



**Avaliação da eficiência de diversos tipos de pavimentos na redução do escoamento superficial em espaços urbanos**

**João Luiz Brigido de Assis**

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Gestão de Recursos Florestais*

Orientado por

**Professora Doutora Felícia Fonseca**  
**Professor Doutor Tomás de Figueiredo**

Bragança 2020

**Avaliação da eficiência de diversos tipos de pavimentos na redução do escoamento superficial em espaços urbanos**

João Luiz Brigido de Assis

Professora Doutora Felícia Fonseca  
Professor Doutor Tomás de Figueiredo

Bragança, 2020

## **Agradecimentos**

Em primeiro, devo agradecer aos meus pais que sempre me apoiaram em todas as minhas escolhas, fossem elas boas ou más, sempre me deixaram a última palavra. Em segundo lugar, à minha família que mesmo do outro lado do mundo, a quem não veja há uns bons anos, sempre me apoiaram.

Também tenho de agradecer à minha orientadora Felícia Fonseca que me apoiou em todos os momentos e foi essencial para que esta tese fosse possível e pela oportunidade que me deu em trabalhar com este tema, pelos desafios que me colocou que por vezes foram uma pedra no sapato, mas nada que não fosse resolvido.

Ao meu coorientador Professor Tomás Figueiredo que foi um braço direito em todos os momentos do dia, à noite, fins-de-semana e feriados.

À professora Helena Vaz que me ajudou a corrigir esta tese em termos de português (o que sou péssimo, e odeio) muito obrigado mesmo pela ajuda.

Agradecer também à Ana Caroline que neste caso foi o braço esquerdo que me ajudou em todas as fases da parte prática desta tese e pelas dezenas de vezes que eu gritava (Anaaa !!!!!) e ela descia as escadas para me ajudar e depois voltava a subir, foram alguns km assim.

Ao Instituto Politécnico de Bragança e à Escola Superior Agrária de Bragança por todo o apoio logístico.

Ao Município de Bragança pela cedência dos pavimentos, brita e areia

Aos amigos de curso, onde nos apoiamos e nos ajudamos nos bons e maus momentos.

E a Bragança que foi uma cidade maravilhosa, cheia de desafios, bons e maus momentos, realmente na vida de um estudante existe tempo para tudo e Bragança não poderia ser melhor local para esses momentos.

E por fim a quem disse que nunca chegaria onde cheguei, e que nunca seria ninguém, esta tese é a prova de que quando queremos algo, o impossível não existe

## **Resumo**

Atualmente, a utilização de pavimentos permeáveis em áreas urbanas tem como objetivo reduzir o escoamento superficial e aumentar a infiltração de água no solo, para evitar cheias e inundações nas cidades. Apesar das cidades terem sistemas de drenagem das águas pluviais, por vezes estes não são suficientes e/ou eficientes.

Neste estudo foi avaliada a eficácia dos pavimentos em uso na zona industrial das Cantarias, Bragança, quanto ao efeito no escoamento superficial e na capacidade de infiltração de água no solo. Com recurso ao método de simulação de chuva, realizaram-se ensaios com cinco tipos de pavimentos: cubos de granito pequenos (CGP), cubos de granito grandes (CGG), quadrados de cimento (QC), blocos de cimento retangulares (BCR) e blocos de cimento tipo “mapa de Portugal” (BCMP). Os resultados mostram que o pavimento construído com quadrados de cimento (QC) é claramente uma escolha inadequada, pois os valores de escoamento superficial são muito elevados. Os restantes pavimentos mostraram padrões muito idênticos de escoamento superficial, sugerindo a escolha por aqueles que causem menor pegada ecológica na região onde vão ser aplicados.

A análise comparativa entre os diversos tipos de pavimentos permitiu avaliar quais os que favorecem a infiltração de água no solo, disponibilizando assim informação útil para a escolha dos pavimentos mais adequados a serem usados em projetos futuros de pavimentação em áreas urbanas, tais como estacionamento, passeios, parques de estacionamento, parques de lazer, ou mesmo estradas e áreas envolventes de casas e indústrias.

## **Abstract**

Currently, the use of permeable pavements in urban areas aims to reduce the runoff and increase water infiltration in the soil, to prevent floods and overflows in the cities, although these have a surface water drainage system, but sometimes these do not are sufficient and / or efficient

In this study, the effectiveness of the existing pavements in the industrial area of Cantarias, Bragança was evaluated, in order to verify their effectiveness in terms of runoff and the ability to water infiltration. Using the rain simulation method, tests were carried out with five types of pavements: small granite cubes (CGP), large granite cubes (CGG), cement squares (QC), rectangular cement blocks (BCR) and cement blocks type “map of Portugal” (BCMP). The results show that the pavement built with cement squares (QC) is clearly an inappropriate choice, as the values of runoff are very high. The remaining pavements showed very similar patterns of runoff, suggesting the choice for those that cause the smaller ecological footprint in the region where they will be applied.

The comparative analysis between the different types of pavements made it possible to evaluate which ones favor the water infiltration in the soil, thus providing useful information for choosing the most suitable pavements to be used in next paving projects in urban areas, such as parking lots, sidewalks, car parks, leisure parks, or even roads and surrounding areas of homes and industries.

## Índice

Agradecimentos .....	II
Resumo .....	III
Abstract .....	IV
Índice .....	V
Índice de Figuras .....	VII
Índice de Tabelas .....	X
Introdução .....	1
1.1 Hipóteses de estudo .....	2
1.2 Objetivos .....	2
ENQUADRAMENTO .....	3
2.1 História da drenagem urbana.....	3
2.3 Simuladores de Chuva.....	9
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
3.1 Área de Estudo .....	12
3.1.1 Localização e caracterização .....	12
3.1.2 Impermeabilização dos solos.....	13
3.2 Trabalho de campo .....	14
3.2.1 Colheita de amostras de solo .....	15
3.2.2 Levantamento do tipo de pavimentos.....	16
3.3 Trabalho de laboratório .....	17
3.3.1 Ensaio de permeabilidade do solo .....	17
3.3.2 Avaliação de propriedades físicas do solo.....	21
3.3.2.1 Permeabilidade do solo .....	21
3.3.2.2 Densidade aparente do solo .....	23
3.3.2.3 Porosidade total do solo .....	23
3.3.2.4 Capacidade de Campo e Capacidade Máxima para a Água.....	23

3.3.2.5	Microporosidade e Macroporosidade .....	24
3.3.2.6	Elementos grosseiros .....	24
3.3.3	Ensaio de permeabilidade dos pavimentos .....	24
3.3.3.1	Construção de protótipos dos pavimentos .....	24
3.3.3.2	Simulador de chuva .....	27
3.3.3.2	Calibração do simulador de chuva .....	28
3.3.3.3	Água de infiltração e água de escoamento superficial .....	29
3.3.3.4	Teor de humidade da camada drenante colocada sob os pavimentos .....	30
3.3.4	Análises estatísticas .....	30
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
4.1	Propriedades físicas do solo .....	31
4.1.1	Permeabilidade do solo .....	31
4.1.2	Propriedades físicas do solo e sua relação com a permeabilidade .....	32
4.2	Permeabilidade dos pavimentos .....	35
4.2.1	Pavimentos testados .....	36
4.2.1.1	Cubos de granito pequenos .....	36
4.2.1.2	Cubos de granito grandes .....	38
4.2.1.3	Quadrados de cimento .....	40
4.2.1.4	Blocos de cimento porosos retangulares .....	41
4.2.1.5	Blocos de cimento porosos tipo “mapa de Portugal” .....	43
4.2.2	Comparação dos pavimentos .....	45
4.2.2.1	Infiltração .....	45
4.2.2.2	Escurência superficial .....	49
	CONCLUSÕES .....	51
	BIBLIOGRAFIA .....	52

## Índice de Figuras

Figura 1- Aglomerado de Mohengo-Doro e sistema de drenagem no meio da imagem. Fonte: Blogue Universo da História.....	3
Figura 2- Aglomerado de Mohengo-Doro e sistema de drenagem no meio da imagem. Fonte: Blogue Universo da História.....	3
Figura 3- Traçado aproximado dos canos da cidade de Lisboa, final do século XVII, Parte Oriental. Fonte: Câmara Municipal de Lisboa (1950) .....	4
Figura 4- Traçado aproximado dos canos da cidade de Lisboa, final do século XVII, Parte Ocidental. Fonte: Câmara Municipal de Lisboa (1950).....	4
Figura 5- Manilhas de concreto para direcionamento das águas pluviais da Avenida de Sá Carneiro para o rio Fervença. ....	5
Figura 6- Estação de Tratamento de Águas Residuais de Bragança .....	6
Figura 7- Pavimento bloco “mapa de Portugal” .....	7
Figura 8- Pavimento bloco retangular .....	7
Figura 9- Pavimento quadrado de cimento.....	7
Figura 10- Pavimento cubos granito grande.....	7
Figura 11- Pavimento cubos granito pequeno .....	7
Figura 12- Juntas de pavimentos tapadas com cimento em passeios da cidade de Bragança	8
Figura 13- Vantagens associadas aos pavimentos permeáveis (Gonçalves & Oliveira, 2014).....	9
Figura 14- Classificação climática de Köppen-Geiger na Península Ibérica e Ilhas Baleares (IPMA, 2019) .....	12
Figura 15- Diagrama Obrotermico período 1981-2010 em Bragança (IPMA, 2020).....	13
Figura 16- Mapa de uma parte da zona industrial das Cantarias, Bragança. Fonte: Documentos do projeto INDNATUR .....	14
Figura 17- Colheita de amostras de solo não perturbadas na zona industrial das Cantarias, Bragança.....	15
Figura 18- Sonda de encaixe dos cilindros.....	16
Figura 19- Cilindros de aço inoxidável de 100 cm <sup>3</sup> .....	16
Figura 20- Mala de Transporte dos cilindros .....	16
Figura 21- Permeâmetro de carga constante .....	17
Figura 22- Montagem de uma armadura de suporte do cilindro .....	18
Figura 23- Instalação do sifão entre a amostra e o tubo de evacuação .....	18

Figura 24- Vista superior do Permeâmetro com as amostras instaladas .....	18
Figura 25- Buretas associadas às amostras.....	19
Figura 26- Sistema a funcionar .....	19
Figura 27- Medição da diferença de nível.....	19
Figura 28- Medidor com a luz apagada (sem estar a tocar com a ponteira na água) .....	19
Figura 29- Aparelho com a luz ligada (ponteira está a tocar na água).....	19
Figura 30- Secagem das amostras de solo e da gaze hidrófila a 105 °C .....	20
Figura 31- Separação da gaze hidrófila, do cilindro e do solo .....	20
Figura 32- Pesagem dos recipientes de plástico, cilindros e gazes .....	21
Figura 33- Diversos tipos de pavimentos em uso na zona industrial das Cantarias (esquerda) e protótipo de pavimento construído com granito pequeno (direita) .....	25
Figura 34- Base de sustentação das caixas .....	26
Figura 35- Quinadora .....	26
Figura 36- Caixa para suporte dos pavimentos .....	26
Figura 37- Caixa colectora da água de infiltração.....	26
Figura 38- Caixa colectora da água do escoamento .....	26
Figura 39- Simulador construído nas oficinas do IPB no ano de 2008.....	27
Figura 40- Colheita da água de infiltração e de escoamento superficial.....	29
Figura 41- Sensor de humidade.....	30
Figura 42- Pesagem de areia .....	30
Figura 43- Medição da humidade.....	30
Figura 44- Valores de permeabilidade do solo (cm/h), distribuídos pelos intervalos de classe de permeabilidade (cm/h) e percentagem de amostras analisadas em cada classe de permeabilidade nos solos da zona industrial das Cantarias, Bragança .....	32
Figura 45- Relação entre a permeabilidade e a densidade aparente (Dap) dos solos da zona industrial das Cantarias, Bragança .....	33
Figura 46- Relação entre a capacidade máxima para a água (CMA) e a densidade aparente (Dap) dos solos da zona industrial das Cantarias, Bragança.....	34
Figura 47- Teor de elementos grosseiros (EG), distribuídos pelos intervalos de classe de permeabilidade (cm/h) nos solos da zona industrial das Cantarias, Bragança.....	35
Figura 48- Pavimento permeável construído com cubos de granito pequenos .....	36
Figura 49- Volume de água infiltrada através do pavimento permeável construído com cubos de granito pequenos .....	36

Figura 50- Volume de água de escoamento no pavimento permeável construído com cubos de granito pequenos.....	37
Figura 51- Pavimento permeável construído com cubos de granito grandes.....	38
Figura 52- Volume de água infiltrada através do pavimento permeável construído com cubos de granito grandes.....	39
Figura 53- Volume de água de escoamento no pavimento permeável construído com cubos de granito grandes.....	39
Figura 54- Pavimento permeável construído com quadrados de cimento.....	40
Figura 55- Volume de água infiltrada através do pavimento permeável construído com quadrados de cimento.....	40
Figura 56- Volume de água de escoamento no pavimento permeável construído com quadrados de cimento.....	41
Figura 57- Pavimento permeável construído com blocos de cimento retangulares.....	42
Figura 58- Volume de água infiltrada através do pavimento permeável construído com blocos de cimento porosos retangulares.....	42
Figura 59- Volume de água de escoamento no pavimento permeável construído com blocos de cimento retangulares.....	43
Figura 60- Pavimento permeável construído com blocos de cimento “mapa de Portugal”	43
Figura 61- Volume de água infiltrada através do pavimento permeável construído com blocos de cimento tipo “mapa de Portugal”.....	44
Figura 62- Volume de água de escoamento no pavimento permeável construído com blocos de cimento tipo “mapa de Portugal”.....	44
Figura 63- Peso de blocos de cimento no estado seco e saturado.....	48
Figura 64- Quantidade de água de infiltração obtida por infiltração para os pavimentos construídos com cubos granito pequenos (CGP), cubos granito grandes (CGG), blocos cimento retangulares (BCR), blocos cimento tipo “mapa de Portugal” e quadrados cimento (QC).....	48
Figura 65- Quantidade de água de escorrência superficial nos pavimentos construídos com cubos granito pequenos (CGP), cubos granito grandes (CGG), blocos cimento retangulares (BCR), blocos cimento tipo “mapa de Portugal” e quadrados de cimento (QC).....	50

## Índice de Tabelas

Tabela 1- Classificação da permeabilidade dos solos (SCS/USDA) .....	22
Tabela 2-Representatividade das classes de permeabilidade dos solos da zona industrial das Cantarias, Bragança .....	32
Tabela 3 – Propriedades físicas do solo: densidade aparente (Dap), porosidade total (P total), Microporosidade (MicroP), macroporosidade (MacroP), capacidade de campo (CC) e capacidade máxima para a água (CMA) .....	33
Tabela 4- Valores de infiltração e de escoamento superficial da primeira simulação sobre os diversos pavimentos testados.....	45
Tabela 5-Valores de infiltração e de escoamento superficial da segunda simulação sobre os diversos pavimentos testados .....	46
Tabela 6-Valores de infiltração e de escoamento superficial da terceira simulação sobre os diversos pavimentos testados .....	46

## **Introdução**

O solo apresenta uma elevada importância na manutenção da vida nos ecossistemas terrestres, sendo o mesmo essencial para a produção de alimentos, fornecimento de matérias-primas para produção de medicamentos, vestuário, energia e construção de edifícios. Os seres humanos dependem diretamente deste recurso natural para quase tudo o que fazem durante a vida. Porém, o uso e gestão do solo de forma inadequada durante os últimos anos têm gerado danos ao ambiente de forma irreversível (Figueiredo, 2012). A erosão hídrica tem sido uma das principais causas de redução da produtividade das terras agrícolas, podendo resultar no abandono de áreas anteriormente produtivas (Bertoni & Neto 1990). Todavia, este aumento de erosão nas áreas rurais não é acompanhado em áreas urbanas, visto que aqui o solo tem sido protegido por camadas de pavimentos e construções.

Desde de que o Homem começou a viver em comunidade nos tempos mais remotos da história, a ocupação urbana através de áreas impermeáveis como telhados, pátios, ruas, passeios, estacionamentos, fontes, entre outros tipos de construções, tem alterado as características do solo, tornando estes mais impermeáveis, contribuindo para o aumento do escoamento superficial e diminuição da infiltração de água no solo. Com o aumento dessas áreas, o aumento do volume de água que escorre é superior, o que tem levado ao aumento de inundações urbanas e degradação da qualidade das águas (Matos, 2003a).

As ações para evitar o aumento desse escoamento nem sempre são as melhores. Muitas vezes são escolhidos os materiais mais adequados a colocar nos espaços urbanos ao ar livre (passeios, estacionamentos, parques), mas quando da sua execução cometem-se erros grosseiros, como no caso de Bragança que por vezes as juntas dos pavimentos são preenchidas com cimento, contribuindo para a ocorrência de inundações.

O princípio errado que tem levado às inundações na drenagem urbana é o seguinte: “A melhor drenagem é aquela que escoar a água da chuva o mais rápido possível para jusante” (Tucci, 2007). Este princípio que surgiu pela preocupação em evitar o risco de doenças no século XIX, utiliza a aceleração do escoamento através de condutas e o aumento da seção dos mesmos para evitar os alagamentos e inundações no local onde são construídos. O que ocorre na realidade é a transferência do impacto para jusante sem que o problema seja resolvido. Segundo o mesmo autor, resolver os problemas de drenagem apenas utilizando essa abordagem, pode ser definido como uma gestão insustentável.

Em uma visão de gestão sustentável da drenagem urbana, tem-se procurado compensar os efeitos da ocupação urbana por meio de um plano de controlo das águas pluviais que engloba as bacias hidrográficas da região, utilizando medidas estruturais e não estruturais. Dentre as medidas de controlo estruturais existentes está o pavimento permeável.

Pavimento Permeável é um dispositivo de infiltração que permite a passagem da água através de uma superfície permeável para dentro de uma estrutura reservatório. Segundo Araújo (1999), os pavimentos permeáveis são classificados em três tipos quanto ao seu revestimento: pavimento de asfalto poroso, de concreto poroso e de blocos de concreto perfurado preenchido com areia ou cimento. Estes pavimentos permeáveis, são capazes de reduzir o volume de escoamento superficial e vazões de pico a níveis iguais, ou até inferiores aos observados antes da urbanização, devido à redução da velocidade de impacto das gotas da chuva, salpico e perda de água por escoamento superficial.

### **1.1 Hipóteses de estudo**

- i. Existem diferenças entre a taxa de infiltração e o escoamento superficial nos diferentes tipos de pavimentos utilizados em espaços urbanos?
- ii. Existe um tipo de pavimento que seja o ideal para diminuir ou mesmo eliminar o escoamento e aumentar a infiltração?
- iii. É possível com um simulador de chuva avaliar a permeabilidade/infiltração e escoamento superficial de diferentes tipos de pavimentos utilizados em espaços urbanos?

### **1.2 Objetivos**

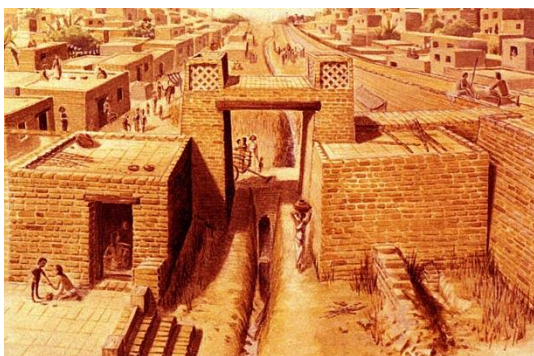
Este estudo tem como principal objetivo encontrar, de entre diferentes materiais utilizados como pavimentos em espaços urbanos, neste caso concreto na zona industrial das Cantarias, Bragança, os mais eficientes na redução do escoamento superficial e aumento da infiltração, e consequentemente a recomendar em futuras construções ou reconstruções de estradas, passeios e parques de estacionamento ao ar livre e em espaços verdes urbanos.

## ENQUADRAMENTO

### 2.1 História da drenagem urbana

A água tem uma elevada importância na vida e atividades desenvolvidas pelo Homem, estando assim diretamente ligada aos progressos históricos dos sistemas de drenagem das águas residuais. Regra geral, os povos construía as suas casas próximas das linhas de água, o que facilitava muito a vida no dia-a-dia no acesso à água e alimento.

O primeiro sistema de drenagem de águas residuais, de que há registo, é o do aglomerado de *Mohengo-Doro*, situado no Paquistão Ocidental. Foi criado pela civilização Hindu há cerca de 3000 anos a.C. (Figuras 1 e 2), construído em pedra, barro e uma espécie de argamassa existente na época e destinava-se sobretudo à drenagem da escorrência superficial das vias de comunicação para evitar que as vias se tornassem intransitáveis devido às lamas que se formavam na época das chuvas (Webster, 1962). Desde sempre que o Homem procurou obter água de fácil acesso construindo as habitações na sua proximidade, proporcionando também o desenvolvimento da agricultura, comércio, comunicação com outros povos, navegação, defesa e segurança (Virgiliis, 2009). Porém, nem tudo eram facilidades, essa proximidade também continha perigos, como a própria água, que em tempos de muita chuva, causava inundações e ainda possíveis ataques por parte de animais que vinham beber. Com o tempo, as civilizações aprenderam a viver com esses problemas e passaram a aceitar essas situações como um preço a pagar pelo acesso fácil à água (Virgiliis, 2009).



*Figura 1- Aglomerado de Mohengo-Doro e sistema de drenagem no meio da imagem. Fonte: Blogue Universo da História.*



*Figura 2- Aglomerado de Mohengo-Doro e sistema de drenagem no meio da imagem. Fonte: Blogue Universo da História.*

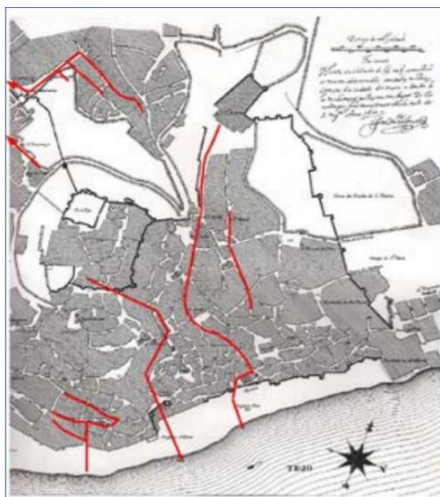
Esta proximidade às linhas de água dos aglomerados populacionais, acabou por trazer riscos para a saúde humana, registando-se no século XVIII, em Itália, a morte de

pessoas e animais, tendo sido relacionadas com as águas poluídas dos rios e zonas alagadas (Webster, 1962). Na sequência deste acontecimento, outros países europeus, como a França, Alemanha e Inglaterra, procederam à limpeza de zonas alagadas e eliminação de esgotos a céu aberto (Silveira, 1999).

Em Portugal, os primeiros registos históricos que existem sobre o assunto datam do século XV. Em consequência da peste, o rei D. João II mandou limpar os canos de drenagem das águas pluviais que existiam na cidade de Lisboa, pois estes também captavam todo o tipo de lixo que existia devido ao elevado número de pessoas que ali viviam e lançavam para as ruas dejetos, estrume e outro tipo de lixos (Matos, 2003b).

Entre os séculos XVI e XVIII, até ao terremoto de Lisboa de 1755, o crescimento da população foi considerável e complicou ainda mais os problemas que já existiam, principalmente na época das chuvas. Existem obras históricas que documentam os problemas de inundações que existiam em Lisboa nas zonas que estão atualmente ocupadas pela Praça da Figueira e o Rossio (Figuras 3 e 4) (Matos, 2003a).

Depois do Terremoto de 1755, procedeu-se à reconstrução da cidade de Lisboa e deu-se um enorme progresso pela reedificação da cidade e pelo estabelecimento do princípio da canalização metódica das águas residuais, sendo que o seu efeito ainda se faz sentir actualmente nas zonas mais antigas da cidade, existindo coletores unitários dispostos em malha com ligação ao rio Tejo (Matos, 2003b).



*Figura 3- Traçado aproximado dos canos da cidade de Lisboa, final do século XVII, Parte Oriental. Fonte: Câmara Municipal de Lisboa (1950)*



*Figura 4- Traçado aproximado dos canos da cidade de Lisboa, final do século XVII, Parte Ocidental. Fonte: Câmara Municipal de Lisboa (1950)*

No início do século XX surgiram os coletores de betão, que passaram a substituir os coletores de alvenaria de pedra, onde as juntas estavam fechadas com argamassa, permitindo a estanquicidade e autolimpeza do sistema, o que levou a uma redução da contaminação das águas superficiais e das nascentes. Estes sistemas de drenagem de água pluviais passaram também a receber as águas residuais domésticas, o que representou um avanço enorme nas condições de higiene das cidades possibilitando a criação de casas de banho e o abandono do hábito de colocar os canecos com os dejetos na rua, que mais tarde eram recolhidos pelos trabalhadores do município (Matos, 2003a).

Nos últimos 40 anos, em Portugal, o número de estações de tratamento de águas residuais quase triplicou. A criação de um decreto-lei foi essencial no estabelecimento de normas para o controlo da poluição das águas residuais, permitindo salvaguardar a saúde pública e a produção de efluentes tratados que posteriormente podem ser utilizados na agricultura como fertilizantes e na rega dos espaços verdes urbanos (Matos, 2003b).

Nos dias de hoje, devido a esse decreto-lei, as águas pluviais dos aglomerados urbanos são conduzidas para as linhas de água (Figura 5).



*Figura 5- Manilhas de concreto para direcionamento das águas pluviais da Avenida de Sá Carneiro para o rio Fervença.*

Por sua vez os esgotos são destinados para as estações de tratamento de águas residuais (ETAR) (Figura 6), onde as lamas são tratadas, tornando-as inócuas pela mineralização da matéria orgânica. Depois de todo o processo de tratamento, a parte sólida pode ser aproveitada como adubo e a parte líquida pode ser reintroduzida na rede ou como no caso de Bragança, descarregada em linhas de água.



*Figura 6- Estação de Tratamento de Águas Residuais de Bragança*

Por vezes é impossível intervir ao nível dos sistemas de drenagem implementados devido a ser uma solução dispendiosa e muitas das vezes estes passarem por ruas históricas de cidades onde as obras são impossíveis, por isso utiliza-se outras soluções, de modo a diminuir o risco de cheias e inundações e proteger as populações.

## **2.2 Pavimentos permeáveis**

Os pavimentos permeáveis são uma solução alternativa para ajudar com a eliminação da escorrência de água em meio urbano. Estes são diferentes dos pavimentos tradicionais por permitirem a drenagem das águas pluviais através da superfície para as camadas subjacentes onde a água acaba por infiltrar-se no solo, ser reutilizada para sistemas de rega ou encaminhadas por sistemas complementar de drenagem para as linhas de água (Ballard *et al.*, 2007)

Os pavimentos permeáveis têm uma grande capacidade de gerir a precipitação que cai diretamente na sua superfície e contribuem para o armazenamento ou infiltração das águas pluviais provenientes dos telhados e de outras superfícies impermeáveis (Ballard *et al.*, 2007).

Os pavimentos utilizados nas estradas e estacionamento com camada de desgaste porosa têm ainda a vantagem de reduzirem o risco de aquaplanagem aumentando a segurança rodoviária. Esses pavimentos devido ao facto de poderem ter várias cores podem ser utilizados como marcação das vias o que reduz consideravelmente o uso de tintas, as quais podem ser prejudiciais ao ambiente (Matos, 2003; Costa, 2010).

Estes tipos de pavimentos permitem uma redução de caudal de 20 a 50% e de volume de escoamento entre 15 e 30%. Do ponto de vista da qualidade da água, o efeito depurador aponta para eficiências de redução em termos de sólidos suspensos (entre 50 a 90 %), de carga orgânica (entre 50 e 70 %) e de metais pesados, designadamente, de chumbo (entre 75 e 95 %) (Matos, 2003).

Em Portugal, e no caso concreto da cidade de Bragança, os pavimentos permeáveis já têm alguma aplicação (Figuras 7, 8, 9, 10, e 11).



*Figura 7- Pavimento bloco "mapa de Portugal"*



*Figura 8- Pavimento bloco retangular*



*Figura 9- Pavimento quadrado de cimento*



*Figura 10- Pavimento cubos granito grande*



*Figura 11- Pavimento cubos granito pequeno*

Os pavimentos permeáveis têm uma aplicação versátil, podendo ser usados em diferentes locais como:

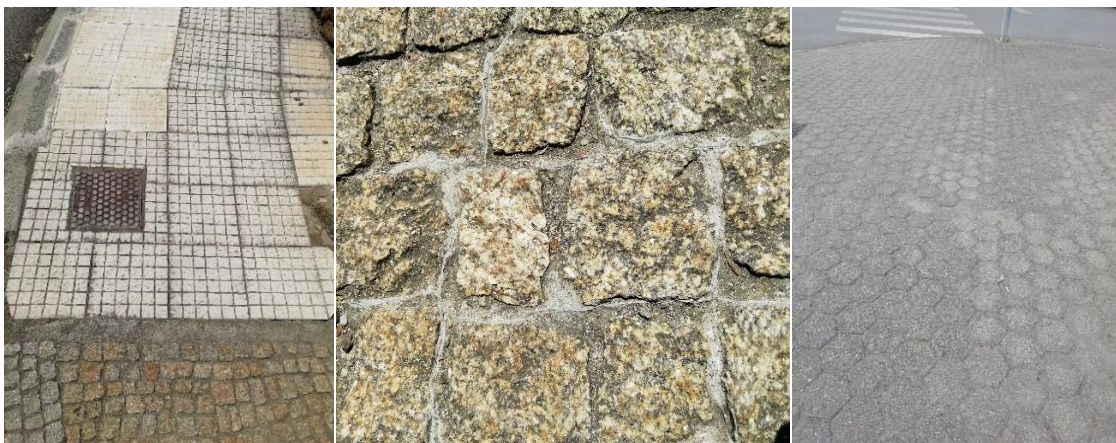
- Parques de estacionamento;
- Passeios pedonais ou circuláveis;
- Estradas com baixa intensidade de tráfego;
- Interior e exterior de casas, entre outras.

Apesar da sua versatilidade na aplicação, é necessário ter vários fatores em conta quando se aplica esses tipos de pavimentos, a inclinação é um dos principais, muitos desses pavimentos apresentam melhor desempenho em zonas planas e outros em zonas com alguma inclinação.

### 2.2.1 Características dos pavimentos permeáveis

Os pavimentos permeáveis são todos aqueles que possuem um revestimento permeável ou poroso, o que permite o armazenamento e/ou a infiltração da água para as camadas inferiores do solo ou mesmo para um sistema de drenagem complementar (Sequeira, 2018). Ballard *et al.*, (2007) fazem a distinção entre pavimentos permeáveis e pavimentos porosos.

Os pavimentos permeáveis, como o nome indica, possuem um revestimento permeável, o que por sua vez permite a entrada de água para as camadas inferiores por meio das juntas. Temos o exemplo dos blocos de betão, cerâmicos, ou mesmo os de pedra com as juntas abertas ou blocos de betão alveolares. Por vezes o seu mau uso como pode ser observado em algumas regiões, tornam estes pavimentos impermeáveis. Em Bragança é possível observar esse mau uso em vários locais, quando da finalização da pavimentação é colocada uma camada de cimento nas juntas (Figura 12).



*Figura 12- Juntas de pavimentos tapadas com cimento em passeios da cidade de Bragança*

Por sua vez, os pavimentos porosos são construídos por materiais porosos, com 15 a 25% de espaços vazios, por onde se processa a infiltração das águas pluviais (Gonçalves e Oliveira, 2014). Pode-se referir alguns tipos de materiais porosos como são o caso do betão betuminoso poroso, o betão de cimento poroso, as superfícies de relva ou de gravilha

reforçada. Porém, na cidade de Bragança não foram identificados esses tipos de pavimentos de betão poroso, e apesar das várias tentativas para arranjar amostras para fazer ensaios para este trabalho não foi possível arranjar, mostrando as empresas contactadas indisponibilidade do material. Mediante esta dificuldade para obter este tipo de pavimentos porosos pode-se concluir que ainda é muito pouco utilizado em Portugal.

Os dois tipos de pavimento referidos podem ainda possuir função hidráulica de armazenamento, ou seja, a camada de base ou sub-base dispõe de uma estrutura de vazios com capacidade de armazenamento, como foi possível observar durante os testes efetuados com pavimentos permeáveis. Estes conseguem armazenar e reter a humidade na camada base e sub-base, mesmo com o calor intenso do verão, por alguns dias. Neste caso o pavimento passa a designar-se de pavimento com estrutura reservatório, ou, simplesmente pavimento reservatório.

De seguida apresentam-se algumas vantagens dos pavimentos permeáveis (Figura 13):



Figura 13- Vantagens associadas aos pavimentos permeáveis (Gonçalves & Oliveira, 2014)

### 2.3 Simuladores de Chuva

Os simuladores de chuva têm como principal função aplicar água sobre os pavimentos, solo ou outro tipo de materiais a serem estudados do modo mais próximo ao

da chuva natural de modo que se possa efetuar estudos de erosão, infiltração e escoamento superficial (Tomás, 1997).

Os simuladores de chuva podem simular a intensidade, a duração e a quantidade de chuva desejada, não ficando a investigação dependente das condições meteorológicas, e do fator tempo (Guerra *et al.*, 1999).

O simulador de chuva tem inúmeras vantagens tais como (Hudson, 1981; Bertoni, 1990; Tomás, 1997; Guerra *et al.*, 1999):

- A chuva é simulada no solo, sem alteração estrutural do terreno;
- Os resultados do estudo são obtidos num curto espaço de tempo;
- Pode-se controlar a recolha dos dados, como e quando, o que torna o trabalho eficiente. Porque a depender da chuva natural a recolha de informação é bastante incerta, não falando do tempo que demora a obter os dados necessários;
- Aumento da eficiência do estudo devido ao controlo da chuva;
- Têm uma relação custo-benefício elevada porque os custos da recolha de dados por um simulador são bastantes inferiores à recolha desses dados em bacias naturais ou talhões, devido aos custos elevados tanto ao nível dos investimentos, manutenção e recolha de dados.

As desvantagens do simulador são (Tomás, 1997; Guerra *et al.*, 1999):

- De ordem operacional, como o transporte do equipamento;
- O suprimento da água, a presença de ventos, ocorrência de chuva natural durante a simulação;
- Os simuladores são dispendiosos de construir, como o custo das peças, e usar, como o número de operadores necessários;
- As áreas em estudo são muito variáveis, desde inferiores a 1m<sup>2</sup> até várias centenas de m<sup>2</sup>, o que por vezes dependendo do estudo não são representativas;
- As distribuições das gotas produzidas pelos simuladores não são idênticas às reais;
- Na sua maioria, os simuladores não possibilitam a variação da intensidade de precipitação ao longo de um evento simulado;
- Alguns simuladores produzem gotas com velocidades de impacto inferiores à velocidade terminal, originando energias cinéticas muito inferiores às reais.

Apesar dos simuladores de chuva terem algumas vantagens e desvantagens estes são ainda nos dias de hoje as ferramentas mais eficazes para obtenção de dados de chuvadas com alguma exatidão sem ser necessário que o fator chuva esteja presente. É a forma mais rápida de obter dados para um dado instante e local num período de tempo curto, para fazer face aos problemas atuais e os quais necessitam de resposta rápida (Tomás, 1997).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de Estudo

##### 3.1.1 Localização e caracterização

O presente trabalho realizou-se na zona industrial das Cantarias, localizada nos arredores da cidade de Bragança (41°47'33.1"N 6°46'37.6"W). Ocupa uma área total de 970 000 m<sup>2</sup>, sendo a área destinada à instalação de empresas de 830 000 m<sup>2</sup>, estando até ao momento 770 000 m<sup>2</sup> ocupados por empresas e 60 000 m<sup>2</sup> de área livre (Município de Bragança, 2020).

De acordo com a classificação climática de Köppen o clima é Csb (Figura 14), também conhecido como “clima mediterrânico de verão fresco”. Caracteriza-se por o mês mais frio ter temperatura média acima de 0°C, todos os meses têm temperaturas médias abaixo de 22°C e pelo menos quatro meses apresentam média acima de 10°C. Ocorre pelo menos três vezes mais precipitação no mês mais chuvoso do inverno do que no mês mais seco do verão. O mês mais seco do verão recebe menos de 30 mm de precipitação (Figura 15) (Peel *et al.*, 2007).

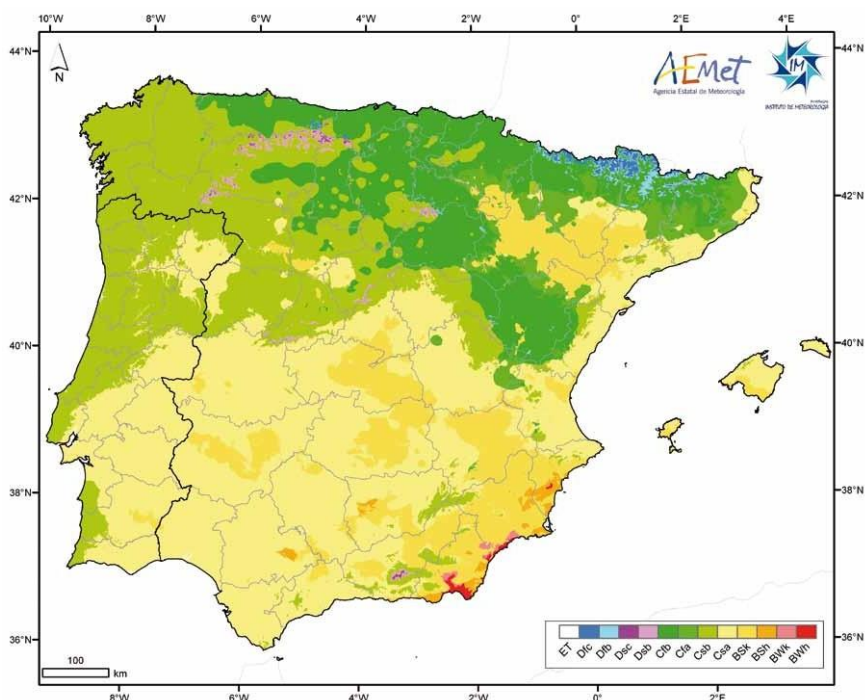


Figura 14- Classificação climática de Köppen-Geiger na Península Ibérica e Ilhas Baleares (IPMA, 2019)

A precipitação média anual é de 758,3 mm, apresentando uma distribuição típica mediterrânica sazonal com chuvas concentradas no outono e inverno, podendo ocorrer algumas chuvadas na primavera e trovoadas no verão. A temperatura média anual é de 12,3°C com médias mensais que variam de 4,5°C em janeiro e 21,7°C em julho (Figura 10) (IPMA, 2019).

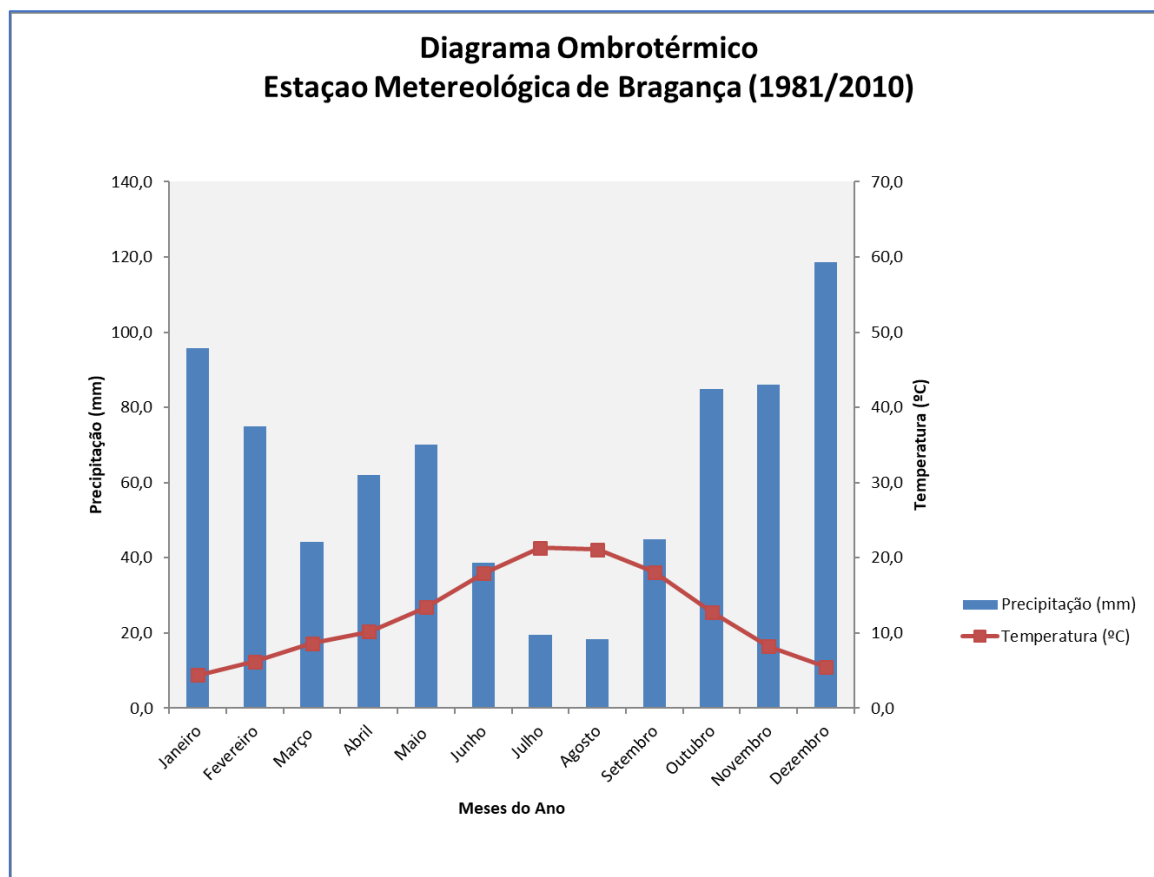


Figura 15- Diagrama Ombro térmico período 1981-2010 em Bragança (IPMA, 2020)

De acordo com a Base Mundial de Referência para Recursos do Solo (WRB, 2014), o tipo de solo predominante são os Leptosolos, que se caracterizam por serem solos jovens ou incipientes, delgados, limitados por rocha dura contínua e coerente ou uma camada contínua cimentada a menos de 30 cm de profundidade, ocupando as zonas de declives mais acentuados. Os Leptosolos apresentam perfil do tipo A C R ou A R.

### 3.1.2 Impermeabilização dos solos

Grande parte dos solos da zona industrial (solos urbanos) estão completamente ou parcialmente impermeabilizados quer por construções associadas às empresas, quer por estradas, passeios, estacionamento e parques de estacionamento. Regra geral, nas áreas



### 3.2.1 Colheita de amostras de solo

Na área de amostragem, zona industrial das Cantarias de Bragança, foi realizada a colheita de 22 amostras de solo não perturbadas utilizando o método do cilindro, com a finalidade de avaliar a permeabilidade do solo (Figura 17). Foram colhidas amostras duplicadas na camada superficial do solo (0-5 cm) em 11 pontos distribuídos por espaços verdes públicos (pequenos jardins) e privados (áreas envolventes dos pavilhões das empresas) e em lotes que ainda não estão ocupados por empresas. O método do cilindro consta de uma sonda (Figura 18) onde encaixam cilindros de aço inoxidável com um volume de  $100 \text{ cm}^3$  (área base  $20 \text{ cm}^2 \times$  altura  $5 \text{ cm}$ ) (Figuras 17 e 19). Com a ajuda da sonda o cilindro é enterrado no solo, sempre com o máximo cuidado para evitar as pedras que podem dificultar a colheita da amostra e danificar os cilindros, de seguida afasta-se o solo ao redor do cilindro (com um martelo geológico) e introduz-se na base do mesmo uma lâmina metálica. Levanta-se a sonda, retira-se o cilindro e coloca-se em ambas as extremidades tampas para não haver perdas de solo e facilitar o transporte, em malas metálicas almofadadas, para o laboratório. (Figura 20).



*Figura 17- Colheita de amostras de solo não perturbadas na zona industrial das Cantarias, Bragança*



*Figura 18- Sonda de encaixe dos cilindros*



*Figura 19- Cilindros de aço inoxidável de 100 cm<sup>3</sup>*



*Figura 20- Mala de transporte dos cilindros*

### **3.2.2 Levantamento do tipo de pavimentos**

Foi efetuado um levantamento do tipo de pavimentos permeáveis utilizados nas estradas, passeios, estacionamento e parques de estacionamento na zona industrial das Cantarias, Bragança. Foram identificados pavimentos permeáveis em passeios e estacionamento públicos e em parques de estacionamento e acessos em áreas privadas das empresas. As estradas e alguns parques de estacionamento estão asfaltados e, como tal, foram classificadas como superfícies impermeáveis, não sendo consideradas neste estudo. Todos os tipos de pavimentos permeáveis identificados foram avaliados relativamente à permeabilidade/infiltração em protótipos construídos em laboratório, sendo os seguintes:

- (1) Cubos de granito pequenos (Dimensões médias: 55×50×38,31 mm)
- (2) Quadrados de cimento (Dimensões médias: 310×310×33,88 mm);
- (3) Blocos de cimento porosos retangulares (Dimensões médias: 210×110×58,09 mm);
- (4) Blocos de cimento porosos, que devido à sua forma são vulgarmente designados por “mapa de Portugal” (Dimensões médias: 244×140×63,22 mm).

Para a construção dos protótipos dos pavimentos foi solicitado à Câmara Municipal de Bragança a disponibilização deste tipo de materiais, uma vez que esta entidade tem sempre algumas quantidades em armazém, para o caso de ser necessário fazer reparações ou pequenas obras. Para além dos pavimentos o Município também cedeu areia e brita, inertes que são utilizados na construção da base (areia) e sub-base (brita) da camada drenante, sobre a qual assentam os pavimentos para facilitar a permeabilidade/infiltração das águas pluviais.

### 3.3 Trabalho de laboratório

O trabalho de laboratório abrangeu a avaliação da permeabilidade das amostras de solo e dos diversos tipos de pavimentos utilizados na zona industrial das Cantarias, Bragança. No primeiro caso foi utilizado um permeâmetro de carga constante e no segundo foram efetuados ensaios de simulação de chuva. Todas as avaliações foram efetuadas no Laboratório de Solos da Escola Superior Agrária de Bragança.

#### 3.3.1 Ensaios de permeabilidade do solo

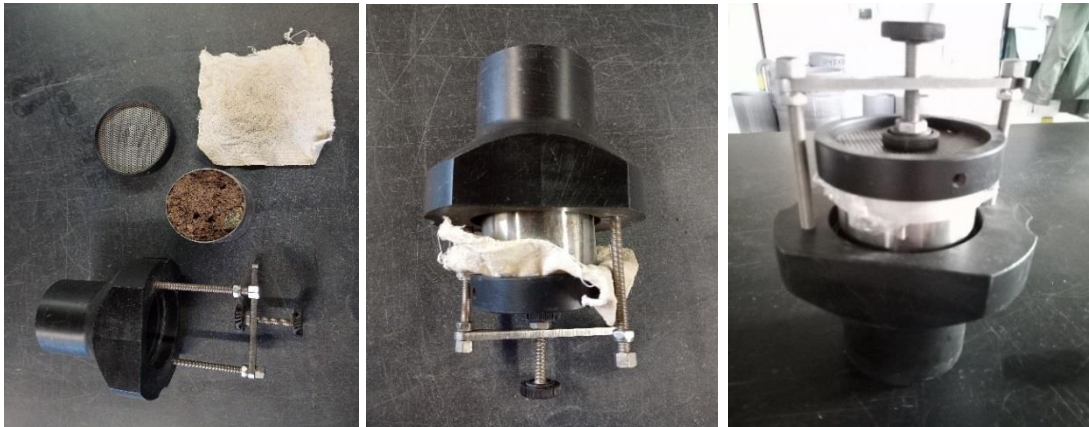
O coeficiente de permeabilidade do solo ( $k$ ) foi avaliado num permeâmetro de carga constante (Figura 21), que permite obter informação sobre a facilidade com que a água escoar através do solo. Para além da avaliação deste parâmetro do solo, a partir das mesmas amostras e mediante a realização de diversos procedimentos, foi possível avaliar outras propriedades físicas do solo, nomeadamente densidade aparente, porosidade e armazenamento de água no solo.



*Figura 21- Permeômetro de carga constante*

Os cilindros, com as amostras de solo não perturbadas, foram limpos externamente e colocada uma gaze hidrófila na extremidade não biselada, fixada pela sobreposição de um filtro metálico. Seguiu-se o encaixe do cilindro na armadura de suporte do permeâmetro com a parte do filtro para baixo (Figura 22), de modo a garantir o fluxo da água através da amostra no sentido natural do fluxo no solo. As armaduras de suporte foram introduzidas no permeâmetro respeitando a ordem definida e a posição

exata de cada amostra. Podem ser colocadas em simultâneo 25 armaduras, permitindo assim avaliar a permeabilidade de 25 amostras em cada ensaio.



*Figura 22- Montagem de uma armadura de suporte do cilindro*

Já com as armaduras contendo as amostras colocadas no devido lugar no permeâmetro, iniciou-se a etapa seguinte, que consistiu na saturação das amostras. As amostras estiveram cerca de 48 horas a saturar para garantir a saturação completa e estabilidade.

Depois das amostras saturadas, deu-se início à instalação dos sifões que foi realizada com todo o cuidado, colocando uma extremidade do sifão no cilindro da amostra e a outra dentro do tubo sintético de evacuação da água devidamente numerado, de modo a assegurar o fecho do circuito hidráulico (Figuras 23 e 24). Se esta fase não for efetuada de modo correto não se estabelece o circuito da água, por isso todo o cuidado e atenção. A cada amostra está associada uma bureta de 40 ml de capacidade, que permite o registo da quantidade de água que atravessa a amostra por unidade de tempo (Figuras 25 e 26).



*Figura 23- Instalação do sifão entre a amostra e o tubo de evacuação*

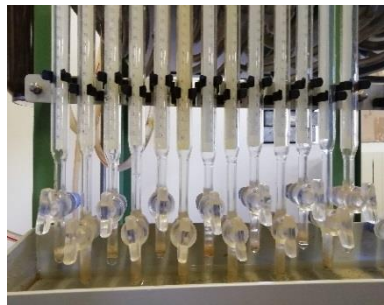


*Figura 24- Vista superior do Permeâmetro com as amostras instaladas*

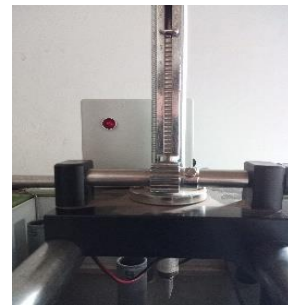
Depois de verificado o funcionamento do aparelho e dos sifões, deu-se início às leituras. As buretas foram fechadas e cronometrado o tempo até atingir os 40 ml ou então quantificada a quantidade de água na bureta num período máximo de 30 minutos. Algumas amostras eram muito impermeáveis pelo que foi necessário deixar por períodos mais longos (1, 2, ... ou até mesmo 24 horas). Após as leituras, foram feitas as medições dos níveis de água dentro e fora do cilindro, para cálculo da carga hidráulica (dH) (Figura 27). As leituras foram efetuadas durante quatro dias, realizando-se uma leitura por dia sempre à mesma hora, resultando assim num total de quatro leituras.



*Figura 25- Buretas associadas às amostras*



*Figura 26- Sistema a funcionar*



*Figura 27- Medição da diferença de nível*

A diferença do nível de água (dH), no interior e no exterior do cilindro que contém a amostra, é estabelecida de acordo com a permeabilidade dos solos, variando entre 2 mm para solos altamente permeáveis e 20 mm para solos pouco permeáveis. A aferição dos níveis da água foi feita usando um medidor incorporado no próprio permeâmetro. O medidor possui uma escala graduada em cm e quando a ponteira toca na água acende uma luz vermelha e regista-se essa medida (Figuras 28 e 29).



*Figura 28- Medidor com a luz apagada (sem estar a tocar com a ponteira na água)*



*Figura 29- Aparelho com a luz ligada (ponteira está a tocar na água)*

Após a última leitura, foi drenada a água do permeâmetro e aguardou-se cerca de uma hora para que toda a água dos cilindros fosse também drenada. De seguida, os cilindros foram retirados do permeâmetro e colocados individualmente em recipientes de plástico devidamente identificados. Por último, procedeu-se à pesagem de cada conjunto formado por recipiente de plástico, cilindro com a amostra de solo e gaze hidrófila.

Após a primeira pesagem, os conjuntos anteriormente referidos, foram deixados à temperatura ambiente durante 24 horas. Após este período, fez-se uma nova pesagem dos conjuntos que foram colocados na estufa a 105° C, também por um período de 24 horas (Figura 30).



*Figura 30- Secagem das amostras de solo e da gaze hidrófila a 105 °C*

Retirou-se o material da estufa e com o solo já seco, voltou-se a fazer a pesagem dos diversos conjuntos. Posteriormente, as amostras de solo foram retiradas dos cilindros e procedeu-se à lavagem do recipiente de plástico, cilindro e gaze utilizados em cada amostra de solo, que foram levados à estufa para secar (Figura 31).



*Figura 31- Separação da gaze hidrófila, do cilindro e do solo*

Depois de duas horas a secar a 105 °C, as gazes, os cilindros e os recipientes de plásticos já não continham humidade, e foram pesados individualmente para determinar as taras necessárias para obter o peso da amostra de solo (Figura 32).



Figura 32- Pesagem dos recipientes de plástico, cilindros e gazes

### 3.3.2 Avaliação de propriedades físicas do solo

A partir das leituras e medições realizadas anteriormente, foi possível determinar o coeficiente de permeabilidade do solo, a densidade aparente, a microporosidade, a macroporosidade, a porosidade total, a capacidade de campo e a capacidade máxima para a água.

#### 3.3.2.1 Permeabilidade do solo

O cálculo da permeabilidade inicial do solo ( $k_i$ ) foi realizado a partir dos dados obtidos na primeira leitura e a permeabilidade final ( $k_f$ ) foi obtida com base na média das outras três leituras.

O coeficiente de permeabilidade (k) foi calculado com base na Lei de Darcy:

$$k = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot dH}$$

Onde:

k – coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica (cm / h);

V – volume de água que flui através da amostra (1 ml = 1 cm<sup>3</sup>);

L – altura da amostra de solo (cm);

A – área da amostra através da qual passa a água (cm<sup>2</sup>);

t – tempo estabelecido para a medição do volume V (h).

dH – diferença de nível de água dentro e fora do cilindro da amostra (cm).

A altura (L) e a área da amostra (A) foram constantes para todas as amostras, 5 cm e 20 cm<sup>2</sup>, respetivamente.

Os valores dos coeficientes de permeabilidade (k) foram classificados de acordo com a informação disponibilizada na Tabela 1.

*Tabela 1- Classificação da permeabilidade dos solos (SCS/USDA)*

<b>Classe de permeabilidade (designação)</b>	<b>Valor (cm/h)</b>
Extremamente rápida	100 – 300
Muito rápida	25,4 – 100
Rápida	12,7 – 25,4
Moderadamente rápida	6,35 – 12,7
Moderada	2,00 – 6,35
Moderadamente lenta	0,50 – 2,00
Lenta	0,13 – 0,50
Muito lenta	< 0,13

### 3.3.2.2 Densidade aparente do solo

A densidade aparente ( $D_{ap}$ ) é um valor adimensional, determinado pela razão entre a massa volúmica aparente do solo ( $\rho_s$ ) e a da água ( $\rho = 1 \text{ g / cm}^3$ ).

$$D_{ap} = \frac{\rho_s}{\rho}$$

A massa volúmica aparente do solo foi calcula por:

$$\rho_s = \frac{\text{Massa solo seco}}{\text{Volume do cilindro}}$$

onde a Massa solo seco foi obtida por pesagem da amostra seca na estufa a 105°C até peso constante (durante pelo menos 24h) e Volume do cilindro =  $A \times L$ .

### 3.3.2.3 Porosidade total do solo

A porosidade total do solo ( $P$ ) foi calculada a partir da razão entre a água de saturação e o volume do cilindro (Figueiredo, 2011):

$$P = \frac{(\text{Massa do solo saturado} - \text{Massa do solo seco})}{\text{Volume do cilindro}} \times 100$$

onde a Massa solo saturado foi obtida por pesagem da amostra à saída do permeâmetro após 1 hora de drenagem, Massa solo seco foi obtida depois da secagem da amostra na estufa a 105°C até peso constante (durante pelo menos 24h) e o Volume cilindro =  $A \times L$ .

### 3.3.2.4 Capacidade de Campo e Capacidade Máxima para a Água

No final do ensaio, as amostras ficaram a drenar durante 24 horas, estimando-se que o teor de humidade obtido, no final desse período, corresponde à capacidade de campo do solo (CC), ou seja, a uma estimativa da água retida nos micróporos (Figueiredo, 2011). Determinou-se este teor de humidade através da diferença entre o peso da amostra nessas condições ( $M_{\text{solo húmido}}$ ), e o peso obtido depois da secagem da amostra na estufa a 105°C ( $M_{\text{solo seco}}$ ):

$$CC = \frac{Massa\ solo\ húmido - Massa\ solo\ seco}{Massa\ solo\ seco} \times 100$$

A capacidade máxima para água (CMA) foi determinada da seguinte forma:

$$CMA = \frac{Massa\ solo\ saturado - Massa\ solo\ seco}{Massa\ solo\ seco} \times 100$$

### 3.3.2.5 Microporosidade e Macroporosidade

A microporosidade (MicroP) é a expressão volumétrica do teor de humidade, calculada por:

$$MicroP (\%) = CC \times Dap$$

A macroporosidade (macroP) foi estimada por diferença entre a porosidade total e a microporosidade:

$$MacroP (\%) = P - MicroP$$

### 3.3.2.6 Elementos grosseiros

Os elementos grosseiros, partículas minerais com dimensões superiores a 2 mm, foram expressos em percentagem em relação ao peso total da amostra.

## 3.3.3 Ensaio de permeabilidade dos pavimentos

Na avaliação da permeabilidade dos pavimentos, em uso na zona industrial das Cantarias, foi utilizado o método de simulador de chuva (ensaio de simulação de chuva) e construídos protótipos dos pavimentos.

### 3.3.3.1 Construção de protótipos dos pavimentos

Para uso específico neste trabalho, foram criados cinco protótipos de pavimentos permeáveis, em uso em passeios e estacionamento na zona industrial das Cantarias (Figura 33):

- (1) Cubos de granito pequenos (CGP);
- (2) Cubos de granito grandes (CGG);
- (3) Quadrados de cimento (QC);
- (4) Blocos de cimento retangulares (BCR);
- (5) Blocos de cimento tipo “mapa de Portugal” (BCMP).

Sob os pavimentos foi colocada uma camada de brita (sub-base) e uma camada de areia (base), que conjuntamente formam a camada-drenante, seguindo os procedimentos normalmente adotados na construção destes pavimentos.



*Figura 33- Diversos tipos de pavimentos em uso na zona industrial das Cantarias (esquerda) e protótipo de pavimento construído com granito pequeno (direita)*

Para o efeito foi desenvolvido um dispositivo que permitisse suportar os protótipos dos pavimentos quando submetidos às simulações de chuva. Este dispositivo foi produzido no Laboratório de mecânica (ESTIG), Laboratório de solos (ESA) e oficinas do IPB e consta de um suporte de ferro com as medidas  $50 \times 50 \times 50$  cm (medidas internas) e de uma caixa metálica que apoia na parte superior do suporte sobre uma aba voltada para o interior (Figuras 34 e 36).

As caixas metálicas, que serviram de suporte aos pavimentos, foram construídas a partir de uma chapa com 200 cm de comprimento e 20 cm de altura, que foi dobrada numa quinadora (Figura 35) para formar um quadrado com lado de 50 cm. Na base da caixa foi colocada uma rede metálica de malha fina, de modo a permitir a drenagem da água através dos pavimentos (Figura 36).



*Figura 34- Base de sustentação das caixas*



*Figura 35- Quinadora*



*Figura 36- Caixa para suporte dos pavimentos*

Também construiu-se uma espécie de caixa coletora para colocar na base da caixa metálica e permitir que a água resultante da infiltração fosse direcionada através de um tubo até aos recipientes de recolha (Figura 37). Para captar a água do escoamento foi criada uma rampa de alumínio rijo, de forma triangular, com uma capa protetora por cima para evitar que as partículas de água provenientes do bico aspersor pudessem interferir com a água de escoamento dos pavimentos (Figura 38). A esta rampa foi ligado um tubo para recolha da água do escoamento em recipientes apropriados. A base de sustentação das caixas foi definida com uma inclinação de 5%, pois foi considerada como sendo a inclinação média da zona industrial das Cantarias.



*Figura 37- Caixa colectora da água de infiltração*



*Figura 38- Caixa colectora da água do escoamento*

O *design* do dispositivo construído foi feito de modo a que as diversas partes constituintes fossem móveis, facilitando, assim, o movimento das caixas, dos tubos e das capas protetoras a cada mudança de pavimento, e também para que este sistema fosse móvel e possível de transportar para qualquer lugar e de fácil e rápida montagem.

### 3.3.3.2 Simulador de chuva

O simulador utilizado neste estudo foi um modelo proposto por Wilcox *et al.* (1986), construído nas oficinas do IPB no ano de 2008 (Figura 39).



Figura 39- Simulador construído nas oficinas do IPB no ano de 2008

O simulador já estava desatualizado e não permitia executar da melhor forma as tarefas necessárias. Sendo assim, foi alterado, reconstruído e melhorado para fins da simulação de chuva. O modelo atualizado contém apoios reguláveis em altura com parafusos, para que possa estar apoiado e bem nivelado em qualquer lugar. A área da base do aspersor foi ampliada para  $50 \times 50$  cm para evitar o escoamento de água pelos apoios e caso seja preciso colocar um toldo por cima permite que as gotas escurram por ele (necessário quando há vento). O simulador é do tipo aspersor, tendo como base de sustentação quatro apoios de tubo galvanizado extensíveis e articulados para a projeção da altura desejável. Devido ao tipo de simulador utilizado, foi necessário o bombeamento da água a partir de um bidão, com o auxílio de uma bomba do tipo “Grunfos”. Este foi outro

sistema alterado para que não seja necessário estar sempre alguém junto do mesmo; antes era preciso dois bidões, um com a bomba e outro com água para ajudar a manter o nível, já que a torneira não tinha vazão suficiente. Agora o sistema está automatizado, com uma tomada inteligente com comando, para ligar e desligar a bomba à distância, evitando deslocamentos rápidos até aos bidões para desligar a bomba. O sistema mostrou-se eficaz durante toda a sua utilização.

Antes do início de cada ensaio de avaliação da permeabilidade dos pavimentos, realizou-se a calibração do simulador, de modo a garantir o caudal e a intensidade da precipitação de acordo com as características da precipitação da área de amostragem e a sua distribuição de forma uniforme. Com a calibração pretendeu-se que as condições em que se realizaram os ensaios fossem similares às condições da área de estudo (Pinto, 1990; Tomás, 1997).

### **3.3.3.2 Calibração do simulador de chuva**

A calibração do simulador e os ensaios de simulação de chuva foram realizados na área externa ao Laboratório de Solos da Escola Superior Agrária. A calibração consistiu na determinação do caudal, da intensidade da precipitação e da pressão à saída do bico do aspersor e foi efetuada antes de cada ensaio de simulação de chuva.

O simulador foi montado com os apoios posicionados de modo a formarem um quadrado de 3 m de lado, a uma altura de 2,70 m em relação à posição dos apoios e 2,45 m em relação ao centro do quadrado, local onde era colocado cada um dos protótipos de pavimentos a ensaiar. Os ensaios foram realizados individualmente para cada tipo de pavimento. Antes do início de cada simulação de chuva (momento em que se ligava a bomba), colocava-se um funil com uma mangueira acoplada sob o aspersor, de modo a desviar a água para fora do protótipo de pavimento até o caudal e a pressão estabilizar. Uma vez estabilizados esses parâmetros, media-se o caudal, à saída do aspersor, enchendo um recipiente de volume conhecido até à capacidade máxima (utilizando-se o funil com a mangueira acoplada), e com um cronómetro media-se o tempo de enchimento. De seguida, retirava-se o funil e procedia-se à avaliação da intensidade da chuva simulada através da recolha de precipitação em cinco recipientes previamente colocados sobre uma chapa de alumínio que cobria o protótipo de pavimento (quatro colocados em cruz e um na parte central), durante 10 minutos. Após a recolha, media-se o volume de água em cada recipiente e determinava-se a intensidade da chuvada. A pressão no bico foi regulada através de um manómetro fixado ao simulador. Com esta calibração procurou-se ajustar a

intensidade da precipitação às características da precipitação da área de estudo (Tomás, 1997).

Os parâmetros utilizados durante os ensaios de simulação de chuva foram:

- Intensidade média da chuva: 74 mm h<sup>-1</sup>;
- Pressão da água: 0,40 bar;
- Altura da queda da chuva 2,45 m;
- Inclinação da caixa com os pavimentos: 5%;
- Duração de cada ensaio: 30 minutos.

### 3.3.3.3 Água de infiltração e água de escoamento superficial

Imediatamente a seguir à calibração do simulador retirava-se a chapa de alumínio (que cobria o protótipo) e iniciava-se os ensaios de simulação de chuva sobre o protótipo do pavimento. Efetuaram-se três simulações de chuva por ensaio com a duração de 30 minutos cada, com um intervalo de 1 h entre a primeira e a segunda simulação e de 3 h entre a segunda e a terceira simulação. Os procedimentos foram iguais em todas as simulações. A água de escoamento e de infiltração foi contabilizada em intervalos de 5 minutos (sendo o tempo de recolha depois de terminadas as simulações variável) e captada através de dois tubos, um ligado à rampa colocada na frente do protótipo (água de escoamento) (Figura 38) e outro ligado a um sistema incorporado por baixo do protótipo (água de infiltração) (Figura 37), para frascos separados e devidamente identificados, totalizando 6 colheitas para cada variável no período de 30 minutos (Figura 40). Seguiu-se a medição do volume da água de escoamento e de infiltração para cada intervalo de colheita e simulação.



*Figura 40- Colheita da água de infiltração e de escoamento superficial*

### 3.3.3.4 Teor de humidade da camada drenante colocada sob os pavimentos

Na camada-drenante (base de areia e sub-base de brita) colocada sob os pavimentos foi instalado um sensor de humidade (Figura 41). Na calibração do sensor foi utilizada areia seca em estufa a 105°C até atingir 0 % de humidade. A areia foi distribuída por cinco copos, colocando cerca de 120 g em cada um (Figura 42).

Para a calibração do sensor criaram-se cinco grupos de percentagem de humidade da areia (Figura 43):

- (1) Areia seca – 0 % de humidade;
- (2) Areia pouco seca, adição de 5,45 ml de água – 30 % de humidade;
- (3) Areia pouco húmida, adição de 11,50 ml de água – 50 % de humidade;
- (4) Areia húmida, adição de 17,25 ml de água – 70 % de humidade;
- (5) Areia saturada, adição de 23,00 ml de água – 100 % de humidade.

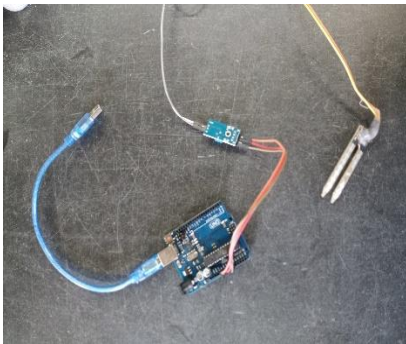


Figura 41- Sensor de humidade



Figura 42- Pesagem de areia

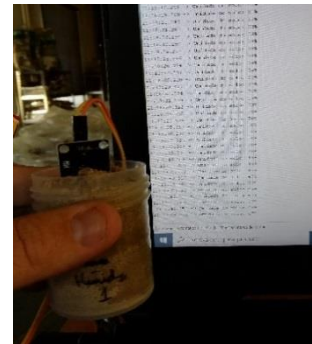


Figura 43- Medição da humidade

### 3.3.4 Análises estatísticas

Para interpretação dos resultados utilizou-se os valores médios das diversas variáveis em estudo. Também foram estabelecidas correlações entre a permeabilidade e algumas propriedades físicas do solo. A análise estatística foi efetuada com recurso às ferramentas do *software* excel.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Na primeira parte são apresentados os resultados obtidos em amostras não perturbadas de solo, colhidas na camada superficial (0-5 cm) na zona industrial das Cantarias, onde foi avaliado o coeficiente de permeabilidade do solo ( $k$ , cm/h), que dá uma indicação da velocidade com que a água atravessa o solo. Nas mesmas amostras foram ainda avaliadas outras propriedades físicas, que estão relacionadas com a permeabilidade, nomeadamente a densidade aparente, teor de elementos grosseiros, porosidade total, microporosidade, macroporosidade, capacidade de campo (capacidade de retenção de água) e capacidade máxima para a água. O conhecimento destas propriedades do solo é importante, pois os pavimentos estão assentes sobre estes solos e consequentemente vão interferir com a infiltração das águas pluviais. Na segunda parte faz-se referência à permeabilidade de diversos tipos de pavimentos em uso em áreas ao ar livre na referida zona industrial.

### **4.1 Propriedades físicas do solo**

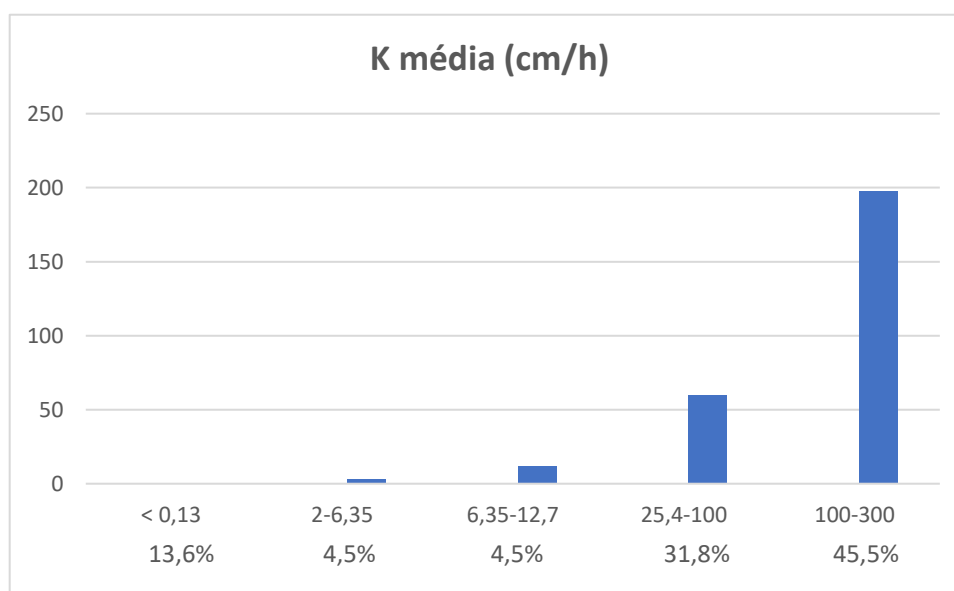
#### **4.1.1 Permeabilidade do solo**

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios de permeabilidade e respetivas classes de permeabilidade. Frequentemente, os solos apresentam uma permeabilidade Extremamente Rápida ( $k = 197,3$  cm/h) ou Muito Rápida ( $k = 59,5$  cm/h), representando ambas as classes 77,3 % do total de amostras analisadas (Figura 44). As classes Moderadamente Rápida ( $k = 11,5$  cm/h) e Moderada ( $k = 3,3$  cm/h) são pouco expressivas (menos de 10 % das amostras analisadas). A classe Muito Lenta ( $k = 0,10$  cm/h) está associada a zonas localizadas mais compactadas, que favorecem o escoamento superficial das águas pluviais (cerca de 14 % das amostras analisadas).

A avaliação da permeabilidade constitui um importante elemento de interpretação ecológica, uma vez que permite identificar as áreas que apresentam maior capacidade para a infiltração da água (Paz, 2004; Sequeira, 2018).

*Tabela 2-Representatividade das classes de permeabilidade dos solos da zona industrial das Cantarias, Bragança*

Classe de Permeabilidade (K)	Intervalo da classe (K, cm/h)	Resultados	
		K média (cm/h)	Nº de amostras
1 Extremamente Rápida	100-300	197,3	10
2 Muito Rápida	25,4-100	59,5	7
3 Moderadamente Rápida	6,35-12,7	11,5	1
4 Moderada	2-6,35	3,3	1
5 Muito lenta	< 0,13	0,1	3



*Figura 44- Valores de permeabilidade do solo (cm/h), distribuídos pelos intervalos de classe de permeabilidade (cm/h) e percentagem de amostras analisadas em cada classe de permeabilidade nos solos da zona industrial das Cantarias, Bragança*

#### **4.1.2 Propriedades físicas do solo e sua relação com a permeabilidade**

Na Tabela 2 podem ser observados os valores relativos a diversas propriedades físicas do solo.

Tabela 3 – Propriedades físicas do solo: densidade aparente (*Dap*), porosidade total (*P total*), Microporosidade (*MicroP*), macroporosidade (*MacroP*), capacidade de campo (*CC*) e capacidade máxima para a água (*CMA*)

Classe de permeabilidade (k)	<i>Dap</i> (g cm <sup>-3</sup> )	<i>P total</i>	<i>MicroP</i>	<i>MacroP</i>	<i>CC</i>	<i>CMA</i>
1 Extremamente Rápida	1,24 ± 0,10	52,2 ± 4,8	47,0 ± 4,4	5,2 ± 1,1	36,9 ± 7,8	41,0 ± 8,8
2 Muito Rápida	1,37 ± 0,11	52,9 ± 2,7	48,0 ± 2,8	4,9 ± 0,8	35,3 ± 3,3	39,4 ± 4,7
3 Moderadamente Rápida	1,42	53,0	48,5	4,5	34,1	37,2
4 Moderada	1,51	49,5	44,7	4,8	29,5	32,7
5 Muito lenta	1,62 ± 0,06	52,2 ± 4,0	46,4 ± 3,4	5,9 ± 1,0	28,6 ± 1,7	35,3 ± 7,8

Todas as amostras de solo mostram valores de densidade aparente (*Dap*) bastante inferiores ao valor típico de solos compactados (1,90 a 1,95) (Porta *et al.*, 2003; Costa, 2003). Globalmente, verifica-se uma relação inversa entre a permeabilidade e a *Dap* ( $r^2 = 0,500$ ) (Figura 45), significando que 50% da variação da permeabilidade é explicada pela *Dap*.

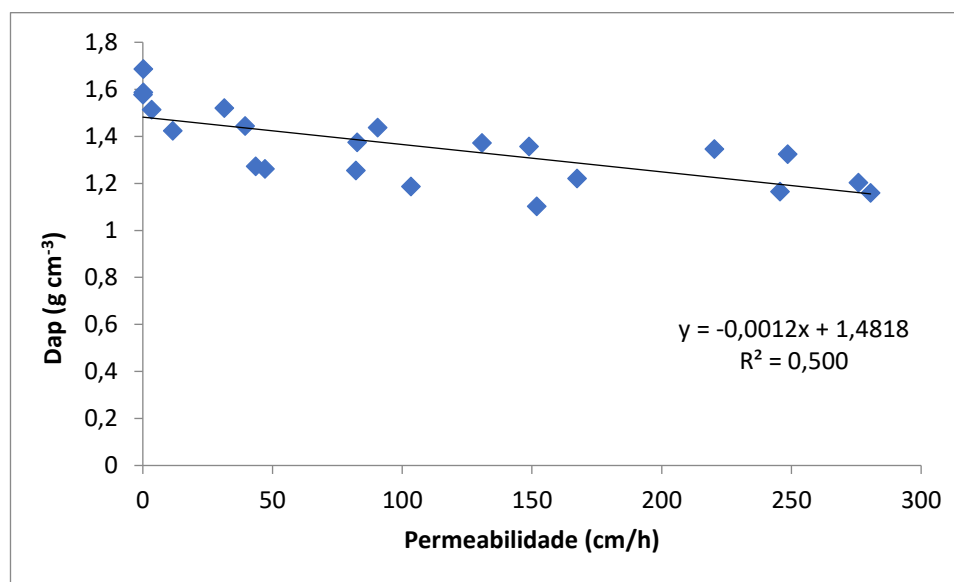


Figura 45- Relação entre a permeabilidade e a densidade aparente (*Dap*) dos solos da zona industrial das Cantarias, Bragança

As correlações entre a permeabilidade e as restantes propriedades físicas do solo (*P total*, *MicroP*, *MacroP*, *CC* e *CMA*) são baixas, pelo que a permeabilidade do solo está

dependente dos efeitos conjuntos das diversas propriedades e das interações que ocorrem entre elas e não do efeito de cada propriedade em particular. Como referido anteriormente, a propriedade física do solo que mais contribui para explicar a permeabilidade do solo foi a Dap. Estas baixas correlações podem significar que a permeabilidade é também explicada por outras variáveis que não foram incluídas neste estudo (por exemplo, teor de matéria orgânica, espessura do solo).

Na Figura 46 pode-se observar a interação existente entre a Dap e a capacidade máxima para a água (CMA), verificando-se que a CMA do solo está muito relacionada com a Dap ( $r^2 = 0,829$ ). De um modo geral, a permeabilidade aumenta com o aumento da capacidade do solo para a água (CMA), apresentando os solos uma boa CMA, com valores que variam entre 32,7 e 41,0 % (Tabela 3). Contudo, mais de 85 % da água fica retida nos microporos, pois a capacidade de campo (CC) apresenta percentagens de humidade muito próximas da CMA, variam de 28,6 a 36,9 % (Tabela 3). Esta informação realça a necessidade de uma rede de drenagem adequada e eficiente, de modo a evitar cheias e inundações quando das chuvadas de elevada intensidade, muito frequentes na região mediterrânea (Figueiredo *et al.*, 2012; Figueiredo, 2012).

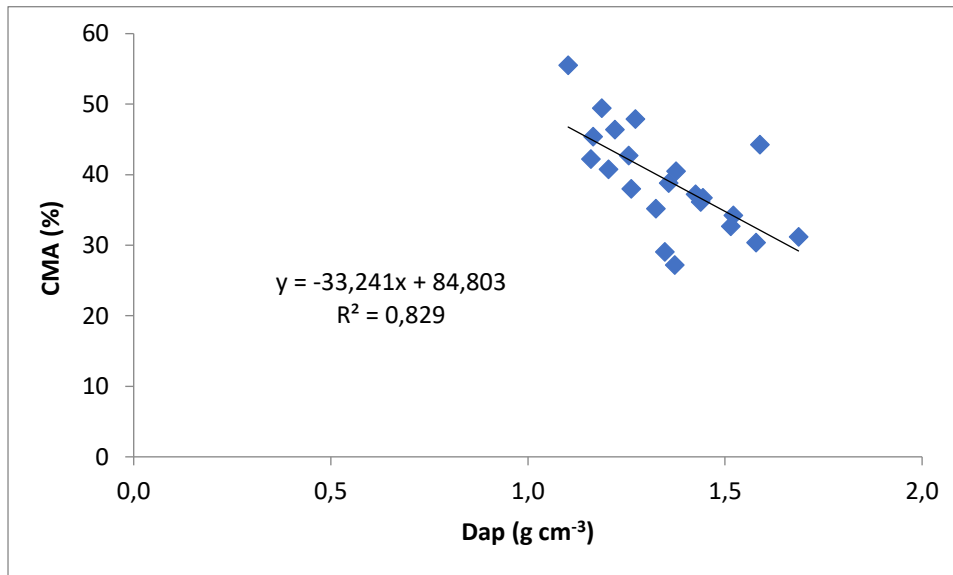


Figura 46- Relação entre a capacidade máxima para a água (CMA) e a densidade aparente (Dap) dos solos da zona industrial das Cantarias, Bragança

Os solos apresentam uma porosidade total adequada (Porta *et al.*, 2003; Costa, 2003), com valores superiores a 50 % do volume do solo. A microporosidade é muito elevada, representando cerca de 90 % da porosidade total, mas como o teor de elementos

grosseiros (EG) é superior a 25 %, valor considerado alto (Figueiredo, 2012), nas classes de permeabilidade mais representativas (Extremamente Rápida, 100-300 cm/h e Muito Rápida, 25,4 a 100 cm/h) (Figura 47), estes contribuem para a abertura de “canais” através dos quais a água se infiltra com alguma facilidade para camadas mais profundas do solo (Fonseca & Figueiredo, 2016). De um modo geral, a permeabilidade mostra uma relação positiva com o teor de EG, ou seja, quando o teor de EG aumenta a permeabilidade aumenta também ( $r^2 = 0,166$ ).

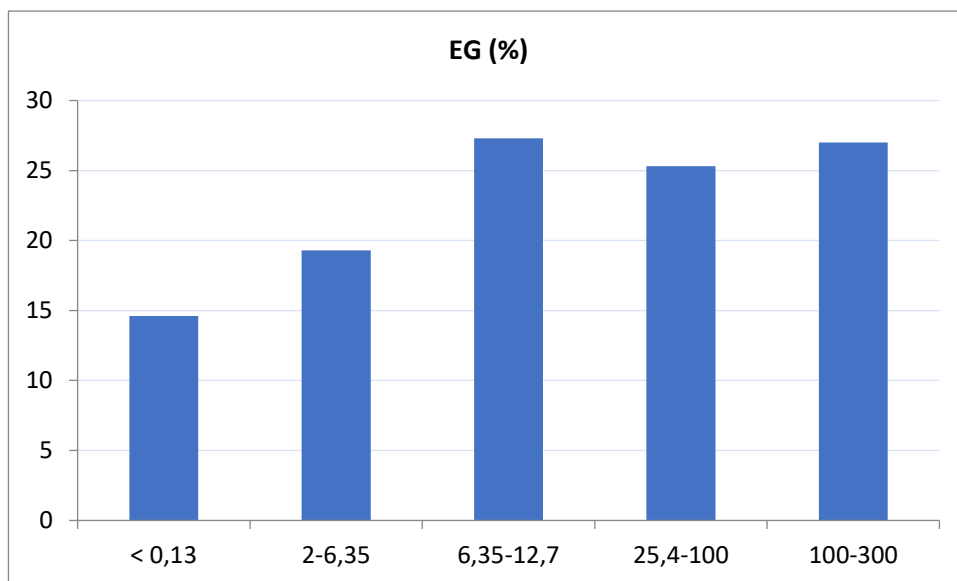


Figura 47- Teor de elementos grosseiros (EG), distribuídos pelos intervalos de classe de permeabilidade (cm/h) nos solos da zona industrial das Cantarias, Bragança

#### 4.2 Permeabilidade dos pavimentos

Através de um ensaio experimental, procurou-se fazer simulação de chuva sobre diferentes tipos de pavimentos em uso na zona industrial das Cantarias, de modo a determinar a infiltração e o escoamento superficial. Os pavimentos ensaiados foram os apresentados no Ponto 4.2.1. Em todos os pavimentos, o teor de humidade da sub-base (brita) e da base (areia), que conjuntamente formam a camada-drenante, era 0 % no início da primeira simulação de chuva. Todos os protótipos dos pavimentos tinham dimensões de  $50 \times 50$  cm e os volumes apresentados nos gráficos do Ponto 4.2.1, são referentes a esta área ( $0,25 \text{ m}^2$ ).

## 4.2.1 Pavimentos testados

### 4.2.1.1 Cubos de granito pequenos

Durante a primeira simulação efetuada sobre o pavimento construído com cubos de granito pequenos (Figura 48), observou-se que a camada-drenante (base e sub-base) apenas ficou saturada, ao ponto de permitir que a água vertesse para o dispositivo de captação de água ao minuto 15:02 (Figura 49).



Figura 48- Pavimento permeável construído com cubos de granito pequenos

Passados 5 minutos o volume de água infiltrada foi de 700 cm<sup>3</sup> (minuto 20:02) e esse valor foi aumentando de forma sensivelmente linear até ao minuto 25 (1291,5 cm<sup>3</sup>), seguindo-se um aumento decrescente até ao minuto 30 (1415,5 cm<sup>3</sup>), momento em que terminou a simulação. Porém, a água continuou a escoar até ao minuto 39:58, onde se obteve um volume de 523 cm<sup>3</sup> de água resultante da infiltração (Figura 49).

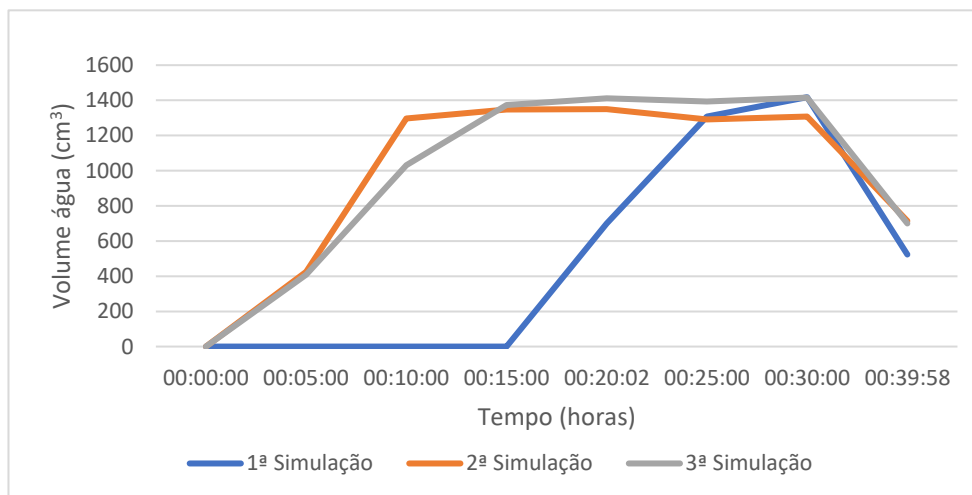


Figura 49- Volume de água infiltrada através do pavimento permeável construído com cubos de granito pequenos

A segunda simulação foi realizada uma hora depois da primeira e a terceira três horas depois da segunda, registrando as camadas-drenantes (base e sub-base) um teor de humidade de 100% e 76% no início da segunda e terceira simulação, respetivamente. Devido a esta diferença de humidade, a infiltração estabilizou mais rapidamente na segunda simulação (a partir do minuto 10), que na terceira (a partir do minuto 15) (Figura 49). Ao fim de 5 minutos, para ambas as simulações, o volume de água de infiltração era idêntico (cerca de 408 cm<sup>3</sup>). A partir daí aumentou até cerca de 1300 cm<sup>3</sup> (segunda simulação) e 1370 cm<sup>3</sup> (terceira simulação), mantendo-se os valores relativamente constantes até ao final das duas simulações (minuto 30). A capacidade de retenção de água na camada-drenante aumentou cerca de 200 cm<sup>3</sup> da primeira para as duas últimas simulações, pois após o término da chuvada ainda vazou por infiltração cerca de 715 cm<sup>3</sup> (Figura 49).

Relativamente ao escoamento superficial, como esperado, os valores são baixos, verificando-se na primeira simulação os valores mais elevados, tendo iniciado no minuto seis (Figura 50).

Na primeira simulação, como referido anteriormente, a camada-drenante tinha 0% de humidade e o que se observou foi o mesmo que acontece num solo seco quando ocorre uma chuvada. Quando esta é de elevada intensidade, muita da água escorre e não se infiltra. Neste pavimento verificou-se esse processo, como havia poeiras tanto dos granitos, como da brita e da areia, a água em vez de infiltrar-se escorreu e lavou essas poeiras.

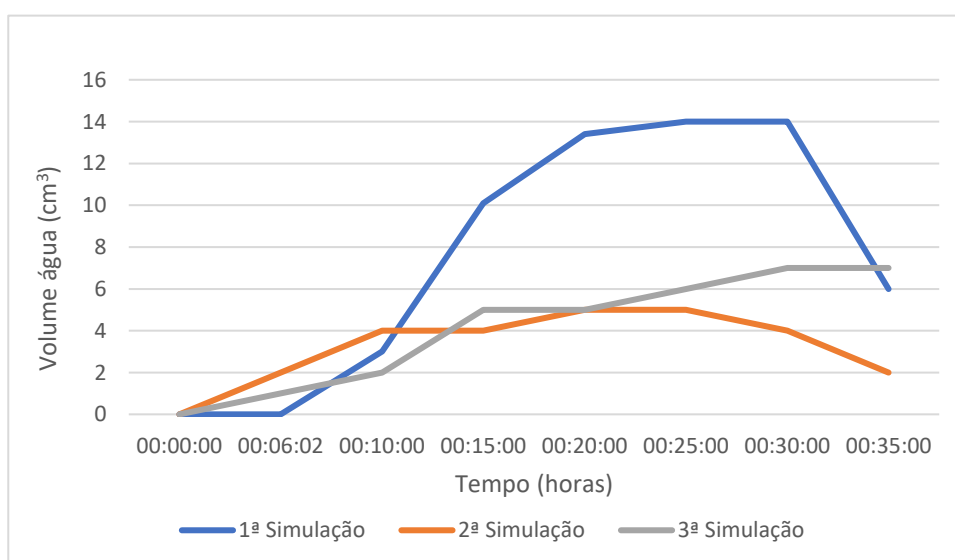


Figura 50- Volume de água de escoamento no pavimento permeável construído com cubos de granito pequenos

O escoamento atingiu um máximo de 14, 5 e 7 cm<sup>3</sup> para a primeira, segunda e terceira simulação, respetivamente. O escoamento cessou 5 minutos após as simulações (Figura 50).

#### 4.2.1.2 Cubos de granito grandes

No pavimento construído com cubos de granito grandes (Figura 51), na primeira simulação (0% de humidade da camada drenante), a água de infiltração começou a vazar no minuto 21:15 sob a forma de gotas, transformando-se num fio fino de água no minuto 24:50, atingindo um pico de 1847 cm<sup>3</sup> no minuto 30 (Figura 52).



*Figura 51- Pavimento permeável construído com cubos de granito grandes*

A segunda simulação (uma hora depois da primeira) já decorreu com uma humidade da camada-drenante de 100%. Surgiram as primeiras gotas ao fim de 59 segundos e passado 5 minutos já se tinha infiltrado 900 cm<sup>3</sup> de água e os valores foram sempre subindo até chegar ao máximo de 1406 cm<sup>3</sup> ao minuto 15, ocorrendo alguma estabilização a partir daí, atingindo 1202 cm<sup>3</sup> no final da simulação (minuto 30). A vazão da água infiltrada cessou no minuto 45:10, registando 394 cm<sup>3</sup> depois da simulação ter terminado (Figura 52).

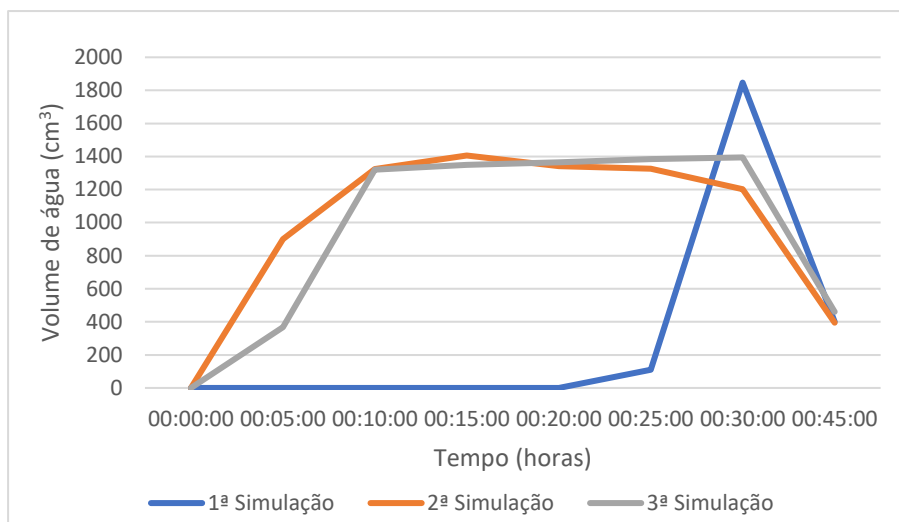


Figura 52- Volume de água infiltrada através do pavimento permeável construído com cubos de granito grandes

A terceira simulação como ocorreu três horas depois da segunda, o sensor de humidade registava o valor de 76% de humidade na camada-drenante. Assim, a vazão da água de infiltração só teve início ao minuto 3, com um pequeno fio de água. Contudo, no minuto 10 os registos eram de cerca de 1320 cm<sup>3</sup>, apresentando um comportamento similar ao da segunda simulação a partir daí. Depois de terminada a simulação, registou-se aos 45 minutos 460cm<sup>3</sup> de água de infiltração (Figura 52).

No que respeita ao escoamento superficial, na primeira simulação como a camada-drenante estava completamente seca (0% de humidade), verificou-se um retardamento no escoamento, com início no minuto 5 e mostrando um rápido aumento até ao minuto 20 (13,4 cm<sup>3</sup>), estabilizando nos últimos 10 minutos (14 cm<sup>3</sup>) (Figura 53).

A segunda e terceira simulação tiveram um comportamento muito idêntico ao longo do tempo, com máximos de 19 e 18 cm<sup>3</sup>, respetivamente (Figura 53).

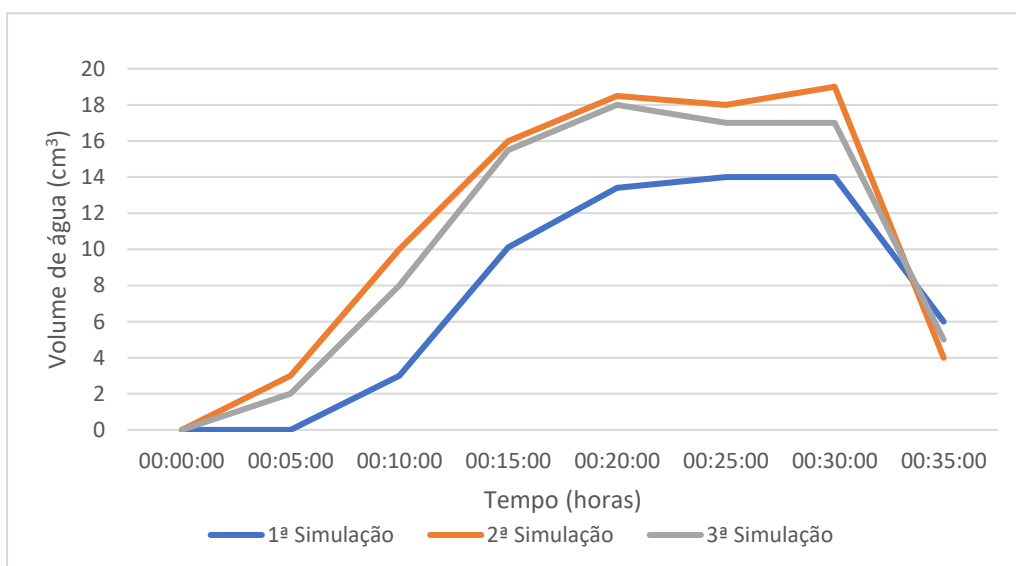


Figura 53- Volume de água de escoamento no pavimento permeável construído com cubos de granito grandes

### 4.2.1.3 Quadrados de cimento

No pavimento construído com quadrados de cimento (Figura 54) observou-se valores de infiltração bastante inferiores aos dos pavimentos de granito. Na primeira simulação a vazão da água de infiltração iniciou-se ao minuto 21 e aumentou de forma rápida até ao final da simulação (minuto 30), atingindo um máximo de  $406 \text{ cm}^3$  (Figura 54).



Figura 54- Pavimento permeável construído com quadrados de cimento

As simulações dois e três seguem um padrão idêntico ao longo do tempo, sempre com valores superiores na segunda simulação, atingindo máximos de  $450$  e  $380 \text{ cm}^3$ , respetivamente (Figura 55).

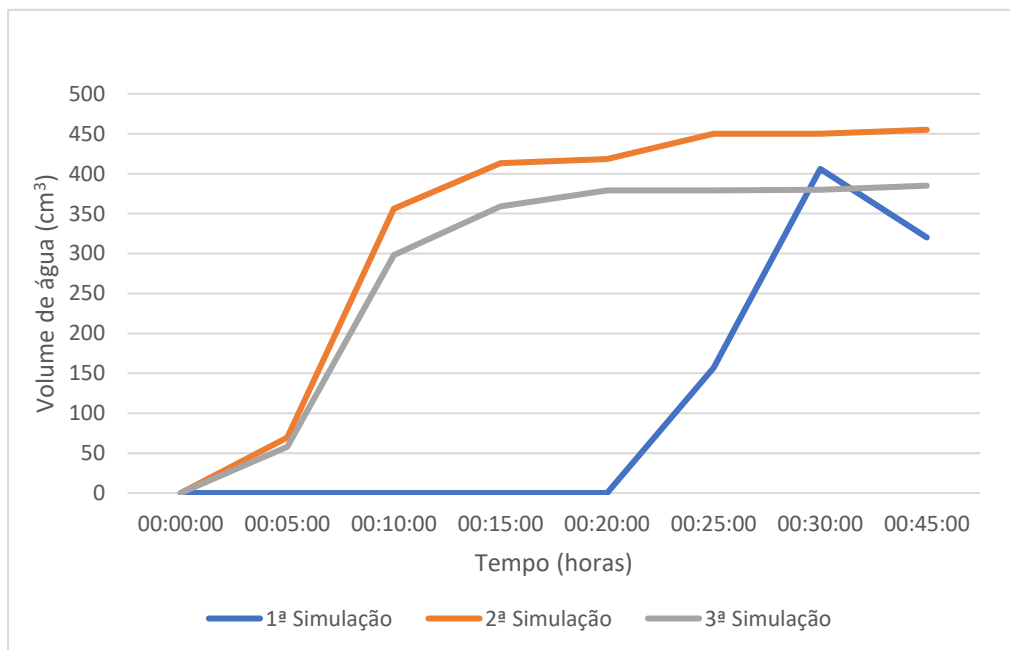


Figura 55- Volume de água infiltrada através do pavimento permeável construído com quadrados de cimento

Já para o escoamento superficial observa-se valores muito superiores aos encontrados para os pavimentos de granito. Pela primeira vez o escoamento superficial foi superior à infiltração, o que se explica pelo tamanho das juntas. No caso deste pavimento (quadrado de cimento), a área das juntas é muito menor que a dos pavimentos de granito, dificultando a infiltração da água e favorecendo o escoamento.

O escoamento iniciou-se logo ao minuto 1 e mostrou um padrão similar com tendência de aumento ao longo das três simulações, com máximos de 493, 755 e 862 cm<sup>3</sup> para as simulações um, dois e três, respectivamente (Figura 56).

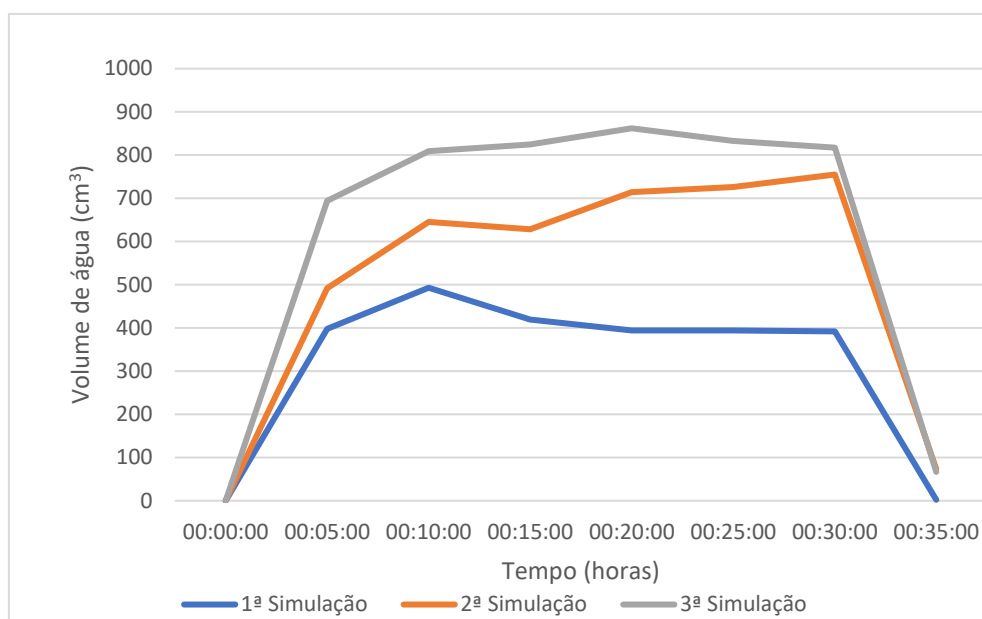


Figura 56- Volume de água de escoamento no pavimento permeável construído com quadrados de cimento

#### 4.2.1.4 Blocos de cimento porosos retangulares

No pavimento construído com blocos de cimento porosos retangulares (Figura 57), o comportamento da infiltração é muito similar ao observado para os pavimentos de granito. Na primeira simulação (camada-drenante com 0% de humidade) a recolha de água de infiltração tem início no minuto 20 aumentando rapidamente, alcançando um máximo de 1314 cm<sup>3</sup>. Mesmo depois de terminada a simulação (minuto 30), a vazão da infiltração perdurou até ao minuto 44:48 totalizando um volume de 786 cm<sup>3</sup>.

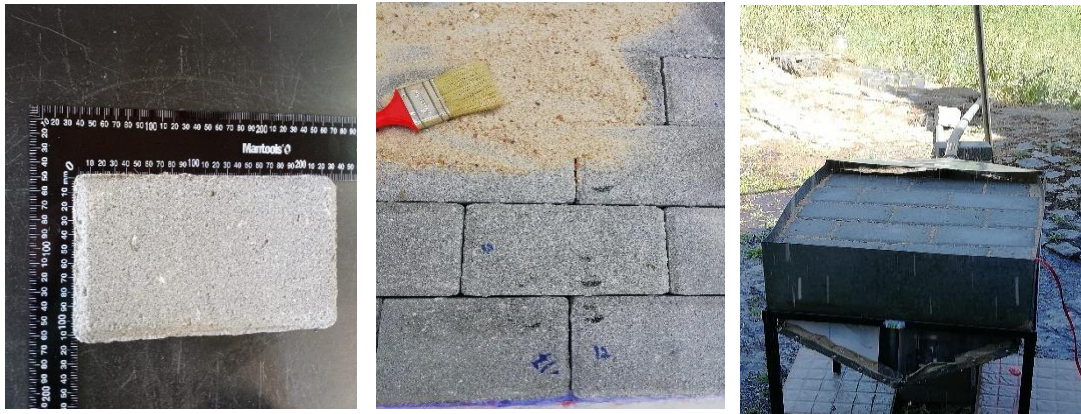


Figura 57- Pavimento permeável construído com blocos de cimento retangulares

Na segunda e terceira simulação não se obtiveram grandes diferenças, tanto que as curvas do gráfico representado na Figura 58 estão próximas, tocando-se mesmo em alguns pontos. Apesar dos valores máximos serem idênticos ao da primeira simulação (cerca de  $1395 \text{ cm}^3$ ), o padrão de variação ao longo do tempo é muito diferente.

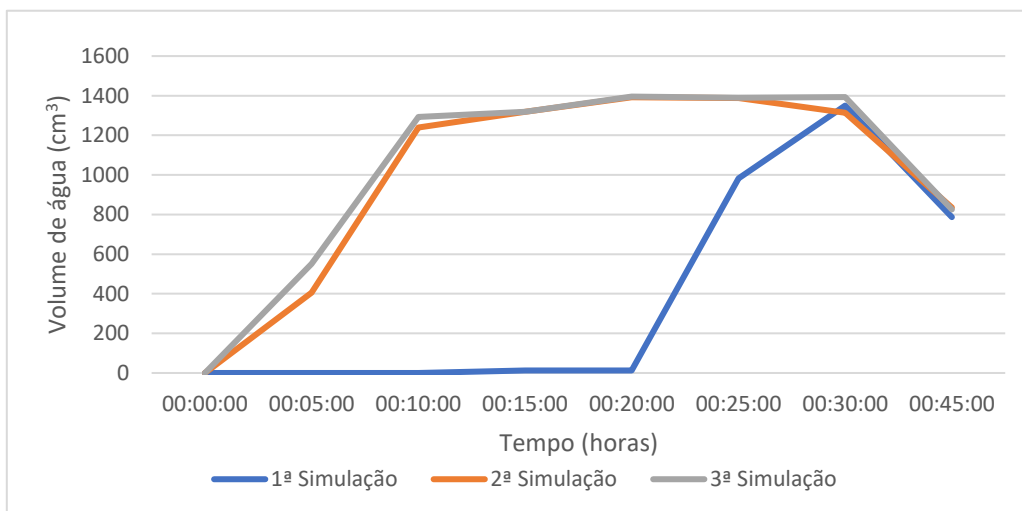
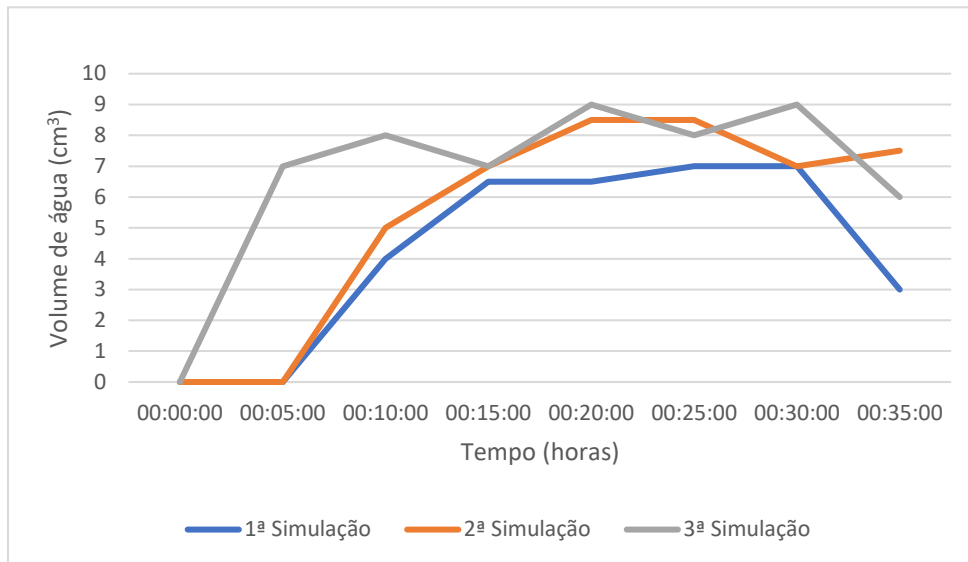


Figura 58- Volume de água infiltrada através do pavimento permeável construído com blocos de cimento porosos retangulares

Para este pavimento o escoamento superficial foi baixo, o que já era de esperar, pois para além das juntas, os blocos são porosos facilitando a infiltração da água (Figura 59).



*Figura 59- Volume de água de escoamento no pavimento permeável construído com blocos de cimento retangulares*

#### **4.2.1.5 Blocos de cimento porosos tipo “mapa de Portugal”**

No pavimento construído com blocos de cimento porosos tipo “mapa de Portugal” (Figura 60), tal como nos restantes pavimentos, a primeira simulação foi a que demorou mais tempo a produzir dados de infiltração de água, tendo tido início ao minuto 10. Atingiu o máximo (1548 cm<sup>3</sup>) no final da simulação (minuto 30). A colheita da infiltração só terminou no minuto 45 (ainda durou 15 minutos depois de terminada a chuvada), com um volume de cerca de 919 cm<sup>3</sup> (Figura 60).



*Figura 60- Pavimento permeável construído com blocos de cimento “mapa de Portugal”*

A segunda e terceira simulação apresentam um padrão de variação muito semelhante ao longo do tempo, as curvas quase que se sobrepõem (Figura 61). A água de infiltração começou a cair no recipiente de recolha logo no minuto 1 e atingiu o máximo no minuto 30 (1403 cm<sup>3</sup>).

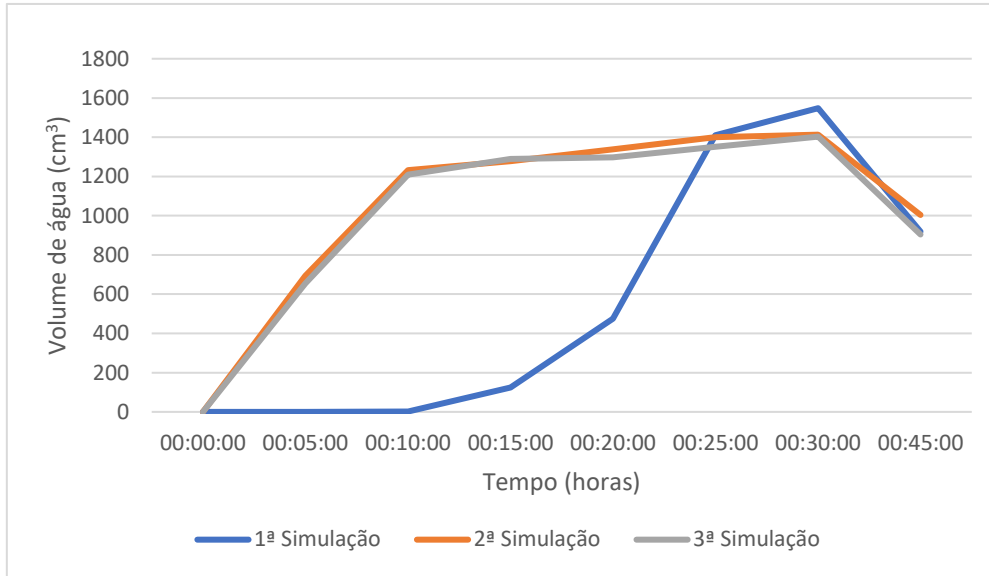


Figura 61- Volume de água infiltrada através do pavimento permeável construído com blocos de cimento tipo “mapa de Portugal”

O comportamento da escurência superficial foi muito idêntico ao do pavimento construído com blocos de cimento retangulares, pois a principal diferença entre estes dois pavimentos é a forma do bloco e aparentemente o efeito mais visível foi no retardamento do início do escoamento na primeira simulação (5 minutos mais tarde comparativamente ao pavimento de blocos de cimento retangulares) (Figura 62).

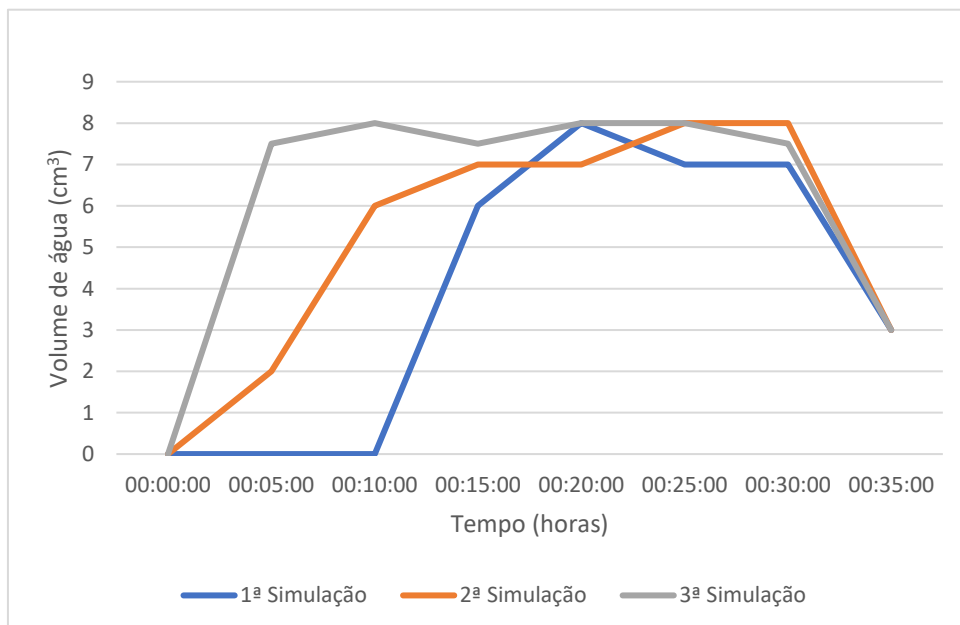


Figura 62- Volume de água de escoamento no pavimento permeável construído com blocos de cimento tipo “mapa de Portugal”

## 4.2.2 Comparação dos pavimentos

Os pavimentos permeáveis têm-se tornado fundamentais, por reduzirem o volume do escoamento superficial e o impacto na qualidade da água (Gonçalves & Oliveira, 2014).

Com exceção do pavimento Quadrados de cimento, os diversos pavimentos ensaiados mostraram valores baixos de escoamento superficial e valores elevados de água de infiltração, não se recomendando a utilização de Quadrados de cimento em espaços urbanos.

### 4.2.2.1 Infiltração

Como resultado das simulações (primeira, segunda e terceira simulação), observaram-se os valores de infiltração expressos nas Tabelas 4, 5 e 6.

*Tabela 4- Valores de infiltração e de escoamento superficial da primeira simulação sobre os diversos pavimentos testados*

Pavimento	Tempo (minutos)							Total
	5	10	15	20	25	30	Final (variável)	
<b>Infiltração (mm)</b>								
CGP	0	0	0	2,8	5,2	5,7	2,1	15,8
CGG	0	0	0	0	0,4	7,4	1,6	9,4
QC	0	0	0	0	0,6	1,6	1,3	3,5
BCR	0	0	0	0	3,9	5,6	3,3	12,8
BCMP	0	0	0,5	1,9	5,6	6,1	3,6	17,7
<b>Escorrimento superficial (mm)</b>								
CGP	0	0,012	0,04	0,054	0,056	0,056	0,024	0,242
CGG	0	0,012	0,04	0,054	0,056	0,056	0,024	0,242
QC	1,9	2	1,7	1,6	1,6	1,6	0,1	10,5
BCR	0	0,016	0,026	0,026	0,028	0,028	0,012	0,136
BCMP	0	0	0,024	0,032	0,028	0,028	0,012	0,124

CGP – cubos granito pequenos; CGG – cubos de granito grandes; QC – Quadrados de cimento; BCR – blocos de cimento retangulares; BCMP – blocos de cimento tipo “mapa de Portugal”

*Tabela 5-Valores de infiltração e de escoamento superficial da segunda simulação sobre os diversos pavimentos testados*

Pavimento	Tempo (minutos)							Total
	5	10	15	20	25	30	Final (variável)	
<b>Infiltração (mm)</b>								
CGP	1,6	5,2	5,5	5,4	5,2	5,2	2,8	30,9
CGG	3,6	5,3	5,6	5,5	5,5	4,8	1,6	31,9
QC	0,2	1,4	1,7	1,7	1,8	1,8	1,8	10,4
BCR	1,6	5,2	5,3	5,6	5,6	5,3	3,3	31,9
BCMP	2,6	4,8	5,2	5,6	5,6	5,6	4,0	33,4
<b>Escorrimento superficial (mm)</b>								
CGP	0,008	0,016	0,016	0,020	0,020	0,016	0,008	0,104
CGG	0,012	0,040	0,064	0,074	0,072	0,076	0,016	0,354
QC	2	2,6	2,5	2,9	2,9	3	0,3	16,2
BCR	0	0,020	0,028	0,034	0,034	0,028	0,03	0,174
BCMP	0,008	0,024	0,028	0,028	0,032	0,032	0,012	0,164

CGP – cubos granito pequenos; CGG – cubos de granito grandes; QC – Quadrados de cimento; BCR – blocos de cimento retangulares; BCMP – blocos de cimento tipo “mapa de Portugal”

*Tabela 6-Valores de infiltração e de escoamento superficial da terceira simulação sobre os diversos pavimentos testados*

Pavimento	Tempo (minutos)							Total
	5	10	15	20	25	30	Final (variável)	
<b>Infiltração (mm)</b>								
CGP	1,6	4,1	5,5	5,6	5,6	5,7	2,8	30,9
CGG	1,5	5,3	5,4	5,5	5,5	5,6	1,6	30,4
QC	0,2	1,2	1,4	1,5	1,5	1,5	1,5	8,8
BCR	2,2	5,2	5,3	5,6	5,6	5,6	3,3	32,8
BCMP	2,6	4,8	5,2	5,4	5,5	5,6	3,6	32,7
<b>Escorrimento superficial (mm)</b>								
CGP	0,004	0,008	0,020	0,020	0,024	0,028	0,028	0,132
CGG	0,008	0,032	0,062	0,072	0,068	0,068	0,02	0,330
QC	2,8	3,2	3,3	3,4	3,3	3,3	0,3	19,6
BCR	0,028	0,032	0,028	0,036	0,032	0,036	0,024	0,216
BCMP	0,03	0,032	0,030	0,032	0,032	0,030	0,012	0,198

CGP – cubos granito pequenos; CGG – cubos de granito grandes; QC – Quadrados de cimento; BCR – blocos de cimento retangulares; BCMP – blocos de cimento tipo “mapa de Portugal”

Na primeira simulação (Tabela 4) a colheita de água de infiltração teve início a partir do minuto 15, sendo que em três dos pavimentos (CGG, QC e BCR), o primeiro registo foi efetuado apenas no minuto 25. Este retardamento está relacionado com o tempo necessário para a saturação da camada-drenante subjacente aos pavimentos, a qual tinha 0% de humidade no início da primeira simulação. A água de infiltração aumentou até ao final da simulação (minuto 30). Depois de terminada a chuvada (indicado nas Tabelas como tempo final variável), observa-se que os pavimentos construídos com blocos de cimento (BCR e BCMP) são os que armazenam mais água, pois resultou num maior volume de água (3,3 e 3,6 mm, respetivamente), seguido do pavimento CGP (2,1 mm) e finalmente os pavimentos CGG e QC com 1,6 e 1,3 mm, respetivamente. No final da simulação (minuto 30), o pavimento QC apresenta um valor muito baixo (1,6 mm), comparativamente aos restantes pavimentos.

Na segunda e terceira simulação (Tabelas 5 e 6) a infiltração aumenta rapidamente do minuto 5 para o minuto 10, mantendo-se, a partir daí, relativamente estável até ao final da simulação (minuto 30). O pavimento QC mantém valores consistentes com os observados na primeira simulação e o volume de água colhido depois do final da simulação segue, também, o padrão já referido para a primeira simulação, com valores muito similares.

Nos pavimentos construídos com blocos de cimento (BCR e BCMP), a porosidade dos blocos reflete-se principalmente na quantidade de água de infiltração depois de terminada a simulação, atingindo nestes pavimentos os maiores volumes em todas as simulações (Tabelas 4, 5 e 6).

Foi realizado um ensaio, com cinco blocos porosos (Figura 63), de modo a quantificar a capacidade de retenção de água pelos blocos de cimento. Com base nos pesos dos blocos secos e saturados obteve-se um armazenamento médio de água por bloco de 123 ml, existindo um potencial de armazenamento de água de cerca de um litro por cada oito blocos do pavimento. Esta capacidade é principalmente importante quando ocorrem chuvadas de elevada intensidade, pois permite retardar e reduzir o escoamento superficial.

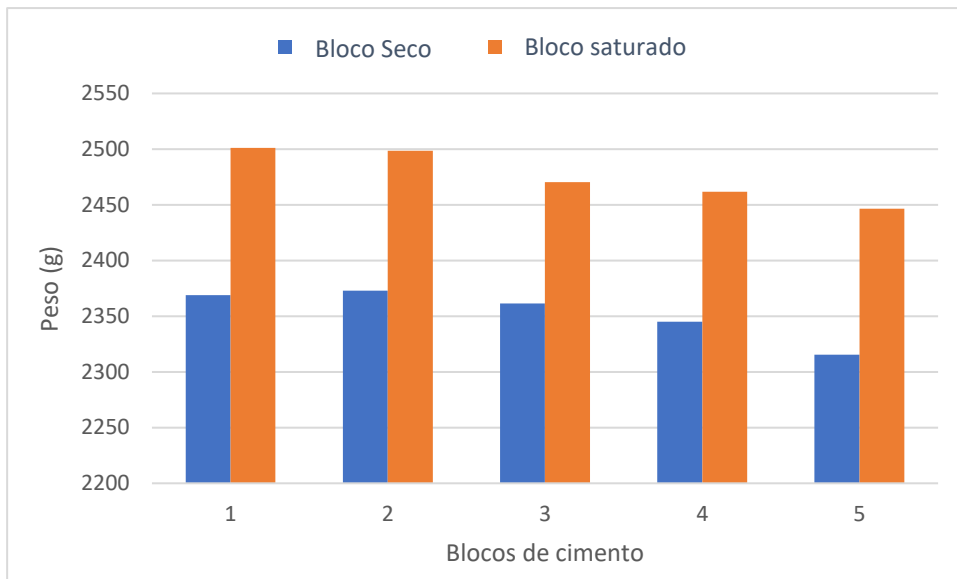


Figura 63- Peso de blocos de cimento no estado seco e saturado

Na Figura 64 podem ser observados os valores totais de infiltração, desde o início de cada simulação até ao momento em que deixou de se observar saída de água a partir da camada-drenante, para as três simulações e os cinco pavimentos.

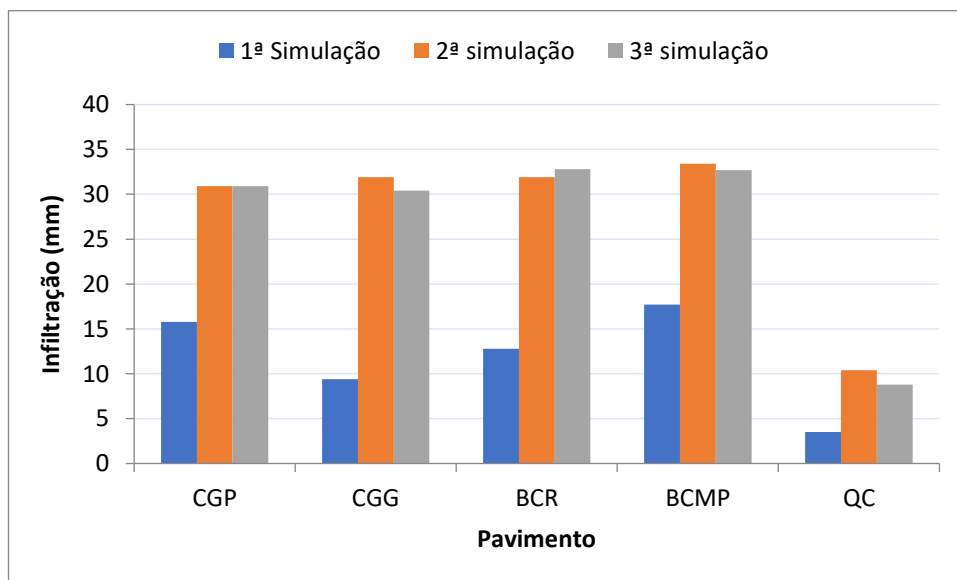


Figura 64- Quantidade de água de infiltração obtida por infiltração para os pavimentos construídos com cubos granito pequenos (CGP), cubos granito grandes (CGG), blocos cimento retangulares (BCR), blocos cimento tipo “mapa de Portugal” e quadrados cimento (QC)

Na primeira simulação a água infiltrada varia de 3,5 (QC) a 17,7 mm (BCMP), mantendo os dois pavimentos, respectivamente, os menores e maiores valores de infiltração nas simulações seguintes (segunda e terceira simulação) (Figura 64).

O pavimento construído com quadrados de cimento (QC) é claramente uma escolha inadequada, pois os valores de infiltração são muito baixos. A intenção do uso de pavimentos permeáveis está relacionada com o favorecimento da infiltração das águas pluviais, evitando que estas escorram para as estradas, que a maioria das vezes não estão preparadas para absorver grandes quantidades de água e assim podem causar inundações e problemas para o tráfego. Os restantes pavimentos mostraram padrões muito idênticos de infiltração, sugerindo a escolha por aqueles que causem menor pegada ecológica na região onde vão ser aplicados.

#### **4.2.2.2 Escorrência superficial**

Os valores de escoamento superficial ao longo do tempo de simulação (primeira, segunda e terceira simulação), são apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6. Como seria de esperar, o escoamento superficial varia inversamente com a infiltração, mostrando todos os pavimentos valores muito baixos, com exceção do pavimento construído com quadrados de cimento (QC), que apresenta um valor de 1,9 mm no minuto 5 da primeira simulação, enquanto os restantes pavimentos ainda não registavam qualquer escoamento neste momento.

Na segunda e terceira simulação a partir do minuto 10, para cada tipo de pavimento, o escoamento manteve-se sensivelmente constante até ao final da simulação (minuto 30). Também se verificou que o escoamento superficial cessava muito antes da infiltração.

A Figura 65 mostra os valores totais de escoência superficial, desde o início de cada simulação até ao momento em que deixou de se observar escoência, para as três simulações e os cinco pavimentos.

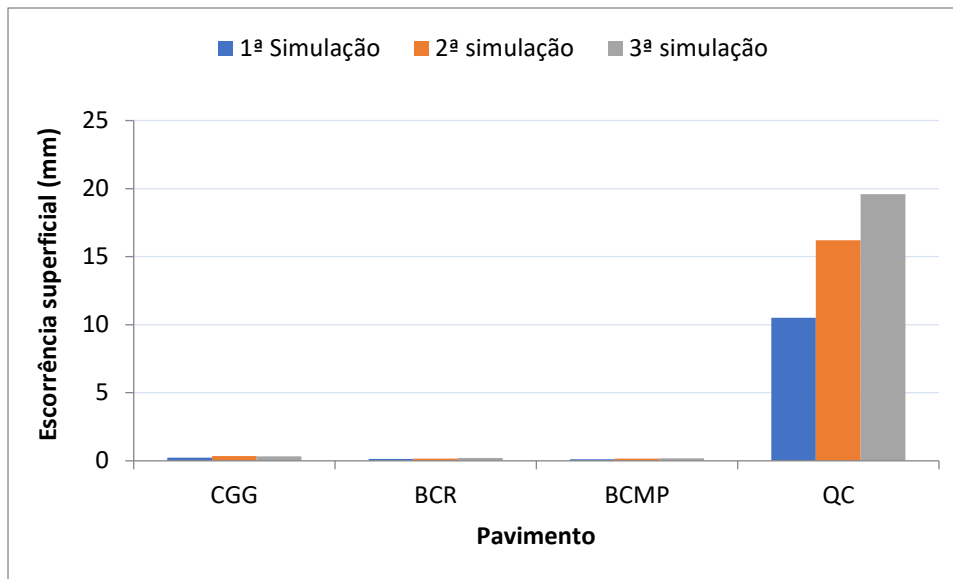


Figura 65- Quantidade de água de escorrência superficial nos pavimentos construídos com cubos granito pequenos (CGP), cubos granito grandes (CGG), blocos cimento retangulares (BCR), blocos cimento tipo “mapa de Portugal” e quadrados de cimento (QC)

Como já referido, será de excluir o pavimento QC, mantendo os restantes pavimentos valores muito baixos e similares de escorrência superficial.

Para que um pavimento permeável cumpra a sua função, é necessário garantir que a execução e a manutenção sejam efetuadas de forma correta. Neste sentido, é fundamental cumprir as indicações do fabricante e as considerações técnicas associadas a esta matéria.

Existem estudos que referem que os sedimentos que se acumulam no pavimento tendem a diminuir a infiltração ao longo dos anos, verificando-se que num período de 10 anos, o pavimento permeável pode atingir uma redução de 90% da sua capacidade de infiltração (Parra & Teixeira, 2015). Recomenda-se uma limpeza anual retirando os sedimentos acumulados e a vegetação que cresce entre as juntas dos pavimentos.

## CONCLUSÕES

A permeabilidade dos solos, subjacentes aos pavimentos, é uma característica fundamental para permitir a infiltração e condução das águas pluviais para os lençóis freáticos subterrâneos. A permeabilidade está correlacionada com as características dos solos e cerca de 77% das amostras analisadas revelaram uma permeabilidade extremamente rápida ou muito rápida o que favorece a infiltração da água, contribuindo para uma menor escorrência superficial e menores danos causados no local e a jusante. Porém, os solos são delgados (Leptosolos), podendo em algumas situações gerar escorrência mesmo para precipitações relativamente baixas, pelo que a existência de um adequado sistema de drenagem complementar é crucial.

Os pavimentos permeáveis em uso na zona industrial das Cantarias, com exceção do pavimento construído com quadrados de cimento, revelaram um bom desempenho, com valores de infiltração elevados e escorrência superficial baixa. Assim, estes pavimentos podem solucionar ou minimizar os efeitos das águas pluviais, auxiliando no controle direto na fonte e funcionando como medida compensatória na drenagem urbana. Para que os pavimentos permeáveis mantenham a sua função, é essencial garantir uma manutenção correta ao longo do tempo.

Estes tipos de estudos são essenciais, sendo de grande importância a continuidade do mesmo, de modo a avaliar outras soluções e contribuir para a resolução de problemas associados às inundações em espaços urbanos.

## BIBLIOGRAFIA

Araújo, P.R., 1999. Análise experimental da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre.

Ballard, B.W., Kellagher, R., Martin, P., Jefferies, C., Bray, R., Shaffer, P., 2007. *The SUDS Manual*. CIRIA- Construction Industry Research and Information Association, Londres.

Bertoni, J., Neto, F.L., 1990. Conservação do solo. 1ª ed. São Paulo: Ícone editora.

Costa, A., 2010. Águas pluviais em meio urbano: contribuição de Lisboa para o seu uso sustentável. Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

Costa, J., 2004. Caracterização e constituição do solo. 7ª ed., Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

Figueiredo, T. de, Fonseca, F., 2012. Erosão hídrica dos solos em Portugal: contributo para uma revisão. V Congresso Ibérico da Ciência do Solo 2012, uso e manejo do solo. Instituto Politécnico de Bragança.

Figueiredo, T., 2012. Pedregosidade dos Solos em Trás-os-Montes: importância relativa e distribuição espacial. Serie Estudos 83, Instituto Politécnico de Bragança.

Figueiredo, T., Fonseca, F., Martins, A., 2012. Soil loss and runoff in young forest stands as affected by site preparation technique: a study in NE Portugal. *European Journal of Forest Research* 131, 1747-1760.

Fonseca, F., Figueiredo, T., 2016. Effects of site preparation on physical and chemical properties as indicators of forest soil quality. *Gaia Scientia*, 10 (2), 38-46.

Gonçalves, A., Oliveira, R., 2014. Seminários sobre “Pavimentos Permeáveis e sua Influência sobre a Drenagem”. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.

Guerra, A. S., Silva, J.T., Botelho, R.G.M., 1999. O início do processo erosivo. Capítulo I, In Guerra, A.J.T. et al. *Erosão e conservação dos solos: conceito, termos e aplicações*. 1ª ed. Rio de Janeiro, Brasil.

Hudson, N.W., 1981. *Soil conservation* (2nd ed). Cornell University Press, Ithaca, N.Y.

IPMA, 2019. Normais Climatológicas. Retrieved August 20, 2020, from <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>

Matos, J., 2003a. Aspetos históricos a actuais da drenagem de águas residuais em meio urbano. Revista Universidade do Minho, número 16, 2003. Acedido em: 10 de maio de 2020 em: (<http://www.civil.uminho.pt/cec/revista/num16/pag%2013-23.pdf>).

Matos, J., 2003b. *Ambiente e Saneamento – Sistemas de Drenagem Urbana*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Ono, B., Balbo, J., Cargnin, A., 2017. Análise da capacidade de infiltração em pavimento permeável de bloco de concreto unidirecionalmente articulado. Transportes, 12pp. DOI:10.14295/transportes.v25i3.1314

Parra, G., Teixeira, B., 2015. Análise da permeabilidade e dos métodos de instalação de pavimentos permeáveis contidos em artigos científicos e em catálogos técnicos. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, 03: 142-157.

Paz, A.R., 2004. Hidrologia aplicada. Universidade Estadual do Rio grande do Sul.

Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences, 4(2): 439–473.

Pinto, M.A.S., 1990. Efeitos do fogo controlado nos processos hidrológicos. Vila Real: Universidade de Trás-os-Montes e alto Douro. Relatório Final de Estágio.

Porta, J., López Acevedo, M., Roquero, C., 2003. Edafologia para la agricultura y el medio ambiente. 3ª ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Sequeira, S., 2018. Índices de impermeabilização e gestão territorial – o caso do Porto. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia da Faculdade do Porto.

Silveira, A.L.L., Debordes, M., 1999. Modelo Hidrológico Distribuído Urbano Com Poucos Parâmetros. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 4 n.1: 35-48.

Tomás, P.M.P.P., 1997. Modelos de previsão da erosão hídrica em solos agrícolas. Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa - Instituto Superior Técnico. Tese de Doutoramento.

Tucci, C.E.M., 2007. Inundações urbanas. 1 ed. Porto Alegre, ABRH; RHAMA.

Urbonas, B., Star, E.P., 1993. Stormwater Best Management Practices and Detention, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 450p.

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

Webster, C., 1962 The sewers of Mohenjo-Daro. J. Water Pollution Control Fed., 34(2): 116-123.

WilcoxI, B., Wood, M.K., Tromble, J.M., Ward, T., 1986. A hand portable single nozzle simulator designed for use on steep slopes. Journal of Range Management.

WRB, 2014. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports, FAO, Rome, No. 106.