulico com a direcção dos fluxos nos ensaios com carga hidráulica variável.



Figura 4.17 – Disposição do equipamento em ensaio com carga hidráulica variável.

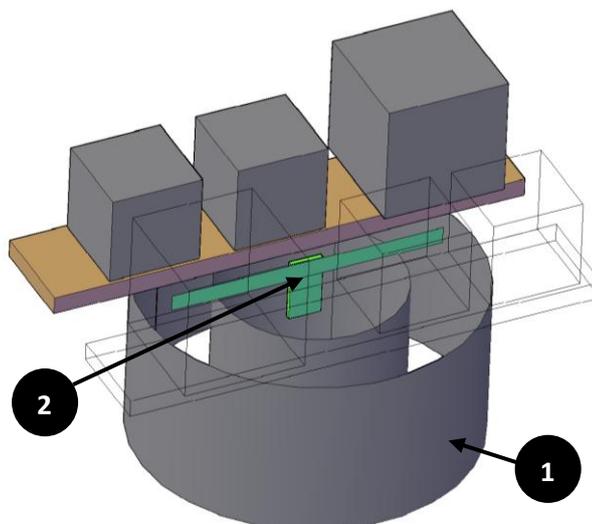


Figura 4.18 – Esquema da disposição do equipamento em ensaio com carga hidráulica variável.

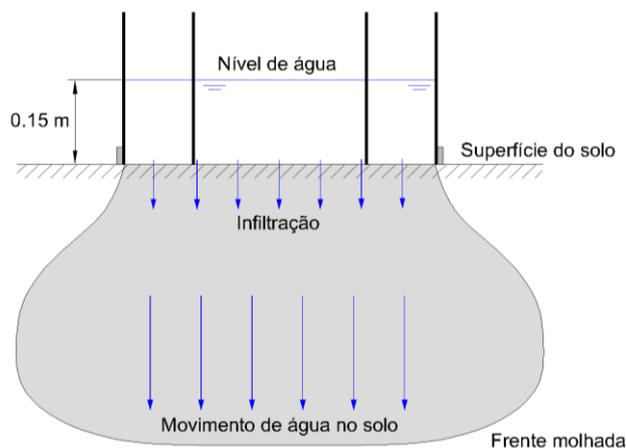


Figura 4.19 – Esquema hidráulico dos ensaios de campo com carga hidráulica variável com indicação do trajecto da água na instalação.

4.2.2.3 Ensaios com carga hidráulica constante

Nos ensaios com carga hidráulica constante (Figuras 4.20 e 4.21) a instalação do equipamento correspondeu aos mesmos critérios dos ensaios com carga variável tendo-se utilizado ainda um reservatório de abastecimento ao anel interior do infiltrómetro (2) e um segundo reservatório para abastecimento ao anel exterior (3). Manteve-se a carga hidráulica constante recorrendo a uma válvula, accionada por uma bóia, para controlo do caudal de abastecimento a cada um dos anéis do infiltrómetro (4). A taxa de infiltração foi determinada com base na variação do nível de água no reservatório de abastecimento ao anel interior do infiltrómetro

cujos valores foram registados com periodicidades semelhantes às adoptadas nos ensaios com carga variável. Os ensaios foram dados como terminados depois de ter sido atingido um valor de taxa de infiltração aproximadamente constante.

Nestes ensaios foi também considerada a determinação da evaporação e da temperatura da água, tendo-se realizado uma série de 3 ensaios para cada um dos tipos de calçada.

Na Figura 4.22 são apresentados os fluxos envolvidos nos ensaios com carga hidráulica constante.



Figura 4.20 – Disposição do equipamento em ensaio com carga hidráulica constante.

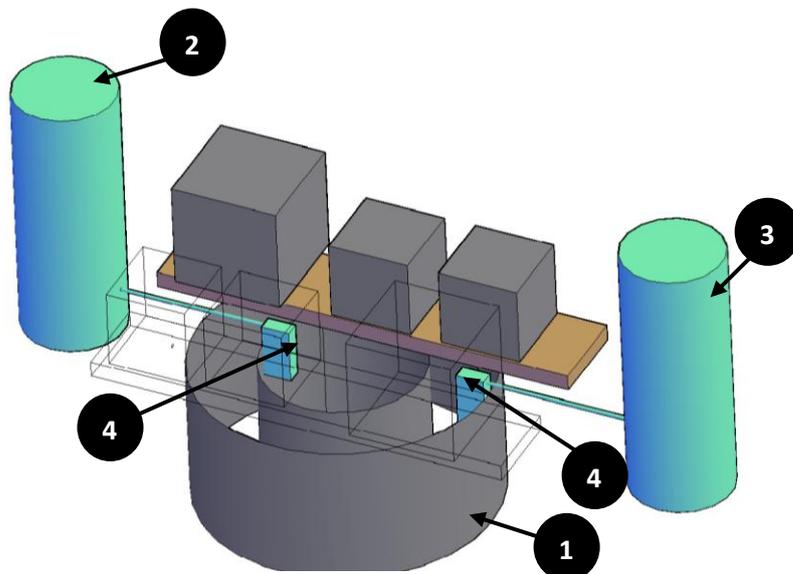


Figura 4.21 – Esquema da disposição do equipamento em ensaio com carga hidráulica constante.

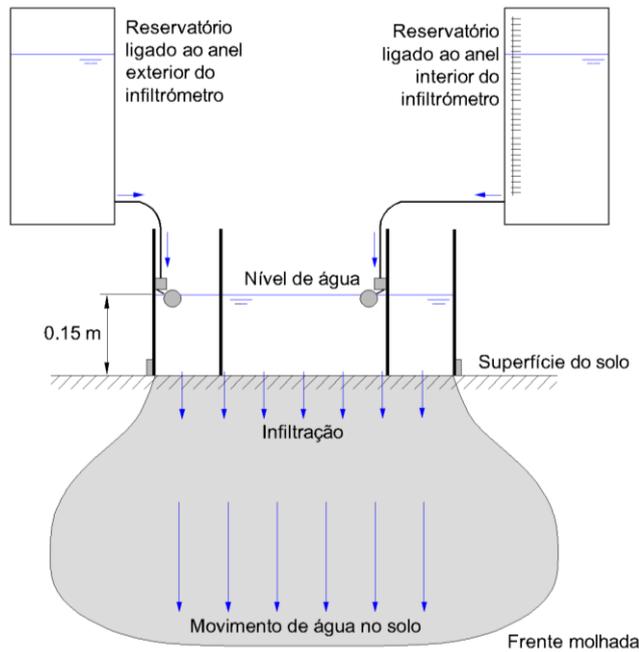


Figura 4.22 – Esquema hidráulico dos ensaios de campo com carga hidráulica constante com indicação do trajecto da água na instalação.

4.2.3. Ensaios laboratoriais

4.2.3.1 Determinação da intensidade de precipitação

Para a realização dos ensaios em laboratório foi previamente determinada a intensidade de precipitação a adoptar. Para tal, o tubo de arejamento do mini-simulador foi colocado na posição mais baixa de forma a minimizar a carga hidráulica sobre os capilares formadores de gotas. Colocou-se mini-simulador de chuva, previamente cheio com água, sobre o suporte acrílico (Figura 4.23) e retirou-se a tampa do tubo de arejamento de forma a dar início a uma chuva de 3 minutos. A duração da chuva foi adoptada tendo em conta a capacidade do reservatório do mini-simulador, tendo o mesmo valor sido usado por Titos *et al.* (1997) nos seus ensaios.



Figura 4.23 – Determinação da intensidade de precipitação.

Após terminada a chuva pesou-se a quantidade de água precipitada e determinou-se a intensidade de precipitação sobre uma área quadrada com 25 cm de lado, pela fórmula:

$$I = \frac{M}{\rho \cdot t \cdot A} \quad (4.1)$$

Em que:

I – intensidade de precipitação (m/h)

M – massa (kg)

ρ – massa volúmica da água (kg/m³)

t – duração da precipitação (h)

A – área (m²)

Foi considerado o valor de 998.6 kg/m³ para a massa volúmica da água, indicado na Norma NP EN 1097-6 de 2003, uma vez que esta se encontrava à temperatura de 18°C obtendo-se os valores de intensidade de precipitação apresentados na Tabela 4.2. As intensidades obtidas correspondem aos menores valores que o mini-simulador permite fornecer condicionadas pela posição do tubo de arejamento e conseqüente pela carga hidráulica sobre os capilares formadores de gotas.

Tabela 4.2 – Determinação da intensidade de precipitação.

Chuva	Tempo (minutos)	Quantidade de água precipitada (g)	Intensidade de precipitação (mm/h)
1	3.0	540.36	173
2	3.0	552.27	177
3	3.0	552.79	177
4	3.0	583.12	187
5	3.0	567.04	182
6	3.0	581.82	186
7	3.2	598.02	180

Observa-se que em média a intensidade de precipitação simulada foi de 180 mm/h (Tabela 4.2).

Com base nas curvas Intensidade-Duração-Frequência (IDF) contidas no Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de Agosto correspondentes a um tempo de retorno de 20 anos na região do Algarve, determinou-se a intensidade de precipitação de uma chuva com 3 minutos, através da expressão (4.2), tendo-se obtido o valor de 176 mm/h. Este valor é muito próximo da intensidade de precipitação utilizada nas simulações.

$$I = 317.74 \cdot t^{-0.538} \quad (4.2)$$

Sendo:

I – intensidade de precipitação (mm/h)

t – duração da precipitação (min)

4.2.3.2 Preparação do talhão de pavimento

Numa primeira fase realizaram-se ensaios preliminares para identificar os materiais adequados à construção do pavimento em laboratório de forma a simular as condições de escoamento reais. O talhão foi constituído por blocos de calçada sobre uma camada de base e juntas preenchidas com pó-de-pedra. No entanto não foi possível recriar as condições de compactação características da construção real e da utilização por se tratar de um talhão de pavimento com apenas 0.0125 m³ de volume construído dentro de um recipiente plástico. Como tal, nos ensaios preliminares não se registou escoamento superficial ao longo de 10

chuvas consecutivas. Para contornar este obstáculo foi utilizado um solo argiloso para o preenchimento das juntas dos blocos.

A preparação dos talhões de pavimentos iniciou-se com a colocação de geotextil no fundo do recipiente para evitar a passagem das partículas de solo mais finas através dos seus orifícios. De seguida, preparou-se uma camada base constituída por pó-de-pedra com cerca de 12 cm ou 7 cm, consoante se tratasse do pavimento com calçada miúda ou com calçada grossa. Esta camada foi construída por estratos sucessivamente compactados manualmente com um maço sobre a qual se espalharam cerca de 2 cm de solo argiloso, também posteriormente compactado. Colocaram-se os blocos na disposição a ensaiar preenchendo as suas juntas com o solo argiloso e compactando-as não só com o maço mas também pontualmente, com um objecto pontiagudo para que as partículas de solo se reajustassem e ocupassem todos os vazios existentes entre elas. O talhão foi colocado segundo um declive da 20 % tal como indicado por Kamphorst (1987). A Figura 4.24 mostra a constituição, por camadas, do talhão de pavimento.

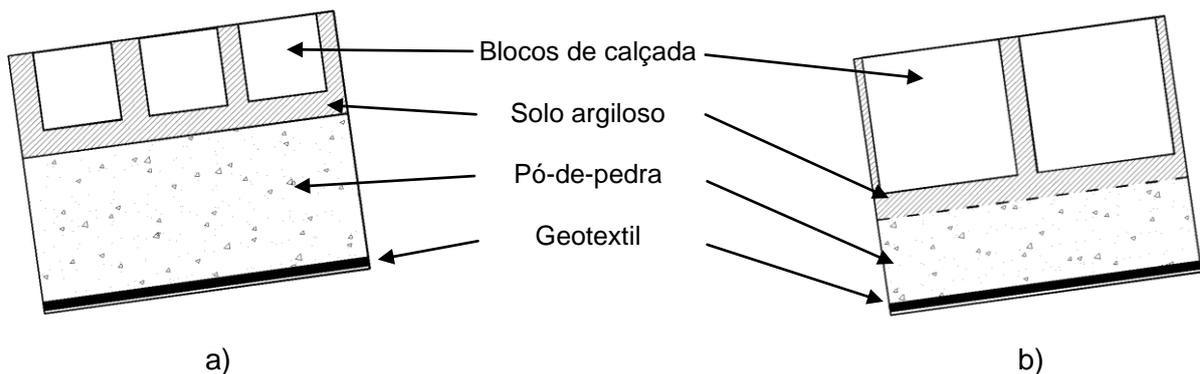


Figura 4.24 – Esquema da constituição dos talhões de pavimento: a) calçada miúda e b) calçada grossa.

Através da Tabela 4.3 verifica-se que os pavimentos com as juntas paralelas à direcção do escoamento apresentaram uma densidade de blocos bastante próxima da registada nos pavimentos *in situ*. Os talhões de pavimento construídos com as juntas a 45° com o escoamento possuíram os valores de densidades mais baixos devido à maior dificuldade de construção, especialmente com a calçada grossa, uma vez que os blocos tiveram de ser quebrados para se conseguir o padrão desejado na reduzida área de ensaio.

Tabela 4.3 – Densidade de blocos de calçada por cada talhão de pavimento.

Tipo de calçada	Direcção das juntas	Densidade dos blocos (%)
Calçada miúda	Paralelas à direcção do escoamento	72
	45° com o escoamento	68
Calçada grossa	Paralelas à direcção do escoamento	71
	45° com o escoamento	55

4.2.3.3 Realização do ensaio

Encheu-se com água o mini-simulador instalando-o depois sobre o talhão de pavimento a ensaiar, tendo previamente colocado o tubo de arejamento na posição correspondente à intensidade de precipitação de 180 mm/h. Iniciou-se o ensaio através da remoção da tampa do tubo de arejamento. Para ter uma distribuição espacial aleatória da chuvada foi necessária a movimentação da placa formadora de gotas durante todo o ensaio. Cada chuva simulada teve a duração de 3 minutos. Durante este período o escoamento superficial foi recolhido em intervalos de 15 s, tal como definido por de Lima *et al.* (1999). Após tapado o orifício de arejamento e concluída a simulação efectuam-se mais 3 recolhas com intervalos de 5 s. O início e o fim do escoamento superficial foram registados por observação directa e pesaram-se todos os recipientes contendo o escoamento superficial recolhido.

Cada série de ensaios foi composta por uma sequência de 10 chuvas espaçadas por um intervalo de 7 minutos. Por fim mediu-se o micro-relevo em 3 direcções diferentes de forma a registar os sulcos nas juntas do pavimento.

Nestes ensaios desprezaram-se não só as perdas evaporação, devido à curta duração das simulações, como também as perdas por transpiração e intersecção uma vez que a superfície de escoamento encontrava-se desprovida de vegetação.

A Figura 4.25 apresenta o esquema hidráulico dos ensaios de laboratório com a indicação dos fluxos.

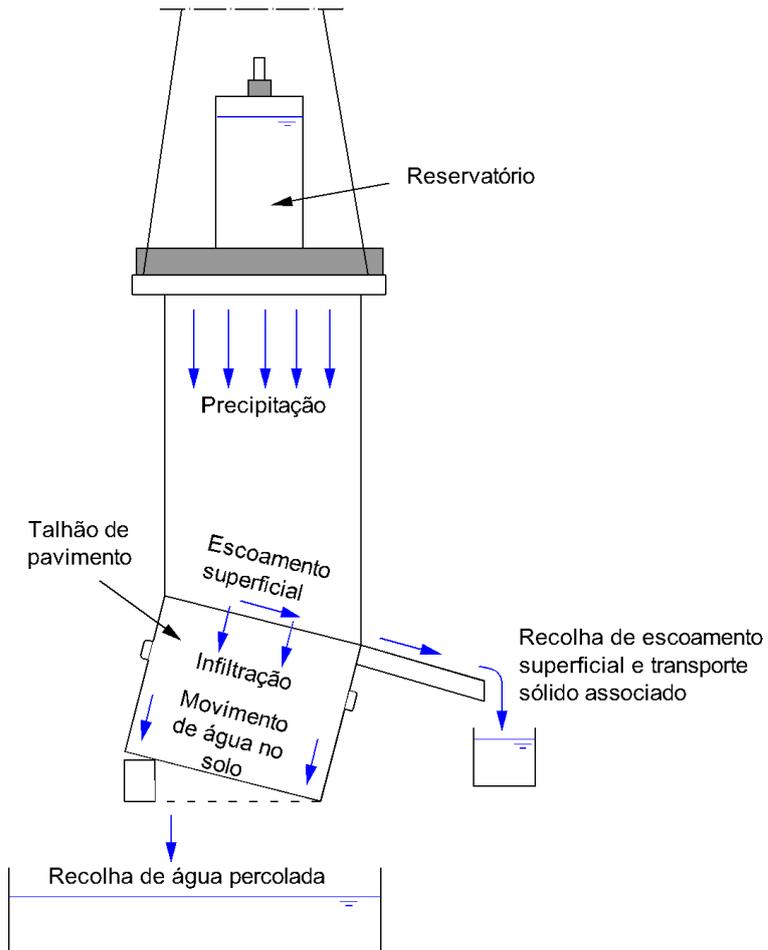


Figura 4.25 – Esquema hidráulico dos ensaios de laboratório com indicação do trajecto da água na instalação.

5. RESULTADOS

5.1. Ensaios de caracterização

5.1.1. Ensaios de infiltração no solo

O Gráfico 5.1 revela as taxas de infiltração resultantes dos ensaios realizados com o infiltrómetro nos solos das imediações de cada um dos pavimentos em calçada estudados. Estes ensaios foram realizados entre os dias 12 de Fevereiro e 14 de Março de 2011.

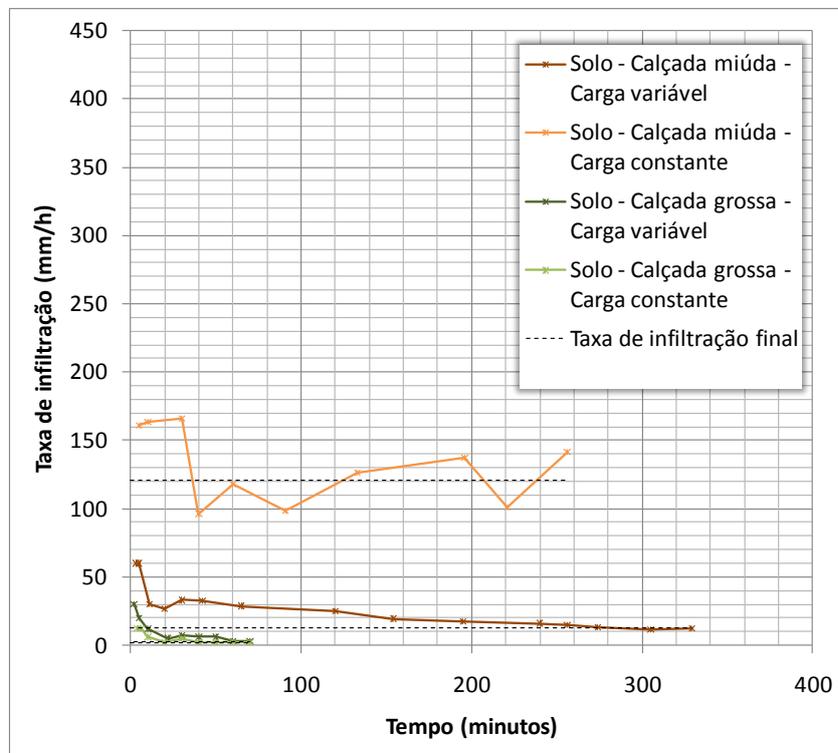


Gráfico 5.1 – Resultado dos ensaios de infiltração realizados nos solos ⁽¹⁾.

Com base na análise do Gráfico 5.1 observa-se que o solo base da calçada grossa estudada apresenta uma capacidade de infiltração inferior à do solo base da calçada miúda. Tal pode dever-se ao facto de se localizar numa zona onde a manutenção é praticamente inexistente, observando-se um grau de compactação mais elevado comparativamente com o solo base da calçada miúda.

⁽¹⁾ A escala vertical foi escolhida de modo a facilitar a comparação entre os vários ensaios de infiltração.

No solo base da calçada miúda os ensaios com carga hidráulica constante forneceram taxas de infiltração superiores aos ensaios com carga variável devido à existência de dois possíveis factores:

- Trabalhos de jardinagem que envolveram a alteração da estrutura superficial do solo.
- Caminho preferencial para passagem de água criado aquando da instalação do equipamento.

5.1.2. Ensaio granulométricos

Na Figura 5.1 estão apresentadas as curvas granulométricas dos solos analisados cujos dados constam nos boletins preenchidos segundo a especificação E 239 – 1970 (Anexo B).

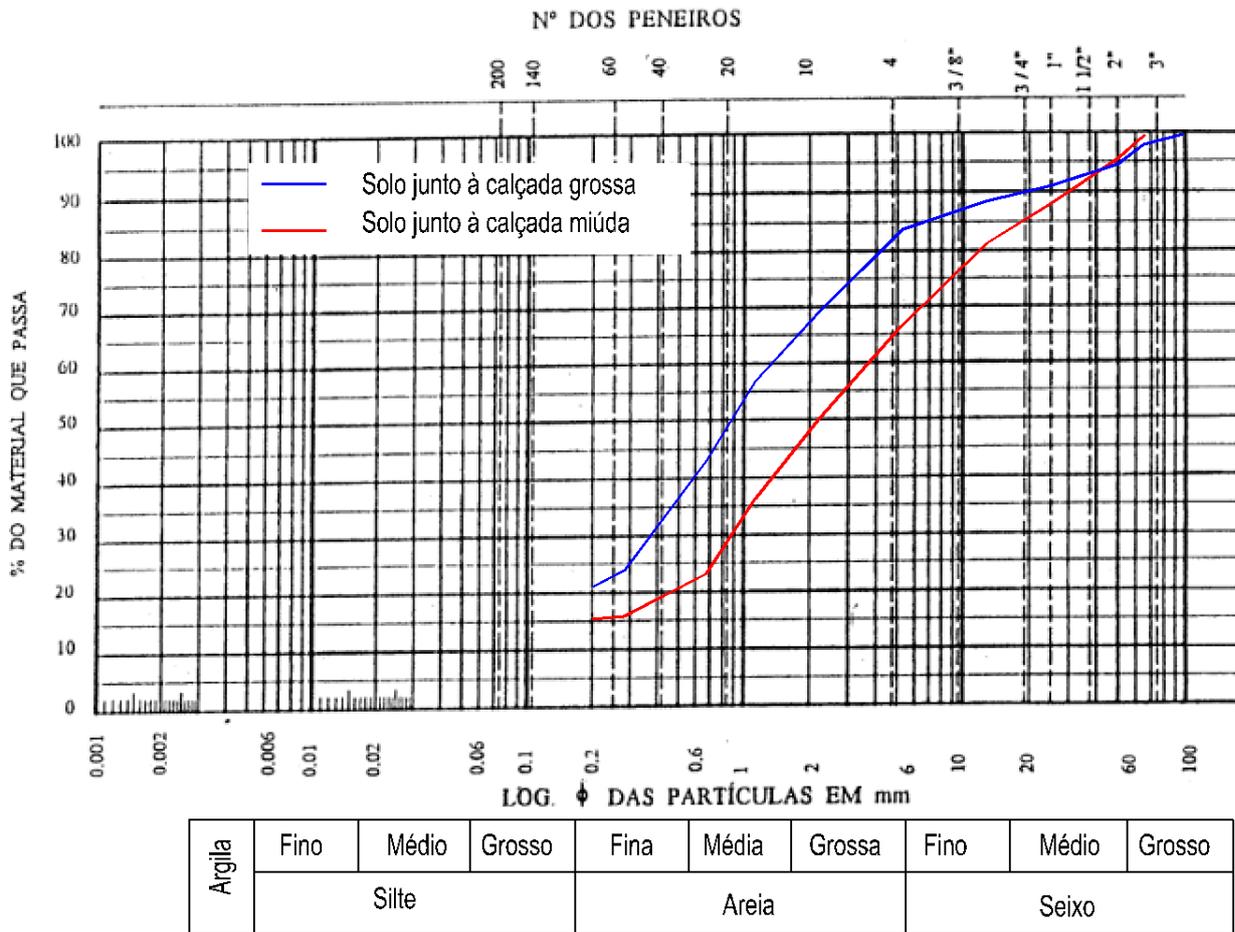


Figura 5.1 – Curvas granulométricas dos solos analisados.

De acordo com a especificação portuguesa os solos analisados possuem as fracções granulométricas nas proporções apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Fracções constituintes dos solos e respectivas percentagens.

Local de extracção do solo	Fracções granulométricas		
	Finos (%)	Areia (%)	Seixo (%)
Junto à calçada miúda	16	51	33
Junto à calçada grossa	22	62	16

Os dados resultantes destes ensaios revelaram solos com granulometrias semelhantes. São ambos solos maioritariamente arenosos com uma fracção fina significativa e curvas granulométricas com andamentos idênticos caracterizadas por uma granulometria extensa.

O solo junto à calçada grossa apresenta não só uma quantidade de finos superior como também uma percentagem de seixo inferior à do solo localizado junto à calçada miúda, o que contribui para uma menor capacidade de infiltração, facto comprovado pelos ensaios anteriormente apresentados.

5.1.3. Ensaio de absorção de água dos blocos

Os ensaios de absorção foram realizados com água à temperatura de 19°, como tal foi adoptada nos cálculos uma massa volúmica (ρ) de 998.4 kg/m³, indicada na Norma Portuguesa NP EN 1097-6 de 2003. A Tabela 5.2 apresenta as massas determinadas durante este ensaio.

Tabela 5.2 – Massas determinadas no ensaio de absorção.

	Calçada miúda	Calçada grossa			
	10 Blocos	Número de blocos			
		1 e 2	3 e 4	5	6 e 7
M ₁ - Massa dps blocos saturados (g)	4181	5982	7028	3617	7400
M ₂ - Massa dos blocos e cesto imersos em água (g)	3361	4490	5920	3024	5370
M ₃ - Massa do cesto vazio imerso em água (g)	777				
M ₄ - Massa dos blocos seco em estufa (g)	4113	5926	6975	3582	7325

A capacidade de absorção de água dos paralelepípedos de calçada corresponde ao quociente entre a massa de água contida nos poros dos blocos saturados e a massa destes depois de secos em estufa. Desta forma a absorção de água é dada pela Equação (5.4) sendo os resultados apresentados na Tabela 5.3.

$$WA_{25} = \frac{100 \cdot (M_1 - M_4)}{M_4} \quad (5.4)$$

Tabela 5.3 – Absorção de água dos blocos de calçada.

	Calçada miúda	Calçada grossa			
	10 Blocos	Número de blocos			
		1 e 2	3 e 4	5	6 e 7
Absorção de água (%)	1.7	0.9	0.8	1.0	1.0

A absorção de água pelos blocos de calçada miúda e de calçada grossa é em média de, respectivamente, 1.7 % e de 0.9 %.

Com base no procedimento de ensaio definido na norma foram ainda determinadas as seguintes massas volúmicas:

- A massa volúmica dos blocos secos em estufa é de 2571 kg/m³ para calçada miúda e de 2879 kg/m³ para calçada grossa, sendo dada por:

$$\rho_{rd} = \frac{M_4}{\frac{M_1 - (M_2 - M_3)}{\rho}} \quad (5.5)$$

- A massa volúmica dos blocos depois de imersos em água durante 24 h e após terem sido limpas as suas superfícies foi de 4940 kg/m³ e 7186 kg/m³ para a calçada miúda e para a calçada grossa, respectivamente, calculando-se através da seguinte expressão:

$$\rho_{ssd} = \frac{M_1}{\frac{[M_1 - (M_2 - M_3)]}{\rho}} \quad (5.6)$$

5.2. Ensaios de campo

Neste capítulo são apresentadas as curvas de capacidade de infiltração resultantes das 4 séries de ensaios feitas sobre os dois tipos de pavimentos em calçada (miúda e grossa) com carga hidráulica variável e constante. No Capítulo 5.2.2 tecem-se as considerações sobre os resultados destes ensaios.

5.2.1. Ensaios preliminares

A realização de ensaios iniciou-se em Agosto de 2010 com sete ensaios preliminares na calçada miúda, cujo propósito foi referido no Capítulo 4.2.2.1 (Gráfico 5.2).

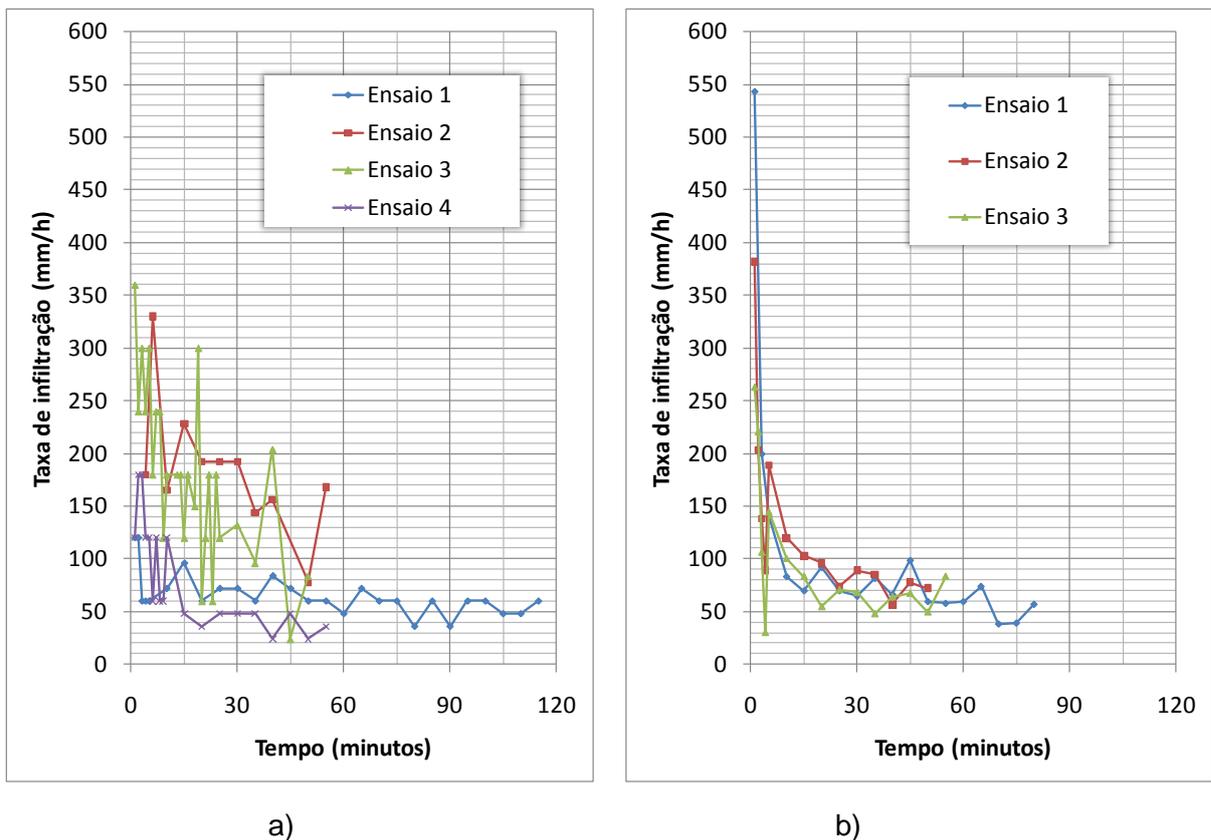


Gráfico 5.2 – Taxas de infiltração na calçada miúda resultantes dos ensaios preliminares com: a) carga hidráulica variável e b) carga hidráulica constante.

Com base neste trabalho preliminar verificaram-se alguns dos pressupostos que condicionaram o método de realização dos ensaios descrito no Capítulo 4.2.2, nomeadamente:

- A adopção de uma altura de água no infiltrómetro de 15 cm, valor máximo definido por Raghunath (2006), para conseguir ensaios com carga variável mais longos.
- A necessidade de prolongar os ensaios até que se atingisse a taxa de infiltração final, o que implicou:
 - A recarga de água do infiltrómetro com 15 cm quando o nível atingia os 3 cm de altura no ensaio com carga variável;
 - A utilização de um equipamento automático para controlo do abastecimento do infiltrómetro nos ensaios com carga hidráulica constante.
- A constatação de que as perdas por evaporação eram nulas apesar das temperaturas características da época do ano.

É de referir que os valores de capacidade de infiltração obtidos nos instantes iniciais só coincidem com as taxas de infiltração reais para precipitações com intensidades superiores à curva de capacidade de infiltração, tal como foi referido no Capítulo 3.2.

5.2.2. Ensaios com carga hidráulica variável

Os Gráficos 5.3 e 5.4 apresentam as curvas de capacidade de infiltração dos ensaios com carga hidráulica variável realizados na calçada miúda e na grossa respectivamente.

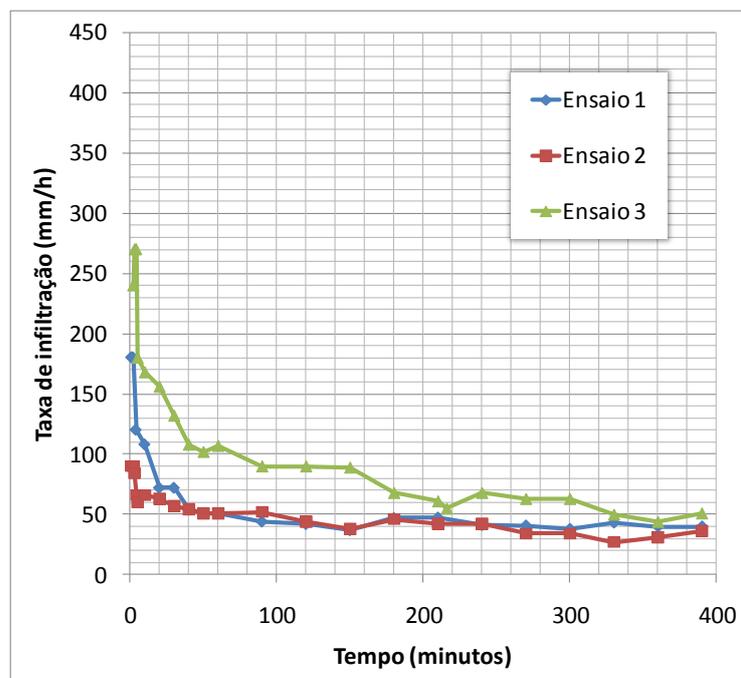


Gráfico 5.3 – Taxa de infiltração em ensaios com carga variável em calçada miúda.

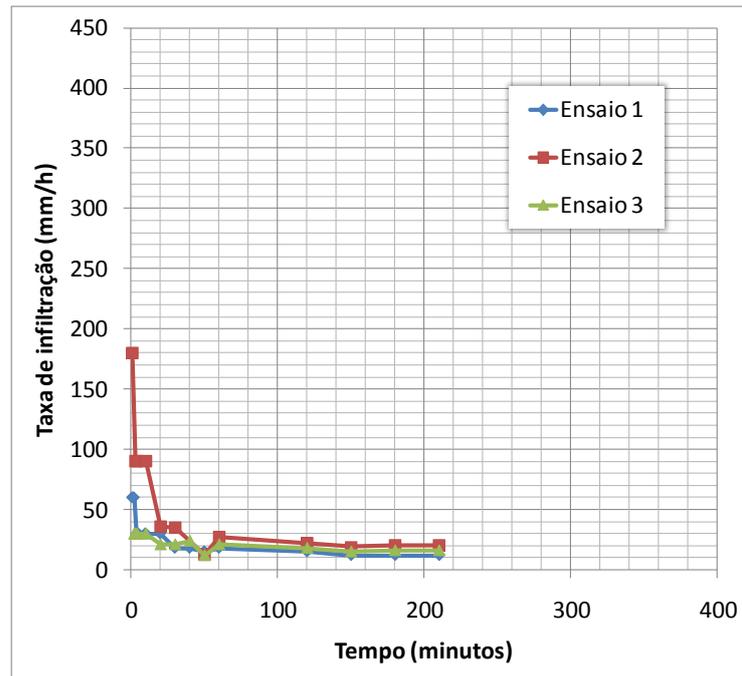


Gráfico 5.4 – Taxa de infiltração em ensaios com carga variável em calçada grossa.

5.2.3. Ensaios com carga hidráulica constante

Os Gráficos 5.5 e 5.6 revelam os resultados obtidos nas séries de ensaios com carga constante feitas respectivamente, na calçada miúda e na grossa.

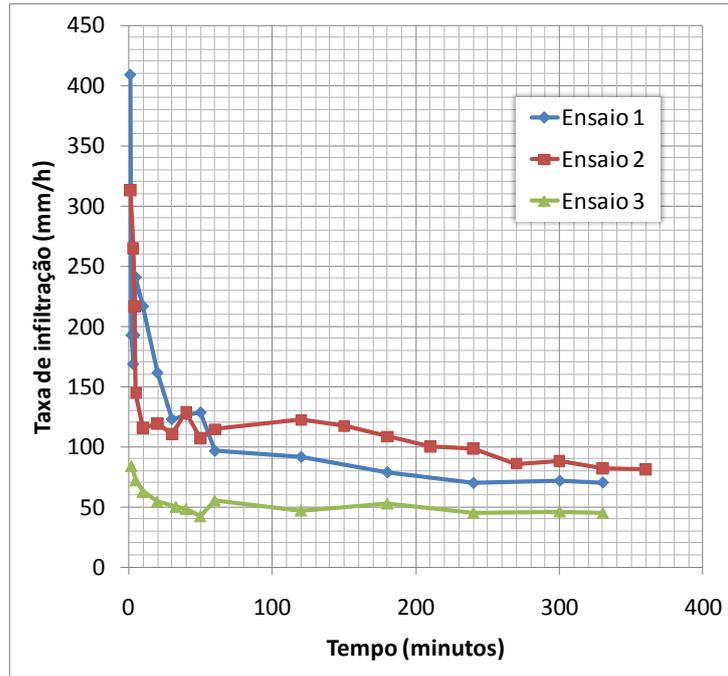


Gráfico 5.5 – Taxa de infiltração em ensaios com carga constante em calçada miúda.

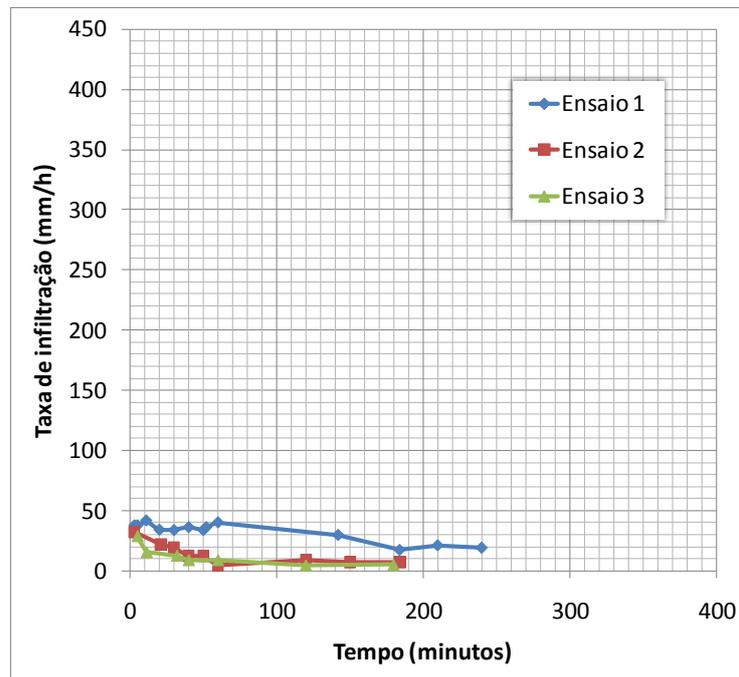


Gráfico 5.6 – Taxa de infiltração em ensaios com carga constante em calçada grossa ⁽¹⁾.

As tabelas com os dados recolhidos nas 4 séries de ensaios de campo estão contidas no Anexo C.

⁽¹⁾ A escala vertical foi escolhida de modo a facilitar a comparação entre os vários ensaios de infiltração.

5.2.4. Resumo dos resultados obtidos

A Tabela 5.4 apresenta a caracterização resumida dos ensaios de campo, na qual estão simbolizados, respectivamente a vermelho e a azul, os valores mais elevados e mais baixos das taxas de infiltração por cada série de ensaios.

Tabela 5.4 – Tabela resumo dos ensaios de campo com infiltrómetro.

	Ensaio com carga hidráulica variável						Ensaio com carga hidráulica constante					
	Calçada miúda			Calçada grossa			Calçada miúda			Calçada grossa		
	Nº Ensaio			Nº Ensaio			Nº Ensaio			Nº Ensaio		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Data de realização do ensaio	03-Out	20-Out	12-Nov	27-Out	27-Out	06-Nov	19-Out	25-Nov	07-Jan	15-Dez	05-Jan	05-Jan
Temperatura da água (°C)	22	19	18	19	19	19	18	18	18	18	18	18
Taxa de infiltração máxima (mm/h)	180	90	270	60	180	30	409	313	84	38	32	29
Taxa de infiltração final (mm/h)	40	30	50	12	20	16	70	81	45	19	7	5
Taxa de infiltração média (mm/h)	67	46	115	26	53	22	152	132	54	32	14	12
Duração do ensaio (h)	6.5	6.5	6.5	3.5	3.5	3.5	5.5	6	5.5	4	3	3

Nota-se que a calçada miúda é o pavimento que apresenta a maior discrepância de resultados dentro da mesma série de ensaios, especialmente nos ensaios com carga hidráulica constante.

A duração dos ensaios foi distinta nos dois tipos de pavimentos uma vez que na calçada miúda a taxa de infiltração final demorou mais tempo a ser alcançada.

É de referir que as taxas de infiltração obtidas poderão estar sujeitas a erros subjacentes à realização dos ensaios com infiltrómetro, nomeadamente a existência de:

- Escoamento lateral em movimentos não verticais de propagação do bolbo de infiltração.
- Caminhos preferenciais de escoamento da água aquando da colocação do infiltrómetro.

5.2.5. Análise dos resultados de campo

5.2.5.1 Variação das taxas de infiltração durante a série de ensaios.

As taxas de infiltração inicial, final e média ao longo do tempo (data de execução dos ensaios) são apresentadas no Gráfico 5.7. Observa-se, na generalidade, uma tendência decrescente, tal como seria expectável, dos valores de taxas iniciais de infiltração do primeiro para o último ensaio influenciada pelo grau de humidade do solo. A alteração do grau de humidade do solo entre ensaios deveu-se à precipitação ocorrida durante os meses de Outubro a Janeiro.

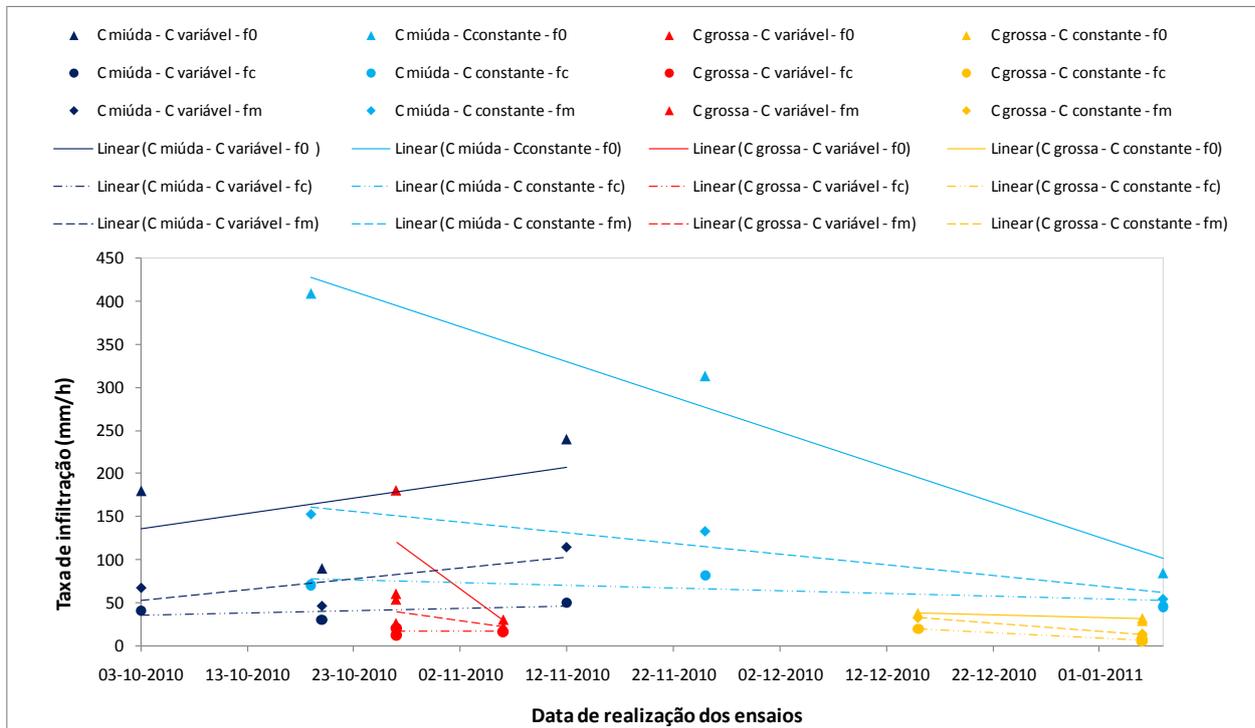


Gráfico 5.7 – Taxas de infiltração inicial (f_0), final (f_c) e média (f_m) para cada ensaio em função da data de execução.

5.2.5.2 Comparação dos resultados dos ensaios de campo com a equação de Horton

A equação de Horton, tendo sido verificada por vários autores (e. g., Moura, 2005 e Paixão *et al.*, 2004) a sua adequada aproximação aos resultados dos ensaios de infiltração comparativamente com outras equações, foi aplicada aos ensaios de campo realizados. É de referir no entanto que esta equação está direccionada para a interpretação de curvas de infiltração resultantes da ocorrência de precipitação e não da aplicação de uma carga hidráulica como acontece com os infiltrómetros de inundação.

A Tabela 5.5 apresenta o coeficiente da equação de Horton (k) calculado com base na Equação (3.9) e o coeficiente de determinação (R^2) de cada ensaio.

O coeficiente da equação de Horton permite caracterizar o andamento inicial da curva de infiltração, sendo que os valores mais elevados conduzem a curvaturas mais acentuadas. Verifica-se que na série de ensaios em calçada grossa com carga variável os valores apresentam a maior oscilação, diferindo 3.17 h^{-1} entre ensaios. A menor discrepância entre estes coeficientes para a mesma série de ensaios (1.26 h^{-1}) registou-se também neste pavimento mas nos ensaios com carga hidráulica variável.

Para cada ensaio foi determinado o coeficiente de determinação de forma a verificar variação entre as taxas de infiltração obtidas em campo e a equação de Horton.

Tabela 5.5 – Coeficiente da equação de Horton para cada ensaio.

	Ensaio com carga hidráulica variável						Ensaio com carga hidráulica constante					
	Calçada miúda			Calçada grossa			Calçada miúda			Calçada grossa		
	Nº Ensaio			Nº Ensaio			Nº Ensaio			Nº Ensaio		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Coeficiente da equação Horton (h^{-1})	3.15	0.84	1.1	3.05	4.35	1.18	2.21	1.08	0.76	0.31	1.27	1.57
Coeficiente de determinação	0.95	0.84	0.89	0.77	0.82	0.60	0.56	0.47	0.35	0.15	0.74	0.78

As curvas de infiltração dadas pela aplicação da equação de Horton aos resultados de campo nos ensaios com carga variável em calçada miúda mostram diferentes configurações entre si, sendo representadas nos quatro seguintes gráficos por “H”.

Os Gráficos 5.8 e 5.9 mostram a adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga hidráulica variável na calçada miúda e na calçada grossa, respectivamente.

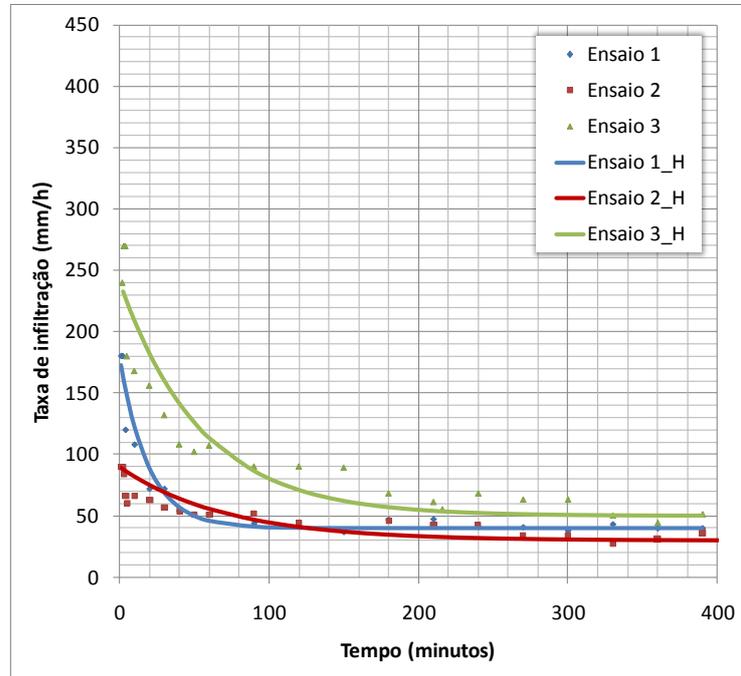


Gráfico 5.8 – Adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga variável em calçada miúda.

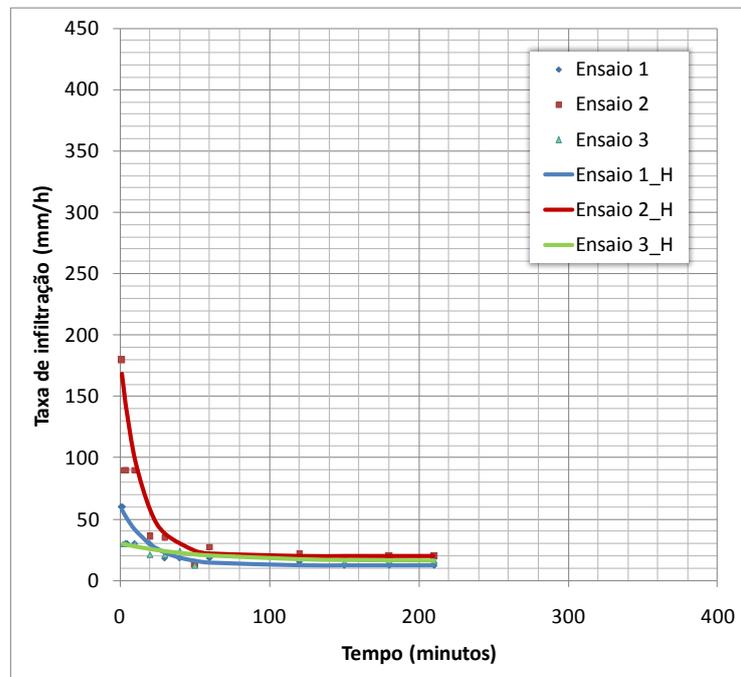


Gráfico 5.9 – Adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga variável em calçada grossa.

Os Gráficos 5.10 e 5.11 apresentam a adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga hidráulica constante na calçada miúda e na calçada grossa, respectivamente.

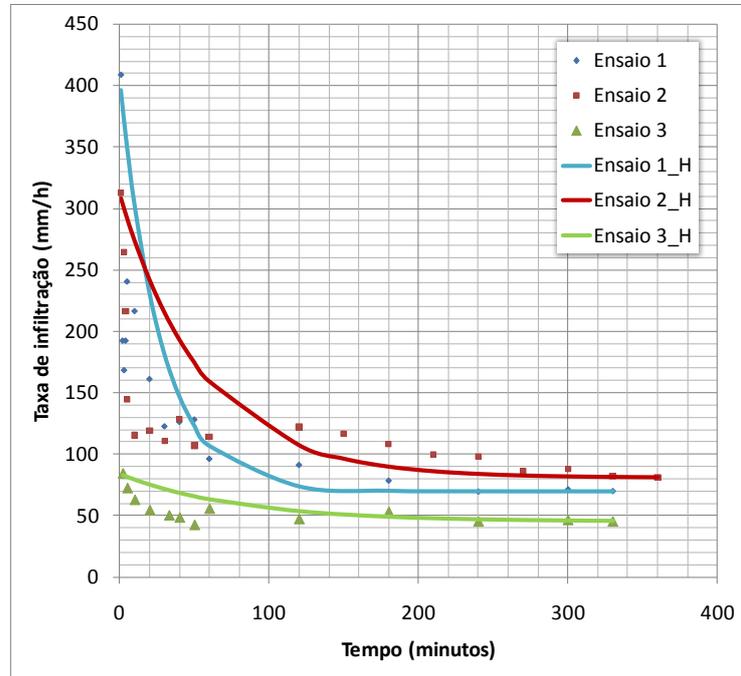


Gráfico 5.10 – Adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga constante em calçada miúda.

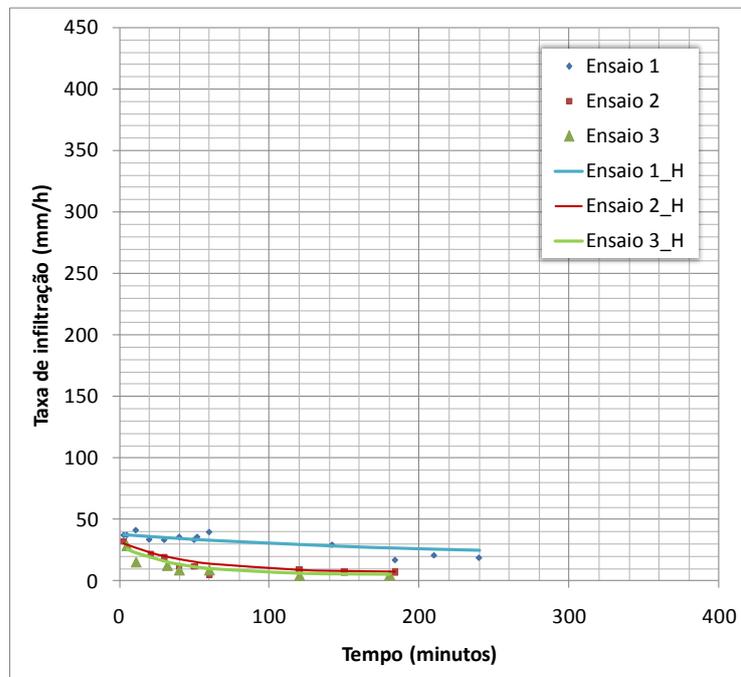


Gráfico 5.11 – Adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga constante em calçada grossa.

No Gráfico 5.12 observam-se com mais pormenor as curvas de infiltração resultantes da série de ensaios em calçada grossa com carga hidráulica constante.

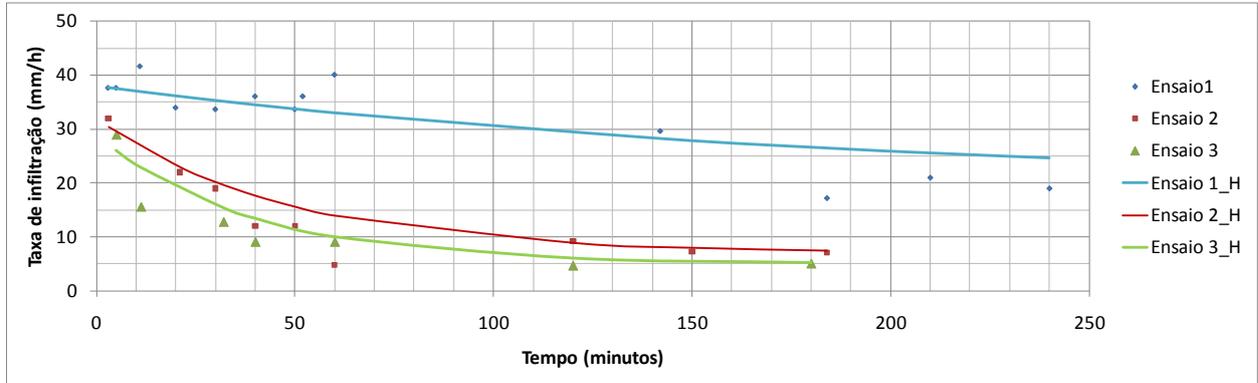


Gráfico 5.12 – Pormenor da adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas nos ensaios com carga constante em calçada grossa.

No Gráfico 5.13 observam-se os coeficientes de determinação para cada série de ensaios, sendo que para a calçada miúda e para a calçada grossa analisadas o valor é, em média, respectivamente de 0.67 e 0.64. Nota-se que a equação de Horton demonstrou uma melhor adaptação aos ensaios realizados com carga hidráulica variável (0.81) do que aos ensaios com carga hidráulica constante (0.51).

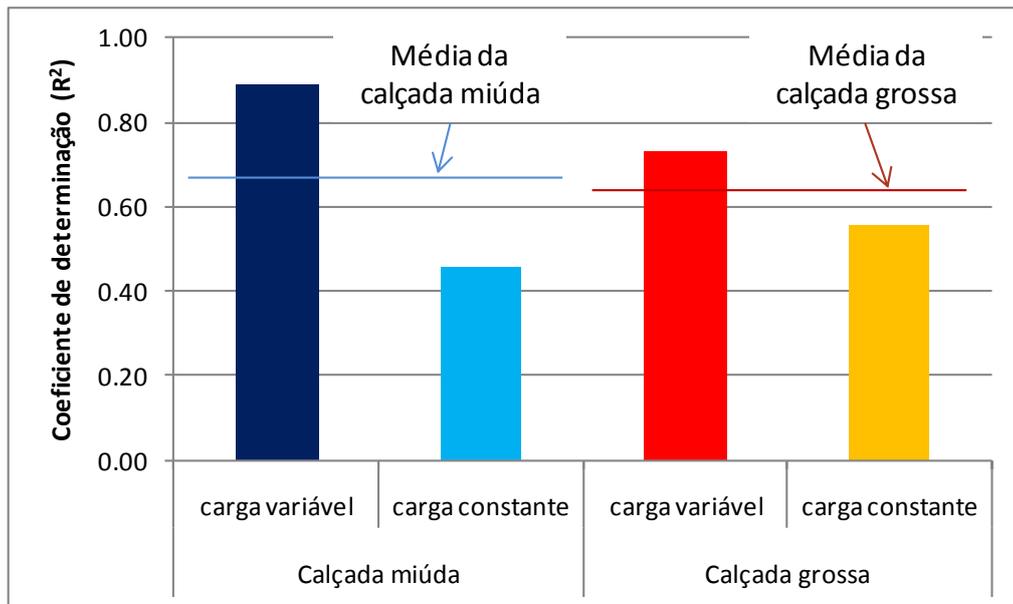


Gráfico 5.13 – Coeficiente de determinação para avaliar a adaptação da equação de Horton às taxas de infiltração obtidas em campo.

5.2.5.3 Relação entre as taxas de infiltração na calçada miúda e na calçada grossa

A média das taxas de infiltração nos ensaios em calçada miúda e calçada grossa é apresentada nos Gráficos 5.14 a) e b) para os ensaios com carga hidráulica variável e com carga hidráulica constante, respectivamente.

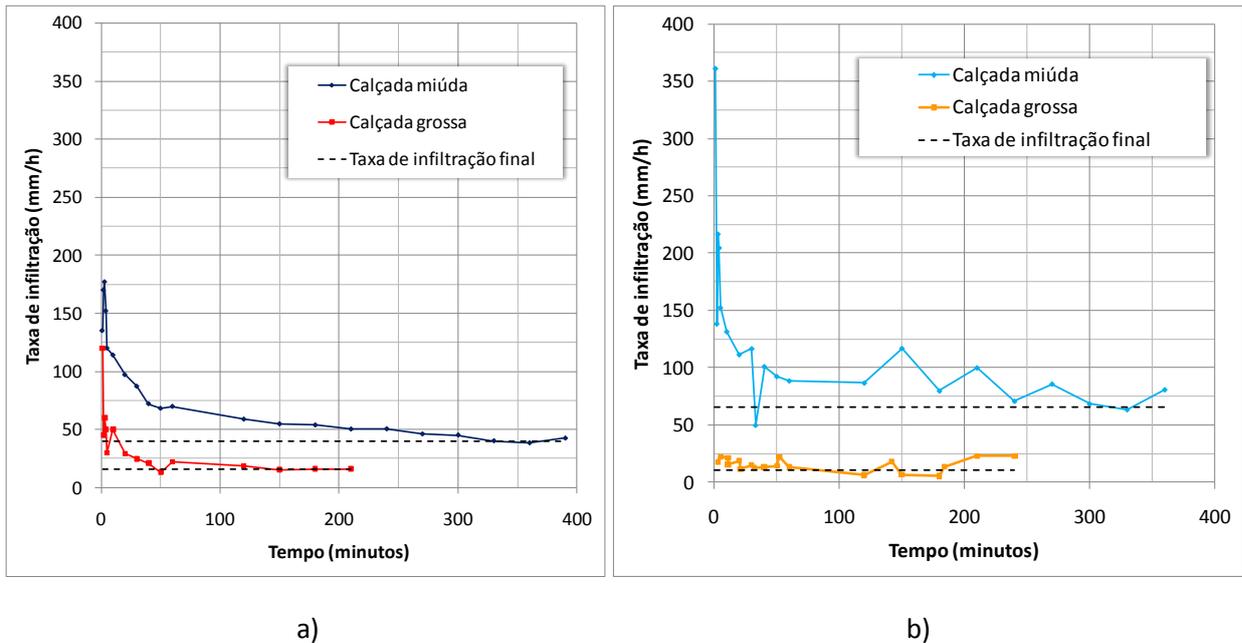


Gráfico 5.14 – Taxa de infiltração média resultante dos ensaios com: a) carga hidráulica variável e b) carga hidráulica constante.

Verifica-se que, nos locais ensaiados, a calçada grossa analisada promove taxas de infiltração inferiores às da calçada miúda. Na calçada grossa a taxa de infiltração final foi atingida após cerca de 3 h de ensaio enquanto na calçada miúda esta taxa foi conseguida após o dobro do tempo.

5.2.5.4 Relação entre os resultados dos ensaios com carga variável e constante

O Gráficos 5.15 apresenta a média das taxas de infiltração nos ensaios com carga hidráulica variável e constante para cada um dos tipos de pavimento em calçada.

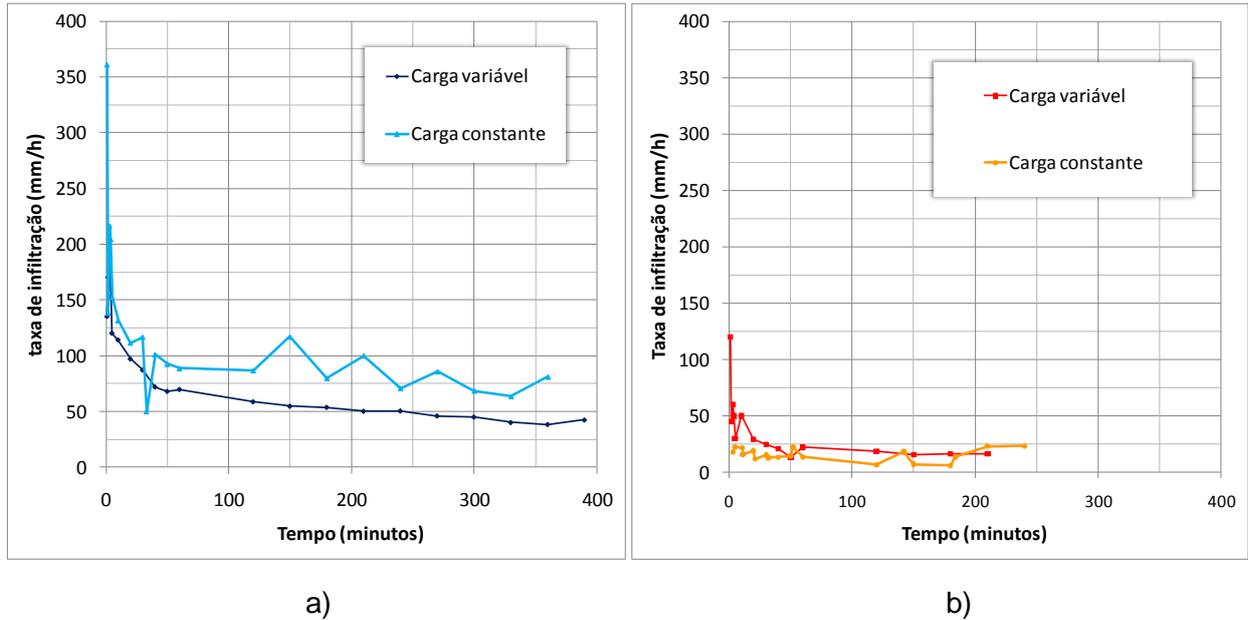


Gráfico 5.15 – Taxa de infiltração média resultante dos ensaios em: a) calçada miúda e b) calçada grossa.

Os ensaios com carga hidráulica variável e constante forneceram resultados semelhantes na calçada grossa e no respectivo solo base, tal como se viu no Gráfico 5.1.

Na calçada miúda os ensaios com carga hidráulica variável produziram taxas de infiltração mais baixas do que os ensaios com carga hidráulica constante, relação também observada no solo base deste pavimento caracterizado por uma granulometria mais grosseira do que o solo base da calçada grossa.

Verifica-se que a granulometria do solo influencia a proximidade entre os resultados das duas metodologias de ensaios de infiltração (carga variável e constante), tal como referido no Capítulo 3.3.3.1.

A Tabela 5.6 apresenta a média das taxas de infiltração máximas e finais para cada série de ensaios.

Tabela 5.6 – Média das taxas de infiltração máximas e das taxas de infiltração finais para cada série de ensaios.

	Carga variável		Carga constante	
	C. miúda	C. grossa	C. miúda	C. grossa
Taxa de infiltração máxima (mm/h)	177	120	361	42
Taxa de infiltração final (mm/h)	40	16	65	10

5.2.5.5 Relação entre os valores de condutividade hidráulica saturada

O Gráfico 5.16 mostra que, para os locais ensaiados, a condutividade hidráulica saturada é superior para a calçada miúda, sendo em média de 53 mm/h, enquanto na calçada grossa é de 13 mm/h.

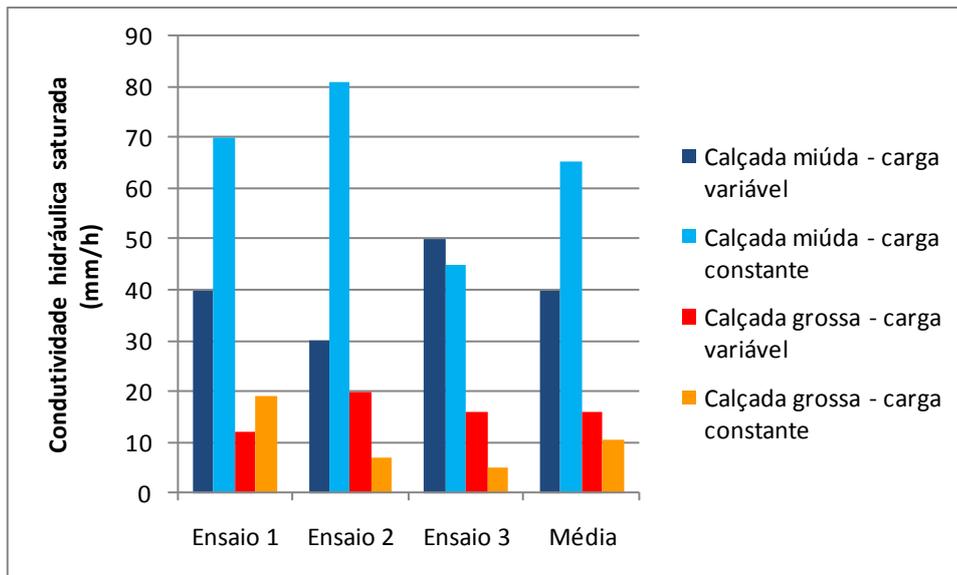


Gráfico 5.16 – Condutividade hidráulica saturada de cada ensaio e valor médio por série de ensaios.

A estimativa da condutividade hidráulica é um processo complexo devido à variabilidade espacial e temporal deste valor que depende das propriedades da água (*e. g.*, temperatura), do grau de compactação do pavimento, da constituição da camada de assentamento e da camada de solo base. Por outro lado, a determinação da condutividade hidráulica saturada em campo está sujeita a erros subjacentes à realização dos ensaios. Como tal, o rigor da estimativa da condutividade hidráulica saturada beneficia com a realização de grande número de ensaios e com o tratamento estatístico dos resultados, tal como indicado por Bagarello *et al.* (2007).

Pelo Gráfico 5.17 observa-se que os valores de condutividade hidráulica saturada apresentam menor variação, relativamente aos valores médios, nas séries de ensaios feitos na calçada grossa (6 mm/h) do que na calçada miúda (13 mm/h).

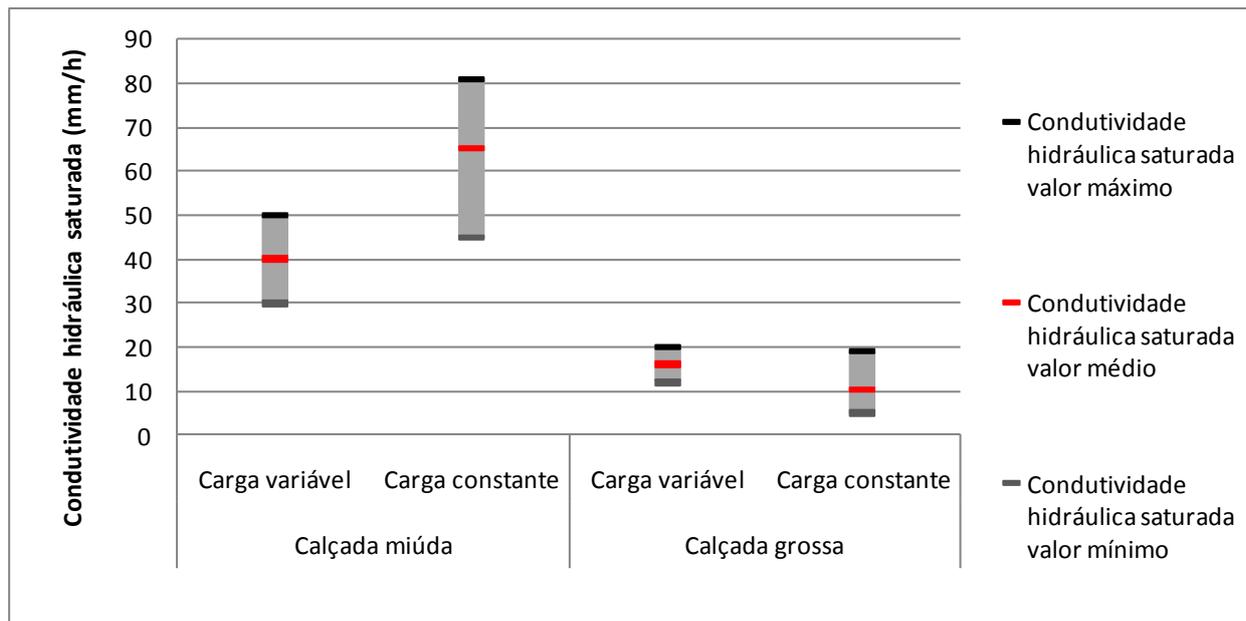
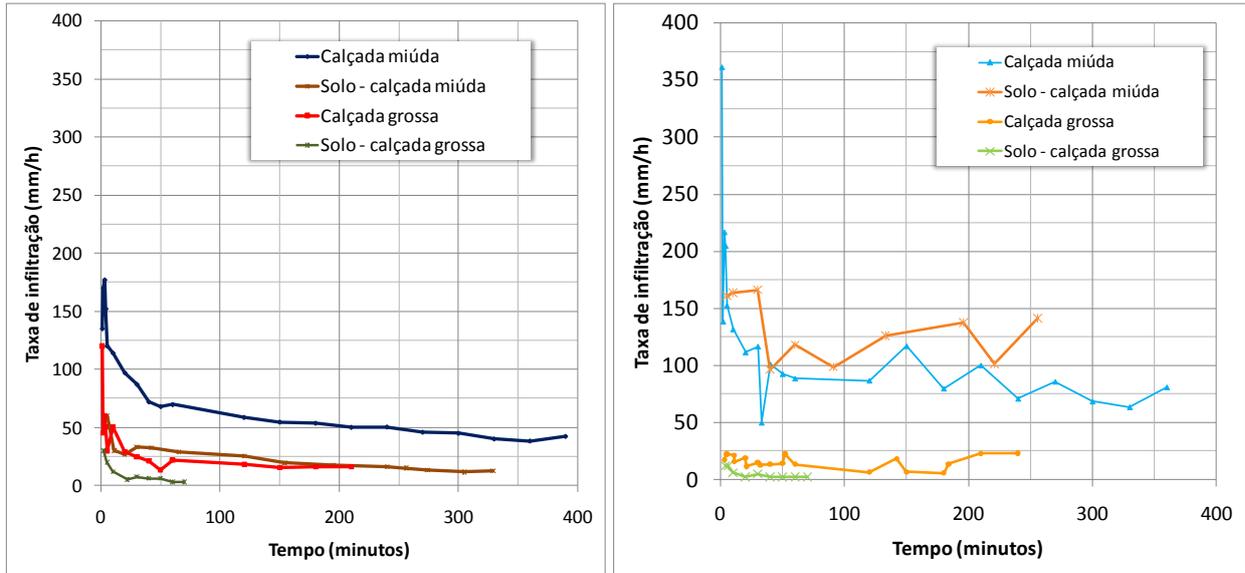


Gráfico 5.17 – Comparação entre valores máximos, médios e mínimos de condutividade hidráulica saturada por cada série de ensaios.

5.2.5.6 Relação entre os ensaios na calçada e no respectivo solo de base

Os ensaios realizados no solo permitiram comparar as curvas de infiltração com as curvas dos pavimentos que lhes estão associados. No Gráfico 5.18 observa-se que os solos apresentam taxas de infiltração inferiores às do respectivo pavimento (com excepção dos ensaios de infiltração com carga constante feitos na calçada miúda), o que pode dever-se aos seguintes factores:

- O pavimento em calçada possui uma camada de assentamento de material granular que permite taxas de infiltração superiores às dos solos base analisados apesar do revestimento com blocos.
- Ao longo das séries de ensaios o grau de humidade antecedente foi aumentando, justificando taxas de infiltração iniciais inferiores no solo comparativamente com as dos pavimentos, cujos ensaios decorreram primeiro.



a)

b)

Gráfico 5.18 – Comparação entre as curvas de infiltração na calçada e no respectivo solo obtidas com base em ensaios com: a) carga variável e b) carga constante.

No Gráfico 5.19 é possível observar que os pavimentos apresentam valores de condutividade hidráulica saturada superiores aos dos solos em que se inserem. Tal como foi referido no Capítulo 5.1.1, o valor elevado de condutividade hidráulica obtido no ensaio com carga constante no solo base da calçada miúda poderá dever-se à alteração da estrutura do solo ou à existência de caminhos preferenciais.

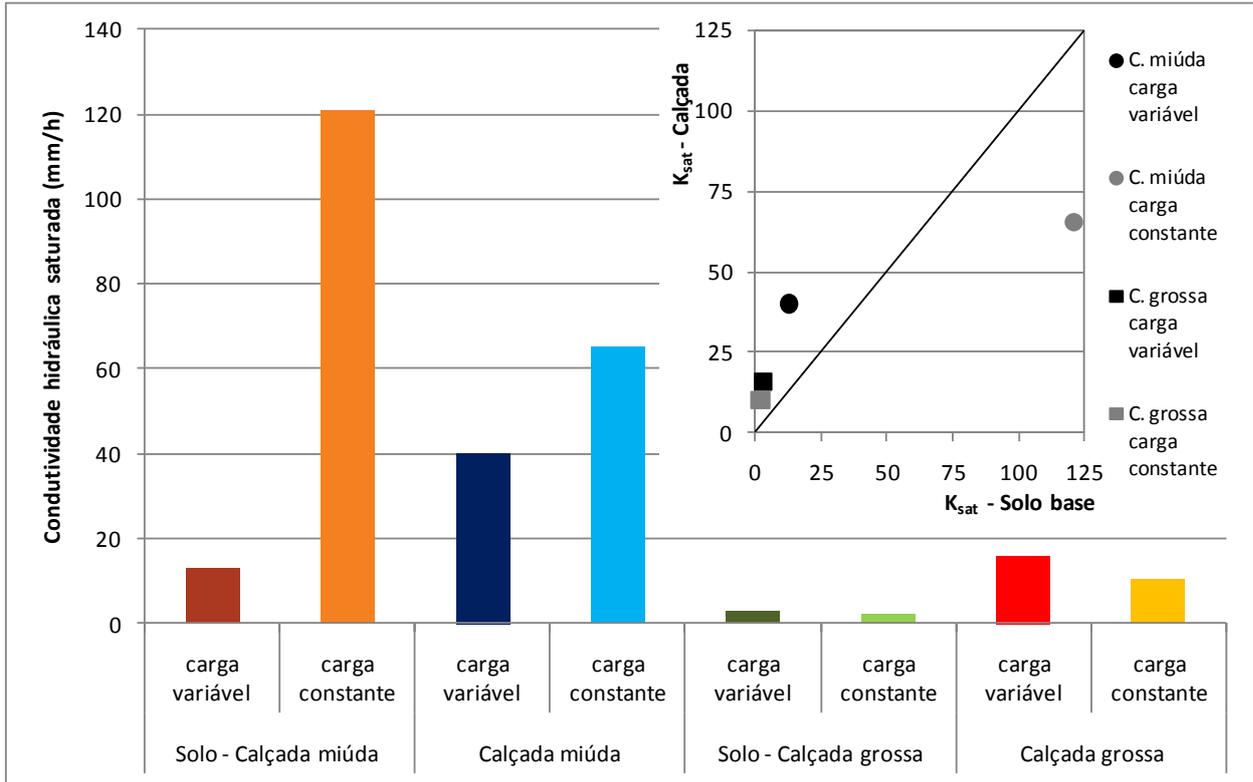


Gráfico 5.19 – Comparação entre a condutividade hidráulica saturada na calçada e no respectivo solo.

5.2.5.7 Comparação entre os resultados de campo e os valores da literatura

Tal como referido no Capítulo 3.3, existem na literatura diversos estudos feitos para a determinação da taxa de infiltração em pavimentos permeáveis. Para além do valor fornecido por Illgen *et al.* (2007) para a taxa de infiltração final no pavimento em calçada, os valores médios de taxas de infiltração finais obtidos através dos ensaios de campo para cada tipo de pavimento foram também comparados com as taxas de infiltração finais dos pavimentos, apresentados na literatura, considerados similares à calçada (Tabela 5.7). Foram recolhidos da Tabela 3.3 os pavimentos compostos por blocos (maciços e vazados) e grelhas de betão, com juntas colmatadas pelo uso e camada base compactada, sendo estas características envolvidas concordantes com as dos pavimentos em calçada ensaiados. O chão compactado está incluído na tabela para que se possa comparar a sua taxa de infiltração final com a da calçada.

Tabela 5.7 – Taxa de infiltração final dos pavimentos em calçada e dos pavimentos permeáveis semelhantes descritos na literatura (ver gráfico 5.20).

Tipo de pavimento	Taxa de infiltração final (mm/h)	Referência
Calçada miúda	53	Ensaio de campo realizados
Calçada grossa	13	
Calçada	79.00	Illgen <i>et al.</i> , 2007
Chão compactado	51.00	Moura, 2005
Bloco maciço com base compactada e juntas colmatadas	43.25	
Blocos vazados com base compactada e juntas colmatadas	88.50	
Blocos com juntas abertas (0.2 cm a 0.51 cm) após 6 anos de construção	104.00	Ferguson, 2005
Grelhas de betão com células vazias, ocupando 10 % da área, preenchidas com agregados de 2 mm a 5 mm, 8 anos após a construção	105.00	

No Gráfico 5.20 é apresentada a taxa de infiltração final dos pavimentos permeáveis incluídos na Tabela 5.7. As diferenças entre os valores de taxas de infiltração finais apresentados para os pavimentos devem-se em grande parte aos factores envolventes, nomeadamente, o revestimento, o grau de compactação, o solo de base, o material que preenche os seus vazios e a técnica utilizada no ensaio de infiltração, entre outros aspectos.

O pavimento em calçada grossa apresentou a taxa de infiltração final mais baixa comparativamente com os restantes pavimentos. O pavimento em calçada miúda possui uma taxa de infiltração final semelhante à obtida por Moura (2005) para os blocos maciços e para o chão compactado, no entanto inferior aos restantes pavimentos permeáveis constituídos por grelhas e blocos de betão.

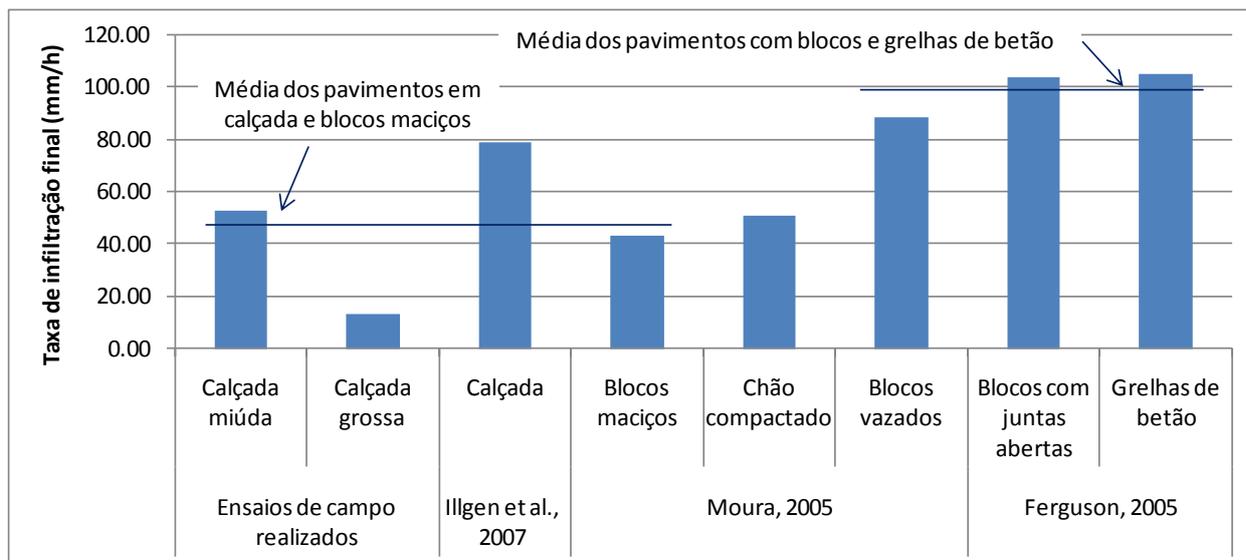


Gráfico 5.20 – Comparação entre os valores de taxa de infiltração final dos pavimentos em calçada ensaiados e os valores obtidos na bibliografia para pavimentos semelhantes (calçada, blocos de betão, grelhas e chão compactado).

5.3. Ensaios laboratoriais

Em laboratório foram executados 40 ensaios correspondentes à simulação de 10 chuvadas consecutivas, com a duração de 3 minutos, sobre as quatro seguintes superfícies de escoamento: calçada miúda com as juntas paralelas à direcção do escoamento; calçada miúda com as juntas a 45° com a direcção do escoamento; calçada grossa com as juntas paralelas à direcção do escoamento e calçada grossa com as juntas a 45° com a direcção do escoamento.

O Gráfico 5.21 mostra os resultados de escoamento superficial dos ensaios realizados em laboratório. Verifica-se uma tendência crescente do escoamento superficial ao longo das séries de 10 ensaios, para os 4 tipos de pavimento, devido ao aumento o grau de humidade do solo e, consequentemente, da precipitação efectiva. Com excepção do primeiro hidrograma de cada série, cuja curva de crescimento é mais prolongada no tempo, todos os restantes apresentam uma forma semelhante.

As diferenças absolutas entre os caudais de pico resultantes dos vários ensaios são baixas, o que poderá dever-se: à constituição idêntica dos pavimentos (variando apenas na dimensão e disposição dos blocos) e ao tamanho do talhão, cuja área é inferior à sugerida por Sobrinho *et al.* (2002). Verifica-se que todos os hidrogramas mantêm praticamente constantes as relações entre si ao longo das 10 simulações.

O escoamento superficial é mais elevado nos pavimentos com juntas a 45° com a direcção do escoamento do que com as juntas paralelas à direcção do escoamento. Esta relação apenas não se verifica nos três primeiros hidrogramas resultantes dos ensaios em calçada grossa com juntas a 45°, possivelmente devido à menor densidade de blocos neste modelo.

Os ensaios laboratoriais estão em conformidade com os ensaios de campo, uma vez que ambos identificaram a calçada miúda como o pavimento onde se registaram taxas de infiltração superiores, com conseqüente diminuição do caudal escoado.

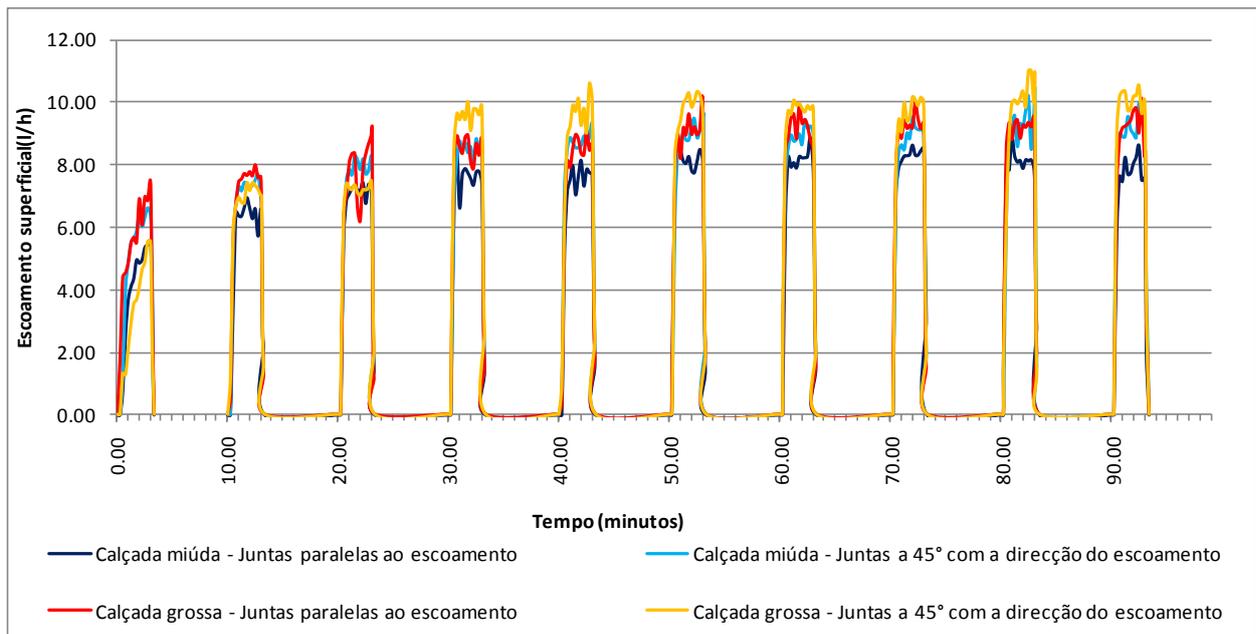


Gráfico 5.21 – Escoamento superficial resultante da simulação de precipitação nos quatro talhões de pavimento.

O Gráfico 5.22 apresenta o escoamento superficial médio resultante das 10 chuvadas sobre cada talhão de pavimento, comparando-o com o escoamento sobre uma superfície impermeável. Verifica-se que os talhões de calçada geraram um caudal de ponta cerca de 10 % inferior ao caudal escoado sobre a superfície impermeável.

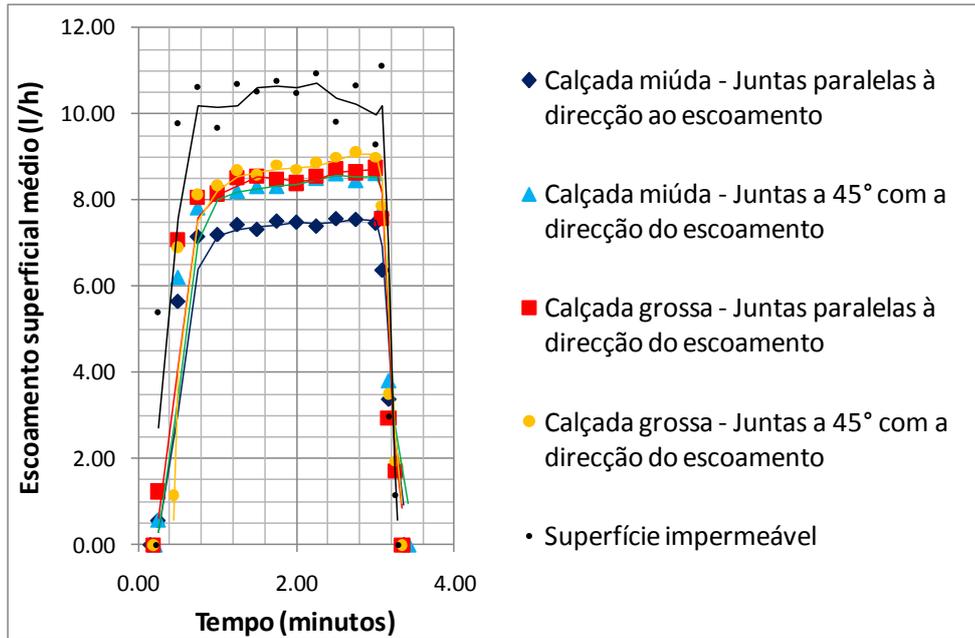


Gráfico 5.22 – Valores médios de escoamento superficial.

O Gráfico 5.23 apresenta, no decorrer das 10 simulações, os caudais máximos escoados, cujo valor aumenta ao longo do tempo, observando-se que as linhas de tendência têm o mesmo comportamento para todas as séries de ensaios.

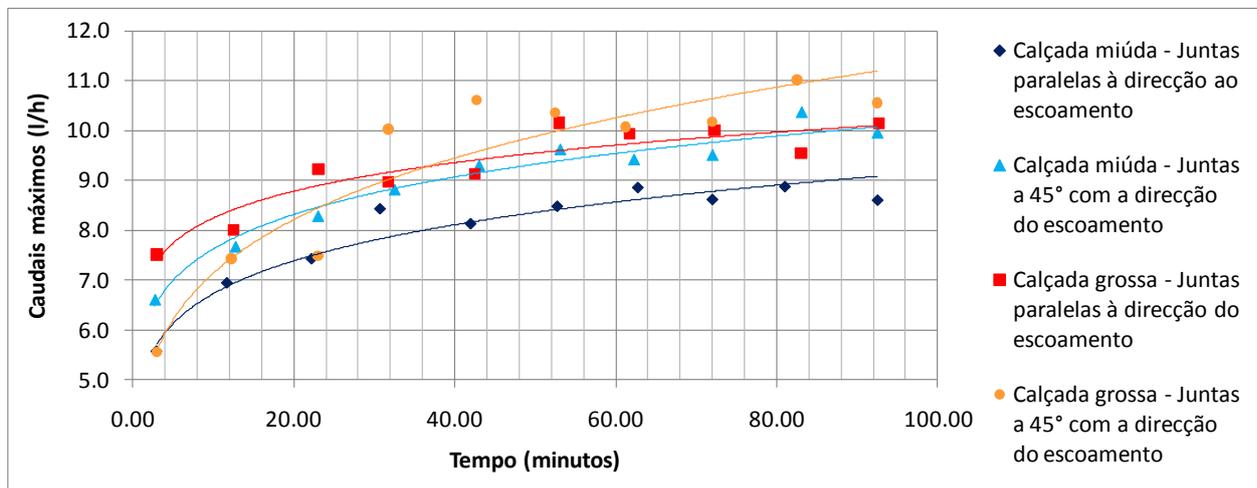


Gráfico 5.23 – Caudais máximos escoados ao longo das simulações.

Os coeficientes de escoamento dos vários eventos e para cada pavimento são apresentados no Gráfico 5.24. O coeficiente de escoamento aumenta com o número de ordem da chuvada como consequência do maior grau de humidade do solo.

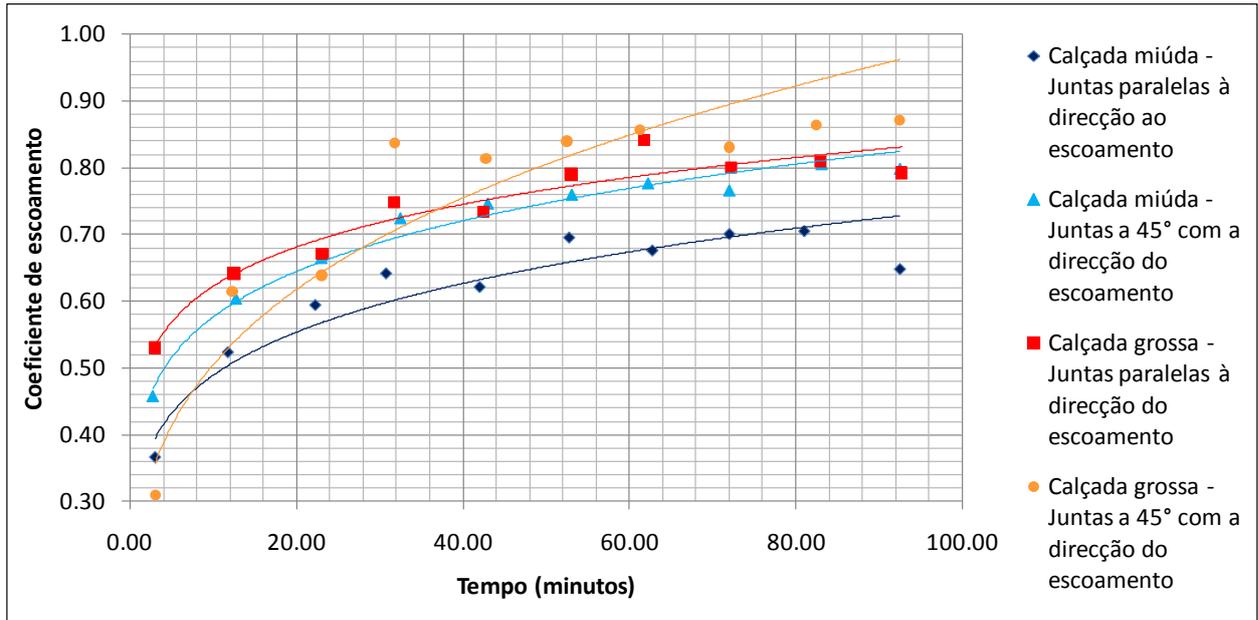


Gráfico 5.24 – Coeficientes de escoamentos de cada uma das simulações.

A calçada miúda com juntas paralela à direcção do escoamento apresentou um coeficiente de escoamento médio de 0.62, enquanto os outros talhões de pavimentos ensaiados apresentaram valores na ordem dos 0.73 (Gráfico 5.25).

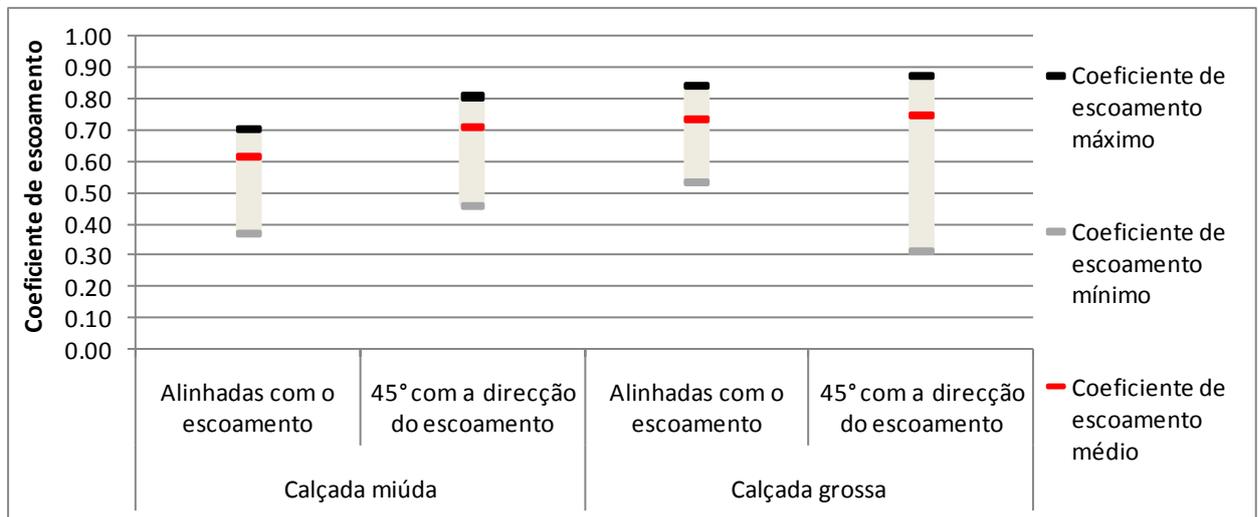


Gráfico 5.25 – Variação do coeficiente de escoamento consoante a tipologia do pavimento e a orientação das juntas com o escoamento.

As Figuras 5.2, 5.4, 5.6 e 5.8 apresentam um registo fotográfico feito antes e após cada série de dez chuvas. As Figuras 5.3, 5.5, 5.7, e 5.9 representam o “esquema” do relevo micrométrico

das juntas em diversas posições registado no final de cada série, estando o sentido do escoamento indicado pela seta azul.



Figura 5.2 – Calçada miúda com juntas paralelas à direcção do escoamento: a) antes da série de ensaios e b) após a série de ensaios.

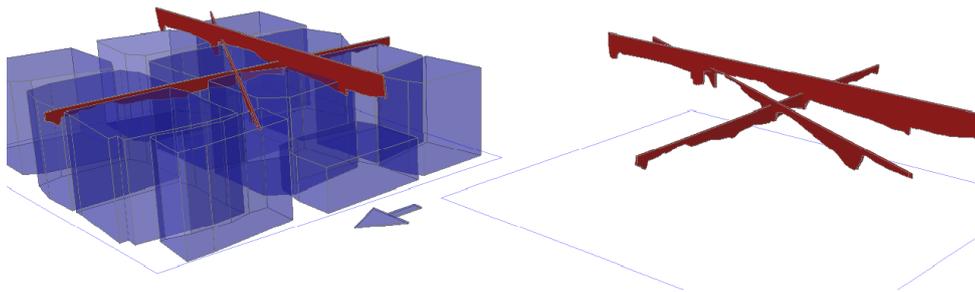


Figura 5.3 – Relevo de juntas em calçada miúda com juntas paralelas à direcção do escoamento.

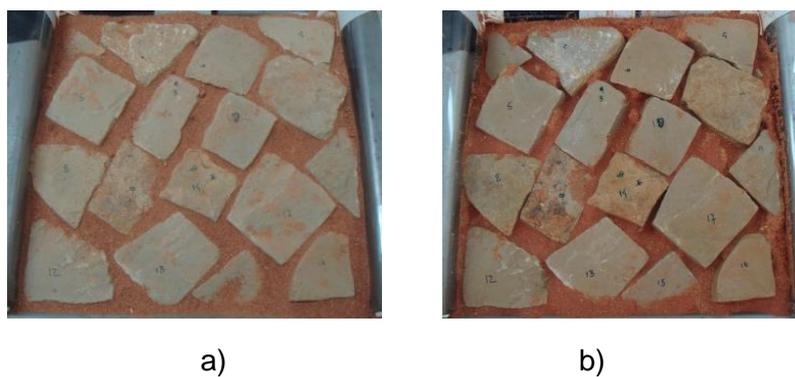


Figura 5.4 – Calçada miúda com juntas a 45° com o escoamento: a) antes da série de ensaios e b) após a série de ensaios.

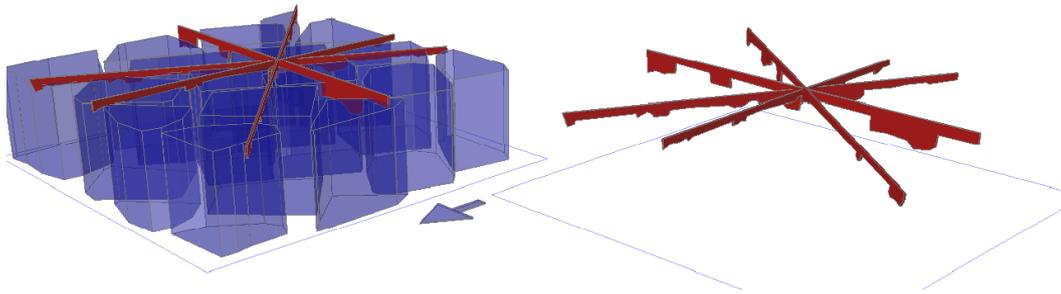


Figura 5.5 – Relevo de juntas em calçada miúda com juntas a 45° com o escoamento.

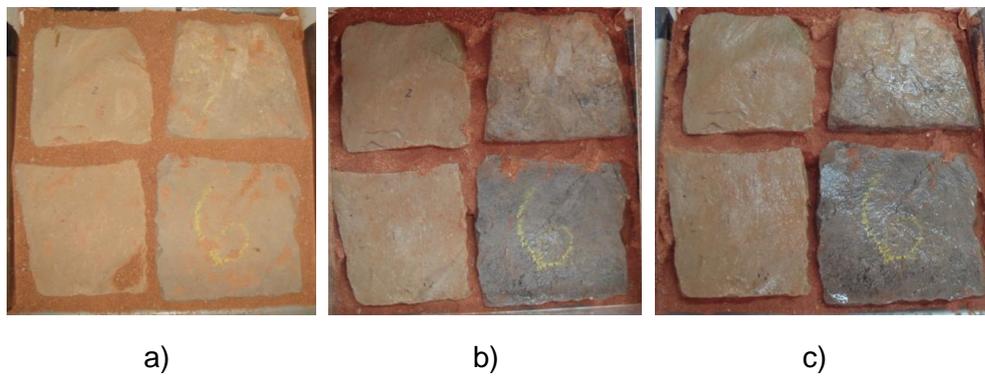


Figura 5.6 – Calçada grossa com juntas na direcção do escoamento: a) antes da série de ensaios, b) no final da quinta chuva e c) após a série de ensaios.

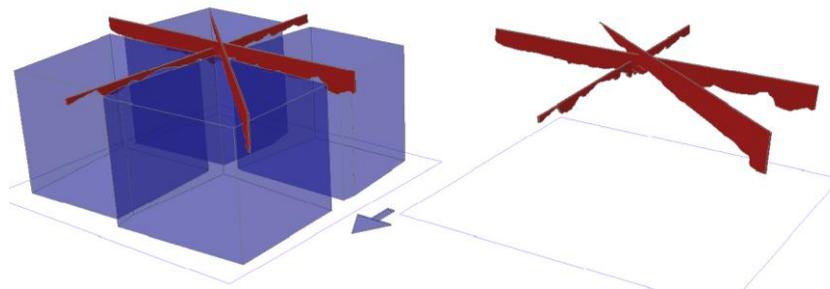


Figura 5.7 – Relevo de juntas em calçada grossa com juntas na direcção do escoamento.

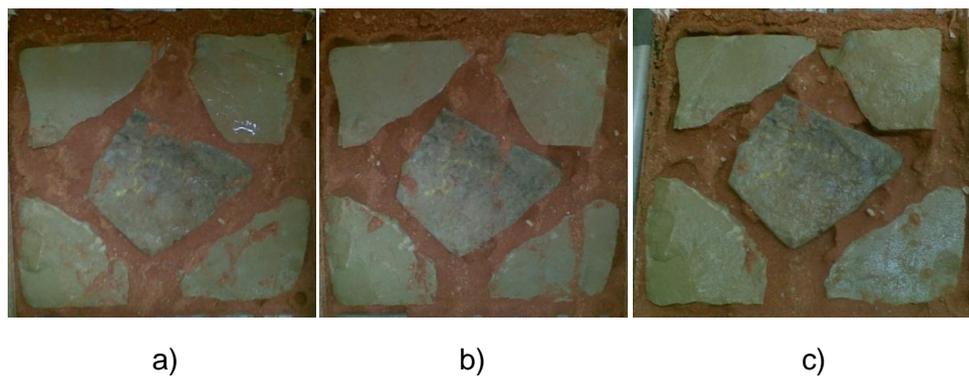


Figura 5.8 – Calçada grossa com juntas a 45° com o escoamento: a) após a primeira chuva, b) no final da sexta chuva e c) após a série de ensaios.

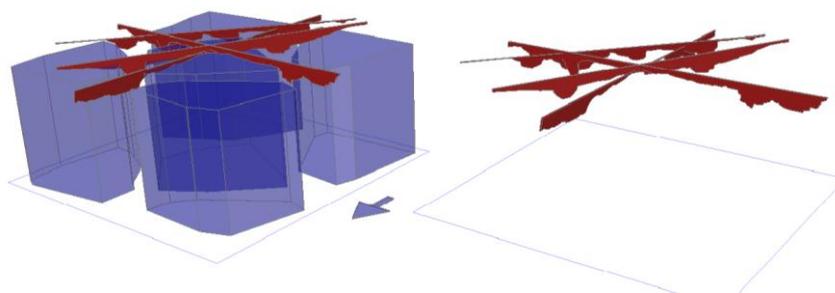


Figura 5.9 – Relevo de juntas em calçada grossa com juntas a 45° com o escoamento.

A erosão das juntas foi ligeiramente mais acentuada na zona central do pavimento, o que estará possivelmente relacionado com a distribuição espacial da chuva. As depressões geradas pelo impacto das gotas e pelo escoamento superficial, como consequência do transporte sólido, aumentaram a retenção da água e contribuíram para um crescimento menos acentuado dos caudais escoados.

As Tabelas com os dados recolhidos do escoamento superficial resultante de cada um dos ensaios feitos em laboratório estão contidas no Anexo D.

5.3.1. Comparação entre os resultados laboratoriais e os valores da literatura

A Tabela 5.8 apresenta os coeficientes de escoamento obtidos, não só pela médias dos coeficientes de escoamento nos pavimentos em calçada ensaiada em laboratório no âmbito deste trabalho, como também dos pavimentos considerados como semelhantes à calçada,

estudados na literatura. O critério de escolha dos pavimentos foi idêntico ao referido no Capítulo 5.2.2.7.

Tabela 5.8 – Coeficientes de escoamento dos pavimentos em calçada e dos pavimentos permeáveis semelhantes descritos na literatura (ver Gráfico 5.26).

Tipo de pavimento	Coeficiente de escoamento	Referência
Calçada miúda	0.66	Ensaios realizados em laboratório
Calçada grossa	0.74	
Calçada	0.6	Araújo <i>et al.</i> , 2000
Blocos de betão	0.78	
Blocos de betão	0.37	Alessi <i>et al.</i> , 2006
Blocos maciços com base compactada e juntas colmatadas	0.5225	Moura, 2005
Blocos vazados com base compactada e juntas colmatadas	0.3225	
Blocos vazados	0.5	Araújo <i>et al.</i> , 2000
Blocos de juntas abertas com vazios preenchidos com agregados de 0.5 cm a 2.0 cm	0.4	Ferguson, 2007

Verifica-se que os coeficientes de escoamento obtidos nos pavimentos ensaiados apresentaram-se próximos dos indicados por Araújo *et al.* (2000) para a calçada. Na generalidade os restantes pavimentos em betão na literatura forneceram coeficientes de escoamento inferiores.

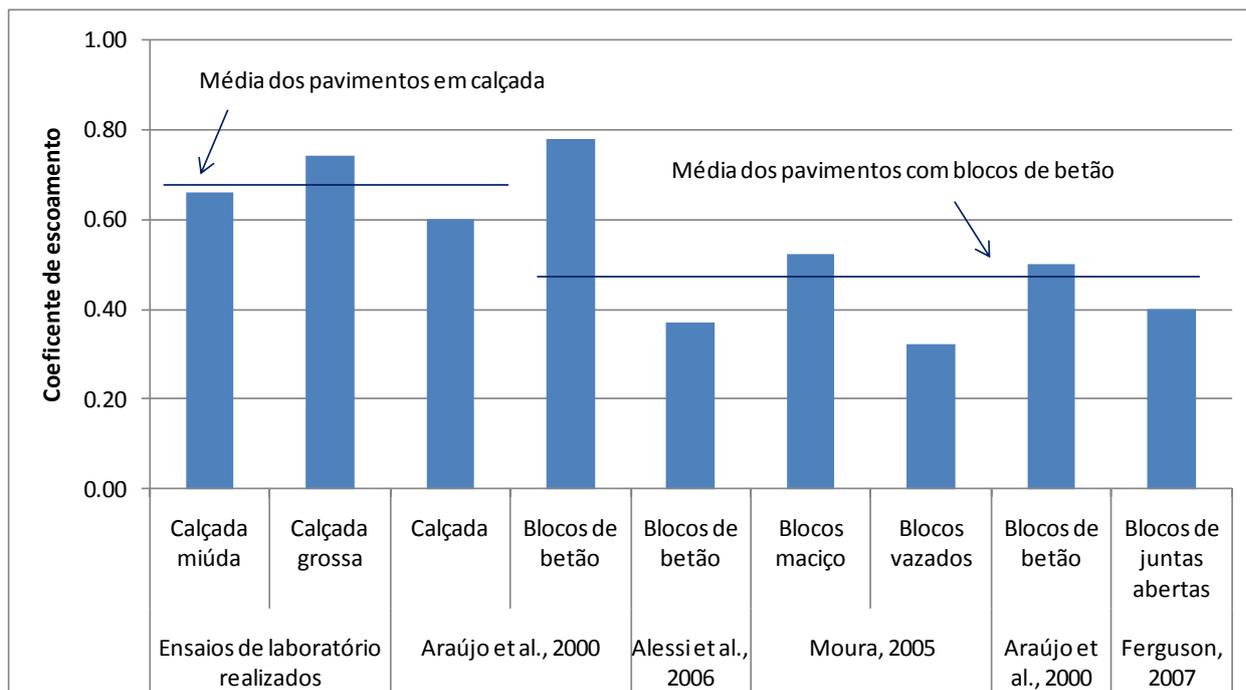


Gráfico 5.26 – Comparação entre os valores do coeficiente de escoamento dos pavimentos em calçada ensaiados e os valores constantes na literatura para pavimentos semelhantes (calçada e blocos de betão).

6. CONCLUSÃO

A estimativa da condutividade hidráulica saturada e das taxas de infiltração em pavimentos com Calçada à Portuguesa mostrou-se complexa graças à grande variabilidade destes valores no espaço e no tempo.

O trabalho desenvolvido permitiu verificar, para os pavimentos ensaiados, a influência que determinadas características destes exercem quanto à sua capacidade de infiltração. Tiraram-se as seguintes conclusões gerais:

- Os valores obtidos nas taxas finais de infiltração são comparáveis aos referenciados na bibliografia.
- A calçada miúda, quando comparada com a grossa, apresentou taxas de infiltração superiores e conseqüentemente um coeficiente de escoamento inferior, para a mesma área de juntas.
- A orientação das juntas na direcção paralela ao escoamento proporcionou maior capacidade de infiltração, comparativamente com as mesmas a 45° com o escoamento.

Os ensaios permitiram ainda estabelecer as seguintes relações:

- Na generalidade, observaram-se taxas de infiltração nos pavimentos superiores às dos solos correspondentes, o que se justifica pelas condições antecedentes de humidade e pela existência da camada de assentamento de blocos de maior permeabilidade;
- Os ensaios com carga hidráulica variável forneceram taxas de infiltração mais baixas na calçada miúda e no respectivo solo comparativamente com os ensaios com carga hidráulica constante. Na calçada grossa ambas as metodologias de ensaios apresentaram resultados semelhantes, tal como no solo base deste pavimento. Esta relação entre ensaios de carga variável e constante foi também verificada por Gregory *et al.* (2005);
- A equação de Horton, traduziu de forma semelhante os valores observados da taxa de infiltração em ambos os pavimentos de calçada ensaios em campo, sendo o valor do coeficiente de determinação (R^2) em média de 0.7;
- O teor de humidade inicial do solo (antes dos ensaios) mostrou influenciar os resultados obtidos tanto em campo como em laboratório;
- As taxas de infiltração finais obtidas nos ensaios de campo, em calçada miúda, aproximaram-se dos valores obtidos por Moura (2005) no chão compacto e nos blocos maciços. A calçada grossa apresentou uma taxa de infiltração final inferior aos restantes pavimentos permeáveis apresentados na bibliografia constituídos por blocos e grelhas de betão. Os coeficientes de escoamento obtidos nos ensaios laboratoriais aproximaram-se dos indicados por Araújo *et al.* (2000) para a calçada, mas foram

superiores aos dos restantes pavimentos permeáveis de blocos de betão apresentados na bibliografia.

Como futuras linhas de investigação podem-se destacar as seguintes:

- Realização de ensaios que permitam identificar de forma isolada a influência de diferentes características dos pavimentos em calçada na sua capacidade de infiltração, nomeadamente: o solo base e a respectiva condutividade hidráulica saturada, a dimensão e constituição da camada de pó-de-pedra ou areia, o grau de compactação, o declive e a manutenção através da eliminação da fracção colmatada das juntas. Para tal seria relevante a realização de ensaios de campo em talhões de calçada, construídos para o efeito, de forma a poder controlar e caracterizar devidamente cada componente do pavimento, fazendo variar pontualmente e de forma independente cada parâmetro em análise.
- Execução de um número relevante de ensaios de infiltração em Calçada à Portuguesa (ou também em outros tipos de pavimentos permeáveis) em vários locais de um aglomerado urbano com vista à obtenção de grandezas hidrológicas com representatividade estatística para este tipo de pavimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, Curitiba, Brasil, 3(1), 139-156.

ANDERSEN, C.; FOSTER, I.; PRATT, C. (1999). “The role of urban surfaces (permeable pavements) in regulating drainage and evaporation: development of a laboratory simulation experiment”. Hydrological Processes, 13, 597-609.

ARAÚJO, P.; TUCCI, C.; GOLDENFUM, J. (2000). “Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Brasil, 5(3), 21-29.

BAGARELLO, V.; SGROI, A. (2007). “Using the simplified falling head technique to detect temporal changes in field-saturated hydraulic conductivity at the surface of sandy loam soil”. Soil & Tillage Research, 94, 283-294.

BALL, J.; RANKIN, K. (2010). “The hydrological performance of permeable pavement”. Urban Water Journal, 7(2), 79-90.

BEAN, E.; HUNT, W.; BIDELESPACH, D.; BURAK, R. (2004). “Study on the surface infiltration rate of permeable pavements”. 1st Water and Environment Specialty Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.

BOOTH, D.; LEAVITT, J.; PETERSON, K. (1997). “The University of Washington permeable pavement demonstration project – background and first-year field results”. Center for Urban Water Resources Management, University of Washington, Seattle, USA.

BRATTEBO, B.; BOOTH, D. (2003). “Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems”. Water Research, 37(18), 4369-4376.

CASTANHEIRA, P.; GONÇALVES, A. (2000). “Determinação da condutividade hidráulica saturada acima da superfície freática”. Revista de Recursos Hídricos da APRH, 21, 71-76.

DAS, B. (2008). “Advanced Soil Mechanics”. 3rd ed., Taylor & Francis Group, New York, U.S.A.

de LIMA, J. L. M. P. (ed.) (2010). “Hidrologia Urbana: Conceitos básicos”. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), Série Cursos Técnicos Nº 1, Lisboa, Portugal.

de LIMA, J. L. M. P.; González, C.; de Lima, M. (2002). “Experiências laboratoriais sobre a influência do movimento de chuvadas no transporte de sais solúveis no escoamento superficial”. III Congresso Ibérico sobre gestión y planificación de aguas, Sevilha, Espanha.

de LIMA, J. L. M. P.; Jardim, N. (1999). “Utilização em laboratório, de um mini-simulador de chuva (modelo: LUW)”. Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal.

DELLEUR, J. (1999). “The handbook of ground water engineering”. CRC Press LLC, USA.

DIELEMAN, P. (ed). (1979). “Drainage principles and applications”. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Publication 16, Wageningen, The Netherlands.

EIJKELKAMP, Agrisearch Equipment (2005). “Operating instructions, rainfall simulator”. Giesbeek, The Netherlands.

FERGUSON, B. (2005). “Porous pavements”. Taylor & Francis Group, New York, USA.

FILGUERA, R.; SORACCO, C.; SALI, G.; FOURNIER, L. (2006). “Estimación de propiedades hidráulica de suelos por mediciones a campo y el uso de modelos de flujo estacionario y transitorio”. Ci. Suelo, Argentina, 24(1), 39-48.

GREGORY, J. (2004). “Stormwater infiltration at the scale of an individual residential lot north central Florida”. Thesis presented to the University of Florida (degree of Master), Florida, U.S.A.

GREGORY, J.; DUKES, M.; MILLER, G.; JONES, P. (2005). “Analysis of double-ring infiltration techniques and development of a simple automatic water delivery system”. Online. Applied Turfgrass Science doi:10.1094/ATS-2005-0531-01-MG.

HENRIQUES, A.; MOURA, A.; SANTOS, F. (2009). “Manual de Calçada Portuguesa”, Direcção Geral de Energia e Geologia, Lisboa, Portugal.

HILLS, R. (1970). “The determination of the infiltration capacity of field soils using the cylinder infiltrometer”. B.G.R.C., Tech. Bull., 3.

ILLGEN, M.; HARTING, K.; SCHMITT, T.; WELKER, A. (2007). “Runoff and infiltration characteristics of permeable pavements. Review of an intensive monitoring program”. Institute of Urban Water Management, University of Kaiserslautern, Germany.

KAMPHORST, A. (1987). “A small rainfall simulator for the determination of soil erodibility”. Netherlands Journal of Agricultural Sciences, 35, 407-41.

LENCASTRE, A.; FRANCO, F. (1984). “Lições de hidrologia”. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

MARTA, P. (2006). “Exploração de calcários para calçada Portuguesa – um georrecurso educativo para o ensino secundário”. Dissertação submetida à Universidade Nova de Lisboa (grau de Mestrado), Lisboa, Portugal.

MARTÍNEZ-ZAVALA, L.; JORDÁN, A. (2008). “Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in Western Andalusia, Spain”. *Soil Use and Management*, 24, 108–117.

MOURA, T. (2005). “Estudo experimental de superfícies permeáveis para o controle do escoamento superficial em ambientes urbanos”. Dissertação submetida à Universidade de Brasília (grau de Mestre), Brasília, Brasil.

PAIXÃO, F.; ANDRADE, A.; AZEVEDO, C.; SILVA, J.; COSTA, T.; REGILANE, F. (2004). “Estimativa da Infiltração da água no solo através de modelos empíricos e funções não lineares”. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, 5(1).

PAGOTTO, C.; LEGRET, M.; CLOIREC, P. (2000). “Comparison of the hydraulic behavior and the quality of highway runoff water according to the pavement”. *Water Research*, 34 (18), 4446-4454.

POTT, C. (2001). “Determinação da velocidade de infiltração básica de água no solo por meio de infiltrômetros de aspersão, de pressão e de tensão, em três solos do estado de São Paulo”. Dissertação apresentada ao instituto Agrônômico (grau de Mestre), São Paulo, Brasil.

RAGHUNATH, H. (2006). “Hydrology – Principles, Analysis, Design”. New age international publishers, 2nd rev. ed., New Delhi, India.

RAWLS, J.; BRAKENSIEK, D.; MILLER, N. (1983). “Green-Ampt infiltration parameters from soils data, J. Hydraul. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 109(1), 62-70. (*)

RITZEMA, H. (ed) (1994). “Drainage Principles and Applications”. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), Publication 16, 2nd rev. ed., Wageningen, The Netherlands.

SANTOS, C. (2004). “Análise Paramétrica da infiltração e sua influência na estabilidade de taludes em solo não saturado.” Dissertação apresentada à Universidade de São Paulo (grau de Mestre), São Paulo, Brasil.

SCHIETTECATTE, W.; OUESSAR, M.; GABRIELS, D.; TANGHE, S.; HEIRMAN, S.; ABDELLI, F. (2005). “Impact of water harvesting techniques on soil and water conservation: a case study on a micro catchment in southeastern Tunisia”. *Journal of Arid Environments*, 61, 297-313.

SILVA, L.; SERRALHEIRO, R. (2005). “Determinação de equações da infiltrabilidade de um solo mediterrânico para o dimensionamento e gestão da rega com rampas rotativas”. Comunicação oral, 7º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa, Universidade de Évora, Évora, Portugal.

SMITH, P. (2003). “Numerical analysis of infiltration into partially saturated soil slopes”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 6(2), 337-334.

(*) Referência não consultada directamente.

SOBRINHO, T.; FERREIRA, P.; PRUSKI, F. (2002). “Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 6(2), 337-344.

TITOS, D.; CERVERA, J. (1997). "Análisis de simuladores de lluvia para estudios de erosión". Universidade de Cordoba, Cordoba, Espanha.

VEN TE CHOW (1964). “Handbook of Applied Hydrology”. McGraw-Hill.

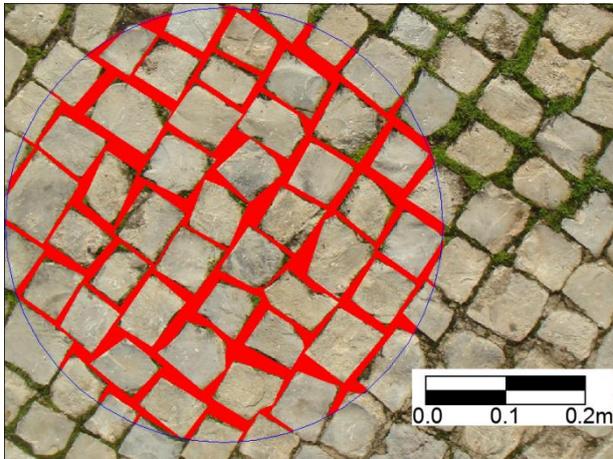
VEN TE CHOW ; MAYS, L.; MAIDMENT, D. (1988). “Applied Hydrology”. McGraw-Hill.

WANG, D.; WANG, L.; CHENG, K.; LIN, J. (2010). “Benefit analysis of permeable pavement on sidewalks”. International Journal of Pavement Research and technology, 3(4), 207-215.

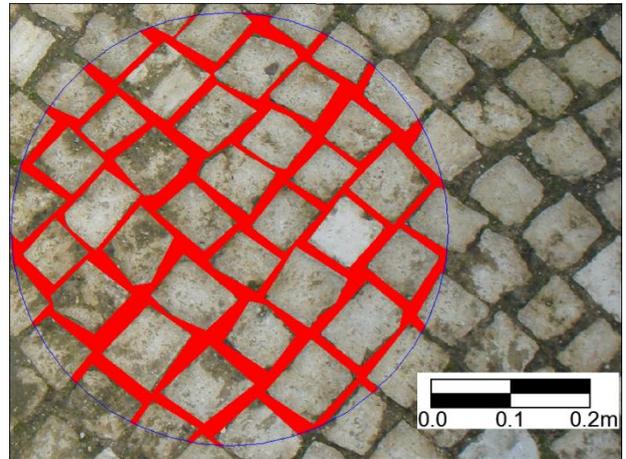
XU, C.; SINGH, V. (2005). “Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions”. Journal of Hydrology, 308, 105-121.

ANEXOS

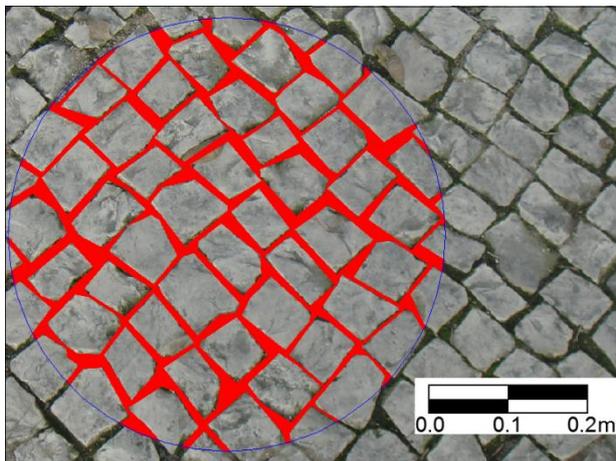
Anexo A – Pavimentos em calçada em Loulé analisados quanto à densidade de blocos



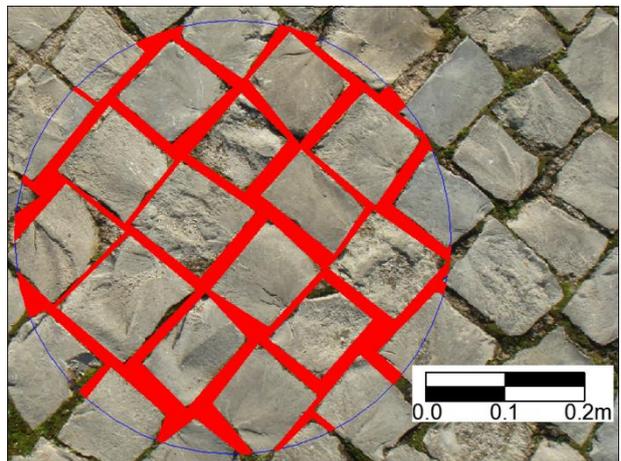
Local 1



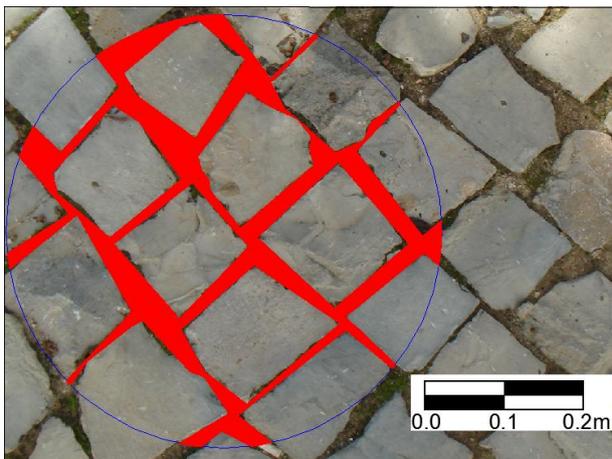
Local 2



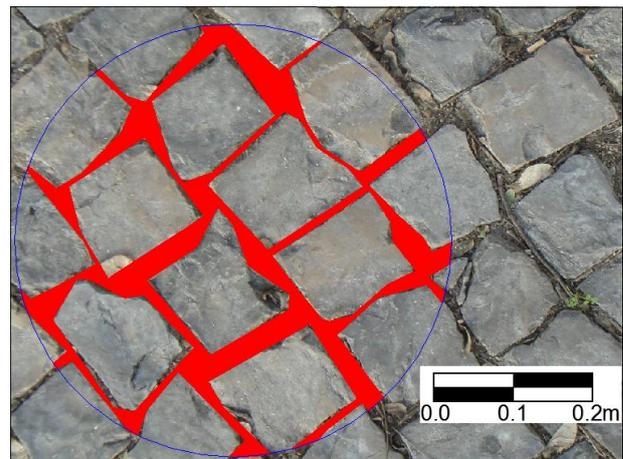
Local 3



Local 4



Local 5



Local 6

Anexo B – Boletins de análise granulométrica

Solo de base da calçada grossa

	Massa (g)
Total da amostra	2140.52
Retida no peneiro de 2,00 mm (n.º 10)	348.41
Passada no peneiro de 2,00 mm (n.º 10)	1792.11

Fracção retida no peneiro de 2.00 mm (nº 10)					
Peneiros		Massa retida (g)	Solo retido (%)	Solo Acumulado retido (%)	Solo acumulado que passa (%)
Número	(mm)				
3	76.1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	50.8	0.0	0.0	0.0	0.0
1/2	38.1	0.0	0.0	0.0	0.0
1	25.4	39.77	1.86	1.86	98.14
3/4	19.0	71.93	3.36	5.22	94.78
3/8	9.51	76.89	3.59	8.81	91.19
4	4.76	55.78	2.61	11.42	88.58
10	2.00	104.04	4.86	16.28	83.72
	<2,00	1792.11			
	Total	2140.52			

Fracção passada no peneiro de 2.00 mm (nº 10)					
Peneiros		Massa retida (g)	Solo retido (%)	Solo acumulado retido (%)	Solo acumulado que passa (%)
Número	(mm)				
20	0.850	20.88	14.11	30.39	69.61
40	0.425	18.16	12.27	42.66	57.34
60	0.250	20.08	13.57	56.23	43.77
140	0.106	28.61	19.33	75.56	24.44
200	0.075	3.99	2.70	78.25	21.75
	<0,075	32.18	21.75	100.00	0.00
	Total	123.90			

Solo de base da calçada miúda

	Massa (g)
Total da amostra	2042.29
Retida no peneiro de 2,00 mm (n.º 10)	672.47
Passada no peneiro de 2,00 mm (n.º 10)	1369.82

Fracção retida no peneiro de 2.00 mm (nº 10)					
Peneiros		Massa retida (g)	Solo retido (%)	Solo Acumulado retido (%)	Solo acumulado que passa (%)
Número	(mm)				
3	76.1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	50.8	0.00	0.00	0.00	0.00
1/2	38.1	0.00	0.00	0.00	0.00
1	25.4	0.00	0.00	0.00	0.00
3/4	19.0	82.81	4.05	4.05	95.95
3/8	9.51	160.52	7.86	11.91	88.09
4	4.76	143.88	7.05	18.96	81.04
10	2.00	285.26	13.97	32.93	67.07
	<2,00	1369.82			
	Total	2042.29			

Fracção passada no peneiro de 2.00 mm (nº 10)					
Peneiros		Massa retida (g)	Solo retido (%)	Solo Acumulado retido (%)	Solo acumulado que passa (%)
Número	(mm)				
20	0.850	30.07	16.51	49.44	50.56
40	0.425	25.05	13.76	63.20	36.80
60	0.250	23.76	13.05	76.25	23.75
140	0.106	12.91	7.09	83.34	16.66
200	0.075	1.32	0.72	84.06	15.94
	<0,075	29.02	15.94	100.00	0.00
	Total	122.13			

Anexo C – Resultados dos ensaios de infiltração nos pavimentos em calçada

	Ensaio com carga variável em calçada miúda					
	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3	
Tempo (minutos)	Nível de água (mm)	Infiltração (mm/h)	Nível de água (mm)	Infiltração (mm/h)	Nível de água (mm)	Infiltração (mm/h)
0	48.0		44.0		52.5	
1	51.0	180	45.5	90	60.0	450 ⁽¹⁾
2	54.0	180	47.0	90	64.0	240
3	55.0	60 ⁽¹⁾	48.4	84	68.5	270
4	57.0	120	49.5	66	73.0	270
5	58.0	60 ⁽¹⁾	50.5	60	76.0	180
10	67.0	108	56.0	66	90.0	168
20	79.0	72	66.5	63	116.0	156
30	91.0	72	76.0	57	138.0	132
40	100.0	54	85.0	54	156.0	108
50	108.5	51	93.5	51	173.0	102
51	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	49.0	⁽²⁾
60	117.0	51	102.0	51	65.0	107
90	139.0	44	128.0	52	110.0	90
120	160.0	42	150.0	44	155.0	90
121	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	48.0	⁽²⁾
137	54.0	⁽²⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾
150	62.0	37	169.0	38	91.0	89
151	⁽³⁾	⁽³⁾	49.8	0	⁽³⁾	⁽³⁾
180	85.5	47	72.0	46	125.0	68
210	109.0	47	93.0	42	155.5	61
216	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	161.0	55
217	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	49.0	⁽²⁾
240	129.5	41	114.0	42	75.0	68
270	150.0	41	131.0	34	106.5	63
300	169.0	38	148.0	34	138.0	63
305	50.0	⁽²⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾	⁽³⁾
330	68.0	43	161.5	27	163.0	50
331	⁽³⁾	⁽³⁾	48.0	⁽²⁾	⁽³⁾	⁽³⁾
360	88.0	40	63.0	31	185.0	44
390	108.0	40	81.0	36	77.5	51

⁽¹⁾ Valor considerado como *outlier* e eliminado.

⁽²⁾ Recarga de água quando a carga hidráulica se encontrava próxima dos 3 cm.

⁽³⁾ Leitura não realizada.

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

	Ensaio com carga variável em calçada grossa					
	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3	
Tempo (minutos)	Nível de água (mm)	Infiltração (mm/h)	Nível de água (mm)	Infiltração (mm/h)	Nível de água (mm)	Infiltração (mm/h)
0	54.0		44.0		43.0	
1	55.0	60	47.0	180	43.0	0 ⁽¹⁾
2	56.0	60	48.0	60 ⁽¹⁾	43.5	30
3	56.0	0 ⁽¹⁾	49.5	90	44.0	30
4	56.5	30	51.0	90	44.5	30
5	57.0	30	51.5	30 ⁽¹⁾	44.5	0 ⁽¹⁾
10	59.5	30	59.0	90	47.0	30
20	64.5	30	65.0	36	50.5	21
30	67.5	18	70.8	35	54.0	21
40	70.5	18	⁽³⁾	⁽³⁾	58.0	24
50	73.0	15	75.0	13	60.0	12
60	76.0	18	79.5	27	63.5	21
120	91.0	15	101.5	22	81.5	18
150	97.0	12	111.0	19	89.0	15
180	103.0	12	121.0	20	97.0	16
210	109.0	12	131.0	20	105.0	16

⁽¹⁾ Valor considerado como *outlier* e eliminado.

⁽²⁾ Recarga de água quando a carga hidráulica se encontrava próxima dos 3 cm.

⁽³⁾ Leitura não realizada.

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Tempo (minutos)	Ensaio de carga constante em calçada miúda								
	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
	Nível no reserv. (cm)	Volume infiltrado (ml)	Taxa de infiltração (mm/h)	Nível no reserv. (cm)	Volume infiltrado (ml)	Taxa de infiltração (mm/h)	Nível no reserv. (cm)	Volume infiltrado (ml)	Taxa de infiltração (mm/h)
0	41.0			40.2			35.3		
1	39.3	482.0	409	38.9	368.6	313	(3)	(3)	(3)
2	38.5	226.8	193	38.1	226.8	96 ⁽¹⁾	34.6	198.5	84
3	37.8	198.5	168	37.0	311.9	265	(3)	(3)	(3)
4	37.0	226.8	193	36.1	255.2	217	(3)	(3)	(3)
5	36.0	283.5	241	35.5	170.1	144	33.7	255.2	72
10	31.5	1275.9	217	33.1	680.5	116	32.4	368.6	63
20	24.8	1899.6	161	28.2	1403.5	119	30.2	637.9	54
30	19.7	1446.0	123	23.6	1304.2	111	(3)	(3)	(3)
33	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	27.5	765.5	50
40	14.5	1488.5	126	18.2	1516.9	129	26.1	396.9	48
50	9.1	1511.2	128	13.8	1261.7	107	24.3	496.2	42
51	42.6	(2)	(2)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
60	39.0	1020.7	96	9.0	1346.8	114	22.0	652.1	55
61	(3)	(3)	(3)	45.7	(2)	(2)	(3)	(3)	(3)
120	16.3	6450.3	91	15.8	8491.7	122	10.3	3317.3	47
121	40.6	(2)	(2)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
125	(3)	(3)	(3)	41.4	(2)	(2)	(3)	(3)	(3)
150	(3)	(3)	(3)	29.3	3444.9	117	(3)	(3)	(3)
154	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	40.0	(2)	(2)
180	21.4	5421.1	78	15.8	3827.6	108	34.3	1616.1	53
181	37.7	(2)	(2)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
191	(3)	(3)	(3)	10.3	1545.2	119 ⁽¹⁾	(3)	(3)	(3)
192	(3)	(3)	(3)	44.5	(2)	(2)	(3)	(3)	(3)
210	(3)	(3)	(3)	37.0	2126.5	100	(3)	(3)	(3)
240	20.7	4834.2	70	24.8	3473.2	98	23.1	3175.5	45
241	44.5	(2)	(2)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
270	(3)	(3)	(3)	14.1	3033.8	86	(3)	(3)	(3)
272	(3)	(3)	(3)	43.9	(2)	(2)	(3)	(3)	(3)
300	27.1	4933.4	71	33.7	2906.2	88	11.6	3260.6	46
330	18.4	2466.7	70	23.4	2906.2	82	6	1587.8	45
360	(3)	(3)	(3)	13.3	2863.6	81	(3)	(3)	(3)

⁽¹⁾ Valor considerado como *outlier* e eliminado.

⁽²⁾ Recarga de água quando a carga hidráulica se encontrava próxima dos 3 cm.

⁽³⁾ Leitura não realizada.

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Tempo (minutos)	Ensaio de carga constante em calçada grossa								
	Ensaio 1			Ensaio 2			Ensaio 3		
	Nível no reserv. (cm)	Volume infiltrado (ml)	Taxa de infiltração (mm/h)	Nível no reserv. (cm)	Volume infiltrado (ml)	Taxa de infiltração (mm/h)	Nível no reserv. (cm)	Volume infiltrado (ml)	Taxa de infiltração (mm/h)
0	19.8			26.0			28.1		
2	19.8	0.0	0 ⁽¹⁾	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
3	19.7	28.4	38	25.6	113.4	32	(3)	(3)	(3)
5	19.5	56.7	38	(3)	(3)	(3)	27.5	170.1	29
6	(3)	(3)	(3)	25.6	0 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	(3)	(3)	(3)
11	18.8	198.5	42	25.6	0 ⁽¹⁾	0 ⁽¹⁾	(3)	(3)	(3)
11.2	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	27.1	113.4	16
20	16.0	793.9	34	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
21	(3)	(3)	(3)	24.7	255.2	22	(3)	(3)	(3)
30	14.6	396.9	34	24.0	198.5	19	(3)	(3)	(3)
32	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	26.0	311.9	13
40	13.1	425.3	36	23.5	141.8	12	25.7	85.1	9
50	11.7	396.9	34	23.0	141.8	12	(3)	(3)	(3)
52	11.4	85.1	36	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
54	44.7	(2)	(2)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)
60	43.7	283.5	40	22.8	56.7	5	23.8	326.1	5
120	(3)	(3)	(3)	20.5	652.1	9	22.5	368.6	5
142	33.6	2863.6	30	(3)	(3)	(3)			
150	(3)	(3)	(3)	19.6	255.2	7			
184	30.6	850.6	17	19.6	255.2	7			
210	28.3	652.1	21						
240	25.9	680.5	19						

⁽¹⁾ Valor considerado como *outlier* e eliminado.

⁽²⁾ Recarga de água quando a carga hidráulica se encontrava próxima dos 3 cm.

⁽³⁾ Leitura não realizada.

Anexo D – escoamento superficial resultante dos ensaios laboratoriais

Tempo (minutos)	Escoamento superficial			
	Calçada miúda		Calçada grossa	
	Juntas paralelas à direcção do escoamento (l/h)	Juntas a 45º com o escoamento (l/h)	Juntas paralelas à direcção do escoamento (l/h)	Juntas a 45º com o escoamento (l/h)
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.25	0.00	0.02	1.69	0.00
0.50	0.75	1.29	4.40	1.31
0.75	2.56	3.99	4.54	1.26
1.00	3.68	4.88	4.86	2.12
1.25	4.10	5.51	5.49	2.91
1.50	4.36	5.65	5.68	3.55
1.75	4.95	5.86	5.51	3.67
2.00	4.85	6.38	6.92	4.10
2.25	4.95	6.01	6.07	4.64
2.50	5.34	6.30	6.98	4.87
2.75	5.44	6.61	6.86	5.54
3.00	5.57	6.41	7.51	5.56
3.08	5.06	5.90	6.17	4.48
3.17	4.22	3.67	3.36	2.10
3.25	1.22	0.86	1.68	1.10
3.33	0.00	0.00	0.00	0.00
10.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10.25	0.00	0.00	0.47	1.12
10.50	3.49	5.31	5.60	5.93
10.75	6.48	6.77	6.75	6.69
11.00	6.36	7.29	7.47	6.96
11.25	6.35	7.15	7.55	6.80
11.50	6.62	7.43	7.73	6.77
11.75	6.94	7.34	7.67	7.43
12.00	6.60	7.30	7.79	7.18
12.25	6.27	7.32	7.66	7.43
12.50	6.58	7.51	8.01	7.34
12.75	5.71	7.67	7.59	7.22
13.00	6.58	6.99	7.63	7.02
13.08	5.50	6.47	6.35	7.01
13.17	2.53	2.75	2.79	2.53
13.25	2.20	1.35	1.31	1.58
13.35	0.00	0.00	0.00	0.00

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Tempo (minutos)	Escoamento superficial			
	Calçada miúda		Calçada grossa	
	Juntas paralelas à direcção do escoamento (l/h)	Juntas a 45° com o escoamento (l/h)	Juntas paralelas à direcção do escoamento (l/h)	Juntas a 45° com o escoamento (l/h)
20.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20.23	0.00	0.00	0.00	0.00
20.25	0.38	0.09	0.11	1.32
20.50	5.64	5.96	6.31	6.50
20.75	6.85	7.47	7.06	7.40
21.00	7.05	7.84	8.07	7.27
21.25	7.23	7.67	8.37	7.21
21.50	7.32	8.26	8.38	7.36
21.75	7.18	8.15	6.66	7.11
22.00	7.17	7.83	6.21	7.02
22.25	7.43	8.18	7.89	7.20
22.50	6.75	7.70	8.35	7.20
22.75	7.37	7.80	8.68	7.26
23.00	7.18	8.28	8.96	7.49
23.08	5.84	7.73	9.23	6.83
23.17	3.08	2.42	1.45	3.28
23.25	1.46	1.96	1.16	2.07
23.33	0.00	0.00	0.00	0.00
30.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30.20	0.00	0.00	0.00	0.00
30.25	0.90	0.60	1.85	2.17
30.50	6.73	6.80	8.21	8.56
30.75	8.43	8.18	8.94	9.64
31.00	6.61	8.74	8.61	9.45
31.25	7.70	8.47	8.38	9.72
31.50	7.87	8.70	8.89	9.45
31.75	7.73	8.37	8.96	10.03
32.00	7.55	8.57	8.12	9.10
32.25	7.34	8.05	7.88	9.79
32.50	7.76	8.82	8.70	9.79
32.75	7.78	8.48	8.32	9.61
33.00	7.46	8.66	8.88	9.90
33.08	6.12	7.36	7.65	8.24
33.17	3.17	3.62	2.88	3.93
33.25	1.40	1.81	1.53	2.64
33.37	0.00	0.00	0.00	0.00

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Tempo (minutos)	Escoamento superficial			
	Calçada miúda		Calçada grossa	
	Juntas paralelas à direcção do escoamento (l/h)	Juntas a 45° com o escoamento (l/h)	Juntas paralelas à direcção do escoamento (l/h)	Juntas a 45° com o escoamento (l/h)
40.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40.25	0.00	0.72	0.36	0.99
40.50	5.26	7.25	6.37	6.44
40.75	7.14	8.48	8.13	8.90
41.00	7.50	8.85	7.92	9.23
41.25	7.96	8.70	8.55	9.91
41.50	7.03	8.54	8.98	9.72
41.75	7.63	8.54	8.84	10.13
42.00	8.13	8.60	8.37	9.26
42.25	7.31	8.91	8.33	9.82
42.50	7.84	8.65	9.13	9.03
42.75	7.74	8.88	8.48	10.62
43.00	7.67	9.30	8.69	10.08
43.08	5.48	7.91	7.37	7.45
43.17	3.21	3.97	2.66	3.67
43.25	1.65	2.34	1.81	2.43
43.33	0.00	0.00	0.00	0.00
50.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50.20	0.00	0.00	0.00	0.00
50.25	1.77	0.47	1.44	0.14
50.50	7.37	6.37	7.85	8.33
50.75	8.47	8.43	9.00	9.07
51.00	8.42	8.71	8.22	9.42
51.25	8.11	8.97	9.20	9.97
51.50	8.04	8.78	8.97	10.12
51.75	8.25	8.78	9.65	10.31
52.00	7.81	9.23	8.99	9.85
52.25	7.74	9.47	9.24	10.05
52.50	8.10	8.86	8.97	10.36
52.75	8.48	9.07	9.16	10.25
53.00	8.18	9.41	10.15	9.79
53.08	7.13	9.63	6.90	8.25
53.17	3.40	3.10	3.61	3.69
53.25	1.45	2.28	1.99	1.98
53.33	0.00	0.00	0.00	0.00

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Tempo (minutos)	Escoamento superficial			
	Calçada miúda		Calçada grossa	
	Juntas paralelas à direcção do escoamento (l/h)	Juntas a 45° com o escoamento (l/h)	Juntas paralelas à direcção do escoamento (l/h)	Juntas a 45° com o escoamento (l/h)
60.00	0.00	0.00	0.00	0.00
60.23	0.00	0.00	0.00	0.00
60.25	0.12	2.08	2.09	2.88
60.50	6.38	7.64	8.44	8.80
60.75	8.23	8.54	8.87	9.74
61.00	7.92	8.94	9.51	9.62
61.25	8.06	8.75	9.64	10.07
61.50	7.89	8.80	8.85	9.91
61.75	8.25	8.98	9.94	9.97
62.00	8.21	8.64	9.35	9.81
62.25	8.22	9.42	9.47	9.69
62.50	8.25	9.16	9.26	9.90
62.75	8.86	9.23	8.81	9.78
63.00	7.99	9.04	8.54	9.89
63.08	6.61	7.95	7.75	8.43
63.17	3.02	3.87	3.67	3.03
63.25	1.50	1.92	1.66	2.03
63.32	0.00	0.00	0.00	0.00
70.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70.23	0.00	0.00	0.00	0.00
70.25	0.17	0.37	1.65	0.38
70.50	7.06	6.94	7.85	7.83
70.75	7.89	8.39	9.21	9.45
71.00	8.10	8.63	8.86	9.05
71.25	8.27	8.47	9.45	10.00
71.50	8.28	9.01	9.18	9.41
71.75	8.31	8.83	9.29	9.53
72.00	8.62	9.51	9.19	10.18
72.25	8.30	9.20	10.00	10.09
72.50	8.30	9.12	9.50	9.90
72.75	8.44	9.11	9.17	10.17
73.00	8.52	9.08	9.36	10.04
73.08	7.39	7.42	7.66	7.95
73.17	5.06	3.98	2.43	3.94
73.25	3.09	1.93	1.53	1.99
73.33	0.00	0.00	0.00	0.00

Perdas no processo de precipitação-escoamento em zonas urbanas
Estudo da infiltração em Calçada à Portuguesa

Tempo (minutos)	Escoamento superficial			
	Calçada miúda		Calçada grossa	
	Juntas paralelas à direcção do escoamento (l/h)	Juntas a 45° com o escoamento (l/h)	Juntas paralelas à direcção do escoamento (l/h)	Juntas a 45° com o escoamento (l/h)
80.00	0.00	0.00	0.00	0.00
80.23	0.00	0.00	0.00	0.00
80.25	2.03	0.32	2.12	1.87
80.50	7.95	6.24	8.56	6.32
80.75	7.82	9.06	9.36	8.92
81.00	8.88	9.14	8.82	9.98
81.25	8.27	9.56	9.36	10.08
81.50	8.08	8.57	9.45	9.96
81.75	8.13	9.30	8.86	10.13
82.00	7.87	9.19	9.28	10.37
82.25	8.15	9.73	9.21	9.85
82.50	8.11	10.17	9.37	11.02
82.75	8.15	8.49	9.23	11.02
83.00	7.88	9.60	9.54	10.01
83.08	7.31	10.38	8.20	10.90
83.17	3.96	6.38	3.50	4.56
83.25	2.88	1.70	2.05	1.43
83.50	0.00	0.00	0.00	0.00
90.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90.23	0.00	0.00	0.00	0.00
90.25	0.26	1.12	0.58	0.56
90.50	5.83	8.35	7.27	9.00
90.75	7.62	9.00	8.85	10.19
91.00	7.45	8.89	9.19	10.35
91.25	8.23	8.89	9.25	10.36
91.50	7.69	9.54	9.33	9.74
91.75	7.72	9.13	9.44	9.84
92.00	8.04	8.98	9.76	10.20
92.25	8.23	8.86	9.83	10.23
92.50	8.60	9.96	9.03	10.55
92.75	7.50	9.31	10.14	9.65
93.00	7.58	9.51	8.27	10.11
93.08	7.29	7.43	8.45	9.22
93.17	2.12	4.39	3.12	4.23
93.25	1.24	2.91	2.30	2.18
93.42	0.00	0.00	0.00	0.00