



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

João Pedro Dias de Oliveira

**Sistemas verdes de drenagem urbana: avaliação
do comportamento hidráulico de canteiros de
biofiltração**



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

João Pedro Dias de Oliveira

**Sistemas verdes de drenagem urbana: avaliação
comportamento hidráulico de canteiros de
biofiltração**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor António Armando de Lima Sampaio Duarte

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos. Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-NãoComercial-SemDerivações
CC BY-NC-ND

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Este documento marca o culminar de todo o meu percurso académico e, como tal, não poderia deixar passar esta oportunidade sem agradecer a todos aqueles que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para o meu sucesso nesta importante etapa da minha vida; a todos os que me apoiaram na realização deste trabalho, endereço a minha enorme gratidão.

Gostaria de agradecer em primeiro lugar, ao meu orientador científico Professor Doutor António Armando de Lima Sampaio Duarte por toda a partilha de conhecimento, dedicação, disponibilidade e por me ter dado a conhecer este tema, pelo qual desenvolvi grande interesse e gosto. Estou grato, também, pelas correções e sugestões que contribuíram imensamente para o desenvolvimento desta dissertação.

Ao Laboratório da Paisagem de Guimarães por todo o espaço, material e meios disponibilizados, essenciais à elaboração de todos os trabalhos, tanto teóricos como práticos, relativos a esta dissertação. Agradeço ainda a todas as pessoas que trabalham neste laboratório, e que comigo conviveram, por toda a simpatia e especialmente por todos os conhecimentos que comigo partilharam nas suas respetivas áreas de intervenção. Um agradecimento especial ao Eng. Nuno Silva, que me acompanhou mais de perto nesta caminhada, por todos os conhecimentos partilhados, pela ajuda, pela disponibilidade e por todas as conversas e momentos relacionados com este trabalho e não só.

À Universidade do Minho, e em particular ao Departamento de Engenharia Civil e seus funcionários; aos professores do curso, em particular aos que tive o prazer de partilhar a sala de aula, o meu muito obrigado por todo o conhecimento transmitido. Este agradecimento particular estende-se a todos os professores com quem me cruzei enquanto aluno desde a escola primária. Todos eles contribuíram para o aumento dos meus conhecimentos científicos e, certamente, para o meu desenvolvimento pessoal.

Aos meus colegas de curso e amigos, Fábio Gonçalves, Rui Silva, Carlos Rodrigues e Jonatan Salgado, por todas as vivências, por todos os trabalhos em conjunto, por todo o apoio e incentivo, o meu muito obrigado. Estes 5 anos teriam sido muito mais difíceis sem eles.

Aos meus pais, a quem eu devo tudo o que tenho, tudo o que sei, tudo o que sou. O meu agradecimento a ambos é eterno, tendo noção que quaisquer palavras de gratidão serão sempre insuficientes. Sem vocês não teria chegado até aqui e, por isso, dedico-lhes esta minha dissertação.

Aos meus avós, João, Ana, Adélia e ao meu avô Dias que está no céu a olhar por mim, e ainda à minha tia-avó Antónia, por todo o carinho, por todos os ensinamentos, por todos os momentos vividos, o meu enorme obrigado. Agradeço ainda aos meus tios Toni e Zeza, Quim e Goretti, e aos meus primos Liliana, Filipa e Hélder, por todo o afeto e momentos vividos. A todos vocês o meu enorme obrigado.

À minha namorada Bruna, por toda a disponibilidade e apoio incansáveis; por ser a pessoa que é, por todo o amor e carinho, por todas as palavras, vivências e momentos, por ser o meu pilar. Tenho perfeita noção que este meu agradecimento é demasiado curto e estas minhas palavras são demasiado vazias para expressar a importância que tem na minha vida.

Por último, mas não menos importante, aos meus amigos, aqueles que só não são meus irmãos por terem outra mãe e outro pai: Pedro, Vieira, Cunha, Luísa, Gabi, Rafa, Alves, Nuno, Morais, Roriz e Prezado, por todas as discussões sérias e pouco sérias, pelos momentos de descontração e por todos os momentos que passamos juntos.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

O crescimento da população tem provocado um aumento e expansão dos aglomerados urbanos com graves consequências para o ambiente e para a drenagem urbana, decorrentes da impermeabilização crescente dos solos. Além disso, a perturbação das características hidrológicas naturais tende a diminuir os tempos de concentração das bacias hidrográficas e a aumentar os caudais de cheia. Os sistemas de drenagem tradicionais (SDT) têm sido os mais utilizados pela sua eficácia e simplicidade no seu funcionamento, contudo são sistemas sem capacidade para se adaptarem a gamas de caudais superiores aos que foram projetados. Isto agrava a frequência e o impacto nas inundações urbanas, devido aos efeitos das alterações climáticas e aumenta a pressão exercida sobre os sistemas existentes. Nesta dissertação são abordadas diversas temáticas que justificam a necessidade de inovação e melhoria da atual gestão das águas pluviais (GAP), sendo os sistemas verdes de drenagem urbana (SVDU) uma solução alternativa inovadora e eficaz para a conceção de futuras redes de drenagem de águas pluviais e para a necessária adaptação e reabilitação das redes existentes. Assim, o uso dos SVDU aumentam permeabilidade das superfícies urbanas e promovem a regularização e o controlo dos hidrogramas relativos aos eventos de precipitação. Neste estudo fez-se não só uma recolha, tratamento e análise de informação relativa à conceção e funcionamento dos SVDU, identificando as suas vantagens e inconvenientes, como também foi concebida e executada uma instalação-piloto que simula o funcionamento dum “canteiro de biofiltração”, com o objetivo principal de avaliar o comportamento hidráulico de dois meios porosos com tipologias distintas e com caudais correspondentes a eventos de precipitação plausíveis e previamente analisados através de uma análise estatística. Para o efeito, um dos meios porosos foi constituído por materiais granulares convencionais (tais como a areia e a brita) e o outro com materiais oriundos dos principais resíduos descartados no município de Guimarães (pontas de cigarro incorporadas em esferas de argila, cascas de ovos e desperdícios têxteis) com o objetivo de potenciar e promover o conceito da economia circular em soluções alternativas e inovadoras. Os resultados obtidos em ambos os meios porosos atestaram a eficácia destes sistemas na regularização e controlo dos hidrogramas relativos aos eventos de precipitação utilizados nos ensaios, tendo sido obtida uma redução máxima do pico de caudal de 15,6% e atrasos na saída da água e no pico de cheia de 1 min e 15 s e de 2 min e 30 s, respetivamente, em relação à situação de referência. Além disso, pelo facto de os resultados terem sido semelhantes nos dois meios porosos testados, verifica-se que os materiais reaproveitados empregues são viáveis neste tipo de sistemas, tornando este conceito promissor.

Palavras-Chave: drenagem urbana; sistemas verdes; regularização de hidrogramas; hidráulica da filtração; economia circular.

ABSTRACT

The global population growth around the world has led to an increase of the number of urban agglomerates as well as the expansion of the existing ones with severe consequences to the environment and to urban drainage. The rapid urbanisation promotes the impermeabilization of the existing natural surfaces to undertake the urban lifestyle which disrupts the existing hydrological conditions. This tends to decrease the concentration times of stormwater catchment areas and to increase the flow rates as well. Conventional drainage urban systems have been widely used, mainly because of their simple operation. However, they work under a limited range of water flows for which they were designed. This inflexibility to accommodate a wider range of water flows combined with the increasing intensity and frequency of rainfall events due to climate change are putting urban drainage systems under pressure. Several areas of study are addressed in this thesis that justify the urge to improve stormwater management in urban areas. Green urban drainage systems (also known as green infrastructure) are an innovative and effective solution as a new feature to be included in new urban drainage projects as well as a retrofit to the existing ones. In both ways they may play an important role in urban adaptation to climate change. These systems main purposes are to increase the percentage of pervious surfaces in urban areas and to equalize the stormwater's hydrographs. Moreover, it allows the increase of stormwater flow rate amount drained to the existing urban drainage systems. This research was divided in two major parts: the theoretical conceptions and background regarding the design, operation, advantages and disadvantages of green urban drainage systems; and the design and construction of a field installation in order to assess the hydraulic performance of biofiltration planters with two distinct filtration media. A statistical analysis of precipitation events was made to ensure the use of plausible water flows in the experiment corresponding to precipitation events. One of the filtration media was developed with conventional materials such as gravel and sand. The other one was focused on the circular economy concept; therefore, it was composed by the main materials found in Guimarães municipality waste such as cigarette butts (processed into lightweight expanded clay aggregate), eggshells and textile waste. The results obtained on both filtration media proved the efficiency of this systems in the regularization and control of the hydrographs used in the experiments. Besides, there was a peak flow maximum reduction of 15,6% and delays of 1 min and 35 s and 2 min and 30 s of water output and flow peak, respectively. Furthermore, the results of both filtration media were very similar which confirms the viability in the use of reused materials.

Keywords: urban drainage; green infrastructure; hydrographs regularization; hydraulics filtration; circular economy.

ÍNDICE

Direitos de autor e condições de utilização do trabalho por terceiros.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Declaração de integridade.....	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Índice de figuras.....	ix
Índice de ilustrações.....	xi
Índice de quadros.....	xii
Lista de abreviaturas, siglas e acrónimos.....	xiii
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento e relevância do tema.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Organização da dissertação.....	5
2. Estado da arte.....	6
2.1 Alterações climáticas.....	6
2.1.1 Evidências atuais.....	7
2.1.2 Causas, efeitos e consequências futuras.....	8
2.1.3 Impactos biofísicos e socioeconómicos.....	10
2.1.4 Desafios futuros e enquadramento político.....	11
2.2 Hidrologia.....	17
2.2.1 Precipitação.....	17
2.2.2 Bacia hidrográfica.....	19
2.3 Gestão das águas pluviais.....	22
2.3.1 Dinâmica demográfica nas cidades.....	22
2.3.2 Consequências da impermeabilização dos solos urbanos.....	24
2.4 Sistemas verdes de drenagem urbana.....	27
2.4.1 Tipos, composição e funcionamento.....	28
2.4.2 Vantagens, inconvenientes, condicionantes e limitações.....	33
2.4.3 Análise técnico-económica comparativa entre os SVDU e os SDT.....	34
2.4.4 Conceção dos SVDU: parâmetros e critérios de dimensionamento.....	41

2.4.5	Casos de estudo	43
2.5	Incorporação dos SVDU noutras iniciativas institucionais	44
2.5.1	Cidades inteligentes (<i>Smart cities</i>)	44
2.5.2	Economia circular	45
3.	Metodologia de investigação	47
3.1	Descrição geral do projeto	47
3.2	Descrição da instalação experimental	48
3.3	Organização do trabalho experimental	55
3.3.1	Definição das variáveis de teste	55
3.3.2	Cenários de análise	63
3.4	Estudo da hidrologia do local	66
3.5	Metodologia de cálculo	69
4.	Apresentação e análise de resultados	72
4.1	Caracterização da situação de referência	72
4.2	Desempenho hidráulico dos SVDU	75
4.2.1	Efeito da composição dos canteiros de biofiltração	76
4.2.2	Efeito da variação do caudal afluyente	84
4.2.3	Efeito do regime de escoamento	88
5.	Conclusões e desenvolvimentos futuros	90
5.1	Conclusões	90
5.2	Desenvolvimentos futuros	93
	Referências bibliográficas	95
	Anexo I – Ilustrações dos tipos de SVDU abordados	104
	Anexo II – Ilustrações do ensaio falhado (entupimento provocadpela formação de lama na camada de areia após o contacto com a água)	107
	Anexo III – Cenários de análise ensaiados	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Sequência de efeitos da emissão antropogénica de GEE	6
Figura 2 – Valor anual de emissões de GEE com origem antropogénica (1970 e 2010)	9
Figura 3 – Avaliação do impacto de eventos ou acontecimentos críticos nas áreas económica, ambiental, geopolítica, social e tecnológica (fonte: WEF, 2019)	12
Figura 4 – Fluxo da ação de combate às alterações climáticas (fonte: IPCC, 2012).....	14
Figura 5 – Políticas de mitigação e adaptação às alterações climáticas a nível mundial, europeu e em Portugal	16
Figura 6 – Parâmetros das curvas IDF correspondentes às regiões pluviométricas de Portugal, consideradas no DR23/95	18
Figura 7 – Principais características das bacias hidrográficas com influência nas escorrências pluviais	19
Figura 8 – Influência das características geométricas e geológicas das bacias hidrográficas na forma dos hidrogramas (Adaptado de Ribeiro, 1987).....	21
Figura 9 – Área contributiva duma sarjeta ou sumidouro num arruamento urbano.....	22
Figura 10 – Crescimento da população mundial e taxa de crescimento da população de 1700 a 2100 (adaptado de Roser et al., 2019).....	23
Figura 11 – Evolução da distribuição da população mundial em meios urbanos e rurais (UN DESA, 2018)	24
Figura 12 – Sistema de drenagem separativo (fonte: NACTO, 2017)	35
Figura 13 – Sistema de drenagem unitário (fonte: NACTO, 2017).....	36
Figura 14 – Sequência de produção da argila expandida incorporada com pontas de cigarro: as pontas de cigarro são esterilizadas e em seguida trituradas; depois são misturadas com argila seca e moída, seguindo-se a formação das esferas; e por fim, sofrem um processo de cozedura, transformando-se no produto final.....	46
Figura 15 - Configuração preliminar dos arruamentos do empreendimento de cariz industrial e pormenores dos SVDU a aplicar propostos pelo Laboratório da Paisagem (adaptado de Laboratório da Paisagem, 2019b).....	48
Figura 16 - Esquema conceptual do funcionamento da instalação experimental	52
Figura 17 – Curva de vazão dos descarregadores utilizados na instalação experimental.....	54
Figura 18 – Curva das intensidades classificadas relativas às precipitações analisadas no período de 2015-2019.....	67
Figura 19 - Hidrograma relativo à caracterização da situação de referência, com caudal afluente de 0,250 L/s.....	73
Figura 20 - Hidrograma relativo à caracterização da situação de referência com caudal afluente de 0,347 L/s.....	73
Figura 21 – Efeito produzido pela base drenante no caudal efluente, para um caudal afluente de 0,250 L/s.....	74

Figura 22 - Efeito da introdução das camadas MP1.1 e MP2.1 no caudal afluente em regime permanente	76
Figura 23 - Efeito da introdução das camadas MP1.1 e MP2.1 no caudal afluente em regime não permanente.....	77
Figura 24 - Efeito da introdução das camadas MP1.2 e MP2.2 no caudal afluente em regime permanente	77
Figura 25 - Efeito da introdução das camadas MP1.2 e MP2.2 no caudal afluente em regime não permanente.....	77
Figura 26 - Efeito da introdução das camadas MP1.3 e MP2.3 no caudal afluente em regime permanente	78
Figura 27 - Efeito da introdução das camadas MP1.3 e MP2.3 no caudal afluente em regime não permanente.....	78
Figura 28 - Efeito das camadas MP4.1 e MP4.2 no caudal afluente em regime permanente	79
Figura 29 - Efeito das camadas MP1.4 e MP2.4 no caudal afluente em regime não permanente	79
Figura 30 - Evolução dos atrasos na saída e nos picos dos caudais efluentes entre os ensaios E0.1, E1.1 e E4.1	80
Figura 31 -Diferenças na regularização do caudal afluente em regime não permanente entre os ensaios E1.2 e E2.2.....	81
Figura 32 - Evolução das formas das curvas dos caudais efluente nos ensaios E0.1, E1.1, E2.1, E3.1 e E4.1	82
Figura 33 - Evolução dos declives (linhas vermelhas) das curvas dos caudais efluentes nos ensaios... 83	83
Figura 34 - Efeito da variação do caudal afluente através da introdução dum caudal afluente de 0,250 L/s em regime permanente no comportamento hidráulico dos CB	84
Figura 35 - Efeito da variação do caudal afluente através da introdução dum caudal afluente de 0,347 L/s em regime permanente no comportamento hidráulico dos CB	85
Figura 36 - Efeito da variação do caudal afluente através da introdução dum caudal afluente de 0,431 L/s em regime permanente no comportamento hidráulico dos CB	85
Figura 37 - Efeito da variação do caudal afluente através da introdução dum caudal afluente de 0,125 L/s em regime permanente no comportamento hidráulico dos CB	86
Figura 38 - Efeito do regime permanente no comportamento hidráulico dos CB.....	88
Figura 39 - Efeito do regime não permanente no comportamento hidráulico dos CB	88

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Ilustração 1 - Transbordamentos em redes de drenagem (caixa de visita e valeta)	25
Ilustração 2 – Escorrência urbana com carga poluente (fonte: Alaska Department of Environmental Conservation, 2018)	26
Ilustração 3 - Estruturas metálicas da instalação experimental	49
Ilustração 4 - Descarregadores utilizados na instalação experimental	50
Ilustração 5 - Distribuidor de alimentação do caudal	50
Ilustração 6 - Caixas de vidro utilizadas na recolha e medição do volume e caudal do efluente	51
Ilustração 7 - Instalação experimental completa	51
Ilustração 8 - Pormenores da selagem da estrutura dos CB	52
Ilustração 9 - Dreno perfurado colocado na saída dos CB	53
Ilustração 10 - Descarregadores utilizados na instalação experimental	53
Ilustração 11 - Processo de lavagem da areia selecionada através de peneiros normalizados	55
Ilustração 12 - Constituição da base drenante dos meios porosos dos CB.....	58
Ilustração 13 - Relva da espécie <i>ophiopogon japonicus</i> colocada no topo dos meios porosos de ambas as instalações-piloto.....	58
Ilustração 14 - Resíduo têxtil colocado entre camadas de brita calcária no meio poroso não convencional	59
Ilustração 15 - Aplicação da argila expandida com e sem incorporação de pontas de cigarro no meio poroso não convencional	60
Ilustração 16 – Incorporação de cascas de ovos numa mistura com substrato vegetal e sua aplicação no meio poroso não convencional.....	61
Ilustração 17 – Camada de 0,3 m areão utilizada no canteiro de biofiltração	62
Ilustração 18 - Colocação da camada de 0,2 m de areia (lavada e peneirada) no meio poroso do canteiro de biofiltração convencional	62
Ilustração 19 – Camada de substrato vegetal no canteiro de biofiltração convencional.....	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Características e funcionamento de canteiros de biorretenção e de biofiltração e caldeiras de árvores.....	30
Quadro 2 - Características e funcionamento de valas de biorretenção, pavimentos permeáveis e coberturas verdes.....	31
Quadro 3 - Características e funcionamento de jardins de chuva e zonas húmidas.....	32
Quadro 4 – Análise <i>SWOT</i> aos SVDU: pontos fortes e pontos fracos	33
Quadro 5 – Análise <i>SWOT</i> aos SVDU: oportunidades e ameaças	34
Quadro 6 - Importância e tipo de manutenção dos SVDU: operações de limpeza	39
Quadro 7 – Importância e tipo de manutenção dos SVDU: operações de ajardinamento	40
Quadro 8 - Importância e tipo de manutenção dos SVDU: operações de reparação	41
Quadro 9 - Casos de estudo de projetos europeus e americanos de SVDU	43
Quadro 10 - Definição das variáveis de analisadas	56
Quadro 11 – Exemplo da definição de um cenário de análise (cenário 5)	64
Quadro 12 – Quadro-resumo dos cenários de análise (variáveis utilizadas e análises efetuadas em cada um deles).....	65
Quadro 13 – Caudais selecionados correspondentes às escorrências originadas num trecho de arruamento urbano.....	68
Quadro 14 – Registo de dados experimentais e cálculo dos caudais na instalação experimental relativos ao Cenário 3, Ensaio 3.1, do CB1	69
Quadro 15 - Fatores de proporcionalidade entre os caudais afluentes e os caudais efluentes dos CB .	87

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

GEE: gases com efeito de estufa

SVDU: sistemas verdes de drenagem urbana

SDT: sistemas de drenagem tradicionais

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

CE: Comissão Europeia

NACTO: *National Association of City Transportation Officials*

USEPA: *United States Environmental Protection Agency*

WEF: *World Economic Forum*

WHO: *World Health Organization*

APA: Agência Portuguesa do Ambiente

GAP: gestão das águas pluviais

PWD: *Philadelphia Water Department*

CB: canteiros de biofiltração

G4CE: *Guimarães for Circular Economy*

CVR: Centro para a Valorização de Resíduos

WU: *Weather Underground*

SNIRH: Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e relevância do tema

O mundo vive em constante mudança desde o início da sua existência, nomeadamente ao nível climático. Essas mudanças aconteciam de forma natural, pois não existiam fontes artificiais emissoras de gases com efeito de estufa (GEE). Porém, a revolução industrial veio alterar esse paradigma uma vez que a produção de bens e materiais por meio da manufatura artesanal não acompanhava o desenvolvimento demográfico. A mecanização dos processos de produção foi feita, maioritariamente, através de vapor de água produzido pela queima de carvão, que é o ponto de viragem na matéria climática (IPCC, 2014a).

O aumento da emissão de GEE conduziu o planeta ao seu aquecimento, provocando alterações no clima a um ritmo acelerado, preocupando as populações, instituições governamentais e não governamentais com as suas consequências atuais e futuras.

Os cenários projetados pelas principais instituições mundiais, relativos às alterações climáticas, antevêm um aumento de eventos de precipitação e temperatura extremos, assim como a ocorrência de tempestades será cada vez mais frequente, intensa e com impactos negativos severos no quotidiano e qualidade de vida das populações, nomeadamente nas comunidades mais vulneráveis (Demuzere et al., 2014; Foster, Lowe, & Winkelmann, 2011; Kelemen et al., 2009). Estes fatores representam uma panóplia de desafios para os aglomerados urbanos, que incluem não só a disponibilidade de recursos naturais e alimentares, como também a sustentabilidade de um crescimento económico equilibrado e socialmente justo. A qualidade dos ambientes urbanos encontra-se, igualmente, em risco, necessitando de um desenvolvimento e renovação sustentáveis, de forma a poderem proporcionar aos cidadãos condições para uma fruição e vivência saudável nas cidades do futuro (CE, 2015e).

Os meios urbanos serão os locais onde as alterações climáticas terão mais impacto a médio e longo prazo. Com o crescimento exponencial da população, surge o aumento do número de cidades, bem como a crescente migração das populações para esses centros urbanos. A rápida urbanização despoletou a substituição de espaços naturais (solo) por superfícies impermeáveis (asfalto e betão) para atenderem às necessidades de espaço para atividades citadinas (Hoang & Fenner, 2016), provocando uma intensa alteração no uso dos solos e, consequentemente, uma degradação significativa do património natural dos meios urbanos. A progressiva impermeabilização de solos, aliada aos efeitos nocivos das alterações climáticas, amplia os problemas de drenagem e coloca novos desafios à gestão

das águas pluviais urbanas, não em termos de quantidade (capacidade dos sistemas) como de qualidade (preservação do ambiente e saúde pública). A conjugação destes fatores pode diminuir, cada vez mais, a necessária resiliência das cidades aos choques ambientais, comprometendo a prossecução dos objetivos de desenvolvimento sustentável da ONU (CE, 2013). A engenharia civil tem de se comprometer e deverá ter um papel decisivo para alcançar esses objetivos e de solucionar eventuais adversidades.

A alteração das condições hidrológicas “naturais” e a degradação da qualidade das águas pluviais são ambas extremamente prejudiciais, tanto para os meio recetores, como, conseqüentemente, para a saúde pública (Payne et al., 2015). As cidades têm tratado a água pluvial como resíduo (algo a ser gerido) uma vez que as áreas impermeáveis (e.g., arruamentos, edificações) impedem a sua infiltração natural (NACTO, 2017) e proporcionam a contaminação das escorrências pluviais com diversos detritos e poluentes (e.g. metais pesados, hidrocarbonetos). Contudo, *“a sociedade humana depende dos benefícios oferecidos pela natureza, sob a forma de alimentos, materiais, água potável, ar puro, regulação climática, prevenção de inundações, polinização, recreio. Todavia, muitos destes benefícios, frequentemente referidos como serviços ecossistémicos, são usufruídos como manancial quase ilimitado e tratados como bens gratuitos cujo verdadeiro valor não é plenamente apreciado.”* (CE, 2013).

A água é um claro exemplo da desvalorização dos recursos naturais por parte do ser humano, apesar de ser um elemento essencial à vida e um dos principais fatores que tornam a Terra o único planeta conhecido que suporta a existência de seres vivos, sendo de enorme importância preservar as origens de água, conservando ou melhorando as suas características/propriedades naturais. A água disponível deve ter uma qualidade adequada ao seu uso, para que não ponha em causa a estabilidade dos ecossistemas naturais, nem a saúde pública. Tal implica um controlo rigoroso da qualidade das descargas nos meios hídricos, seja de águas residuais ou de escorrências pluviais drenadas pelos sistemas urbanos.

Os sistemas de drenagem tradicionais (também conhecidos como infraestruturas cinzentas) têm sido os mais utilizados pela sua simplicidade de funcionamento e instalação e por resolverem, com (alguma) eficácia, o principal problema das zonas urbanizadas: escoar rapidamente as águas pluviais de forma a evitar a acumulação de água e/ou inundações. Contudo, estes sistemas têm-se revelado cada vez mais problemáticos tanto a nível económico como a nível ambiental e social, comprometendo a sua sustentabilidade. Assim, torna-se cada vez mais evidente que o conceito de infraestruturas cinzentas está a ficar ultrapassado e carece de soluções alternativas ou complementares assentes em políticas de

gestão urbanística que promovam um futuro mais sustentável (Chini, Canning, Schreiber, Peschel, & Stillwell, 2017).

Atendendo a todas as preocupações abordadas nos parágrafos anteriores, tornou-se cada vez mais premente a busca de novas soluções e práticas de GAP urbanas. Surge então uma nova abordagem, “amiga do ambiente” que preconiza a implementação de SVDU nas cidades. Estes sistemas “*ajudam a atenuar os impactos de inundações ao armazenarem temporariamente a água, filtram os poluentes decorrentes das escorrências na origem e impulsionam a infiltração da água da chuva no solo*” (Hoang & Fenner, 2016). Por outras palavras, os SVDU funcionam como sistemas de drenagem que, em vez de encaminharem a água unicamente por tubagens, promovem a infiltração natural da água no solo ou facultam escoamentos subsuperficiais que mitigam a acumulação das águas pluviais em áreas mais vulneráveis a inundações. Ademais, “*são ferramentas importantes para a mitigação da fragmentação e insustentável uso do solo, dentro e fora das áreas definidas na rede Natura 2000 e providenciam múltiplos benefícios na manutenção e restauro de ecossistemas e suas funções.*” (Karhu, 2011).

A GAP utilizando os SVDU constitui uma solução de drenagem de águas pluviais resiliente e economicamente viável, que providencia às comunidades inúmeros benefícios (USEPA, 2019). Estes sistemas trazem aos meios urbanos, não só uma solução eficaz na mitigação dos efeitos de eventos extremos relacionados com a precipitação (inundações), como também reduzem a temperatura global em espaços urbanos e oferecem benefícios para a saúde pública (melhor qualidade do ar e das origens de água). Os benefícios mencionados devem-se à utilização de árvores e arbustos nos sistemas de drenagem, que fazem a renovação do ar, e podem absorver poluentes presentes nas escorrências pluviais, enquanto os solos, onde estão enraizados, promovem a filtração de partículas em suspensão na água e a redução dos picos de caudal produzidos pelos eventos de precipitação (Payne et al., 2015). “*Os ecossistemas saudáveis também reduzem a disseminação de doenças transmitidas por vetores. A implantação de características de infraestrutura verde em zonas urbanas cria um maior sentido de comunidade, reforça a ligação com ações voluntárias empreendidas pela sociedade civil e ajuda a combater a exclusão social e o isolamento, com benefícios para o indivíduo e para a comunidade, a nível físico, psicológico, emocional e socioeconómico*” (CE, 2013). Para além dos benefícios mencionados, é importante realçar também que os investimentos em SVDU têm normalmente um retorno elevado, sendo típico obterem-se relações custo-benefício na ordem de 1 para 25 (Nellemann & Corcoran, 2010).

1.2 Objetivos

O trabalho de investigação a realizar nesta dissertação tem como principal objetivo a contribuição para o incremento da utilização dos SVDU nos centros urbanos, através da avaliação do desempenho hidráulico de um dos tipos destes sistemas (canteiro de biofiltração) à escala piloto.

O estudo e a avaliação do desempenho dos SVDU testados visam contribuir para um conhecimento mais alargado sobre as composições dos meios filtrantes destes sistemas, mais concretamente, averiguar a possibilidade de se incluírem materiais não convencionais, ligados ao conceito de economia circular, de modo a diversificar as alternativas e opções de composição dos meios filtrantes desses sistemas. Além do trabalho experimental a desenvolver, pretende-se ainda apresentar diferentes tipos de SVDU, bem como as suas características distintivas, funcionamento e composição. De modo a evidenciar as suas principais vantagens e inconvenientes, será também realizada uma análise comparativa (técnico-económica) entre os SVDU e os sistemas tradicionais de drenagem pluvial.

Para a prossecução do objetivo principal, foram definidos os seguintes objetivos específicos a atingir nas várias fases do trabalho de investigação:

- Pesquisa bibliográfica pertinente com o objetivo de aprofundar conhecimentos pessoais e de conhecer os desenvolvimentos já efetuados sobre o tema;
- Identificar as principais razões e benefícios que justificam a investigação e a aplicação dos SVDU em aglomerados urbanos;
- Estudar os diferentes tipos de SVDU existentes e aprofundar o conhecimento relativo à constituição e funcionamento de cada um deles, através da análise da sua aplicação em casos reais;
- Conceber e construir instalações-piloto que simulem o funcionamento de SVDU do tipo “canteiro de biofiltração” para a avaliação do desempenho hidráulico deste tipo de sistema, com diferentes características/composição do seu meio filtrante;
- Caracterizar e avaliar o desempenho do SVDU simulado à escala piloto, através da monitorização do seu funcionamento para diferentes cenários (relativos ao funcionamento hidráulico), avaliar parâmetros (e.g., tempo de retenção, redução do pico de caudal, remoção da carga de poluente)
- Efetuar uma análise comparativa do desempenho do sistema para os dois meios filtrantes alternativos utilizados (convencional e não convencional).

1.3 Organização da dissertação

A dissertação será elaborada de acordo com as normas do Despacho RT-31/2019 e está organizada em cinco capítulos, sendo que o primeiro capítulo engloba uma breve descrição do enquadramento e relevância do tema em estudo, explicita os objetivos gerais e específicos deste trabalho e, ainda, este mesmo capítulo, que apresenta a estrutura e os conteúdos vigentes em cada capítulo da dissertação.

No Capítulo 2 desenvolve-se uma sùmula resultante da pesquisa bibliográfica efetuada, de forma a mapear o conhecimento existente sobre a temática em estudo. Além disto, concetualizam-se algumas noções básicas sobre as alterações climáticas, a hidrologia, a GAP, os sistemas verdes de drenagem urbana no geral e, por último, a incorporação destes sistemas noutras iniciativas institucionais como as cidades inteligentes (*smart cities*) e a economia circular.

O Capítulo 3 tem como finalidade descrever os procedimentos necessários e a metodologia empregue para a realização deste projeto. Assim, é efetuada uma descrição geral do projeto e uma descrição geral da instalação experimental, dando a conhecer o local e condicionantes associadas, bem como os processos inerentes à instalação experimental (que simula o funcionamento dum canteiro de bio-filtração) e, igualmente, a explicitação de tarefas complementares para a execução dos ensaios (e.g. o estudo da curva de vazão dos descarregadores utilizados). Adicionalmente, neste capítulo, apresenta-se a organização do trabalho experimental, sendo que se define as variáveis de teste e são explicitados os procedimentos utilizados nos cenários considerados.

A apresentação dos resultados e respetiva análise encontra-se pormenorizada no Capítulo 4. Os subcapítulos descrevem os sete cenários de análise realizados, sendo que foram verificados a diminuição dos picos de cheia, o atraso da saída da água, do pico de caudal e a relação entre a área de drenagem e o caudal de saída das instalações-piloto. São ainda feitas algumas comparações entre os diferentes cenários e, por fim, é feita uma análise de comparação entre os resultados obtidos nos últimos ensaios com os da situação de referência.

Por fim, o Capítulo 5 é constituído pelas principais conclusões derivadas da análise dos resultados da atividade experimental realizada e da literatura estudada. Para além disso, são apresentadas algumas sugestões para desenvolvimentos no futuro, que poderão ser um contributo promissor para a investigação no domínio da temática dos SVDU.

2. ESTADO DA ARTE

2.1 Alterações climáticas

As alterações climáticas são, atualmente, um dos principais problemas a nível mundial por colocarem grandes desafios à definição de medidas de prevenção e adaptação eficazes na mitigação dos seus impactos. Especialistas de todo o mundo têm estudado e analisado as causas e consequências dessas alterações, sendo já possível observar várias desregulações ambientais em todo o planeta. Estas desregulações ambientais correspondem a alterações dos equilíbrios dos ecossistemas da Terra e levam a uma evolução negativa dos eventos climáticos extremos, quer no aumento da sua frequência/probabilidade de ocorrência, quer no agravamento da sua intensidade/severidade, elevando o nível do risco associados a esses eventos.

O agravamento dos eventos climáticos coloca em risco as populações e o seu conforto, com os impactos a serem progressivamente mais nefastos e devastadores, originando um efeito “bola de neve” (Figura 1), constituindo uma ameaça crescente. Por esse motivo, quanto mais tardiamente for atacado o problema, mais difícil será de o reduzir e/ou eliminar. Logo, é cada vez mais premente a necessidade de se conceber novos paradigmas de desenvolvimento de modo a implementar medidas e soluções, não só para a eliminação das fontes de poluição atmosférica (mitigação dos GEE de natureza antropogénica), como também para a adaptação dos territórios para os tornar mais resilientes aos efeitos negativos decorrentes das alterações climáticas.

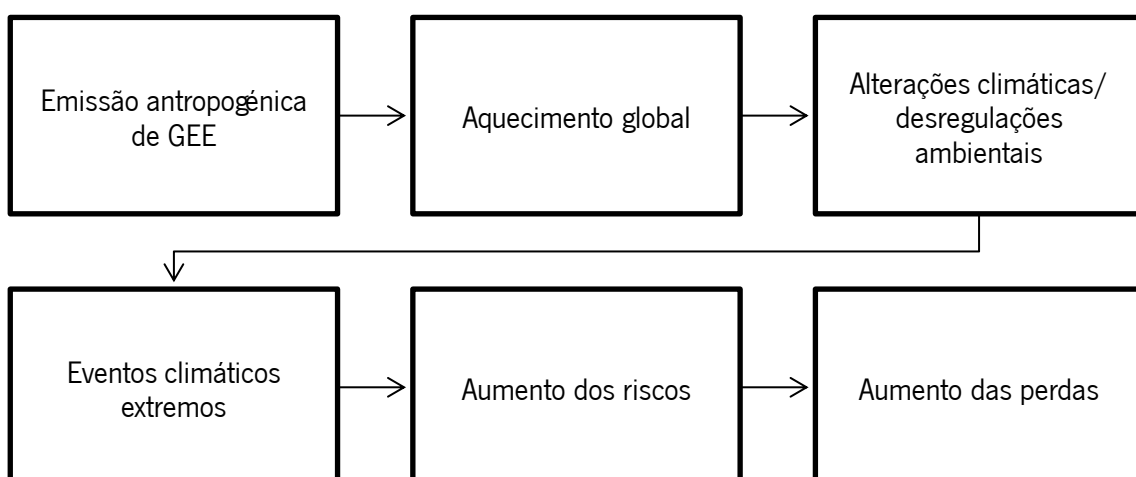


Figura 1 – Sequência de efeitos da emissão antropogénica de GEE

2.1.1 Evidências atuais

O aquecimento global é o termo genericamente aplicado à subida das temperaturas dos diversos ecossistemas terrestres. Estudos recentes constataam que a temperatura da atmosfera e dos oceanos tem aumentado, as quantidades de neve e gelo têm vindo a diminuir e o nível do mar subiu. (IPCC, 2013).

Os relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) revelam que as últimas três décadas foram sucessivamente mais quentes e as mais quentes desde 1850. O período entre 1983 e 2012 foi, provavelmente, o mais quente dos últimos 1400 anos no hemisfério norte. Reporta-se, ainda, que a média global das temperaturas das superfícies dos oceanos e da superfície terrestre combinadas revelou um aquecimento médio a nível mundial de 0,85 °C [0,65 a 1,06 °C], entre 1880 e 2012. Entre 1992 e 2011 o manto de gelo da Gronelândia e do Ártico perdeu massa e a extensão de gelo média anual do oceano Ártico diminuiu entre 3,5 e 4,1%, por década, entre os anos de 1979 e 2012. Os dados publicados revelam que, durante o período entre 1901 e 2010, o nível médio do mar subiu, em média, cerca de 0,19 m [0,17 a 0,21 m] (IPCC, 2014a).

O aumento da temperatura, aliado ao degelo das calotes polares e ao aumento do nível médio do mar, provocam desequilíbrios nos diversos ecossistemas terrestres. Alguns destes ecossistemas são responsáveis pela regulação climática do planeta e, conseqüentemente, pela ocorrência de eventos extremos, tais como: ciclones tropicais, ondas de calor.

Tomando como exemplo os ciclones tropicais do Atlântico Norte, Emanuel (2005) defende que o potencial destrutivo dos furacões (uma das categorias mais gravosas de ciclones tropicais) é altamente correlacionável com a temperatura da superfície do mar. O mesmo autor prevê um aumento significativo das perdas relacionadas com ciclones tropicais (e.g. económicas, humanas, materiais) durante o século XXI uma vez que o aumento da temperatura da superfície do oceano Atlântico Norte, devido ao aquecimento global, provocará um agravamento da intensidade desses fenómenos naturais. A correlação entre o aquecimento global e o agravamento dos eventos climáticos aplica-se a vários outros casos, em que a desregulação climática tende a induzir catástrofes naturais cada vez mais devastadoras. Assim sendo, esta evolução é uma ameaça, não só à segurança e bem-estar das populações, mas também à biodiversidade, através da extinção de espécies e/ou da alteração da localização (migração) dos habitats naturais de animais e plantas sendo que a permanência de elevados níveis de emissões de GEE agravaria ainda mais esses impactos (CE, 2017b).

Os impactos sentidos pelas populações podem vir a ser sentidos de várias formas, no entanto, os impactos serão assimétricos nas diversas regiões da Europa e do mundo e são, geralmente, mais gravosos nas populações e comunidades mais desfavorecidas. (IPCC, 2014a; Kelemen et al., 2009). Na Europa, já é possível verificar que, em algumas regiões, os eventos de precipitação extrema são cada vez mais frequentes e intensos, enquanto que outras regiões são sujeitas a ondas de calor, secas e incêndios florestais cada vez mais severos e frequentes e existem evidências de uma mudança na distribuição geográfica de doenças transmitidas por via hídrica e outros vetores (e.g. insetos) (CE, 2017b), comprovando que as soluções de adaptação às alterações climáticas a adotar devem ser ajustadas consoante as necessidades de cada território. Acrescenta-se, ainda, o facto de nas últimas décadas os custos relacionados com perdas de pessoas e bens devido a eventos climáticos extremos serem elevados: na Europa, entre 2002 e 2012 diversos eventos climáticos extremos provocaram a morte e 80 mil pessoas e provocaram danos económicos que rondam os 95 mil milhões de euros (CE, 2015f).

2.1.2 Causas, efeitos e consequências futuras

Os gases com efeito de estufa (GEE) não permitem a total libertação de calor da Terra para o espaço, retendo parte deste calor, formando um efeito de estufa. A componente natural deste efeito é vital para que o planeta Terra possa suportar a presença de vida, mantendo o planeta a uma temperatura favorável à mesma. Contudo, o aumento da componente antropogénica das emissões atmosféricas agravou significativamente esse efeito após a Revolução Industrial e, por isso, a temperatura do planeta tem vindo a aumentar a um ritmo cada vez mais alarmante, caso não se tomem medidas adequadas capazes de reverter este processo (APA, 2019a; IPCC, 2014a).

Alguns cientistas, governantes e instituições espalhados por todo o mundo negam a influência humana no aquecimento global (e até o mesmo) e nas alterações climáticas (Björnberg, Karlsson, Gilek, & Hansson, 2018). Não obstante, a maioria comunidade científica aponta, como principal causa desse aumento excessivo da temperatura média global, o crescimento da emissão de GEE decorrente das atividades antropogénicas (NASA, 2018), sendo que 97% dos artigos científicos analisados por Cook et al. (2013) atestam essa influência humana no aquecimento global.

Muitos dos GEE encontram-se na atmosfera terrestre de forma natural, mas a atividade humana (queima de carvão, petróleo ou gás, desflorestação, aumento da atividade pecuária, uso de fertilizantes azotados, libertação de gases fluorados e CFC), tem vindo a aumentar em demasia a concentração destes gases na atmosfera, provocando assim o aquecimento global. Os principais GEE de origem antropogénica são

o dióxido de carbono (CO_2) (responsável por 63% do aquecimento mundial por via antropogénica), o metano (CH_4) (19%) e o óxido nitroso (N_2O) (6%) (CE, 2017a).

Na Figura 2 (adaptada de IPCC, 2014) encontra-se representada a quantidade dos principais GEE emitidos por atividades antropogénicas, entre 1970 e 2010. A maior parte destes gases têm a particularidade de manifestarem uma elevada persistência na atmosfera terrestre, o que significa que as alterações climáticas que serão sentidas nos próximos 30 a 40 anos decorrem do grau de emissões ocorridas no passado (Gill, Handley, Ennos, & Pauleit, 2007).

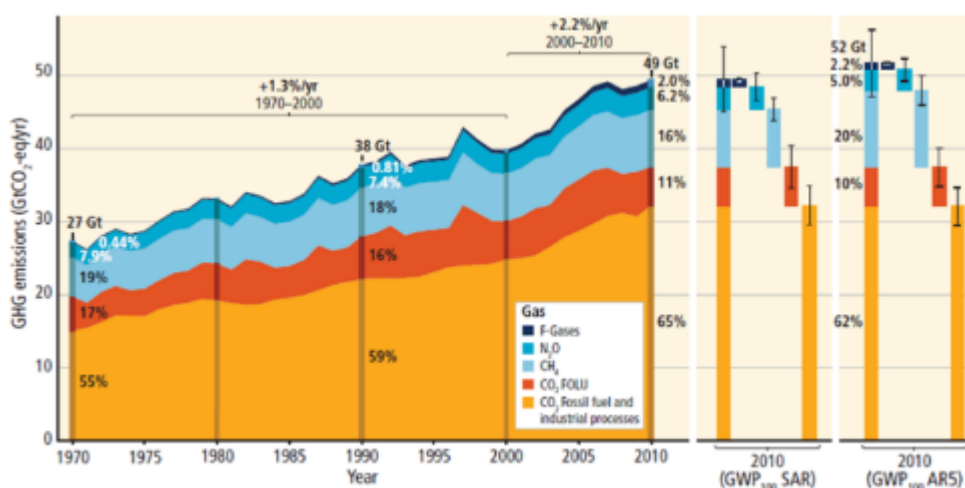


Figura 2 – Valor anual de emissões de GEE com origem antropogénica (1970 e 2010)

Os efeitos das alterações climáticas têm vindo a ser estudados ao longo dos últimos anos e alguns desses efeitos já estão a ser sentidos no presente. As alterações climáticas têm uma elevada dependência da quantidade de GEE presentes na atmosfera e, como tal, a emissão de GEE é uma das variáveis mais importantes do problema, mas é também uma das mais imprevisíveis. A trajetória das emissões de GEE, sendo incerta, torna também incerta a evolução dos eventos climáticos. Assim, as projeções de cenários referentes aos efeitos e consequências futuras das alterações climáticas terão sempre alguma imprevisibilidade associada, sendo que serão, hipoteticamente, mais certas a curto prazo do que a longo prazo (IPCC, 2014a).

Poderá observar-se igualmente o aumento da intensidade, frequência e duração das tempestades tropicais e ainda é projetado que o nível médio do mar suba entre 0,30 e 0,55 metros num cenário de baixas emissões de GEE e entre 0,52 e 1,30 m num cenário de emissões elevadas, até 2100. Aponta-se também que o oceano Ártico fique desprovido de gelo durante os verões, antes de 2050. Após 2100 é esperado que as temperaturas globais continuem a aumentar mesmo que as emissões de GEE sejam interrompidas por completo, o que também torna previsível que o nível médio do mar continue a subir globalmente, para além de hipóteses mais incertas que apontam para a perda total da massa de gelo da

Gronelândia e para a subida de 7 m do nível médio do mar. Em suma, as populações, os ecossistemas, bens e economias sofrerão perturbações motivadas pelo stress devido ao calor, tempestades e precipitação extrema, inundações em zonas costeiras e interiores, poluição do ar, secas, escassez de água e aumento do nível do mar (CE, 2017b; IPCC, 2014a; NASA, 2019).

2.1.3 Impactos biofísicos e socioeconómicos

Recuperando a linha de pensamento produzida ao longo dos diferentes itens abordados anteriormente neste documento, é possível constatar que o aquecimento global leva a desregulações e alterações climáticas em todo o globo, o que tem agravado os impactos e os efeitos negativos da grande maioria dos eventos climáticos e, conseqüentemente, amplificado os riscos para os sistemas naturais e humanos. Resumidamente, estes impactos são resultantes de ondas de calor mais longas e mais quentes, aumento dos efeitos da ilha de calor urbana, tempestades mais destrutivas; transbordamentos das redes de drenagem de águas pluviais e mistas mais frequentes e intensas; secas mais longas e intensas ou períodos escassez de água mais duradouros (Foster et al., 2011).

O IPCC indica quatro riscos genéricos para as populações que se poderão vir a ocorrer em todos os setores e regiões (IPCC, 2014a):

1. Risco de graves problemas de saúde e de perturbações nos meios de subsistência das populações resultantes do aparecimento de tempestades, aumento do nível do mar e inundações em zonas costeiras; inundações em zonas interiores em algumas regiões urbanas e períodos de calor extremo;
2. Riscos sistémicos (risco de colapso de sistemas financeiros ou de mercados) devido a eventos climáticos extremos que levam à rotura de redes de infraestruturas e serviços críticos;
3. Risco de insegurança alimentar e hídrica e perda de meios de subsistência rurais e de rendimentos, particularmente nas populações mais desfavorecidas;
4. Risco de perda de biodiversidade e ecossistemas e dos seus bens, funções e serviços.

Dentro destes quatro riscos genéricos, existem evidências robustas de que ao longo do século XXI as frações da população mundial que experimentam escassez de água e que são afetadas por grandes cheias fluviais irão aumentar à medida que o aquecimento global aumenta, assim como, haverá uma redução da renovação das origens de água (superficiais e subterrâneas) em grande parte das regiões subtropicais. Aponta-se, ainda, que todos os aspetos relativos à segurança alimentar serão potencialmente afetados pelas alterações climáticas, incluindo a sua produção, acesso, consumo e custo.

Por outro lado, as áreas rurais são expectáveis de experimentar grandes impactos no acesso e abastecimento de água, na segurança alimentar e nas receitas agrícolas, incluindo mudanças nas áreas de cultivo alimentar e não alimentar em todo o globo (IPCC, 2014a).

Em termos de saúde pública, é previsto que as alterações climáticas projetadas irão afetar a saúde humana pela intensificação de problemas de saúde já existentes ou pelo aparecimento de novos, tanto físicos como psicológicos, tais como: o aparecimento de problemas mentais em pessoas saudáveis e o aumento desses problemas em pessoas já diagnosticadas (e.g. stress e/ou ansiedade provocados pela ocorrência de condições climáticas mais adversas); o aumento do risco de morte em pessoas que padecem de doenças crónicas (e.g. diabetes), doenças cardiovasculares, respiratórias e renais; os sintomas da asma são mais frequentes e intensos em temperaturas mais elevadas (IPCC, 2014b). Além disso, os impactos indiretos podem vir a tomar destaque no extenso leque de possíveis ameaças: se a falta de água por si só é um grave problema, se se considerar que irá provocar dificuldades na produção de alimentos essenciais, então a extensão do problema torna-se ainda mais preocupante. Torna-se então evidente a ligação entre as alterações climáticas e os riscos para a saúde pública e para os diversos ecossistemas, sendo essencial aplicação de soluções eficazes de adaptação a essas alterações, em diversos níveis e escalas geográficas (IPCC, 2014a).

2.1.4 Desafios futuros e enquadramento político

As alterações climáticas são um problema extremamente complexo e preocupante que tem exigido a atenção de diversas instituições governamentais (nacionais e internacionais), intergovernamentais e não governamentais. O principal objetivo, a longo prazo, dessas entidades é estabilizar as concentrações de GEE na atmosfera de modo a eliminar uma interferência antropogénica perigosa para o sistema climático.

O *World Economic Forum* (WEF) é uma organização internacional público-privada, independente e imparcial, que publica anualmente um relatório sobre a avaliação do risco¹ gerado por diversos eventos críticos que possam por em causa a estabilidade mundial nas mais diversas áreas, nomeadamente nas áreas económica, ambiental, geopolítica, social e tecnológica (WEF, 2019). A Figura 3 apresenta uma relação entre a probabilidade e o impacto da ocorrência dos eventos previsivelmente mais impactantes a curto prazo.

¹O risco é um produto do impacto e da probabilidade de ocorrência de um dado evento ou acontecimento.

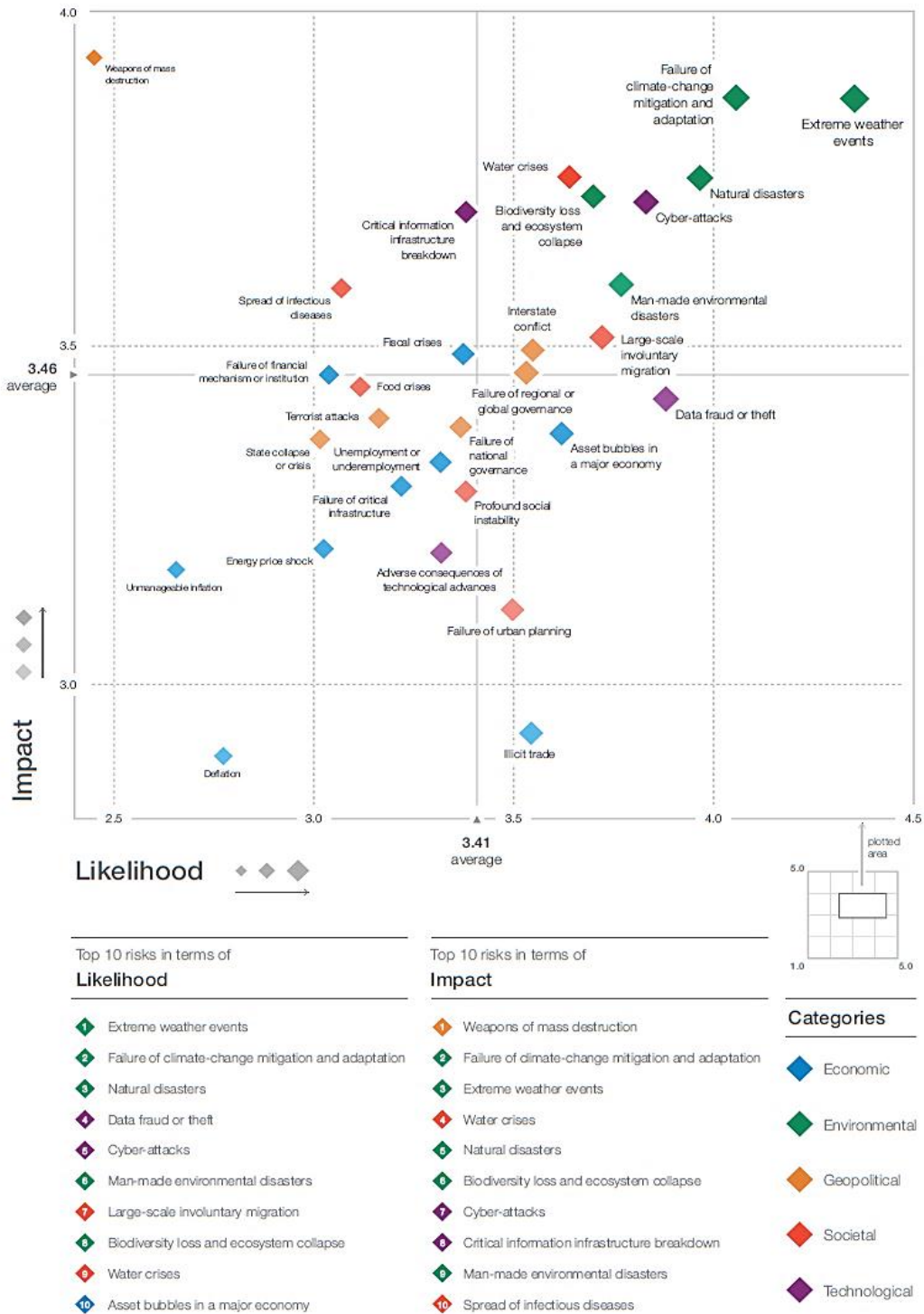


Figura 3 – Avaliação do impacto de eventos ou acontecimentos críticos nas áreas económica, ambiental, geopolítica, social e tecnológica (fonte: WEF, 2019)

Com base nos dados deste relatório (de 2019) e de relatórios dos anos anteriores, é possível constatar uma mudança no paradigma dos riscos/impactos a nível mundial, já que entre 2009 e 2015 os problemas centravam-se nas crises económicas e sociais (nomeadamente crises financeiras, crises

políticas, oscilações do preço do petróleo e gás, conflitos armados, etc.), mas a partir de 2016 os principais riscos estão associados, na sua maioria, a problemas ambientais.

Outras instituições têm-se dedicado a estudar e a analisar em concreto as alterações climáticas de modo a aferir quais as causas e as consequências destas alterações de modo a ser possível encontrar soluções adequadas de modo a diminuir as suas consequências e para que seja possível recuperar a vitalidade do nosso planeta. O IPCC é o organismo da Organização das Nações Unidas (ONU) encarregue do assunto das alterações climáticas e tem como principal objetivo fornecer o conhecimento mais avançado sobre as alterações climáticas. Esta entidade não produz pesquisa original, mas avalia e seleciona artigos produzidos por cientistas de alta competência, tanto independentes como ligados a organizações e governos. A informação selecionada tomará parte do relatório de avaliação do IPCC, onde são apresentadas as causas, os efeitos e os riscos para a humanidade e meio ambiente.

No seu Quinto Relatório de Avaliação, o IPCC refere que *“muitos aspetos das alterações climáticas e dos impactos associados irão permanecer durante séculos, mesmo que as emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa fossem interrompidas por completo. Os riscos de mudanças climáticas abruptas ou irreversíveis aumentam à medida que a magnitude do aquecimento global aumenta.”* e salienta a necessidade de se aplicarem soluções para a adaptação e mitigação das alterações climáticas, incluindo os SVDU, como solução para ambas (IPCC, 2014a).

O problema das alterações climáticas pode ser atacado em diversas vertentes, tornando essencial o estudo das causas e efeitos das alterações para que seja possível perceber qual o conjunto de soluções que melhor servirá a este propósito. Diversas soluções de adaptação e mitigação podem ser válidas no combate às alterações climáticas, contudo é insuficiente aplicá-las isoladamente (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014a). Estas soluções serão tanto mais eficazes quanto melhor prepararem a sociedade para lidar com os impactos biofísicos e socioeconómicos causados pelas alterações climáticas (APA, 2019a). O IPCC define a adaptação e a mitigação da seguinte forma:

- Adaptação: processo de ajuste ao clima atual ou expectável e seus efeitos. Em sistemas humanos, a adaptação procura moderar e/ou evitar danos ou explorar oportunidades benéficas de melhoria desses sistemas. Por sua vez, a intervenção humana em alguns sistemas naturais pode facilitar o ajuste ao clima esperado e seus efeitos.
- Mitigação: intervenção humana para reduzir as fontes de GEE ou melhorar/aumentar os processos e mecanismos de remoção desses gases da atmosfera e outras intervenções com vista a contribuir direta ou indiretamente para a redução das alterações climáticas.

Resumidamente, a adaptação é o ato de reduzir ou eliminar os possíveis efeitos negativos dos impactos e danos causados pelos efeitos das alterações climáticas nos sistemas humanos e naturais, ao passo que a mitigação corresponde às ações de redução e eliminação das origens das alterações climáticas, ou seja, na redução e eliminação das fontes de GEE e seus precursores (APA, 2019a). Assim, a adaptação e a mitigação são estratégias complementares para a redução e gestão dos riscos associados às alterações climáticas, sendo que a redução substancial de emissões durante as próximas décadas pode reduzir esses riscos, pois: aumenta as perspectivas da eficácia da adaptação, reduz os custos e os desafios da mitigação, a longo prazo e, contribui para uma trajetória climática visando um desenvolvimento sustentável.

A eficácia da adaptação e da mitigação das alterações climáticas pode ser melhorada através da sua ligação com outros objetivos sociais e depende de políticas e medidas em múltiplas escalas geográficas: internacional, regional, nacional e subnacional. Nas últimas décadas tem-se verificado a um aumento significativo de iniciativas políticas a todos os níveis (internacional, nacional, regional e local) visando a conservação e ao uso sustentável dos ambientes naturais, o que constitui uma prova da atenção dos decisores políticos em relação à importância da natureza para a sociedade. Inclusivamente, a investigação de soluções naturais para a regeneração urbana com vista ao aumento da sua resiliência face às alterações climáticas tem sido vivamente recomendada pela UE (APA, 2019a; CE, 2015f). A Figura 4 representa um fluxo de combate às alterações climáticas, preconizado num dos relatórios do IPCC.

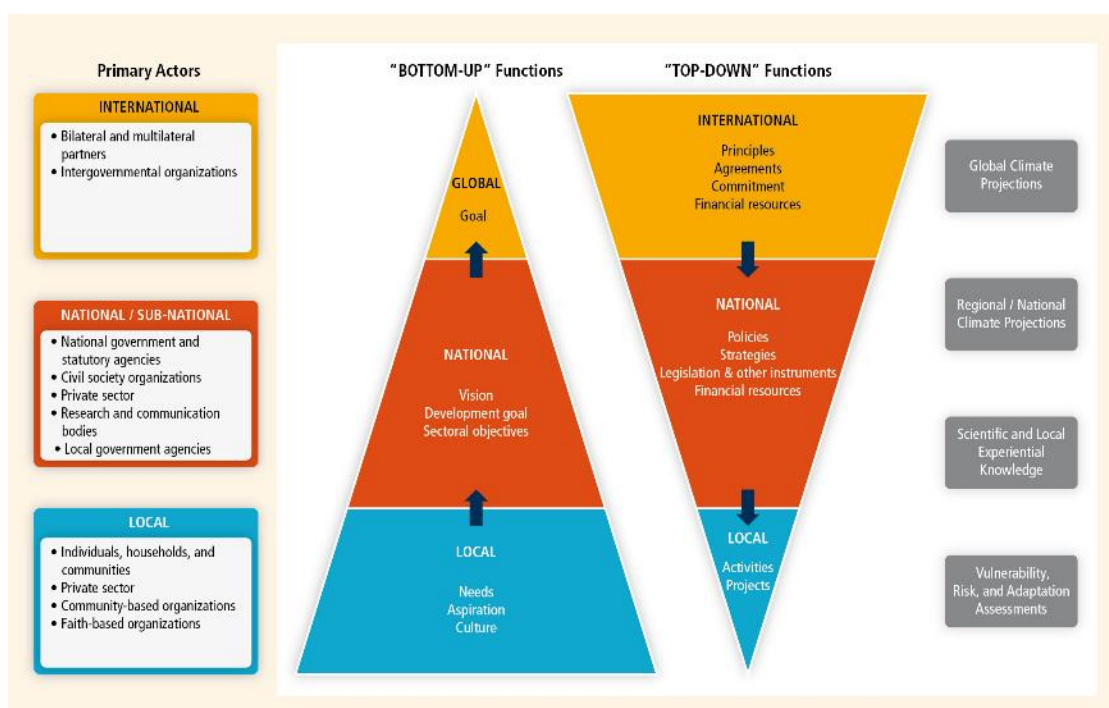


Figura 4 – Fluxo da ação de combate às alterações climáticas (fonte: IPCC, 2012)

As estratégias de mitigação passam pelo desenvolvimento e aplicação de protocolos e acordos internacionais com vista à redução, limitação ou eliminação das emissões de GEE com objetivo de conter o aquecimento global, contudo estas dependem do sucesso da sua implementação e eficiência em cada país ou região (APA, 2019a, 2019b; CE, 2015c).

As políticas de adaptação terão modos de aplicabilidade diferentes, uma vez que as características e problemáticas relativas às alterações climáticas podem diferir, regionalmente ou até dentro do mesmo país. Assim sendo, as estratégias de ação para a adaptação já existentes remetem para o apoio e financiamento do desenvolvimento e aplicação de soluções nas escalas geográficas inferiores. No caso da UE, a estratégia de adaptação estabelecida, a *EU Adaptation Strategy*, passa por coordenar os estados membro na preparação e no aumento da capacidade de combate às alterações climáticas através da promoção, apoio e financiamento na construção e desenvolvimento das soluções de cada um deles. No caso de Portugal, o desenvolvimento e aplicação de soluções ao nível local (nas localidades e municípios) encontra-se integrado na Estratégia Nacional de Adaptação às Alterações Climáticas 2020 (ENAAC 2020) (APA, 2019a; CE, 2015c). Deste modo é possível criar uma “rede europeia” de adaptação às alterações climáticas que engloba tanto as necessidades particulares de resposta às vulnerabilidades, como também permite uma adaptação a nível internacional.

As estratégias mencionadas traduzem a necessidade de se procurarem soluções não só para a mitigação das alterações climáticas, através da redução da emissão de GEE e seus precursores, como também a necessidade de capacitar os aglomerados urbanos com soluções eficazes de adaptação aos efeitos das alterações climáticas, que permitam reduzir os riscos decorrentes dos mesmos, independentemente da evolução das emissões de GEE no futuro (APA, 2019b; CE, 2015c; Gill et al., 2007; IPCC, 2014a; Kelemen et al., 2009). Os SVDU são soluções naturais de adaptação e mitigação das alterações climáticas, fazendo parte das soluções consideradas pelo Programa Hidrológico Internacional da UNESCO como potenciais ferramentas de restauro de processos naturais nos meios urbanos (Krauze & Wagner, 2019).

Na Figura 5 encontram-se sintetizados os principais protocolos, acordos, diretivas e programas, bem como o nível a que serão implementados, relativos às ações de mitigação e adaptação às alterações climáticas, onde se enquadram os SVDU.

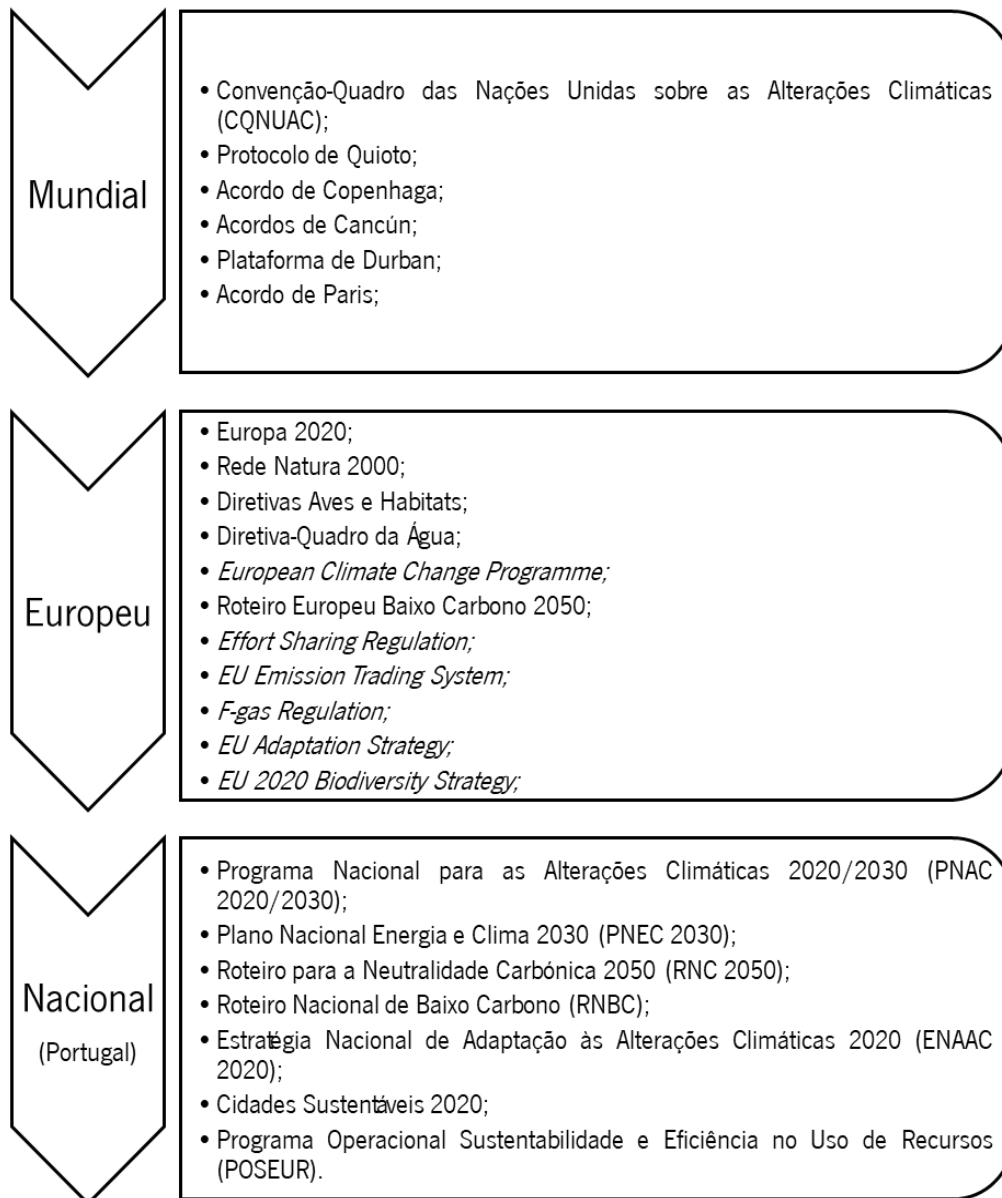


Figura 5 – Políticas de mitigação e adaptação às alterações climáticas a nível mundial, europeu e em Portugal

2.2 Hidrologia

A hidrologia é a ciência que analisa o ciclo da água na natureza, bem como as suas transformações e distribuições em relação à atividade humana (Ribeiro, 1987). Assim é possível conhecer e perceber o percurso da água no planeta, desde que esta cai na superfície terrestre sob a forma de chuva, até à sua evaporação, principalmente dos corpos de água superficiais. O estudo da hidrologia numa região é essencial na conceção e na exploração de sistemas de drenagem de águas pluviais.

Os fenómenos decorrentes do ciclo da água diferem nas suas propriedades e efeitos nas várias regiões do globo, uma vez que dependem de múltiplos fatores, tais como a pluviosidade, temperatura do ar, topografia, geologia, ocupação do solo. Assim, os escoamentos resultantes da precipitação em meios urbanos resultam da conjugação de diversas características territoriais onde os meios hídricos estão inseridos (Ribeiro, 1987). Por sua vez, no projeto de sistemas de drenagem de águas pluviais é necessário determinar a capacidade de vazão do coletor, de modo a permitir escoar as afluições de água ao sistema, ou seja, o pico de caudal resultante do escoamento superficial (e subsuperficial) na respetiva bacia contributiva.

2.2.1 Precipitação

A precipitação é o fenómeno referente à queda de água atmosférica pela condensação do vapor de água contido nas manchas nebulosas, sob a forma de chuva, neve, granizo, orvalho ou geada. A precipitação é classificada relativamente à sua origem, podendo ser orográfica, convectiva ou frontal (Ramísio, 2016; Ribeiro, 1987). O ciclo hidrológico (ou ciclo da água) é o responsável pelas trocas contínuas de água entre as superfícies terrestre e aquática com a atmosfera, mantidas por ação da energia do Sol (Lencastre & Franco, 1984).

A medição da quantidade de água que cai numa dada região é denominada por pluviometria. Os dados recolhidos nestas medições são de extrema importância para a conceção e exploração dos sistemas de drenagem urbana, uma vez que é através deles que se irá determinar a capacidade de vazão requerida a esses sistemas (Ribeiro, 1987). Os dados recolhidos pluviométricos incluem a altura pluviométrica, a duração do evento de precipitação e a intensidade de precipitação. Para além destes, recorre-se a estudos estatísticos para obter o período de retorno, referente à frequência da ocorrência de um dado evento de precipitação com uma dada intensidade e duração (Lencastre & Franco, 1984; Ramísio, 2016; Á. Ribeiro, 1987).

A conjugação das correlações entre dados das intensidades, das durações e dos períodos de retorno permite estabelecer curvas de intensidade-duração-frequência, usualmente designadas por curvas IDF. Os estudos que deram origem à definição destas curvas para o território português foram realizados nas décadas de 80 e 90 (Oliveira, 2016). Estas curvas foram integradas na legislação portuguesa em vigor, relativa ao dimensionamento de redes públicas de águas pluviais (DR23/95, artigo 128º do Capítulo III – Elementos base para dimensionamento (Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações, 1995). No Anexo IX – Regiões pluviométricas, deste Dec.-Lei, estão definidos a equação e os parâmetros necessários ao cálculo da intensidade da precipitação, propostos por Matos & Silva (1986) (Equação 1 e Figura 6).

$$I = a' \cdot t^{n'} \quad (1)$$



Período de Retorno, T (anos)	Região Pluviométrica					
	A		B		C	
	a'	n'	a'	n'	a'	n'
2	202,72	-0,577	162,18	-0,577	243,26	-0,577
5	259,26	-0,562	207,41	-0,562	311,11	-0,562
10	290,68	-0,549	232,21	-0,549	348,82	-0,549
20	317,74	-0,538	254,19	-0,538	381,29	-0,538
50	349,54	-0,524	279,63	-0,524	419,45	-0,524
100	365,62	-0,508	292,5	-0,508	438,75	-0,508

Figura 6 – Parâmetros das curvas IDF correspondentes às regiões pluviométricas de Portugal, consideradas no DR23/95

A não atualização periódica, nas últimas décadas, dos estudos estatísticos que definem os parâmetros a considerar na definição das curvas IDF, com base nas medições das estações meteorológicas existentes, faz com que esses parâmetros sejam cada vez menos representativos dos atuais eventos pluviométricos, face aos impactos das alterações climáticas nas várias regiões. No atual contexto, será muito provável que os sistemas de drenagem pluvial estejam expostos a caudais maiores do que os decorrentes da utilização destas curvas, ou apresentem uma capacidade de vazão para eventos com menor período de retorno, aumentando desse a frequência e a magnitude das inundações urbanas (Dong, Guo, & Zeng, 2017).

Assim sendo, é necessário salientar que, mesmo as redes que apresentam hoje deficiente comportamento, podem estar corretamente dimensionadas, só que tiveram por base os conhecimentos

da época em que foram construídos. Os sistemas existentes foram (e continuam a ser) dimensionados para eventos de precipitação com um período de retorno que, expectavelmente, já não corresponde à realidade atual, fazendo com que a sua capacidade de vazão possa já não ser suficiente.

2.2.2 Bacia hidrográfica

- Tipologia e características

Os cursos de água são alimentados por meio de escoamentos de superfície, sub-superficiais e/ou subterrâneos (lençóis freáticos e aquíferos). Deste modo, a bacia hidrográfica corresponde a uma área delimitada, definida topograficamente, que faz a drenagem apenas para esse curso de água. As principais características das bacias de drenagem são a geometria/morfologia, topografia, geologia e cobertura vegetal (Figura 7) (Lencastre & Franco, 1984; Ribeiro, 1987).

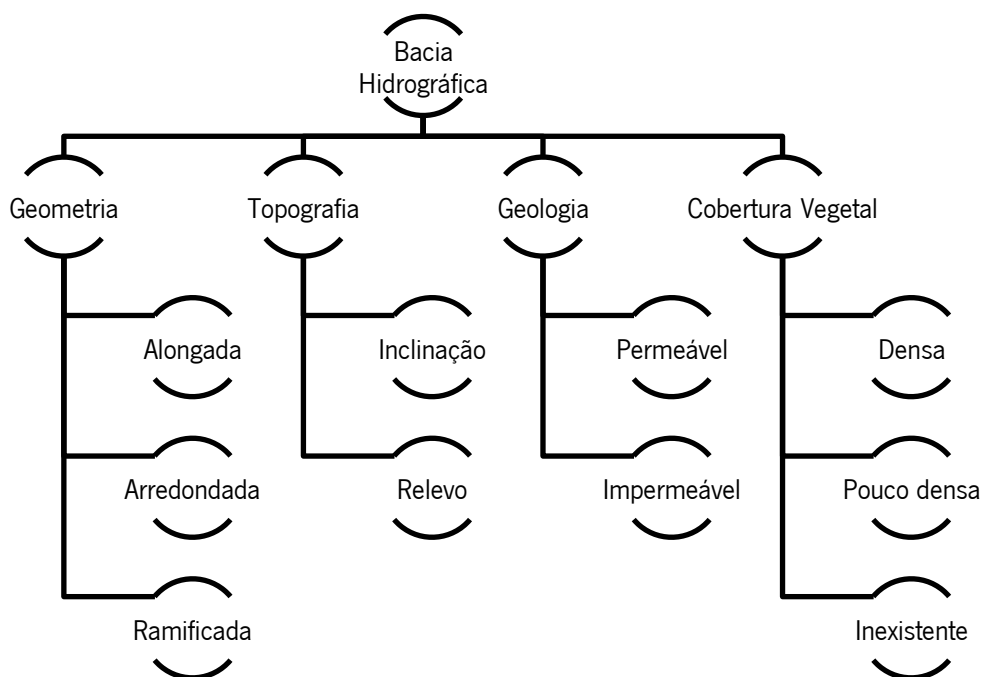


Figura 7 – Principais características das bacias hidrográficas com influência nas escorrências pluviais

As bacias de drenagem em meio urbano apresentam algumas especificidades ao serem delimitadas por arruamentos, edifícios (coberturas e logradouros) e outras estruturas urbanas, que alteram a topografia e geologia natural dos terrenos. Os coletores dos sistemas separativos de drenagem de águas pluviais são normalmente instalados ao longo dos arruamentos, sendo alimentados por ramais de ligação provenientes de sarjetas, sumidouros e ligações prediais.

- Escoamento pluvial

O caudal gerado pela precipitação pode ser estimado com base em diversos métodos de cálculo (empíricos, estatísticos e cinemáticos). Para a dimensão das bacias contributivas em ambiente urbano, a legislação em vigor preconiza, na ausência de conjuntos de dados suficientemente consistentes, a adoção do método racional que utiliza a Equação 2 para determinar de uma forma simplificada (método empírico) o caudal médio escoado (Q) numa dada seção do coletor pluvial que recebe as afluições duma dada sub-bacia contributiva (Duarte, 2019; Portela & Hora, 2002).

$$Q = C \cdot I \cdot A \quad (2)$$

em que,

- C - coeficiente (médio) de escoamento, definido em função da geologia, cobertura de solo e inclinação do terreno, e que traduz a fração de áreas impermeáveis;
- I - intensidade média da precipitação;
- A - área da bacia de drenagem;

Em meios naturais, a conjugação das propriedades duma bacia, pode originar escoamentos irregulares para intensidades de precipitação semelhantes: as superfícies onde ocorre o escoamento são permeáveis e possuem cobertura vegetal em grande parte da sua extensão, reduzindo o caudal que chega às linhas de água de forma superficial (coeficiente de escoamento entre 0,1 e 0,6, aproximadamente) e a reduzindo, também, a velocidade desse mesmo escoamento. Por sua vez, em meios urbanos, intensidades de precipitação semelhantes originam escoamentos superficiais semelhantes, uma vez que em bacias de drenagem em meio urbano são compostas por superfícies maioritariamente impermeáveis onde o coeficiente de escoamento se situa entre 0,8 e 1 (Lima, 2005). A Figura 8 ilustra os efeitos da sua geometria da bacia e do tipo de cobertura do solo na variação temporal do caudal escoado nos cursos de água ou coletores (hidrogramas).

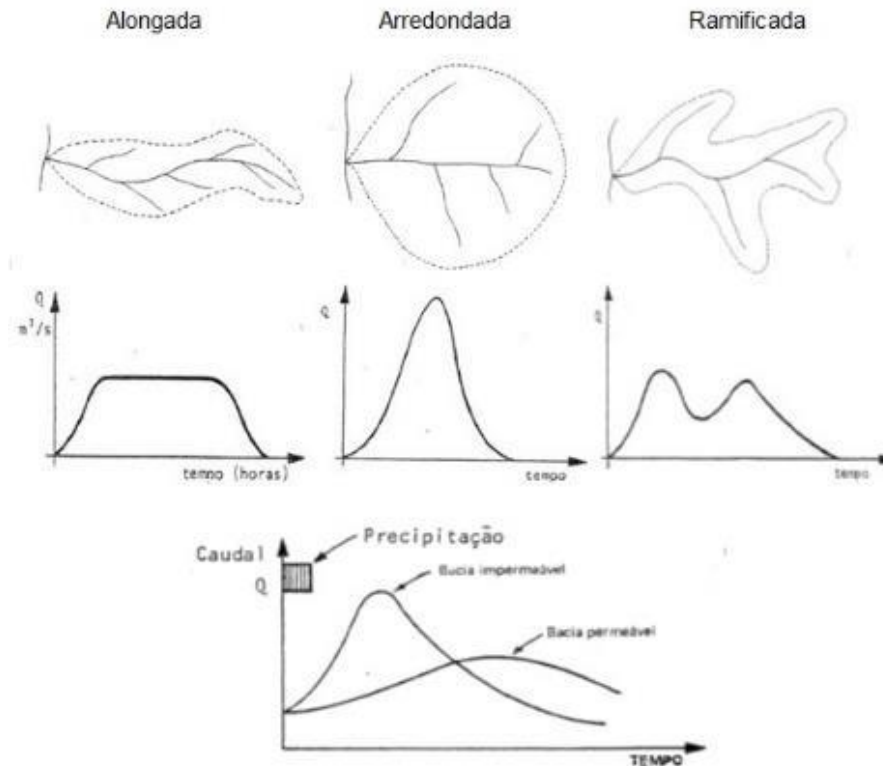


Figura 8 – Influência das características geométricas e geológicas das bacias hidrográficas na forma dos hidrogramas (Adaptado de Ribeiro, 1987)

Há dois outros dois conceitos hidrológicos muito importantes para a definição dos hidrogramas de cheia numa dada bacia contributiva:

- Tempo de concentração da partícula: corresponde ao tempo que a partícula de água cinematicamente mais afastada na bacia demora a chegar à secção de controlo. Este fator determina o tempo que demora a totalidade da área da bacia a contribuir para linha de água, ou no caso do meio urbano, para o sistema de drenagem.
- Duração crítica do evento de precipitação: quando a duração do evento de precipitação é igual ao tempo de concentração de uma dada bacia, diz-se que essa duração é crítica uma vez que irá promover a contribuição total da bacia.

A conjugação destes dois parâmetros é relevante para a conceção dos sistemas de drenagem, pois o seu dimensionamento é feito tendo em conta o caudal máximo (pico) que o sistema terá de escoar, para um dado período de retorno. Assim, para uma dada intensidade de precipitação, esse máximo apenas ocorrerá quando for atingido o tempo de concentração da bacia, ao passo que, para a mesma intensidade de precipitação, caso a duração da chuvada não ultrapasse o tempo de concentração, o caudal irá ser sempre inferior ao máximo.

Considerando a entrada dum sarjeta ou dum sumidouro como secção de controlo, a sua bacia de drenagem corresponderá à área drenada, constituída maioritariamente por faixas de rodagem e passeios, mas também pelas coberturas de edifícios que para ela contribuam. Este tipo de bacias são, usualmente, de área reduzida (muito inferiores às bacias hidrográficas), pouco permeáveis, com formas variáveis (arredondadas ou alongadas) mas e que favorecem a ocorrência de tempos de concentração reduzidos. A Figura 9 exemplifica uma possível área contributiva de uma sarjeta ou sumidouro em meio urbano.

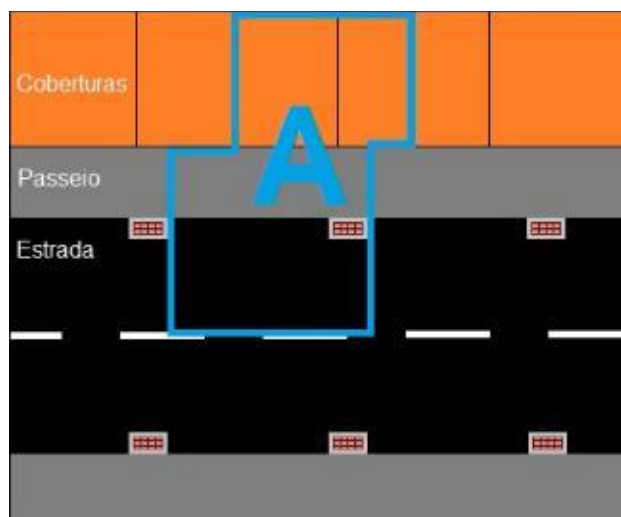


Figura 9 – Área contributiva dum sarjeta ou sumidouro num arruamento urbano

2.3 Gestão das águas pluviais

A gestão das águas pluviais é importante no controlo da poluição e do risco de inundações associadas às escorrências em superfícies impermeáveis. As dificuldades de gestão são mais exigentes em meio urbano, uma vez que os solos das cidades se têm tornado cada vez mais urbanizados/impermeáveis, para suprir as necessidades habitacionais e de serviços inerentes ao aumento da concentração da população em zonas urbanas. Dados os inconvenientes funcionais, ambientais e para a segurança rodoviária e pedonal inerentes a essas ocorrências, torna-se cada vez mais pertinente desenvolver novas técnicas e novos sistemas de drenagem que permitam solucionar os atuais problemas e enfrentar os desafios futuros e que se colocam à GAP num contexto de alterações climáticas.

2.3.1 Dinâmica demográfica nas cidades

Ao longo dos anos a população mundial tem vindo a aumentar e os estudos estatísticos realizados projetam que essa tendência de crescimento, mais acelerado nas cidades, irá manter-se, pelo menos, até ao final do século. Em apenas 70 anos (1950 a 2019) a população mundial aumentou 5,2 mil

milhões de pessoas, perfazendo, atualmente, um total de 7,7 mil milhões. As projeções apontam para um total de 10,9 mil milhões de habitantes, em 2100. Apesar deste aumento, a taxa de crescimento populacional tem vindo a diminuir desde 1990, encontrando-se agora em cerca de 1%. Deste modo, as projeções indicam que a população irá estabilizar no início do próximo século (Figura 10) (Roser, Ritchie & Ortiz-Ospina, 2019; UN DESA, 2019).

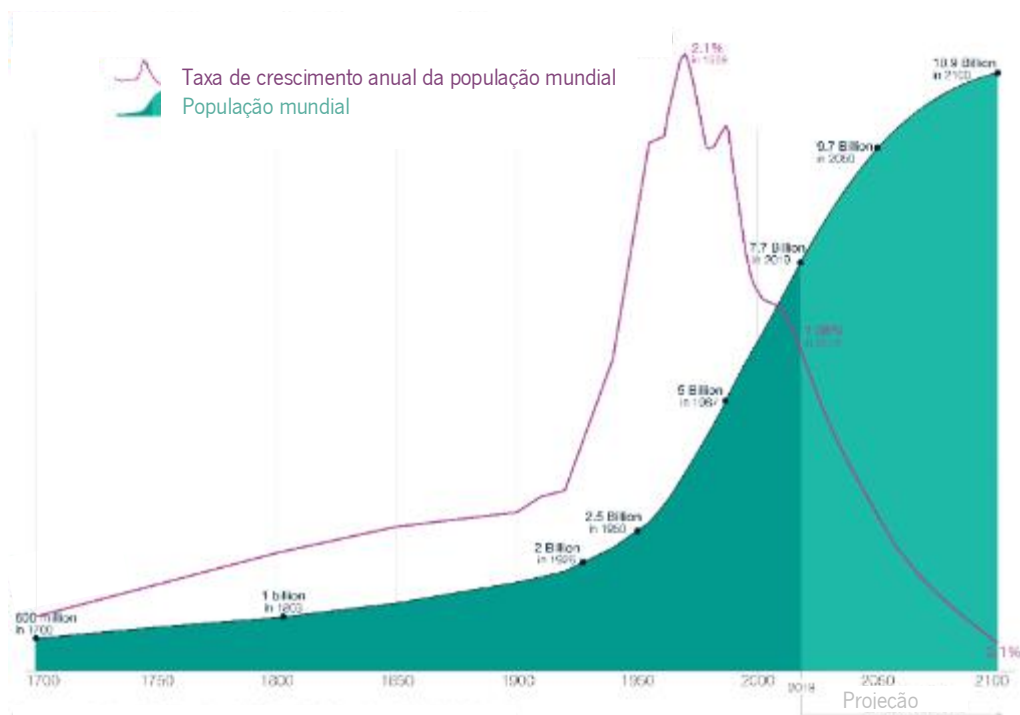


Figura 10 – Crescimento da população mundial e taxa de crescimento da população de 1700 a 2100 (adaptado de Roser et al., 2019)

Com o crescimento exponencial da população, surge o aumento do número de cidades, bem como a crescente migração das populações para esses centros urbanos. Todavia, a distribuição das populações em áreas urbanas e rurais difere de continente para continente, uma vez que os países menos desenvolvidos têm as suas populações a viver em meios rurais, ao passo que as populações dos países mais desenvolvidos se encontram maioritariamente em meios urbanos.

Dados recolhidos e analisados pela ONU apontam para uma tendência de crescimento nas populações que passam a residir em espaços urbanos (Figura 11). Em 1950, 70% da população mundial vivia em zonas rurais e em 2007, pela primeira vez na história, a população urbana ultrapassou a população rural e desde então, o número de habitantes urbanos tem crescido mais rápido que o número habitantes rurais. Em 2018, 55% da população mundial residia em cidades e é esperado que em 2050 68% da população global resida em territórios urbanos (UN DESA, 2018).

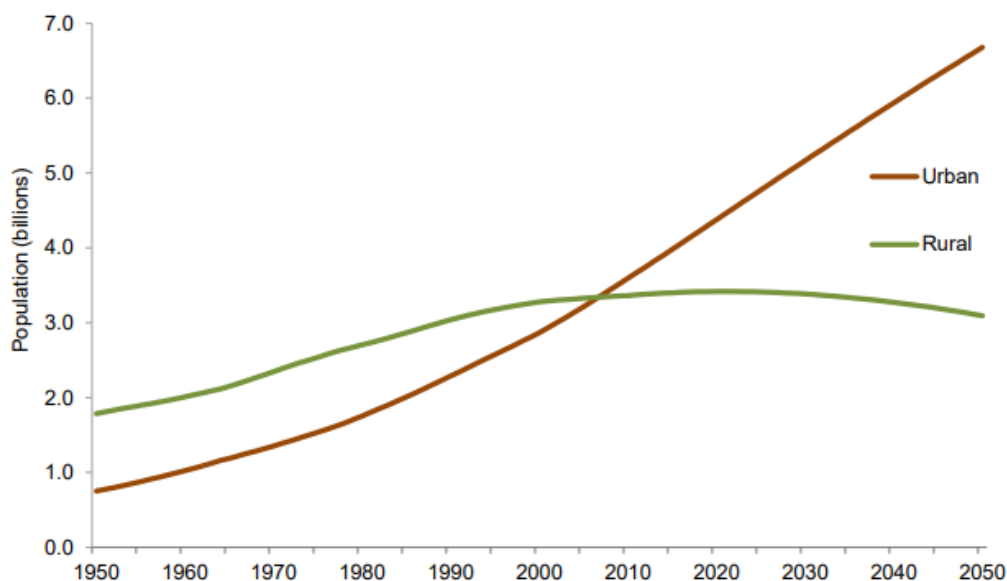


Figura 11 – Evolução da distribuição da população mundial em meios urbanos e rurais (UN DESA, 2018)

Assim, existe uma necessidade cada vez maior de se alargarem as fronteiras do espaço urbano, ocupando os espaços naturais existentes. Enquanto que essa expansão ocorre, devido à rápida urbanização, espaços verdes são perdidos em detrimento de estruturas e infraestruturas de betão e asfalto (Hoang & Fenner, 2016). À medida que as cidades vão concentrando mais pessoas no seu espaço, também concentram e transformam mais energia, materiais e lixo nas áreas urbanas (Pataki et al., 2011). Estes fatores representam uma panóplia de desafios para as cidades, que incluem a disponibilidade de recursos e o equilíbrio do crescimento económico, como também a preservação de espaços verdes urbanos e, conseqüentemente, da saúde humana e do bem-estar dos seus habitantes (Tzoulas et al., 2007).

2.3.2 Consequências da impermeabilização dos solos urbanos

A única forma de renovação da água dos rios, lagos, lençóis freáticos, entre outros, é através da precipitação (Wagner, Krauze, & Zalewski, 2013). Contudo, nos meios urbanos as estradas e passeios, assim como todo o edificado construído, rompem com a hidrologia natural por se tratarem de superfícies impermeáveis de asfalto e betão, tratando a água pluvial como resíduo (algo a ser gerido) (NACTO, 2017). Além disso, outro dos problemas centrais dos meios urbanos prende-se com a utilização de sistemas de drenagem que não permitem a penetração da água da chuva no solo (Semadeni-Davies, Hernebring, Svensson, & Gustafsson, 2008). Ou seja, o objetivo dos centros urbanos tem sido retirar a água pluvial, da forma mais rápida e eficaz possível (Goulden, Portman, Carmon, & Alon-Mozes, 2018), sendo que as soluções mais tradicionais estão longe de ser as ideais.

As superfícies impermeáveis dos meios urbanos provocam uma diminuição quer do tempo de retenção da água nos solos, quer do tempo de concentração das bacias, originando maiores volumes de água afluentes aos sistemas de drenagem num dado tempo, sendo que esses fatores aumentam a possibilidade de transbordamento (*overflow*) nos sistemas de drenagem (Ilustração 1). Nos dias de hoje, os cidadãos e os decisores políticos estão cada vez mais conscientes da necessidade cada vez maior de levar e devolver a natureza às cidades e de procurar outros tipos de soluções de drenagem de águas pluviais (Farrugia, Hudson, & McCulloch, 2013).



Ilustração 1 - Transbordamentos em redes de drenagem (caixa de visita e valeta)

- Qualidade da água e degradação dos meios hídricos

A pressão exercida sobre os meios hídricos tem vindo a aumentar ao longo dos anos. Os consumos e as descargas (quer pelo aumento da população, quer pelo crescimento da indústria) são cada vez maiores, ao passo que as fontes de captação de água doce (rios, lagos, albufeiras, etc.) são parcas, criando assim uma dicotomia muito acentuada entre a oferta e a procura (Vieira, 2019). Este problema acentua-se atendendo que os meios de captação de água são, usualmente, os mesmos que são utilizados para as descargas (tendo em conta as diferentes legislações de cada país, se existirem).

As atividades antropogénicas em zonas urbanas geram poluentes nas superfícies das suas bacias de drenagem que são transportados pelas escorrências de águas pluviais para os SDT (Ilustração 2) e, conseqüentemente, para os meios hídricos (Barbosa, Fernandes, & David, 2012). Aliás, está demonstrado que a poluição resultante das escorrências urbanas é uma das principais causas da deterioração dos meios hídricos que as recebem (Cohen, Field, Tafuri, & Ports, 2012; Lee & Bang, 2000), uma vez que transportam diversos poluentes tais como sólidos suspensos, metais pesados, hidrocarbonetos, óleos e gorduras, entre outros (Barbosa et al., 2011).



Ilustração 2 – Escorrência urbana com carga poluente (fonte: Alaska Department of Environmental Conservation, 2018)

- Impactos na saúde pública

A GAP tem grande influência na preservação da saúde pública, pois os SDT estão demasiado expostos a inundações, o que afeta o conforto, saúde e estabilidade das populações e do seu quotidiano (Dong et al., 2017; Odefey et al., 2012); a impermeabilização das cidades faz aumentar as temperaturas dos centros urbanos, causando e agravando alguns problemas de saúde (Fink, 2016; Gill et al., 2007; Zalewski & Wagner, 2009) e as escorrências das águas pluviais acumulam detritos e poluentes, provocando a degradação dos meios hídricos, com impacto para a saúde pública (Barbosa et al., 2012; Jacobson, 2011; Lee & Bang, 2000). Os problemas enunciados podem ser mitigados através de uma GAP mais sustentável e que integre a interação dos sistemas de drenagem com os meios hídricos urbanos recetores das suas descargas.

O aumento das temperaturas nos meios urbanos faz com que as cidades e espaços urbanos sejam os locais onde o risco para a saúde das populações será mais elevado, uma vez que é neste contexto que se encontra a maior parte dessa população assim como é onde se localiza a maior percentagem do edificado e do solo impermeabilizado, criando e exacerbando os efeitos da ilha de calor (Fink, 2016; Gill et al., 2007).

Os efeitos de ilha de calor urbana, a baixa humidade e o aumento de poeiras e poluição no ar fazem com que as evidências de alergias e asma nas zonas urbanas tripliquem comparativamente com áreas suburbanas (Zalewski & Wagner, 2009). Além disso, a utilização de pavimentos impermeáveis aliados aos SDT, torna as cidades demasiado expostas às imprevisibilidades climáticas, que são cada vez mais intensas e frequentes devido às alterações climáticas (Demuzere et al., 2014).

Devido à intensificação dos eventos climáticos e à rigidez dos sistemas de drenagem (apenas permitem a drenagem até um caudal máximo, calculado para dados valores de intensidade e frequência de precipitação que podem não contabilizar a influência das alterações climáticas), os transbordamentos das redes de drenagem e consequentes inundações irão ser cada vez mais frequentes nos meios urbanizados (Dong et al., 2017). Estas inundações terão efeitos diretos no quotidiano das populações, acarretando riscos para a vida humana e causando prejuízos avultados, sendo que também terão um impacto muito negativo nos meios hídricos, com consequências indiretas na população (Hoang & Fenner, 2016).

Nos anos mais recentes tem-se vindo a dar ênfase aos problemas causados pelas águas residuais, quer ao nível de descargas ilegais, quer ao nível da qualidade do efluente tratado e das suas consequências nos meios hídricos, sendo negligenciada e desprezada a água proveniente da chuva. Se por um lado as águas pluviais têm um potencial enorme de aproveitamento por terem origem natural (Foster et al., 2011), podendo ser captadas e aplicadas no seu estado natural em múltiplas tarefas, por outro lado as escorrências urbanas (e.g. de estradas, passeios, etc.) geram caudais elevados e maiores cargas poluentes (e.g. metais pesados, óleos, entre outros) resultantes, essencialmente, da circulação de veículos (Barbosa et al., 2012). Isto prova que as alterações na hidrologia “natural” e a degradação da qualidade da água são ambas extremamente prejudiciais, tanto para os meio recetores, como, consequentemente, para a saúde pública (Payne et al., 2015).

Existe uma estreita relação entre a qualidade da água, para os seus diferentes usos, e a saúde pública, não só em termos dos consumos diretos (e.g. ingestão), como também na propagação de doenças por contacto ou inalação de águas contaminadas. Estes problemas podem estender-se ainda a riscos de contaminação de alimentos (e.g. metais pesados, vírus, etc.), que serão posteriormente consumidos pelas populações, podendo incorrer em graves problemas para a sua saúde (Macy & Quick, 2009; WHO, 2019).

2.4 Sistemas verdes de drenagem urbana

Considerando o exposto anteriormente, tornou-se cada vez mais premente o desenvolvimento de novas soluções de mitigação e adaptação às alterações climáticas, incluindo as relativas à gestão sustentável de águas pluviais em meio urbano. A solução para alguns dos problemas evidenciados poderá passar por uma progressiva renaturalização do ambiente urbano construído, requerendo uma nova abordagem, mais naturalista, que contemple a implementação de SVDU nas cidades. Estes sistemas constituem uma

solução alternativa para novos empreendimentos, mas também podem ser executados nos sistemas de drenagem existentes através duma reorganização e adaptação dos locais que apresentem recorrentemente debilidades (acumulação de água ou inundação), de modo a complementar as a insuficiente capacidade dos SDT.

As superfícies verdes dos SVDU devolvem a natureza aos meios urbanos e providenciam múltiplos benefícios na manutenção e restauro de ecossistemas e suas funções, promovendo a biodiversidade e uma convivência mais harmoniosa entre os espaços urbanos e naturais. Além disso, reduzem a desfragmentação de ecossistemas, possibilitam a manutenção da integridade de alguns habitats naturais e mitigam os efeitos do uso insustentável do solo dentro e fora das zonas definidas na rede Natura 2000.(Breuste, Artmann, Li, & Xie, 2015; Karhu, 2011; Tzoulas et al., 2007). No que concerne ao combate às alterações climáticas, os SVDU surgem, essencialmente, como uma solução de adaptação, mas podem, também, contribuir para a redução da emissão de GEE, nomeadamente o dióxido de carbono, constituindo também uma solução de mitigação das mesmas.

2.4.1 Tipos, composição e funcionamento

Os SVDU têm como princípio base a drenagem das escorrências criadas pelos eventos pluviosos, com o objetivo de reduzir significativamente os caudais máximos afluentes aos coletores dos sistemas de drenagem de águas pluviais, através do amortecimento e atraso dos picos dos hidrogramas de cada contribuição/ligação, de modo a mitigar o risco de inundações e de transbordamento dos coletores (Comissão Europeia, 2015f).

Estes sistemas podem ter inúmeras aplicações, formas e composições dependendo da finalidade a que se destinam. Desta forma, o funcionamento dos sistemas irá depender do local de aplicação, do tipo de SVDU implementado e da sua composição em que as suas características devem ser adaptadas consoante as necessidades.

Os SVDU têm como uma das suas principais características a versatilidade e são genericamente conceptualizados como uma rede interconectada de estruturas de drenagem que utilizam meios naturais para efetuar essa drenagem (DDOT, 2014b). Sintetizando, estas estruturas têm, na sua génese, três grandes objetivos que lhe conferem o cunho de uma solução integrada e sustentável de GAP : a retenção e amortecimento hidráulicos; a remoção de poluentes através da utilização de plantas e outros materiais com esse efeito e a promoção de espaços verdes e de outras áreas permeáveis nos meios urbanos (NACTO, 2017; Payne et al., 2015).

A composição dos SVDU, apesar de variar consoante os as necessidades e características do local de instalação, apresenta características transversais à maioria dos sistemas (NACTO, 2017; Payne et al., 2015):

- A recolha dos escoamentos superficiais é feita através de entradas desniveladas, cortes nos lancis e/ou canais de drenagem com e sem grelha;
- Utilização de meios porosos com permeabilidade suficiente para permitir a infiltração da água e com capacidade para acolher plantas, arbustos e outros elementos vegetais;
- Presença de plantas, arbustos e outras espécies vegetais autóctones (evitando espécies invasoras), preferencialmente com capacidade de retenção de poluentes dissolvidos na água, muito importante no caso de escorrências rodoviárias;
- Inclusão de um dispositivo de descarga de emergência (similar a um *trop-plein*), ligado diretamente ao sistema de drenagem, para situações em que a capacidade de infiltração do meio poroso seja ultrapassada (casos de eventos de precipitação muito intensa);
- Os materiais utilizados nos meios porosos devem ser estudados previamente, uma vez que devem ter uma capacidade de infiltração suficiente para acomodar a gama de caudais projetada para o local em questão;
- É usual a aplicação de uma zona de pré-assentamento de sedimentos e detritos adjacente à(s) entrada(s) dos sistemas (reduzem a erosão da superfície do meio poroso junto às entradas e acumulam a maior parte dos resíduos numa zona específica, facilitando operações de limpeza).

Nos Quadros 1 a 3 apresenta-se um resumo das suas características e funcionalidades de diversos tipos de SVDU, resultante da pesquisa bibliográfica efetuada (CE, 2010; DDOT, 2014b, 2014a; Foster et al., 2011; NACTO, 2017; Payne et al., 2015; PWD, 2018; State of Green, 2015; Vermont Green Infrastructure Initiative, 2017).

No Anexo I encontram-se imagens de cada tipo de sistemas mencionados, para maior facilidade de visualização dessas características.

Quadro 1 - Características e funcionamento de canteiros de biorretenção e de biofiltração e caldeiras de árvores

Tipo	Características e funcionamento	Observações
<i>Canteiros de biorretenção e canteiros de biofiltração (bioretention planter e biofiltration planter)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Usualmente colocados junto a estradas, atuando como “sarjetas”; ▪ Podem ter várias formas (aproximadamente retangulares ou trapezoidais), podendo ser ajustados às características do local; ▪ A diferença entre os dois tipos de canteiros é relativa à infiltração da água no solo, tendo em conta as condicionantes do local (proximidade de fundações de edifícios, tipo de solo nativo, etc.). Ambos promovem a permeação da água nos respetivos meios porosos, contudo os canteiros de biofiltração (CB) não permitem a infiltração da água nos solos subadjacentes, ao passo que os canteiros de biorretenção permitem essa infiltração. Assim sendo, os CB utilizam drenos perfurados com ligação a coletores para fazer escoar a água; ▪ Promovem a remoção de poluentes através de plantas e meios porosos com esse efeito; ▪ Aumentam a percentagem de área permeável nos meios urbanos; ▪ Reduzem ou eliminam os efeitos da ilha de calor urbana e aumentam a humidade local; ▪ Mitigam a desfragmentação de ecossistemas, recuperando ou conservando importantes funções; ▪ Promovem a interação frequente das populações com espaços verdes. 	<p>Este tipo de sistemas é dos mais utilizados pela sua versatilidade ao nível da forma, permitindo a sua utilização no centro das cidades em diversos espaços, como por exemplo, na zona exterior de passeios, criação de extensões da borda dos passeios, rotundas, ilhéus separadores e defletores, entre outros. Pelo facto de serem implementados de forma adjacente a estradas e passeios, constituem uma importante barreira para os poluentes provenientes da circulação de carros (metais pesados, entre outros) e/ou da lavagem de passeios e fachadas de edifícios.</p>
<i>Árvores e suas caldeiras (tree pit ou tree well)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumentam a percentagem de zonas permeáveis nos meios urbanos; ▪ Utilizam solos estudados para infiltrar e filtrar as escorrências; ▪ As árvores reduzem o efeito de ilha de calor urbano através da criação de sombra; ▪ Promovem a produção de oxigénio, aumentam a humidade através da transpiração e retêm dióxido de carbono; 	<p>Estes sistemas são particularmente úteis em espaços urbanos reduzidos. Estas estruturas são bastante comuns, mas a maior parte delas apenas existe para sustentar a árvore nela colocada. Com a aplicação de solos estudados, este tipo de estruturas podem tornar-se uma mais-valia no controlo de inundações urbanas.</p>

Quadro 2 - Características e funcionamento de valas de biorretenção, pavimentos permeáveis e coberturas verdes

Tipo	Características e funcionamento	Observações
Valas de biorretenção (<i>bioretention swale</i> ou <i>bioswales</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Depressões no terreno colocadas de forma contígua e longitudinal a estradas e passeios, podendo também ser colocadas em separadores centrais de estradas; ▪ Seguem o traçado das vias onde são colocadas; ▪ A água recolhida escoar na direção da inclinação da vala (que é usualmente a mesma da estrada onde está inserida) formando um escoamento de superfície livre; ▪ Permitem a infiltração da água ao longo do traçado, bem como a evaporação da remanescente; ▪ Fazem a remoção de poluentes através de plantas e meios porosos destinados a esse efeito; ▪ Aumentam a percentagem de área permeável nos meios urbanos; ▪ Reduzem ou eliminam os efeitos da ilha de calor urbana e aumentam a humidade local; ▪ Mitigam a desfragmentação de ecossistemas, recuperando ou conservando importantes funções; ▪ Promovem a interação frequente das populações com espaços verdes. 	<p>As valas de biorretenção têm maior aplicabilidade em avenidas relativamente extensas e noutros arruamentos compridos, em zonas de tráfego reduzido e baixa circulação de pessoas (zonas suburbanas, bairros residenciais, etc.) uma vez que a separação vertical entre os sistemas e as estradas e passeios é reduzida ou inexistente. Este tipo de sistemas pode ainda ser aplicado em separadores centrais de estradas, rotundas extensas e outras zonas de dimensão considerável. Estes sistemas são semelhantes aos canteiros de biorretenção, diferenciando-se essencialmente no seu comprimento e têm a capacidade de acumular grandes volumes de água devido à sua dimensão.</p>
Pavimentos permeáveis	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumentam a percentagem de zonas permeáveis; ▪ Permitem a infiltração da água da chuva em áreas onde é necessário manter a rigidez da superfície (estradas, caminhos, passeios, parques de estacionamento, etc.); ▪ A drenagem da água permeada pode ser feita através de sistemas convencionais ou através da infiltração da água nos solos subadjacentes; ▪ Podem acomodar técnicas de tratamento das escorrências através da filtração. 	<p>Tal como as coberturas verdes, também os pavimentos permeáveis são um tipo particular de SVDU. Esta solução não utiliza um coberto vegetal ou estruturas verdes, como é habitual nos SVDU. Contudo, são considerados SVDU porque promovem a infiltração da escorrência nos solos subadjacentes ao invés de a manter à superfície.</p>
Coberturas verdes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Promovem diretamente o atraso do escoamento na cobertura dos edifícios; ▪ O volume total do escoamento é inferior ao de uma cobertura convencional; ▪ Isolam termicamente a cobertura dos edifícios, reduzindo a temperatura interior; ▪ Podem fornecer habitat a algumas espécies de insetos e de aves. 	<p>As coberturas verdes constituem um tipo particular de SVDU, uma vez que não captam nem efetuam o tratamento da escorrência urbana. Contudo a sua contribuição no atraso produzido e na redução do volume do escoamento podem ser importantes em determinadas situações.</p>

Quadro 3 - Características e funcionamento de jardins de chuva e zonas húmidas

Tipo	Características e funcionamento	Observações
<i>Jardins de chuva (rain gardens)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Jardins destinados a receber, acumular e a tratar as escorrências urbanas e suburbanas; ▪ Controlam as escorrências através da interceção e infiltração das escorrências e consequente evaporação e transpiração da água armazenada; ▪ Acomodam diversas espécies de plantas, incluindo as que removem poluentes; ▪ Podem proporcionar habitats para diversas espécies animais; ▪ Promovem a biodiversidade e reduzem a desfragmentação dos ecossistemas; ▪ Reduzem a temperatura e os efeitos de ilha de calor e aumentam a humidade local (efeito de microclima) e melhoram a qualidade da água drenada. 	<p>Estes sistemas são jardins destinados a recolher, acumular e a tratar as escorrências. São geralmente integrados em espaços verdes existentes com alguma dimensão (tais como parques e jardins) através dum rearranjo da estrutura natural existente.</p>
<i>Zonas húmidas (wetlands)</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proporcionam a presença de ambientes aquáticos ou semiaquáticos nos meios onde se inserem e constituem habitats de espécies aquáticas de plantas e animais, reduzindo a desfragmentação de ecossistemas e promovendo tanto a biodiversidade aquática como de outros géneros nos meios urbanos; ▪ São zonas com elevados níveis de evapotranspiração por terem uma elevada densidade de vegetação e presença constante de água; ▪ Aumentam a humidade local produzindo efeitos de microclima; ▪ Controlam as escorrências através da interceção, acumulação e infiltração lenta das escorrências; ▪ Melhoram a qualidade da água drenada e reduzem os efeitos de ilha de calor e a temperatura geral do local. 	<p>Constituem depressões de pouca profundidade (charcos rasos) em terrenos amplos que são inundados aquando da ocorrência de eventos de precipitação, mantendo o volume durante um período de tempo considerável. Necessitam de grandes quantidades de espaço e, por isso, são mais recorrentes em zonas suburbanas.</p>

2.4.2 Vantagens, inconvenientes, condicionantes e limitações

As inovações e o desenvolvimento de soluções têm como objetivo dar resposta a um determinado problema ou melhorar as condições e fatores existentes numa determinada área. Os SVDU são uma solução inovadora que tem como objetivo melhorar as condições existentes nos sistemas de drenagem dos meios urbanos. Apesar de se constituírem como uma alternativa ou um complemento viável aos sistemas de drenagem tradicionais, não são uma solução infalível e, como tal, acarretam algumas limitações e condicionantes.

Nos Quadros 4 e 5 são expostas as vantagens, inconvenientes, condicionantes e limitações sob a forma de uma análise *SWOT* (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*).

Quadro 4 – Análise *SWOT* aos SVDU: pontos fortes e pontos fracos

Pontos fortes (<i>Strengths</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumento dos tempos de retenção das escorrências urbanas (Payne et al., 2015); ▪ Tratamento das escorrências urbanas e melhoria da qualidade da água em espaços urbanos (Demuzere et al., 2014); ▪ Solução de mitigação e adaptação às alterações climáticas (Dong et al., 2017); ▪ Melhoria da qualidade do ar e criação de oxigénio nos espaços urbanos (Fink, 2016; Gill et al., 2007; Laboratório da Paisagem, 2019a; Wagner et al., 2013); ▪ Aumento da resiliência dos meios urbanos face aos efeitos causados por eventos meteorológicos extremos (Laboratório da Paisagem, 2019a; Payne et al., 2015); ▪ Redução da temperatura e do efeito da ilha de calor, fornecimento de sombra e aumento da humidade no espaço urbano (Fink, 2016; Wagner et al., 2013); ▪ Os SVDU possuem uma melhor relação custo-benefício comparativamente com os sistemas de drenagem convencionais, tanto ao nível da conceção como na gestão, monitorização e manutenção dos sistemas (Foster et al., 2011; Laboratório da Paisagem, 2019a; Odefey et al., 2012); ▪ Restauro de processos ecológicos e hidrológicos naturais nos meios urbanos (Krauze & Wagner, 2019); ▪ Redução ou eliminação dos transbordamentos das redes de drenagem (Lucas & Sample, 2015).
Pontos fracos (<i>Weaknesses</i>)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Degradação dos SVDU pelos maus usos e descuidos da população e consequentes falhas na sua funcionalidade e mau aspeto visual (Payne et al., 2015); ▪ Falta de espaço nos meios urbanos para a implementação das soluções adequadas à necessidade do local; ▪ Necessidade de manutenção constante (Payne et al., 2015); ▪ Conceção de SVDU sem estudos prévios e/ou com falta de <i>know-how</i>.

Quadro 5 – Análise *SWOT* aos SVDU: oportunidades e ameaças

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Oportunidades (<i>Opportunities</i>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Consciencialização das populações para a preservação da natureza e aumento da sensibilidade ambiental (CE, 2013); ▪ Redução da desfragmentação de ecossistemas e promoção da biodiversidade nos meios urbanos, com a possibilidade de acolhimento de variadas espécies animais e de plantas (CE, 2010); ▪ Remoção de GEE da atmosfera, com incidência na captura destes gases nos meios urbanos (Demuzere et al., 2014; Fink, 2016); ▪ Integração da ecologia nos espaços urbanos (Hoang & Fenner, 2016); ▪ Melhoria da saúde das populações, com maior incidência a nível psicológico, mas também a nível físico (Demuzere et al., 2014; Fink, 2016; Tzoulas et al., 2007); ▪ Melhoria das competências sociais e do sentimento de responsabilidade cívica (Demuzere et al., 2014); ▪ Redução dos custos e dos gastos de energia na climatização dos edifícios através da implementação de coberturas verdes (Odefey et al., 2012); ▪ Transformação do ambiente urbano em algo mais diversificado e mais aprazíveis às populações (Laboratório da Paisagem, 2019a); ▪ Promoção da economia circular e do conceito de cidades inteligentes (<i>smart cities</i>) através dos SVDU (Crnčević, Tubić, & Bakić, 2017; Krauze & Wagner, 2019).
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Ameaças (<i>Threats</i>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ As entidades governamentais continuam a apostar em soluções de larga escala do ponto de vista tecnológico, ao invés de promover soluções emergentes e sustentáveis (Marlow, Moglia, Cook, & Beale, 2013); ▪ Ceticismo das entidades governamentais e das populações quanto à funcionalidade dos SVDU (Dhakal & Chevalier, 2017; Marlow et al., 2013); ▪ A falta de <i>know-how</i> inicial nas primeiras conceções podem conduzir a sistemas fracos o que poderá levar ao abandono destes sistemas (Marlow et al., 2013); ▪ Questões financeiras (Marlow et al., 2013); ▪ A falta de manutenção dos SVDU, quer por falta de <i>know-how</i>, quer por questões financeiras, pode levar os sistemas ao mau funcionamento (Dhakal & Chevalier, 2017); ▪ Os materiais que serão utilizados nos meios filtrantes dos SVDU devem ser previamente estudados e/ou analisados por forma a evitar o mau funcionamento dos sistemas.

2.4.3 Análise técnico-económica comparativa entre os SVDU e os SDT

- Sistemas de drenagem tradicionais (infraestruturas cinzentas)

Os SDT têm sido os mais utilizados pela sua simplicidade de funções e por resolverem com alguma eficácia o principal problema das urbanizações: escoar rapidamente as águas pluviais de forma a evitar inundações. De um modo geral, estes sistemas são em tudo similares aos sistemas que eram utilizados na Roma Antiga, sendo que não sofreram uma evolução significativa desde então. Contudo, a escala dos desafios colocados aos sistemas de drenagem nos dias de hoje é bastante maior e como tal, estes

sistemas têm revelado cada vez mais problemas ora a nível económico, ora a nível ambiental e social (Odefey et al., 2012).

Os meios urbanos com infraestruturas de saneamento básico mais recentes já possuem sistemas de drenagem separativos, ou seja, dispõem de duas redes de drenagem distintas, uma para as águas residuais e outra para as águas pluviais (Figura 12), embora, em centros urbanos mais antigos, raramente esses sistemas são integralmente separativos, havendo trechos em que tal ainda não acontece, numa coexistência que os tornam numa rede mista de drenagem.

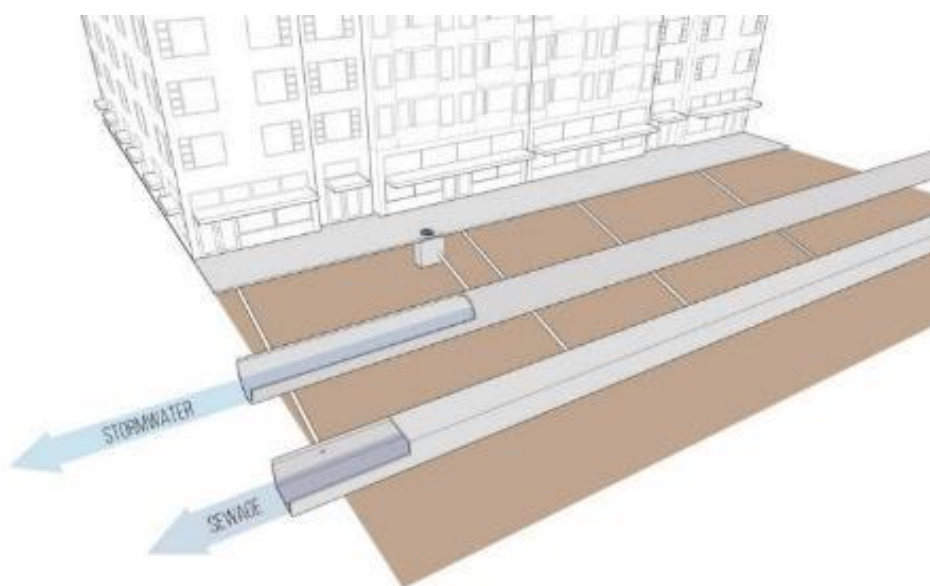


Figura 12 – Sistema de drenagem separativo (fonte: NACTO, 2017)

Se para as águas residuais o dimensionamento das redes é feito com menor aleatoriedade e incerteza, através dos caudais das descargas das contribuições estimadas para cada uso da água (doméstico, industrial, equipamentos coletivos), num meio urbano demograficamente estável, o dimensionamento das redes de drenagem pluvial está associado a uma elevada incerteza, uma vez que os fenómenos de precipitação são aleatórios em termos de ocorrência e de intensidade, originando grandes amplitudes de caudal durante o seu funcionamento.

Quanto às redes unitárias (drenagem conjunta de águas pluviais e residuais) a variabilidade dos fenómenos de precipitação mantem-se, mas acresce o facto de a rede já ter um caudal contínuo de águas residuais (Figura 13), aumentando os riscos de situações de sobrecarga na rede. Estas sobrecargas podem originar descargas de tempestade e/ou transbordamentos, que, nestas redes, são particularmente preocupantes, pois podem provocar graves problemas de poluição e de saúde pública, ao derramar águas residuais (ainda que diluídas) na via pública e em meios hídricos urbanos sem

tratamento prévio (Cohen et al., 2012). A possibilidade de recorrência destes eventos perigosos, vem acentuar a percepção de que o conceito de infraestruturas cinzentas está cada vez mais ultrapassado e da necessidade de desenvolvimento de políticas e estratégias de médio prazo para a implementação de soluções de drenagem urbana inovadoras e mais sustentáveis (Chini et al., 2017).

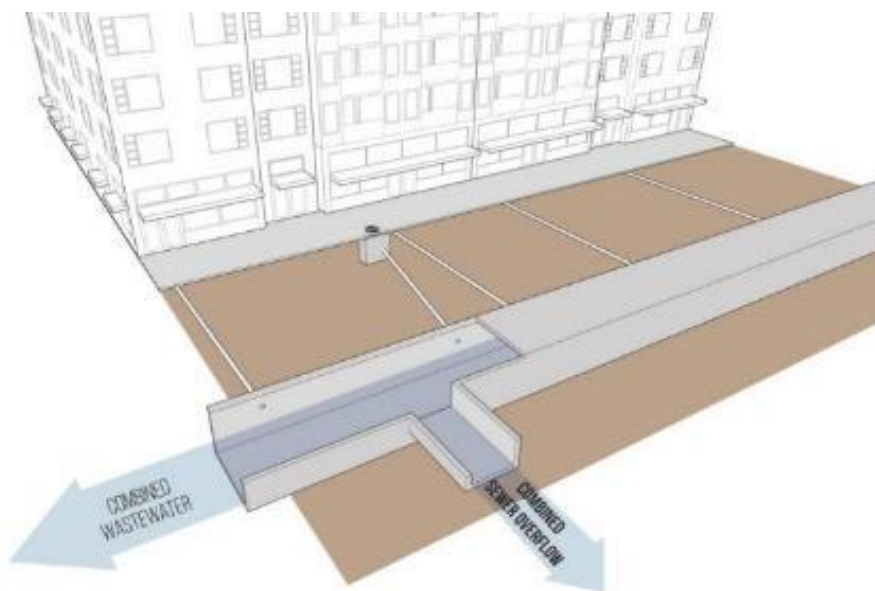


Figura 13 – Sistema de drenagem unitário (fonte: NACTO, 2017)

- SVDU como alternativa inovadora e mais sustentável

Os SVDU podem vir a resolver problemas relacionados com os SDT, uma vez que constituem uma solução de drenagem de águas pluviais resiliente e economicamente viável, que providencia às comunidades e ao meio ambiente inúmeros benefícios, pois são capazes de recuperar funções ecológicas e hidrológicas importantes (Dhakal & Chevalier, 2017; USEPA, 2019).

Ao contrário dos SDT, os SVDU, através do emprego de solos com naturezas e granulometrias estudadas, permitem a retenção e/ou atraso das escoaduras originadas pelos eventos de precipitação, prevenindo inundações nos meios urbanos (Payne et al., 2015), e potenciam a filtração de partículas em suspensão e a absorção/neutralização de substâncias tóxicas dissolvidas dessas escoaduras (purificação da água). Para além disso, as estruturas verdes dos SVDU (árvores e arbustos) oferecem diversos serviços naturais que protegem os meios urbanos e oferecem benefícios para a saúde e bem-estar das suas populações: promovem a renovação do ar, reduzem a temperatura nos centros urbanos e aumentam a humidade local (microclima) e diminuem o risco de alergias e asma. Tal decorre da produção de oxigénio, do efeito de ensombramento, do aumento da humidade nos espaços urbanos e da chegada de água menos poluída aos coletores do sistema de drenagem urbana (Gill et al., 2007; Wagner et al., 2013).

- Análise económica

Em termos económicos, os SVDU revelam-se mais vantajosos relativamente a comparações custo-benefício na maior parte dos casos (Dong et al., 2017; Nellemann & Corcoran, 2010). Os custos relacionados com a conceção e gestão dos SVDU são mais pequenos quando comparados com os sistemas tradicionais. Ademais, os SVDU podem acarretar ganhos económicos através de serviços ecossistémicos relacionados com a utilização e promoção de espaços naturais e, também, através da redução dos prejuízos associados a inundações e transbordamentos, recorrentes em redes de drenagem unitárias, e com a diminuição dos custos associados à climatização de edifícios urbanos (Demuzere et al., 2014; Fink, 2016; Foster et al., 2011).

Em termos de conceção, o investimento em equipamentos, materiais, instalação, manutenção e reparação é mais pequeno quando comparado com o mesmo tipo de investimento nas infraestruturas cinzentas (Odefey et al., 2012). Aliás, Cohen et al., (2012), na avaliação dum caso de estudo de uma combinação da infraestrutura cinzenta com SVDU, constataram que esta permitia uma poupança de 9,1% (35 milhões de dólares) na sua exploração, quando comparado com a utilização de apenas infraestrutura cinzenta.

No caso de redes de drenagem existentes, a instalação de SVDU como complemento dessa rede irá permitir o transporte de escorrências com uma gama de caudais maior, reduzindo os custos de exploração do sistema de drenagem, em contraponto com um SVDU concebido de raiz, que permitirá uma poupança nos custos de construção da rede, ao permitir, por exemplo, adotar coletores com menores diâmetros.

Se aos custos de construção e exploração forem adicionados os custos advindos de prejuízos provocados por eventos climáticos extremos, tais como chuvas intensas e secas, e outros custos (sociais e ambientais) relacionados com a preservação de infraestruturas, a regulação térmica de edifícios e a conservação de ecossistemas, a análise comparativa de custo-benefício favorecerá, claramente, a opção pelos SVDU.

- Na UE, entre 2002 e 2012, diversos eventos catastróficos provocaram cerca de 80000 mortos e geraram perdas económicas a rondar os 95 mil milhões de euros, sendo que a maioria das mortes foi causada por temperaturas extremas e 40% dos danos foi causado por inundações (em 2015 os custos associados a inundações fluviais situavam-se em 5,5 mil milhões de euros) (CE, 2015f);

- A *Federal Emergency Management Agency* (FEMA), dos Estados Unidos da América (EUA), estimou que 25% dos mil milhões de dólares anuais gastos em reparações de danos provocados por inundações, estão associados a inundações com origem nas escorrências urbanas (Odefey et al., 2012);
- Em *Fairfax County* (Virgínia, EUA) foi estimado que, através do *Urban Tree Coverage Project*, 1088km² de cobertura de árvores geram cerca de 6 mil milhões de dólares por ano em serviços ecossistémicos que englobam a qualidade do ar, a conservação de energia e a gestão de escorrências urbanas (Fink, 2016);
- A utilização de coberturas verdes (e também de fachadas verdes) provoca uma redução da temperatura interior dos edifícios, reduzindo os custos associados à utilização de equipamentos de refrigeração entre 32% e 100% (Demuzere et al., 2014);
- O *New York City's 2010 Green Infrastructure Plan* aponta para uma redução de custos associados com a gestão da drenagem na ordem dos 2,4 mil milhões de dólares em 20 anos. O mesmo plano prevê que a redução de transbordamentos das redes mistas de drenagem, através da implementação de SVDU, custe menos 1,5 mil milhões de dólares comparativamente com as soluções tradicionais (Foster et al., 2011);
- Os investimentos em SVDU têm normalmente um retorno elevado, sendo típico obterem-se relações custo-benefício na ordem de 1 para 25 (Nellemann & Corcoran, 2010);
- Manutenção dos SVDU

A manutenção dos SVDU é uma das componentes mais importantes na sua gestão e exploração ao longo da vida útil do sistema. Apesar de serem sistemas bem mais complexos que os sistemas tradicionais, a manutenção dos SVDU tem semelhanças com a manutenção relativas à limpeza que é habitualmente realizada nos sistemas convencionais. As principais diferenças encontram-se nas operações de ajardinamento, sendo que estas são muito semelhantes às que são efetuadas em canteiros e jardins urbanos atualmente. Nos Quadros 6, 7 e 8 são apresentados alguns exemplos dos tipos de manutenção necessária para o bom funcionamento dos SVDU e as consequências no caso da sua inexistência (Payne et al., 2015).

Quadro 6 - Importância e tipo de manutenção dos SVDU: operações de limpeza

	Tipo de manutenção	Ilustração da falta de manutenção
Operações de limpeza	<p>Limpeza das entradas dos SVDU, particularmente dos que possuem entradas com grelhas, gradeamentos e orifícios (os detritos acumulados nas entradas não permitem ou dificultam a entrada das escorrências nos sistemas);</p>	
	<p>Limpeza das superfícies dos meios porosos dos SVDU (mau aspeto visual e possibilidade de ocorrerem problemas na distribuição e infiltração das escorrências nos meios porosos);</p>	
	<p>Limpeza das descargas de emergência (manter a funcionalidade destes elementos é essencial, especialmente no período húmido);</p>	

Quadro 7 – Importância e tipo de manutenção dos SVDU: operações de ajardinamento

	Tipo de manutenção	Ilustração da falta de manutenção
Operações de ajardinamento	<p>Revolver ou substituir periodicamente a camada superficial dos meios porosos (a acumulação de sedimentos à superfície pode constituir uma barreira à infiltração da água);</p>	
	<p>Recuperação da vitalidade ou substituição das plantas (a falta de plantas promove a erosão do meio poroso e compromete a eficiência do tratamento; a falta de vitalidade, a morte ou a pobre cobertura de plantas pode ser provocada por falta de água, pouca infiltração da água, velocidades elevadas junto na entrada da água ou pela falta de substrato vegetal);</p>	
	<p>Remoção de ervas daninhas (a presença de ervas daninhas causa mau aspecto visual e pode reduzir a eficácia do tratamento das escoaduras);</p>	

Quadro 8 - Importância e tipo de manutenção dos SVDU: operações de reparação

Tipo de manutenção		Ilustração da falta de manutenção
Operações de reparação	Reparação de danos causados pela circulação automóvel e pedestre e colocar proteções sempre que necessário (os impactos causados por automóveis e peões põem em causa a vitalidade das plantas e provocam a compactação do solo, reduzindo a infiltração);	
	Reparação de buracos e rasgos (comprometem a distribuição das escorrências pela superfície dos sistemas);	

2.4.4 Conceção dos SVDU: parâmetros e critérios de dimensionamento

Em 2012, Davis et al., (2012), reportaram que a conceção dos SVDU era, ainda, muito empírica, verificando-se que, passados 8 anos, a sua conceção continua sem uma definição mais sustentada dos parâmetros e/ou critérios de dimensionamento, existindo apenas recomendações em relação a alguns pormenores construtivos e operacionais dos sistemas, baseadas na experiência prática de alguns casos de estudo. Esta falta de informação pode ser explicada pelo facto destes sistemas terem uma grande variabilidade nas suas dimensões, nos materiais onde podem ser utilizados e nos locais que podem ser aplicados.

Os documentos que abordam a conceção dos SVDU são, normalmente, manuais desenvolvidos por entidades governativas ou instituições ligadas à implementação deste tipo de projetos. Na pesquisa bibliográfica efetuada foram analisados três desses manuais *Adoption Guidelines for Stormwater Biofiltration Systems* (2015), *Urban Street Stormwater Guide* (2017) e *Green Stormwater Infrastructure Planning & Design Manual* (2018). Nesses documentos encontra-se um rol de considerações gerais

aplicadas na concepção e implementação de alguns sistemas pioneiros e são descritos alguns critérios genéricos de dimensionamento empíricos que os autores consideram relevantes para o bom funcionamento dos sistemas.

Após uma análise aos documentos que abordam o dimensionamento dos SVDU, nomeadamente os CB, salientam-se as seguintes recomendações:

- Os SVDU “*devem ser dimensionados para recolher e infiltrar uma quantidade de água expectável, originada pela precipitação que cai numa área específica e durante um período de tempo específico*” (NACTO, 2017);
- Os locais onde os SVDU irão ser colocados devem ser estudados previamente. O clima do local irá influenciar a capacidade dos sistemas a implementar, bem como a escolha do meio filtrante e das plantas. Por sua vez, as inclinações transversais dos arruamentos devem confluir para os respetivos sistemas e o solo do local deve ser estudado para verificar sua capacidade de infiltração, para o caso de sistemas que promovam essa infiltração (Payne et al., 2015);
- A largura da estrutura deve ser ajustada ao contexto do local, mas suficiente para recolher o caudal pretendido e para manter a vitalidade das plantas (NACTO, 2017);
- O comprimento do sistema pode variar entre os 3 m e o comprimento total do arruamento onde está inserido, sendo influenciado pela inclinação ou pela capacidade de infiltração do meio filtrante (NACTO, 2017; Payne et al., 2015);
- A espessura das camadas do meio filtrante situa-se, aproximadamente, entre os 0,70 m e os 1,40 m e deve ser suficiente para produzir os efeitos pretendidos (amortecimento, atraso, retenção) face aos objetivos identificados para o local da instalação (NACTO, 2017; Payne et al., 2015);
- A profundidade a que encontra a superfície do meio poroso é variável e situa-se entre os 5 e os 30 cm. Para profundidades iguais ou superiores a 15 cm é aconselhada a colocação de vedações de proteção (NACTO, 2017; Payne et al., 2015);
- Em sistemas que promovem a infiltração no solo e que se encontram próximos de edifícios, coletores de drenagem e de outras estruturas com componente subterrânea, devem ser acauteladas proteções para encaminhar corretamente as infiltrações no solo. É aconselhada a impermeabilização da face lateral mais próxima da estrutura e, se necessário, parte da base do sistema (PWD, 2018).

2.4.5 Casos de estudo

No Quadros 9 apresentam-se sínteses dos casos de estudo analisados neste trabalho, com o intuito de se conhecerem os sistemas e formas de aplicação dos SVDU em diferentes projetos (europeus e norte-americanos), tendo em conta as diversas alternativas que este tipo de sistemas oferece. Esta síntese engloba projetos realizados na Europa e nos EUA. É de notar que é incluído o projeto do município de Guimarães, que se encontra em fase de estudo, e que impulsionou a realização deste trabalho de investigação. Os restantes projetos já se encontram concluídos ou estão em desenvolvimento por se tratar de programas de longo prazo.

Quadro 9 - Casos de estudo de projetos europeus e americanos de SVDU

Local	Designação	Tipo de SVDU	Bibliografia
Guimarães, Portugal	Sistemas Verdes Integrados de Retenção & Tratamento de Escorrências Urbanas Pluviais	Em fase de estudo.	(Laboratório da Paisagem, 2019a)
<i>Bagsværd</i> , Dinamarca	<i>Novo Nordisk Nature Park</i>	Jardim de chuva e coberturas verdes.	(State of Green, 2015)
Copenhaga, Dinamarca	<i>Copenhagen Climate-Resilient Neighbourhood strategy</i>		
<i>Lodz</i> , Polónia	<i>Strategy for Integrated Development: Lodz 2020+</i>	Zonas húmidas e jardins de chuva.	(Wagner et al., 2013; Zalewski & Wagner, 2009)
Chicago, EUA	<i>Cermak Road-Blue Island Avenue Sustainable Streetscape</i>	Valas de biorretenção, jardins de chuva, canteiros de biofiltração, canteiros de biorretenção e pavimentos permeáveis.	(NACTO, 2017)
Filadélfia, EUA	<i>Green City, Clean Waters</i>	Canteiros de biofiltração e biorretenção, valas de biorretenção, jardins de chuva e	(PWD, 2018)
<i>Kansas City</i> , EUA	<i>Kansas City's Overflow Control Program – Turkey Creek Basin</i>	Jardins de chuva.	(Cohen et al., 2012)
<i>Los Angeles</i> , EUA	<i>Ed P. Reyes River Greenway</i>	Valas de biorretenção e zona húmida.	(NACTO, 2017)
Nova Iorque, EUA	<i>NYC Green Infrastructure Program</i>	Canteiros de biorretenção e de biofiltração, valas de biorretenção e jardins de chuva.	(NYC DEP, 2017; NACTO, 2017)
<i>Paso Robles</i> , EUA	21 st Street Complete and Green Street Project	Vala de escoamento e de biorretenção.	(NACTO, 2017)
<i>Vermont</i> , EUA	<i>Green Infrastructure Collaborative</i>	Pavimentos permeáveis, caldeiras de árvores, valas de biorretenção, canteiros de biorretenção e biofiltração, coberturas verdes e zonas húmidas.	(Vermont Green Infrastructure Initiative, 2017)
<i>Washington D.C.</i> , EUA	<i>Sustainable DC Plan</i>	Pavimentos permeáveis, canteiros de biorretenção e biofiltração, valas de biorretenção e caldeiras de árvores.	(DDOT, 2014b; NACTO, 2017)

2.5 Incorporação dos SVDU noutras iniciativas institucionais

Os SVDU apresentam uma vertente ecológica, pelo que as suas principais funções englobam, além da regularização do caudal pluvial, a remoção de alguns poluentes das escorrências urbanas e a promoção de espaços verdes em meios urbanos. A referida versatilidade dos SVDU permite o emprego de diversos tipos e origens de materiais nos seus meios porosos, sem comprometer as funções dos mesmos, o que abre uma enorme oportunidade de promover a transformação de resíduos em constituintes desses sistemas.

Essa versatilidade permite a incorporação de ideias inovadoras, quer na vertente tecnológica, quer no âmbito da incorporação de materiais, novos ou reutilizados, com características operacionais potencialmente mais vantajosas em relação aos tradicionais (brita, areia), fomentando a sua inclusão em iniciativas e projetos institucionais associados a temáticas emergentes como a das cidades inteligentes (*smart cities*) e da economia circular, que a seguir se abordam.

2.5.1 Cidades inteligentes (*Smart cities*)

O rápido desenvolvimento urbano, aliado à crescente tendência de migração das populações rurais para as grandes cidades, traz novos desafios para os centros urbanos e expõe cada vez mais as suas falhas e debilidades, que até então estavam latentes. Esse aumento da população urbana, motivado pela procura constante de melhores condições de vida, origina uma enorme pressão sobre os sistemas e infraestruturas (hidráulicas, viárias, de telecomunicações, elétricas, etc.) e sobre os recursos naturais dos meios urbanos. Estes fatores exigem a intervenção dos decisores políticos urbanistas e engenheiros no sentido de se encontrarem soluções que satisfaçam os novos desafios sociais (Das, 2019).

O conceito de cidades inteligentes (*smart cities*) surge, então, como resposta a alguns dos desafios atuais e futuros associados às cidades. Este conceito deve ser entendido como uma estratégia urbana que envolve e conecta a cidade e suas infraestruturas com os seus habitantes/utentes e, potenciando as oportunidades da tecnologia atual, nomeadamente ao nível das tecnologias de informação e da digitalização (Musa, 2016; Viitanen & Kingston, 2014). Mais concretamente, o objetivo das *smart cities* passa por tornar a vida dos cidadãos mais fácil e mais segura, utilizando a tecnologia como um instrumento para proteger vidas, melhorar serviços públicos, facilitar processos económicos e implementar sistemas de alerta para situações e ocorrências críticas, no meio urbano decorrentes, nomeadamente, de eventos climáticos extremos (precipitação, cheias inundações, ondas de calor, picos de radiação UV) com impactos no bem-estar e qualidade de vida das populações.

A interação entre as infraestruturas e os cidadãos é realizada por meio de tecnologias de informação e comunicação (TIC), nomeadamente através sensores e sistemas de controlo em tempo real. A informação recolhida dos sensores nas infraestruturas e nos cidadãos são processados em tempo real, sendo que essa informação e o conhecimento adquirido permitem otimizar os sistemas urbanos (Musa, 2016). Tendo em conta todas as vantagens e valências inerentes às *smart cities*, tem surgido, nos últimos anos, a incorporação dessa tecnologia como forma de adaptação às alterações climáticas. Assim é possível combinar as TIC com os SVDU, através da conjugação da vertente ecológica e tecnológica, acrescentando um valor significativo a estes sistemas na mitigação e adaptação às alterações climáticas, e desse modo contribuir para tornar as cidades do futuro mais resilientes (Crnčević et al., 2017).

2.5.2 Economia circular

A pressão exercida nos sistemas do planeta tem vindo a aumentar ano após ano, quer pelo aumento da população, quer pelo desenvolvimento das sociedades e dos seus modos de vida (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017). Os modelos económicos e industriais nos últimos anos têm-se baseado numa sequência linear de extração-produção-uso-descarte de materiais e de energia, que é insustentável (Korhonen, Honkasalo, & Seppälä, 2018). A insustentabilidade destes modelos associada a *“problemas ambientais, tais como a perda de biodiversidade, a poluição da água, ar e solo, o esgotamento dos recursos naturais e a excessiva ocupação de território estão a prejudicar fortemente os sistemas de suporte de vida terrestres”*, torna cada vez mais premente a necessidade de uma transição para uma estrutura social e económica mais sustentáveis (Geissdoerfer et al., 2017).

O conceito da economia circular baseia-se num princípio em que a conservação do valor dos materiais, produtos e recursos na economia o máximo de tempo possível, terminando com o conceito de “fim-de-vida” e, conseqüentemente, reduzindo a produção de resíduos (Comissão Europeia, 2015d; World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation, & McKinsey & Company, 2014). Tal torna a vida de cada produto num ciclo e não numa linha com um princípio e um fim, transformando os bens que estão no fim da sua utilidade nos respetivos usos, em recursos para outros usos, fechando ciclos nos ecossistemas industriais (CE, 2015a, 2015b, 2015e; Stahel, 2018).

Segundo Stahel (2018), os modelos de negócio da economia circular podem ser divididos em dois grupos: os que promovem a reutilização e a extensão do tempo de serviço do produto através da reparação, remanufactura, *upgrades* e adaptações; e os que tornam os produtos em fim-de-vida em novos recursos através da reciclagem dos materiais que o constituíam.

Tendo em conta as suas funcionalidades e objetivos, os SVDU inserem-se no primeiro grupo, uma vez que podem vir a ser o destino de materiais que ainda não têm solução, desde que estes não prejudiquem a funcionalidade destes sistemas (Krauze & Wagner, 2019). Assim os SVDU podem adquirir uma nova valência, a de contribuir para um novo paradigma de desenvolvimento económico assente na economia circular, nas energias limpas e na eficiência energética, indispensáveis à adaptação e mitigação dos efeitos das alterações climáticas (Duarte, 2007).

Em 2018 foi criado o programa *Guimarães for Circular Economy* (G4CE), resultado da parceria entre o Município de Guimarães, o Laboratório da Paisagem de Guimarães e o Centro para a Valorização de Resíduos (CVR) da Universidade do Minho com o objetivo de atingir o desenvolvimento sustentável do território de Guimarães (Ribeiro, Sepúlveda, Carvalho, Vilarinho, & Cristino, 2017), fazendo parte da estratégia municipal de desenvolvimento sustentável. Dentro deste programa foi realizado um estudo de caracterização dos resíduos produzidos no concelho, tendo sido identificados os desperdícios têxteis (resultantes do corte de peças), as cascas de ovos e as pontas de cigarros como alguns dos principais (Sepúlveda, Loureiro, Vilarinho, & Carvalho, 2015). Ainda no âmbito do programa G4CE foram realizadas investigações de valorização desses e doutros resíduos, onde se destaca a valorização das pontas de cigarro através da sua incorporação em esferas de argila (Carvalho, 2018).

Na componente prática desta dissertação será testada a incorporação dos resíduos mencionados na constituição de meios porosos alternativos. Na Figura 14 está ilustrada a sequência do processo de fabrico das esferas de argila, com a referida incorporação de pontas de cigarro.



Figura 14 – Sequência de produção da argila expandida incorporada com pontas de cigarro: as pontas de cigarro são esterilizadas e em seguida trituradas; depois são misturadas com argila seca e moída, seguindo-se a formação das esferas; e por fim, sofrem um processo de cozedura, transformando-se no produto final

3. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

3.1 Descrição geral do projeto

O Laboratório da Paisagem é um parceiro fundamental do Município de Guimarães nas políticas ambientais e de desenvolvimento sustentável do território, tendo assumido a iniciativa de estudar o desenvolvimento de SVDU sustentáveis e inovadores, com vista à generalização progressiva da sua utilização a nível concelhio.

Face à relação institucional entre o Laboratório da Paisagem e a Universidade do Minho, foi estabelecida uma parceria para esta investigação a desenvolver, com a cooperação de ambas instituições, nomeadamente, a secção de recursos hídricos do Laboratório de Paisagem e o Grupo de Hidráulica e Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

A investigação experimental efetuada neste trabalho, associada ao desenvolvimento de SVDU, teve como principal objetivo testar o funcionamento hidráulico, à escala piloto, de um tipo desses sistemas, por forma a validar a sua futura replicação à escala real. Aliás, havia mesmo a oportunidade de complementar o trabalho laboratorial desenvolvido com a sua eventual implementação num empreendimento suburbano de cariz industrial, com um projeto de urbanização já definido.

Após um estudo inicial, realizado pelo Laboratório da Paisagem, às condicionantes e características desse empreendimento (“Sistemas de Retenção & Tratamento de Escorrências Urbanas na Plataforma de Terciarização de Silves”) (Laboratório da Paisagem, 2019b) foram selecionados três tipos de sistemas com potencial para serem utilizados: pavimentos permeáveis nos lugares de estacionamento; canteiros de biofiltração (*biofiltration planter*), em zonas adjacentes a arruamentos, passeios e lugares de estacionamento, e uma vala de biorretenção (*bioswale*) num separador central previsto no projeto (Figura 15).

Tendo em conta as características dos sistemas mencionados e as suas condicionantes, este projeto de investigação centrou-se no estudo dos CB, sendo concebidos e ensaiados dois tipos de meios filtrantes distintos: um convencional e outro não convencional (promovendo a economia circular), onde foram incorporados resíduos (já mencionados no capítulo anterior).

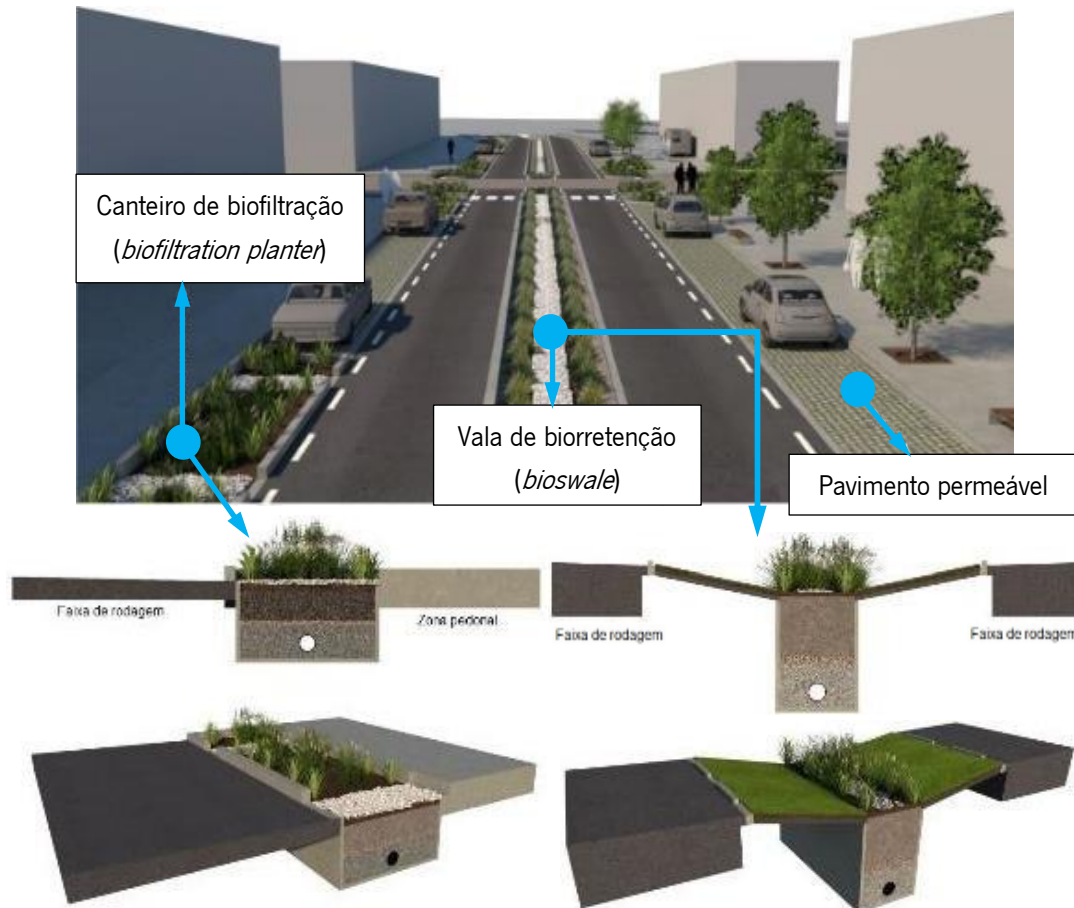


Figura 15 - Configuração preliminar dos arruamentos do empreendimento de cariz industrial e pormenores dos SVDU a aplicar propostos pelo Laboratório da Paisagem (adaptado de Laboratório da Paisagem, 2019b)

3.2 Descrição da instalação experimental

- Local e condicionantes

A instalação experimental foi instalada no Laboratório da Paisagem, que forneceu o apoio logístico para a execução dos trabalhos necessários à sua construção e desenvolvimento. A instalação experimental teve de ser concebida e executada tendo em consideração as seguintes principais condicionantes:

- Orçamento muito reduzido, integralmente aplicado nos materiais utilizados para a construção de duas instalações-piloto, de modo a permitir a comparabilidade do seu desempenho (condições de ensaio semelhantes e/ou simultâneas);
- Acomodação da instalação num espaço coberto, suficientemente amplo e, preferencialmente, exterior e coberto (devido à utilização de grandes quantidades de água nos ensaios e ao tamanho da instalação experimental) com o acesso a uma torneira, como fonte de alimentação de água, de modo a não estar dependente da aleatoriedade dos eventos pluviométricos;

- A torneira teria de ter uma capacidade de débito suficiente para a realização dos ensaios com simulação de diferentes caudais, desejavelmente compatíveis com os produzidos por eventos pluviométricos plausíveis para o local;
- Necessidade de realizar os ensaios, programados para os cenários de análise selecionados, em tempo útil, ou seja, dentro do prazo reduzido para o desenvolvimento desta dissertação (condicionante institucional).

A instalação experimental foi concebida de forma a permitir a realização de ensaios nas duas instalações-piloto em simultâneo. Deste modo, é possível comparar o desempenho dos dois meios filtrantes, distintos na sua constituição, quando sujeitos às mesmas condições de ensaio, bem como os resultados obtidos em cada um dos cenários de funcionamento analisados. Para a simulação do seu funcionamento, foram realizados os seguintes procedimentos:

- Construção de duas instalações-piloto paralelepípedicas, de base quadrada, com dimensões de 0,5×0,5×1,0 m, abertas no topo, de modo a ser inserido o material poroso e o afluente (Ilustração 3). Uma das faces da estrutura de cada CB é em acrílico transparente, com 6 mm de espessura, e a restante estrutura é em alumínio. No fundo da estrutura foi colocado um dreno perfurado em PVC com ligação ao exterior;



Ilustração 3 - Estruturas metálicas da instalação experimental

- A entrada da água no meio poroso foi efetuada por meio descarregadores (Ilustração 4), onde eram medidas as alturas da lâmina líquida, para medição do caudal que entra no sistema, que era controlado através da abertura da torneira de alimentação. A utilização dos descarregadores implicou a realização de um estudo prévio dos mesmos para determinar a respetiva curva de vazão;



Ilustração 4 - Descarregadores utilizados na instalação experimental

- Os descarregadores foram alimentados por uma torneira, onde foi colocado um distribuidor duplo de vias independentes e com regulador de caudal em ambas (Ilustração 5);



Ilustração 5 - Distribuidor de alimentação do caudal

- A água dos ensaios foi recolhida em duas caixas de vidro cúbicas com 0,4 m de aresta (medida exterior), dotadas de uma régua graduada para permitir a medição do volume e do caudal à saída dos CB (Ilustração 6). Nessas caixas de recolha foi ainda colocado um septo, com o objetivo de reduzir ou eliminar as oscilações da lâmina líquida, aquando da queda da água nas caixas, por forma a diminuir os erros de leitura na régua.



Ilustração 6 - Caixas de vidro utilizadas na recolha e medição do volume e caudal do efluente

A configuração final da instalação experimental é apresentada na Ilustração 7.



Ilustração 7 - Instalação experimental completa

De forma a clarificar o funcionamento da instalação experimental foi elaborado um esquema conceptual com a caracterização do funcionamento da instalação experimental, tal como é possível observar na Figura 16.

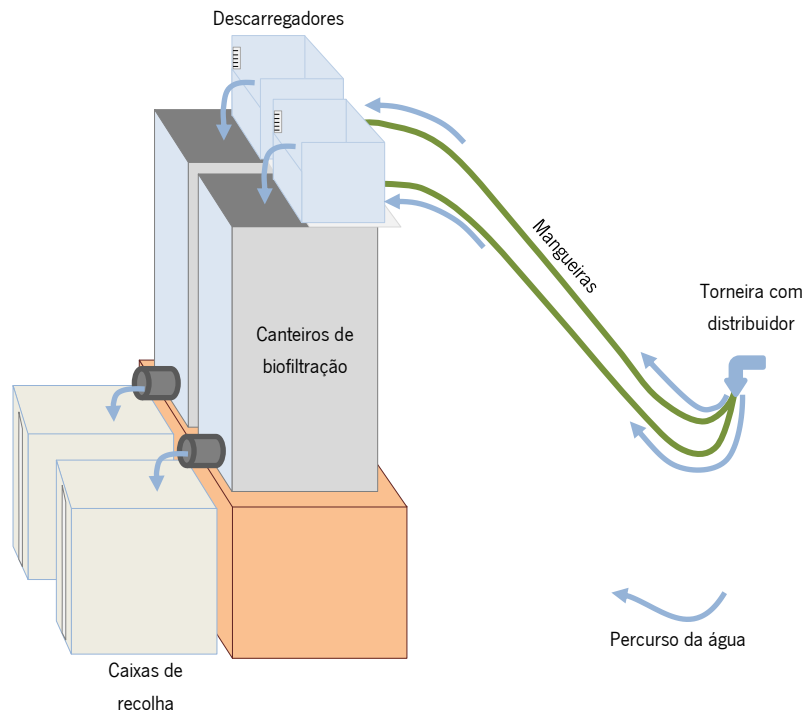


Figura 16 - Esquema conceptual do funcionamento da instalação experimental

- Trabalhos preliminares
- Selagem da estrutura dos CB

A selagem da estrutura dos CB foi um procedimento essencial para que não existissem fugas de água, sob pena dos resultados dos ensaios serem desvirtuados. Após uma análise a ambas as estruturas metálicas (executadas por terceiros), foi verificada a presença de algumas fendas nas juntas de soldadura, nas ligações acrílico-estrutura de alumínio e, ainda, na inserção do dreno na face de acrílico. Assim todas as fendas e juntas tiveram de ser seladas com recurso a produtos adequados (Ilustração 8).



Ilustração 8 - Pormenores da selagem da estrutura dos CB

- Dreno perfurado

A saída da água das estruturas foi conseguida através da utilização de drenos perfurados (Ilustração 9), concebidos a partir de dois tubos PVC com 0,6 m de comprimento. As furações foram feitas com igual espaçamento no perímetro do tubo, contendo 9 linhas transversais com 8 furos em cada linha.



Ilustração 9 - Dreno perfurado colocado na saída dos CB

- Construção e análise hidráulica dos descarregadores

Os descarregadores foram executados através de duas caixas em plástico com dimensões aproximadas de 0,4×0,3×0,27 m. Numa das faces foi cortada uma secção retangular, que originou a crista do descarregador, com uma altura de 0,14 m. Em ambos foi colocada uma régua graduada para medir a altura da lâmina líquida acima da crista (Ilustração 10).



Ilustração 10 - Descarregadores utilizados na instalação experimental

O conhecimento sobre o desempenho de descarregadores é, na sua maioria, de natureza empírica, ou seja, baseado em resultados de estudos experimentais e têm condições de validade específicas a esses estudos. Logo, as curvas de vazão, fórmulas e coeficientes utilizados são relativos a vários tipos de descarregadores, sendo tanto mais adequados quanto mais semelhante for a gama das respetivas características. Assim, face à sua especificidade e escala dos dispositivos adotados, foi necessário estabelecer experimentalmente a curva de vazão a aplicar nos descarregadores concebidos.

A curva de vazão relativa aos descarregadores foi determinada através da média dos resultados obtidos em ensaios, onde a válvula da torneira foi aberta com intervalos de 20 s, registando-se a altura da lâmina líquida e a altura da água na caixa de recolha para cada intervalo. Os resultados obtidos nos ensaios encontram-se expostos na Figura 16.

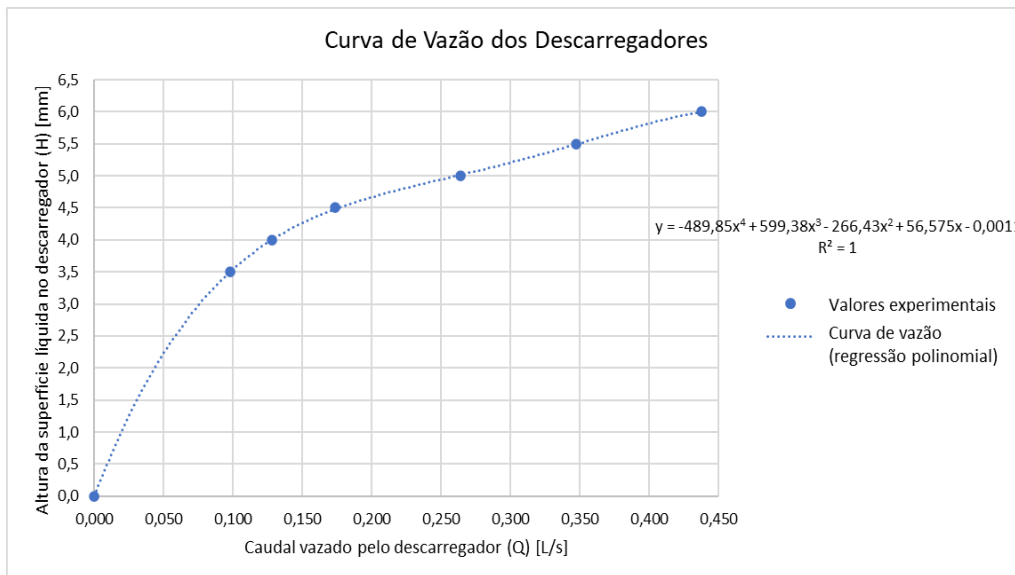


Figura 17 – Curva de vazão dos descarregadores utilizados na instalação experimental

- Lavagem e peneiração da areia

A necessidade desta tarefa surgiu durante a realização dos ensaios após a colocação da areia numa camada do meio poroso. O plano inicial dos ensaios seria colocar os diversos materiais constituintes do meio poroso sem qualquer manuseamento, de forma a simular aquilo que poderá vir a acontecer na aplicação destes sistemas em projetos urbanos. Todavia, verificou-se, após contacto da água com a areia, a formação de uma camada superficial de uma lama, possivelmente devido à presença de material muito fino (*filler*) e de alguma argila, o que impediu a água de se infiltrar (ver Anexo II). Tal ocorrência veio demonstrar a necessidade de se efetuar uma escolha criteriosa dos materiais e suas características para a aplicação nestes sistemas, requerendo algumas recomendações de boas práticas na sua

execução, nomeadamente a possibilidade de se efetuarem operações de lavagem e peneiração aos materiais granulares britados, de modo a evitar a colmatção dos meios filtrantes.

Após a limpeza da instalação, procedeu-se à seleção e lavagem de uma nova areia, usando três peneiros da norma ISO 3310-1:2000, com aberturas de 0,5 mm, 2 mm e 5 mm, sendo então recolhida e utilizada a areia retida nos peneiros de 0,5 e 2 mm (Ilustração 11).



Ilustração 11 - Processo de lavagem da areia selecionada através de peneiros normalizados

3.3 Organização do trabalho experimental

3.3.1 Definição das variáveis de teste

Antes da realização dos ensaios, foi necessário definir as variáveis a serem testadas de modo a estudar o seu efeito no desempenho hidráulico destes sistemas. Essa definição teve como base a pesquisa bibliográfica efetuada e o sucesso do objetivo hidráulico destes sistemas, que se centra na regularização do caudal das escorrências causadas por eventos de precipitação, através do amortecimento e atraso do pico de caudal. As variáveis em questão são as camadas dos meios porosos e as variáveis hidrológicas que dão origem ao caudal, permitindo comparar as diferenças entre essas camadas de meios porosos distintos e verificar quais produzem melhores efeitos individualmente e qual o conjunto que funciona melhor. Note-se que, inicialmente, havia a intenção de testar parâmetros de qualidade da água efluente dos sistemas (e.g., partículas em suspensão, óleos ou gorduras), mas a limitação temporal para a realização deste trabalho, aliada à complexidade experimental dessa avaliação, não permitiu a realização dessa análise. No Quadro 10 estão sintetizadas as variáveis analisadas, incluindo o tipo de afluente apesar de só ter sido testado um deles: a água sem poluentes.

Quadro 10 - Definição das variáveis de analisadas

Definição das variáveis			
Hidrologia			
Chuvada	C_x →	I_x (intensidades registadas de 01/01/2015 a 31/09/2019)	D ($\geq t_c$)
Área da bacia contributiva = "espaçamento entre sistemas x largura da faixa contributiva"		$A_1 = 50 \text{ m}^2$	$A_2 = 0,5 \times A_1 = 25 \text{ m}^2$ $A_3 = 1,75 \times A_1 = 87,5 \text{ m}^2$
Caudal	$Q_{m,x} = C \cdot I_x \cdot A_x$ (C=1, meio urbano totalmente impermeabilizado)		
Tempo de concentração	$t_c = 2 \text{ min}$ (bacia urbana de pequena dimensão)		
Tipo de afluente			
AL	Água limpa		
AS/L	Água com sedimentos/lama		
AO	Água com óleos		
Composição do meio poroso (camadas)			
MP0.1	vazio		
MP0.2	base drenante de 20cm (1 camada de balastro + 1 camada de gravilha)		
MP1.1	MP0.2 + 1 camada de 30cm de brita calcária misturada com desperdício textil (farrapos)		
MP1.2	MP1.1 + 1 camada de 20cm de argila expandida com incorporação de pontas de cigarros		
MP1.3	MP1.2 + 1 camada de 20cm de substrato vegetal com casca de ovo		
MP1.4	MP1.3 + relva		
MP1.5	MP1.4 + camada de folhas		
MP2.1	MP0.2 + 1 camada de 30cm de areão		
MP2.2	MP2.1 + 1 camada de 20cm de areia		
MP2.3	MP2.2 + 1 camada de 20cm de substrato vegetal		
MP2.4	MP2.3 + relva		
MP2.5	MP2.4 + camada de folhas		
Canteiros biofiltração			
Instalados em paralelo	CB_1		CB_2

- Caudal

O caudal de uma escorrência urbana é determinado, como referido, pelas características da bacia e hidrologia do local. Relativamente à precipitação, são referidas duas variáveis consideradas relevantes: a sua intensidade e a sua duração. A duração da precipitação será igual ou superior ao tempo de concentração da bacia contributiva para o dispositivo de drenagem. Assim sendo, adotou-se uma duração de 2 minutos correspondente a um tempo de concentração numa bacia urbana de pequena dimensão (e.g., arruamento). Esta definição implicou que, nos ensaios, a duração da alimentação de água aos CB da instalação-piloto durasse também 2 minutos. É de realçar que a introdução do caudal ocorreu de duas formas distintas: regimes permanente (caudal constante) e não permanente (variação específica). A primeira forma visou avaliar o atraso e (possível) redução do pico de caudal (efluente) e a segunda atestar a uniformização do caudal efluente, face a variações significativas nos eventos de precipitação (simuladas no caudal afluente Q_{in}). Os valores de caudal utilizados nos diferentes cenários de ensaio, serão definidos e justificados no item 3.4.

- Meio poroso

A escolha das diferentes camadas constituintes do meio poroso foi feita tendo por base duas opções distintas: uma convencional e outra não convencional (promovendo a economia circular), visando o aproveitamento de resíduos produzidos (mais abundantes) neste município.

É de salientar que, em teoria, as camadas de um filtro deveriam ser colocadas com granulometria crescente (no sentido ascendente). Ou seja, a camada superior (a que teria maior granulometria) iria filtrar os resíduos de maior dimensão, a camada seguinte resíduos de média dimensão e assim sucessivamente. Contudo, os SVDU utilizam vegetação no topo do meio filtrante e, por conseguinte, essas plantas necessitam de substrato vegetal para sobreviverem e prosperarem, o que impede a utilização de materiais com granulometrias elevadas à superfície. Além disso, os CB têm na sua base drenos perfurados, logo, se fossem utilizados materiais com granulometria reduzida na base, estes iriam ser facilmente arrastados originando a rápida colmatação dos drenos. A eventual aplicação de um material geotêxtil como solução para proteger a entrada no dreno tem revelado problemas operacionais frequentes não evitando a colmatação dos sistemas a médio e longo prazo.

A porosidade inicial de cada camada dos meios porosos é uma característica importante para a caracterização dos filtros e determinante para o cálculo de perdas de carga iniciais nos filtros. Contudo, neste trabalho, a determinação dessa variável não foi possível realizar por indisponibilidade, nesse período, dos meios laboratoriais necessários para esse efeito e pela necessidade de não atrasar a realização dos vários ensaios de filtração na instalação-piloto, face ao prazo disponível para a realização desta dissertação.

Além disso, neste estudo visa-se, não a determinação de perdas de carga, mas sim a comparação de resultados de ensaios de filtração, em que as porosidades iniciais das respetivas camadas dos meios porosos variam à medida que se repetem ensaios, ou quando são adicionadas as camadas superiores dos meios filtrantes (por lixiviação de partículas mais fina). Por esses motivos, considerou-se que essa lacuna (determinação de porosidades iniciais) não seria relevante para os resultados a obter neste estudo e suas conclusões.

A camada inferior, de ambos os CB, é constituída por uma base drenante, com 0,2 m de espessura, composta por materiais britados de granito com duas camadas: a de contacto com o dreno (balastro) tem uma granulometria mais elevada; e, por cima, a camada de gravilha, com menor granulometria (Ilustração 12). Estas camadas da base drenante servem, essencialmente, para impedir o entupimento do dreno e como suporte das camadas superiores.



Ilustração 12 - Constituição da base drenante dos meios porosos dos CB

O elemento superior, também, idêntico em ambos os CB, tratando-se de relva da espécie *ophiopogon japonicus* (Ilustração 13). Esta espécie é comum em Portugal e é bastante utilizada em jardins e canteiros urbanos, podendo vir a ser utilizada também em SVDU. A utilização deste elemento neste trabalho teve como propósito a avaliação da potencial influência da introdução duma camada vegetal no funcionamento destes sistemas devido, principalmente, ao efeito das suas raízes.



Ilustração 13 - Relva da espécie *ophiopogon japonicus* colocada no topo dos meios porosos de ambas as instalações-piloto

Entre estas duas camadas extremas, comuns a ambos os sistemas, foram colocadas outras camadas distintas da composição dos meios porosos, aplicados em cada um dos sistemas de filtração, que a seguir se descrevem.

- Canteiro de biofiltração 1 (CB1) – meio poroso não convencional

Tal como foi mencionado no item 2.5.2, foi realizado um levantamento dos resíduos mais abundantes no município de Guimarães e desse levantamento constou que as pontas de cigarro, as cascas de ovos e os desperdícios da indústria têxtil estão entre os mais abundantes. Na ótica da economia circular esses três tipos de resíduos (as pontas de cigarro estando incorporadas em esferas de argila) foram integrados no meio poroso não convencional para verificar se esses materiais traziam um contributo benéfico, semelhante ou prejudicial ao nível hidráulico em relação à utilização de materiais convencionais.

Assim, após a base drenante, foi colocada uma camada de 0,3 m de brita calcária misturada com desperdício têxtil. A escolha desta brita deveu-se à sua capacidade de corrigir o pH de águas ácidas aquando do seu contacto a mesma (filtração reativa). Este efeito de alcalinização já foi testado e comprovado em filtros de água destinados a abastecimento público (Feitosa, Silva, & Sabiá, 2017). Por sua vez, os desperdícios têxteis, originários do corte de malha para a produção de vestuário, foram colocados para testar a sua influência (positiva ou negativa) nos SVDU, por forma a aferir da possibilidade da sua utilização futura nestes sistemas.

É de realçar, o facto de o resíduo têxtil requerer precaução na sua colocação, uma vez que se for simplesmente despejado pode constituir uma barreira à percolação nestes sistemas. Por esse motivo, os desperdícios foram distribuídos em camadas intercaladas com brita calcária (Ilustração 14). Estes desperdícios, ao incrementar a absorção de água no meio poroso podem não só aumentar o efeito de atraso dos picos de caudal, mas também potenciar a capacidade de retenção intersticial de sedimentos mais finos devido ao pequeno espaço que existe na textura/malha deste tipo de resíduos.



Ilustração 14 - Resíduo têxtil colocado entre camadas de brita calcária no meio poroso não convencional

A argila expandida é um material versátil e possui uma série de características que tornam este material interessante para aplicação em SVDU, tais como: o baixo peso; a elevada permeabilidade, porosidade e durabilidade; a sua não suscetibilidade a ataque químico; e ser um produto natural. A sua elevada porosidade é uma característica relevante, para o funcionamento do sistema, pois mantém a humidade no meio filtrante durante períodos mais longos, comparativamente a outros meios porosos que utilizam materiais britados. Esta humidade é essencial também para preservar a vitalidade da vegetação geralmente presente nos SVDU.

Atendendo à vertente da promoção da economia circular presente neste meio poroso e no projeto G4CE mencionado anteriormente, esta camada é constituída por uma mistura de cerca de 10% de esferas de argila expandida (com incorporação de pontas de cigarro), que estavam disponíveis no Laboratório da Paisagem (material sobranço do projeto mencionado) e 90% de esferas de argila expandida do tipo *Leca Dur*, que tiveram de ser adquiridas. Refira-se que o objetivo principal desta camada era a utilização de argila expandida, já testada com algum sucesso em soluções urbanas de GAP (Saint-Gobain, 2019) e que a presença de um resíduo (pontas de cigarro - abundante neste município) não teve a intenção de avaliar qualquer mais-valia para o desempenho hidráulico do sistema de filtração, mas sim o de proporcionar um destino final para esse resíduo, desde que, em estudos futuros, se comprove não ter efeitos nocivos na qualidade da água filtrada.

Na Ilustração 15 são apresentados os dois tipos de esferas utilizadas (as esferas dos dois tipos têm dimensões diferentes) e a disposição dessa camada (com 0,2 m de espessura), no respetivo canteiro de biofiltração (CB1).



Ilustração 15 - Aplicação da argila expandida com e sem incorporação de pontas de cigarro no meio poroso não convencional

A camada imediatamente acima da argila expandida é composta por substrato vegetal misturado com cascas de ovos e tem 0,2 m de espessura (Ilustração 16). O substrato vegetal é um elemento essencial para o suporte da vida vegetal e encontra-se imediatamente acima da argila expandida tendo em conta a sua capacidade de preservação da humidade no meio. Por sua vez, a casca de ovo é um resíduo natural, cuja aplicação segue a mesma lógica, dos desperdícios têxteis, a de promoção da economia circular, e que pode desempenhar um papel importante na remediação de solos contaminados com metais pesados e outros compostos considerados tóxicos. (Ribeiro et al., 2017; TVI24, 2012).

A utilização deste resíduo poderá dar um contributo para a melhoria da qualidade da água das escorrências pluviais, a confirmar em futuros trabalhos de investigação, mesmo que não seja expectável uma influência significativa, da sua incorporação, ao nível da melhoria do comportamento hidráulico do SVDU. Assim, este material poder-se-á constituir como um elemento importante nos SVDU, especialmente a longo prazo, uma vez que os metais pesados são poluentes muito frequentes nas escorrências pluviais afluentes aos sistemas de drenagem e com picos significativos no início das chuvadas.



Ilustração 16 – Incorporação de cascas de ovos numa mistura com substrato vegetal e sua aplicação no meio poroso não convencional

- Canteiro de biofiltração 2 (CB2) – meio poroso convencional

O CB2 utiliza materiais granulares britados convencionais no seu meio poroso. Assim, a camada colocada sobre a base drenante é constituída por 0,3 m de areão (Ilustração 17), funcionando como elemento de suporte para as camadas superiores, apesar de já ter uma ação de filtração. Trata-se de um material importante no sentido em que não produz uma perda de carga significativa quando comparado com a areia e, simultaneamente, constitui um impedimento à perda de material da camada superior. Além disso, ao aumentar a profundidade do sistema, aumenta a extensão do percurso da água e, conseqüentemente, pode favorecer o atraso na ocorrência dos picos de caudal.



Ilustração 17 – Camada de 0,3 m areão utilizada no canteiro de biofiltração

A camada seguinte, é composta por 0,2 m de areia (Ilustração 18). Este material é um dos elementos relevantes no processo de filtração, mas também pode ser um dos mais problemáticos, caso não sejam efetuadas as boas práticas anteriormente recomendadas (lavagem e separação granulométrica), de modo a evitar a formação de lamas que colmatem o filtro logo no início do seu funcionamento.



Ilustração 18 - Colocação da camada de 0,2 m de areia (lavada e peneirada) no meio poroso do canteiro de biofiltração convencional

A última camada desta instalação é composta por 0,2 m de substrato vegetal simples (Ilustração 19), tendo como propósito sustentar a vegetação (relva).



Ilustração 19 – Camada de substrato vegetal no canteiro de biofiltração convencional

3.3.2 Cenários de análise

Os cenários de análise são um elemento essencial da organização de uma investigação experimental. Deste modo, foi desenvolvido um programa de ensaios com base nestes cenários, onde se define a ordem dos ensaios, o objetivo de cada ensaio e quais as variáveis consideradas nesses ensaios.

Os cenários definidos inicialmente visavam a determinação de meios porosos convencionais com melhor desempenho, através de comparações diretas do efeito de variáveis “tradicionais”. Ou seja, com a possibilidade de serem ensaiados dois sistemas em simultâneo, o objetivo era testar o tipo e granulometria do material, a espessura da camada e suas combinações para selecionar as melhores combinações de materiais nos meios porosos a adotar em SVDU. Todavia, após a realização de ensaios preliminares com esses cenários de teste, constatou-se que a realização dos ensaios, com aqueles objetivos, era operacionalmente impraticável, porque esses cenários implicavam a substituição e lavagem dos meios porosos dos sistemas, tarefas de muito difícil implementação, eficácia duvidosa e sujeita a desvirtuar os resultados dos ensaios seguintes. Estes cenários iniciais de ensaio (bem como as respetivas variáveis de teste) foram por isso reformulados.

Na reformulação dos cenários de análise, definiu-se uma nova abordagem, que fosse exequível com os recursos e tempo disponíveis, visando testar o desempenho de uma solução não convencional para o meio poroso que promovesse o conceito da economia circular, através do aproveitamento de resíduos produzidos localmente, em comparação com um meio poroso convencional, com a mesma espessura total. Os CB foram testados em simultâneo, tal como estava previsto nos anteriores cenários de análise,

mas agora a avaliação incidiu na comparação entre camadas de natureza diferente (mas de igual espessura) no sentido de caracterizar o seu desempenho e identificar os eventuais benefícios dessa solução não convencional e ambientalmente mais sustentável.

Definiram-se 16 cenários de análise, com diferentes objetivos e com variáveis distintas a testar, embora, neste trabalho, só tenha sido possível realizar e analisar 13 deles, referentes ao comportamento hidráulico de diferentes constituições do meio poroso. Os restantes três, relativos ao estudo do efeito dos sistemas na qualidade da água do efluente (e.g., correção do pH, remoção de turvação, óleos e gorduras), sendo também muito importantes, constituem um contributo para o desenvolvimento de futuros trabalhos de investigação neste domínio. O cenário 0 corresponde aos ensaios necessários para determinar os hidrogramas relativos à caracterização da situação de referência (sistema de drenagem convencional), enquanto os restantes visam avaliar o efeito da sobreposição das sucessivas camadas, da variação do caudal afluente e regime do escoamento (permanente e não permanente).

No Quadro 11 apresenta-se um exemplo da composição de um desses cenários, podendo os restantes ser consultados, com igual detalhe, no Anexo III. Refira-se que, foi definido um código, que permite identificar as variáveis testadas em cada CB nos respetivos ensaios, com o objetivo de auxiliar o registo dos dados aquando da realização dos ensaios.

Quadro 11 – Exemplo da definição de um cenário de análise (cenário 5)

Cenário 5							
Objetivo:	Testar o efeito da variação do caudal afluente						
Forma:	Introdução dos caudais afluentes $Q_{n,2}$ e $Q_{n,3}$ em regime permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluente	Tipo de Afluente	Meio Poroso	Código
E5.1	CB ₁	C ₂	A ₁	$Q_{n,2}$	AL	MP1.4	CB1.C2.A1.Q2.AL.MP1.4
	CB ₂	C ₂	A ₁	$Q_{n,2}$	AL	MP2.4	CB2.C2.A1.Q2.AL.MP2.4
E5.2	CB ₁	C ₃	A ₁	$Q_{n,3}$	AL	MP1.4	CB1.C3.A1.Q3.AL.MP1.4
	CB ₂	C ₃	A ₁	$Q_{n,3}$	AL	MP2.4	CB2.C3.A1.Q3.AL.MP2.4

Esse código de identificação dos ensaios é composto por siglas e números relativos à identificação do CB e das restantes variáveis, mencionando o CB onde foi realizado o ensaio, o evento de precipitação (chuvada) utilizado, a área da bacia contributiva considerada, o caudal resultante da respetiva combinação da área e da intensidade de precipitação, o tipo de afluente e a camada do meio poroso que está a ser ensaiada. Assim, tomando como exemplo o ensaio E5.1, o código CB1.C2.A1.Q2.AL.MP1.4 significa que, nesse ensaio, no canteiro de biofiltração 1, foi simulada a situação correspondente ao evento de precipitação 2 e a área da bacia A₁, que originam um caudal Q_2 , de água limpa (abastecimento), afluente ao meio poroso MP1.4 (identificável com o definidas no Quadro 10).

Os cenários de análise concebidos (resumidos no Quadro 12) visam atingir quatro objetivos específicos:

- Avaliar o efeito das sucessivas camadas do meio poroso no desfaseamento temporal entre a entrada e a saída do caudal dos CB, no atraso do pico de caudal e na regularização do caudal;
- Avaliar o efeito da variação do caudal afluente em regime permanente nos CB com os meios porosos completos (variações da intensidade de precipitação ou da área da bacia contributiva);
- Avaliar o efeito do regime de escoamento do caudal afluente (permanente ou não permanente), nos CB com os meios porosos completos;
- Comparar os resultados obtidos em ambos os sistemas com os de uma situação de referência (funcionamento dum sistema de drenagem convencional).

Quadro 12 – Quadro-resumo dos cenários de análise (variáveis utilizadas e análises efetuadas em cada um deles)

Cenários de análise	Ensaio	Variáveis em análise					Análises efetuadas							
		Intensidade de precipitação	Área da bacia contributiva	Caudal afluente	Regime do caudal afluente	Composição do meio poroso (camadas)				Situação de referência	Variação do caudal afluente	Variação do regime do caudal afluente	Variação da composição do meio poroso	
						CB1		CB2						
Cenário 0	E0.1	18 mm/h	50 m ²	0,250 L/s	Permanente	MP0.1	vazio		MP0.1	vazio		X		
	E0.2	25 mm/h	50 m ²	0,347 L/s	Permanente							X		
	E0.3	18 mm/h	50 m ²	0,250 L/s	Permanente	MP0.2	base drenante de 20 cm (balastro + gravilha)		MP0.2	base drenante de 20 cm (balastro + gravilha)		Testar a influência da base drenante		
Cenário 1a	E1.1	18 mm/h	50 m ²	0,250 L/s	Permanente	MP1.1	MP0.2 + camada de 30 cm de brita calcária misturada com desperdício têxtil		MP2.1	MP0.2 + 1 camada de 30 cm de areão				X
Cenário 1b	E1.2	—	—	[0,125 ; 0,431] L/s ¹⁾	Não permanente									X
Cenário 2a	E2.1	18 mm/h	50 m ²	0,250 L/s	Permanente	MP1.2	MP1.1 + 1 camada de 20 cm de argila expandida com incorporação de pontas de cigarros		MP2.2	MP2.1 + 1 camada de 20 cm de areia				X
Cenário 2b	E2.2	—	—	[0,125 ; 0,431] L/s ¹⁾	Não permanente									X
Cenário 3a	E3.1	18 mm/h	50 m ²	0,250 L/s	Permanente	MP1.3	MP1.2 + 1 camada de 20 cm de substrato vegetal com casca de ovo		MP2.3	MP2.2 + 1 camada de 20 cm de substrato vegetal				X
Cenário 3b	E3.2	—	—	[0,125 ; 0,431] L/s ¹⁾	Não permanente									X
Cenário 4a	E4.1	18 mm/h	50 m ²	0,250 L/s	Permanente	MP1.4	MP1.3 + relva		MP2.4	MP2.3 + relva			X	X
Cenário 4b	E4.2	—	—	[0,125 ; 0,431] L/s ¹⁾	Não permanente								X	X
Cenário 4c	E4.1	18 mm/h	50 m ²	0,250 L/s	Permanente	MP1.4	(completo)		MP2.4	(completo)		X		
Cenário 5	E5.1	25 mm/h	50 m ²	0,347 L/s	Permanente	MP1.4	(completo)		MP2.4	(completo)		X		
	E5.2	31 mm/h	50 m ²	0,431 L/s	Permanente	MP1.4	(completo)		MP2.4	(completo)		X		
Cenário 6	E6.1	18 mm/h	25 m ²	0,125 L/s	Permanente	MP1.4	(completo)		MP2.4	(completo)		X		
	E6.2	18 mm/h	87,5 m ²	0,438 L/s	Permanente	MP1.4	(completo)		MP2.4	(completo)		X		
Cenário 7	E7.1	—	—	≈0,450 L/s	Permanente	MP1.4	(completo)		MP2.4	(completo)		Testar a capacidade máxima dos CB		

Nota: os Cenários 8, 9 e 10, referentes a testes sobre colmatação superficial e qualidade da água, não se encontram neste quadro uma vez que não foram realizados, pelas razões já abordadas anteriormente.

¹⁾ O caudal médio deste intervalo é 0,255 L/s.

3.4 Estudo da hidrologia do local

- Intensidade da precipitação

Foi realizado um estudo sobre os eventos de precipitação na cidade de Guimarães, por forma a identificar as intensidades de precipitação num período mais recente, do que aquele que serviu de base às curvas IDF do Regulamento em vigor. Este estudo consistiu na recolha e tratamento de dados relativos à maior intensidade de precipitação diária, num período de 5 anos (entre 01/01/2015 e 31/12/2019). Os dados foram retirados maioritariamente do site da *Weather Underground* (WU) (www.wunderground.com), uma plataforma online que reúne informação de estações meteorológicas de todo o mundo, privadas e institucionais, com registos de dados frequentes (The Weather Company, 2020). Contudo, algumas lacunas nessa base de dados (devido a períodos de manutenção ou avarias), pelo que houve necessidade de complementar esse registo com dados recolhidos no Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH).

O espaço temporal do registo de dados no SNIRH e na WU é diferente, e como tal, os dados não são diretamente correlacionáveis. Enquanto que os dados na WU são registados valores de 5 em 5 minutos, no SNIRH é registado apenas um valor de precipitação horária. Ou seja, apesar do valor da intensidade da precipitação ser expressa em milímetros por hora (mm/h), tanto na WU como no SNIRH, essa grande diferença no número de registos horários, altera completamente o grau de grandeza dos dados. Isto porque, no caso do SNIRH, são contabilizados os milímetros que o udómetro enche durante 1 h e no caso do WU, são contabilizados os milímetros que o udómetro enche no espaço de 5 min, que depois é convertido em mm/h. A título de exemplo: num determinado dia um dado evento de precipitação durou 10 minutos entre as 14:00 e as 14:10 sempre com a mesma intensidade de 6 mm/h ou 0,1 mm/min, entre as 14:30 e as 14:50 choveu 12 mm/h ou 0,2 mm/min e no restante tempo não choveu; ora, no WU irão aparecer dois registos de 6 mm/h (equação 3) entre as 14:00 e as 14:10 e mais quatro registos de 12 mm/h (equação 4) entre as 14:30 e as 14:50, enquanto que, no caso do SNIRH irá aparecer um único registo de 5 mm/h entre as 14:00 e as 15:00, uma vez que, durante essa hora, o udómetro encheu 1mm do primeiro evento, mais 4mm do segundo evento (equação 5).

$$\frac{0,1 \text{ mm}}{\frac{1 \text{ min} \times 1 \text{ h}}{60 \text{ min}}} = 6 \text{ mm/h} \quad (3)$$

$$\frac{0,2 \text{ mm}}{\frac{1 \text{ min} \times 1 \text{ h}}{60 \text{ min}}} = 12 \text{ mm/h} \quad (4)$$

$$\left(0,1 \frac{mm}{min} \times 10 min\right) + \left(0,2 \frac{mm}{min} \times 20 min\right) = 5 mm \rightarrow 5 \frac{mm}{h} \quad (5)$$

Para ultrapassar esta disparidade de registos, foi realizada uma correlação entre as duas plataformas de dados, a partir da análise, nos dias em que existiam registos em ambas, do número de vezes que, em média, os registos da WU eram superiores em relação aos do SNIRH. O resultado obtido foi de seis, tendo sido desprezados o pior registo superior e o pior registo inferior, de forma a minimizar as possíveis discrepâncias de eventuais anomalias no funcionamento de ambas as plataformas.

Os dados recolhidos permitiram verificar que, nos 1826 dias analisados, choveu em 609, ou seja, aproximadamente 120 dias por ano. Após o tratamento desses dados, foi elaborada uma curva de intensidades classificadas, aplicando os mesmos conceitos presentes nas curvas de caudais classificados, relativa aos dias com pluviosidade (Figura 17).

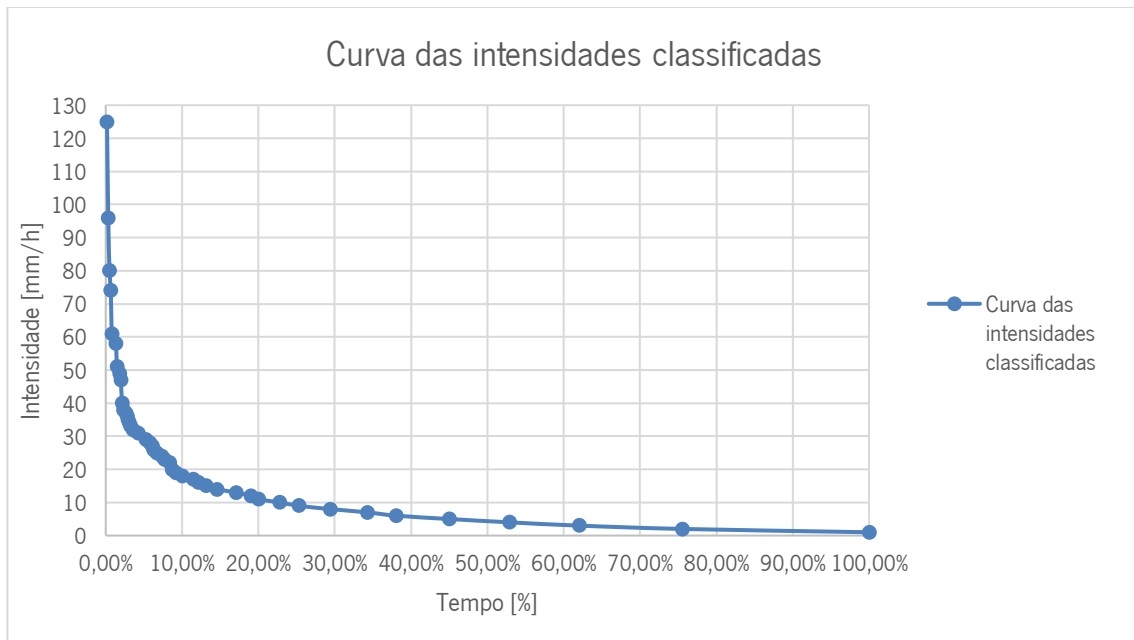


Figura 18 – Curva das intensidades classificadas relativas às precipitações analisadas no período de 2015-2019

É necessário ter em consideração que esta curva não representa nem a duração dos eventos de precipitação, nem a multiplicidade de eventos num mesmo dia. Apenas traduz a intensidade de precipitação máxima diária. Deste modo, não é possível fazer comparações entre estes valores e o das intensidades que seriam obtidas utilizando o Decreto Regulamentar 23/95.

- Caudal do escoamento gerado pela precipitação

O caudal do escoamento gerado pela precipitação foi estimado através da aplicação do método racional, descrito no capítulo 2. Para o coeficiente de escoamento foi adotado o valor de 1, por se trata da

simulação dum meio urbano numa área bastante impermeabilizada e por traduzir a situação/cenário mais desfavorável em termos de caudal máximo.

O caudal a ser utilizado nos ensaios estava limitado pela capacidade de vazão da torneira da rede predial de abastecimento de água, que deveria ter uma capacidade de débito suficiente para se poderem realizar os ensaios com valores plausíveis para o caudal pluvial gerado num dado arruamento urbano.

Para estimar esse caudal, foi adotada uma área contributiva modelo de 50 m², correspondente a um arruamento com uma faixa de rodagem com 3 m de largura, um passeio com 2 m de largura e um comprimento de 10 m ($[3+2] \times 10 = 50 \text{ m}^2$). Considerou-se ainda a não contribuição de coberturas de edifícios para a drenagem do arruamento. Posto isto, foi calculado o caudal gerado pela intensidade de um evento de precipitação igualado ou excedido em 10% dos dias com pluviosidade (60 dias, aproximadamente), tendo sido obtido um caudal de 0,250 L/s.

Através de uma medição volumétrica, verificou-se que o caudal debitado pela torneira é cerca de 0,450 L/s, ou seja, praticamente o dobro do valor mínimo pretendido, sendo, pois, suficiente para a realização de ensaios com caudais mais gravosos. Assim, seleccionou-se uma gama de caudais de ensaio com duas origens distintas: numa delas utilizaram-se diferentes intensidades de precipitação para uma mesma área contributiva de 50 m²; na outra manteve-se a intensidade de precipitação e modificaram-se os valores da área contributiva. No Quadro 13 estão expostos os caudais utilizados nos ensaios.

Quadro 13 – Caudais seleccionados correspondentes às escorrências originadas num trecho de arruamento urbano

$Q_{m,1} = 0,250 \text{ L/s}$	Correspondente a uma intensidade de precipitação igual a 18 mm/h, que é igualada ou excedida em 10,0% do período chuvoso em 5 anos (61 dias em 609) e à área modelo de 50 m ² ;
$Q_{m,2} = 0,347 \text{ L/s}$	Correspondente a uma intensidade de precipitação igual a 25 mm/h, que é igualada ou excedida em 6,7% do período chuvoso em 5 anos (41 dias em 609) e à área modelo de 50 m ² ;
$Q_{m,3} = 0,431 \text{ L/s}$	Correspondente a uma intensidade de precipitação igual a 31 mm/h, que é igualada ou excedida em 4,3% do período chuvoso em 5 anos (26 dias em 609) e à área modelo de 50 m ² ;
$Q_{m,4} = 0,125 \text{ L/s}$	Correspondente a 50% da área modelo (25 m ²) e à intensidade de precipitação de 18 mm/h;
$Q_{m,5} = 0,438 \text{ L/s}$	Correspondente a 175% da área modelo (87,5 m ²) e à intensidade de precipitação de 18 mm/h;
$Q_{m,6} \approx 0,450 \text{ L/s}$	Caudal máximo debitado pela torneira;

O caudal base utilizado foi o $Q_{m,1}$ e corresponde a uma intensidade de precipitação de 18 mm/h. A título de exemplo, esta intensidade de precipitação é superior à máxima registada durante a depressão Elsa (que foi inferior a 17mm/h, no dia 19/12/2019), e que provocou diversas inundações no território português.

Refira-se que os caudais $Q_{m,3}$ $Q_{m,5}$ são praticamente iguais, contudo a distinção é feita por terem origens diferentes, apesar de nos ensaios corresponder ao mesmo caudal. Nos ensaios onde é feita a oscilação de caudal, já referida, os valores introduzidos são uma combinação dos caudais da gama selecionada. Nesses ensaios, o caudal simulado varia de 20 em 20 segundos (durante os 2 minutos da alimentação de água) com a seguinte combinação sequencial: $Q_{m,1}$, $Q_{m,3}$, $Q_{m,4}$, $Q_{m,1}$, $Q_{m,2}$ e $Q_{m,4}$, que está identificada, nos respetivos ensaios, como $Q_{m,x}$.

3.5 Metodologia de cálculo

O registo dos dados de cada ensaio e o cálculo dos caudais afluentes e efluentes, na instalação experimental piloto foi efetuado através dum total de 14 tabelas, sendo que cada tabela contempla os cálculos e resultados para ambos os CB² (três para o cenário 0; duas para cada um dos cenários 1 a 5; uma para o cenário 6; o cenário 7 não necessita de tabela). A elaboração das mesmas foi realizada em folhas de cálculo do *software* Microsoft Excel, conforme se exemplifica no Quadro 14.

Quadro 14 – Registo de dados experimentais e cálculo dos caudais na instalação experimental relativos ao Cenário 3, Ensaio 3.1, do CB1

Cenário 3		Canteiro de biofiltração 1									
Ensaio 3.1 e 3.2		Entrada no Sistema				Saída do Sistema					
Tempo	Δt	$Q_{entrada}$	$H_{descarregador}$	$V_{entrada} = Q_{entrada} \times \Delta t$	h	Δh	h'	A	$V_{saída} = Axh'$	$Q_{saída} = V_{saída} / \Delta t$	
	[s]	[L/s]	[m]	[L]	[cm]	[m]	[m]	[m ²]	[L]	[L/s]	
00:00:00	0	0,000	0,0000	0,00	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
00:00:00	0	0,250		0,00	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
00:00:05	5	0,250		1,25	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
00:00:10	5	0,250		1,25	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
00:00:15	5	0,250		1,25	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
00:00:20	5	0,250		1,25	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
00:00:25	5	0,250		1,25	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
00:00:30	5	0,250		1,25	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
00:00:35	5	0,250		1,25	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
00:00:40	5	0,250		1,25	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
00:00:45	5	0,250		1,25	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	
00:00:50	5	0,250		1,25	0,3	0,003	0,003	0,002	0,226	0,045	
00:00:55	5	0,250		1,25	0,7	0,007	0,004	0,004	0,528	0,106	
00:01:00	5	0,250	0,0050	1,25	1,2	0,012	0,005	0,004	0,641	0,128	
00:01:05	5	0,250		1,25	1,7	0,017	0,006	0,005	0,755	0,151	
00:01:10	5	0,250		1,25	2,3	0,023	0,006	0,006	0,868	0,174	
00:01:15	5	0,250		1,25	3,0	0,030	0,007	0,006	0,943	0,189	
00:01:20	5	0,250		1,25	3,7	0,037	0,007	0,007	1,019	0,204	
00:01:25	5	0,250		1,25	4,4	0,044	0,007	0,007	1,057	0,211	
00:01:30	5	0,250		1,25	5,1	0,051	0,007	0,007	1,057	0,211	
00:01:35	5	0,250		1,25	5,8	0,058	0,008	0,007	1,094	0,219	
00:01:40	5	0,250		1,25	6,5	0,065	0,007	0,007	1,094	0,219	
00:01:45	5	0,250		1,25	7,3	0,073	0,007	0,007	1,094	0,219	
00:01:50	5	0,250		1,25	8,0	0,080	0,008	0,008	1,132	0,226	
00:01:55	5	0,250		1,25	8,8	0,088	0,007	0,008	1,132	0,226	
00:02:00	5	0,250		1,25	9,5	0,095	0,008	0,008	1,132	0,226	

² No cenário 0, os CB encontravam-se em condições semelhantes, relativamente ao meio poroso (ambos estavam vazios nos ensaios E0.1 e E0.2 e tinham a mesma base drenante em E0.3). Por esse motivo, apenas se ensaiou um dos CB neste cenário, assumindo-se que os resultados obtidos seriam idênticos para o outro CB.

Para facilitar a leitura do Quadro 14, refere-se, de seguida, o significado específico de algumas das variáveis aí tabeladas, cuja simbologia, sendo comum, pode carecer de maior detalhe:

- h: altura de água registada na caixa de recolha;
- Δh : diferença de alturas de água entre dois intervalos de tempo consecutivos;
- h': média entre a diferença de altura de água nesse instante e no anterior;
- A: área da bacia contributiva.

Relativamente aos cálculos introduzidos nas tabelas, é de referir o seguinte:

- O caudal de entrada nas instalações-piloto era dado pela altura da lâmina líquida nos respetivos descarregadores, tendo em conta os cálculos previamente efetuados para definição da sua curva de vazão (ver Figura 16 no item 3.2);
- O registo das alturas de água, nas caixas de recolha, foi efetuado com recurso a vídeos gravados dos respetivos ensaios, devido ao curto intervalo de tempo de registo das alturas. Desta forma, foi possível obter dados com uma precisão mais elevada;
- A média efetuada entre a respetiva altura e a altura anterior teve como objetivo reduzir as oscilações nos resultados. Isto porque, pequenos erros de leitura e outras imprecisões, produziam demasiadas oscilações nas alturas o que não era, por vezes, coerente com o tipo de regime hidráulico simulado no ensaio efetuado.

Cada ensaio dum dado cenário foi repetido três vezes (sempre que possível) de forma a validar os resultados obtidos, através da verificação da sua replicabilidade.

- Cálculo do erro relativo dos ensaios

O valor adotado para o cálculo do caudal de saída dos CB advém da média dos três registos dos ensaios, sendo que foi também efetuado o cálculo do erro relativo (percentual) dessa média em relação às medições, em cada intervalo de tempo (Equação 6).

$$\varepsilon (\%) = \frac{\text{máx}[E - m]}{m} \times 100 \quad (6)$$

Em que:

- ε : erro relativo percentual, para cada intervalo de tempo;
- E: valor da variável com maior diferença em relação à média;
- m: média dos valores da variável obtidos nas repetições dum mesmo ensaio.

O resultado do cálculo dos erros relativos nos vários ensaios demonstrou que a análise dos mesmos deve ser efetuada com alguma prudência, pois, para um mesmo erro absoluto, há uma amplificação do erro relativo para valores muito baixos da variável, nomeadamente quando a medição da altura de água efetuada é visual, dado não haver, neste trabalho, possibilidade de recurso a instrumentos mais sofisticados (e.g., laser, efeito doppler).

Para minimizar essa amplificação do erro relativo, optou-se por os estimar através dos volumes totais de água à entrada e à saída (Equação 7). Este procedimento engloba os erros inerentes a todas as medições (tanto positivos como negativos).

$$\varepsilon (\%) = \frac{V_{saída} - V_{entrada}}{V_{entrada}} \times 100 \quad (7)$$

Estas diferenças entre volumes (afluente e efluente) podem ser justificadas por diferentes fatores, tais como: imprecisões na construção dos descarregadores e na colagem nas régua; erros de leitura da altura de água nos descarregadores e nas caixas de recolha; o controlo do caudal de entrada ser feito através da abertura e fecho manual das válvulas do distribuidor duplo e da torneira de alimentação. É de salientar que o cálculo deste um erro relativo também engloba a fração de água retida no próprio meio poroso, que depende das suas características, e nas arestas e/ou mossas da base da estrutura metálica. Ou seja, mesmo que não houvesse quaisquer erros de leitura ou medição, existiriam sempre diferenças entre os volumes de entrada e de saída, os quais podem ser incrementados à medida que são acrescentadas mais camadas de meio filtrante e/ou camadas com maior capacidade de absorção de água (e.g., incorporação de desperdícios têxteis).

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos no trabalho experimental desenvolvido, de acordo com a metodologia de investigação explanada no capítulo anterior, que estabeleceu a realização de ensaios relativos a treze cenários de análise, que engobam a execução de três ensaios no cenário 0, dois ensaios nos cenários 1 a 5³ e um ensaio para os cenários 6⁴ e 7. Cada ensaio, dos cenários 1 a 7, contempla a operação simultânea dos dois CB (CB1 e CB2), com composição do meio poroso distintas e já descritos, tendo como principal objetivo avaliar o comportamento hidráulico das sucessivas camadas de cada meio poroso e dos meios porosos completos, submetidos a diferentes valores de caudal e a diferentes regimes de escoamento.

Para maior clareza dos objetivos de cada cenário, optou-se pela apresentação dos resultados dos ensaios, em termos comparativos, fazendo variar parâmetros com influência no valor do caudal afluente, o regime do escoamento e a constituição do meio poroso nos CB, de modo a avaliar os respectivos efeitos no desempenho hidráulico desses SVDU. Essa avaliação tem como base a análise dos hidrogramas relativos à evolução do caudal medido à saída da instalação experimental (caudal efluente), em termos de amortecimento e atraso do pico, o qual inclui o desfasamento temporal observado no início e final dos hidrogramas em comparação (entrada e saída).

A análise dos resultados experimentais obtidos nos ensaios, relativos aos vários cenários testados, será efetuada nos pontos que se seguem, começando pela caracterização da situação de referência (cenário 0) que servirá de comparação para os resultados dos restantes cenários ensaiados.

4.1 Caracterização da situação de referência

A caracterização da situação de referência, preconizada pelo cenário 0, foi concebida com o objetivo de reproduzir o funcionamento dos sistemas de drenagem convencionais, ou seja, para servir de base de comparação com os SVDU.

³ Cenários, 1a, 1b, 2a, 2b, 3a, 3b, 4a, 4b, 4c e 5 (Quadro 12).

⁴ O cenário 6 preconiza a realização de dois ensaios. Contudo as variáveis do ensaio E6.2 são similares às variáveis do ensaio E5.2, pelo que os resultados obtidos em E5.2 foram também utilizados como resultados do ensaio E6.2. Logo, esse ensaio do cenário 6 não foi realizado em termos práticos.

- Apresentação dos resultados

Os dois primeiros ensaios (E0.1 e E0.2) foram realizados com a estrutura do CB ensaiada vazia (apenas com o dreno perfurado) de modo a reproduzir, o mais aproximadamente possível, as condições presentes num sistema de drenagem convencional, mais concretamente o que ocorre ao nível da ligação sarjeta-coletor. Estes dois ensaios distinguem-se pelo caudal afluente introduzido (0,250 L/s e 0,347 L/s, respetivamente) permitindo, assim, avaliar qual o efeito produzido pelo aumento caudal afluente, num mesmo sistema em condições de ensaio semelhantes (somente pela variação do caudal). Esta variação irá, também, possibilitar a comparação entre a situação de referência com as diferentes camadas dos meios porosos e com os meios porosos completos, onde forem introduzidos caudais semelhantes. Os resultados dos ensaios E0.1 e E0.2 são apresentados nas Figuras 18 e 19.

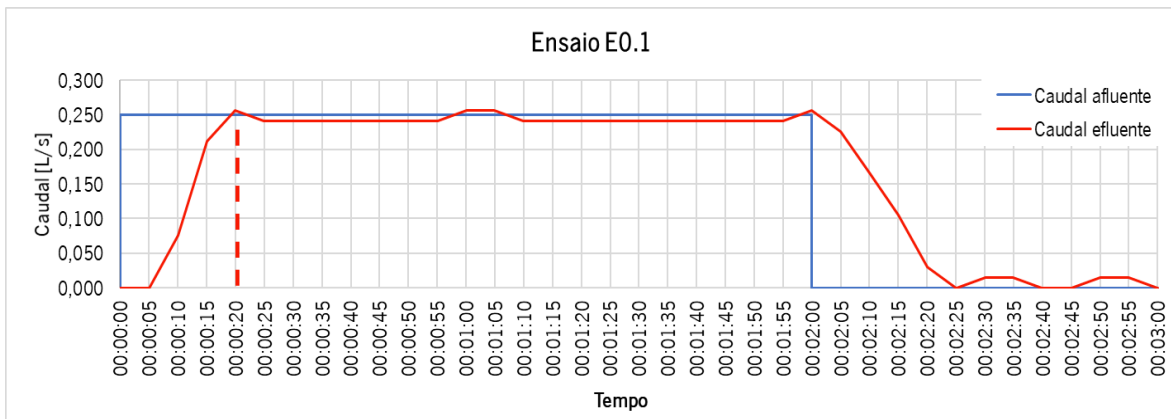


Figura 19 - Hidrograma relativo à caracterização da situação de referência, com caudal afluente de 0,250 L/s

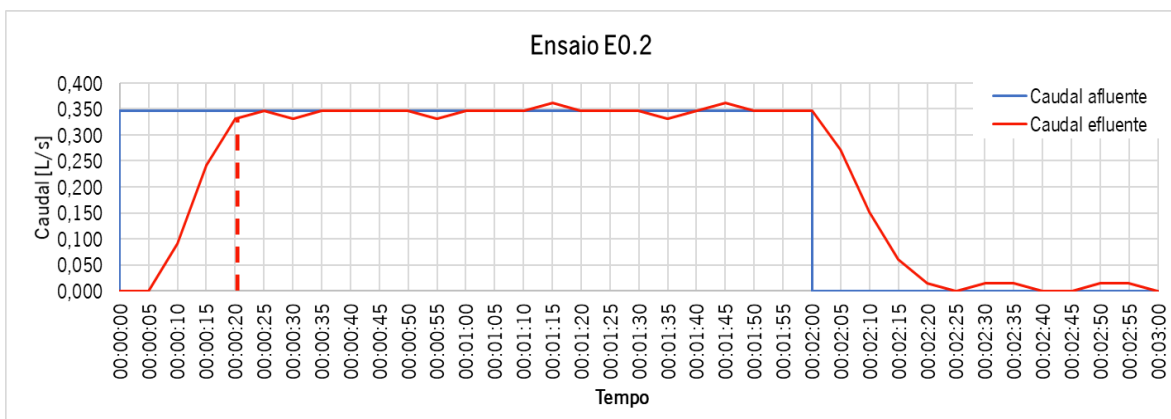


Figura 20 - Hidrograma relativo à caracterização da situação de referência com caudal afluente de 0,347 L/s

Por sua vez, o ensaio E0.3 teve como objetivo avaliar se a presença da base drenante produzia algum efeito no caudal efluente, uma vez que esta não deve constituir um impedimento significativo à passagem da água. Deste modo, foi introduzido um caudal de 0,250 L/s num dos CB (neste caso no CB2) para

averiguar a ocorrência de alguma resistência hidráulica ao caudal. O hidrograma relativo ao ensaio E0.3 encontra-se na Figura 20.

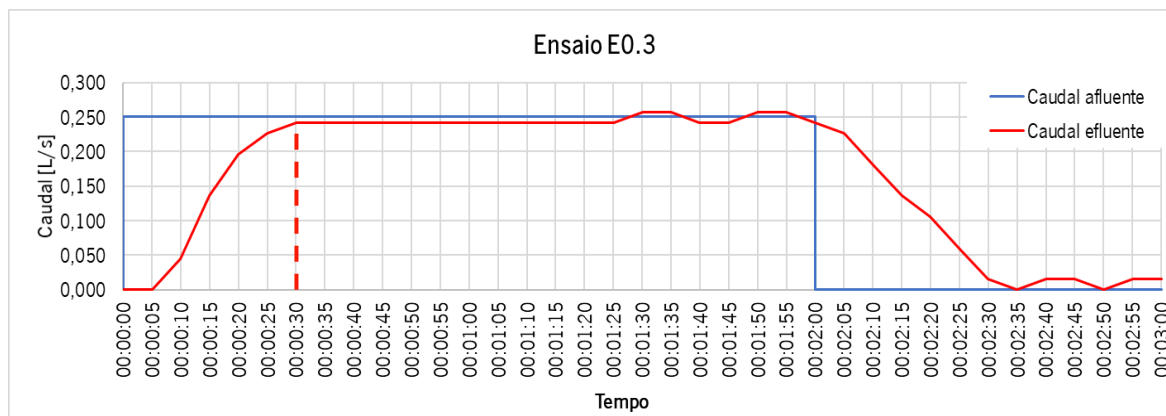


Figura 21 – Efeito produzido pela base drenante no caudal efluente, para um caudal afluente de 0,250 L/s

- Análise dos resultados obtidos em E0.1, E0.2 e E0.3

Antes de se proceder à análise dos resultados propriamente dita, é necessário estabelecer uma norma relativa à leitura dos hidrogramas. Face ao intervalo de registo adotado, o tempo de chegada das primeiras partículas de água à caixa de recolha, pode ter ocorrido entre os 5 e os 10 s. Assim sendo, optou-se por considerar que o tempo dos primeiros registos corresponde ao primeiro tempo da escala adotada que tem um valor de caudal maior que 0. Ou seja, para o caso dos ensaios E0.1, E0.2 e E0.3, o primeiro registo de caudal ocorreu 10 s após o início do ensaio. Doravante esta norma será aplicada para todos os resultados obtidos e analisados. Além disso, a linha a traço interrompido (com a cor idêntica à respetiva curva do caudal efluente) representa o local do hidrograma onde se determinou que foi atingido, pela primeira vez, o caudal máximo do ensaio, por forma a marcar visualmente aquilo que se considerou nas análises relativas a esses aspetos, que se expõem daqui em diante.

Passando agora à análise dos resultados, tal como foi mencionado no parágrafo anterior, o primeiro registo de caudal efluente ocorre aos 10 s. Esse tempo pode ser correlacionado com a duração que as primeiras gotas de água demorariam a chegar a uma sarjeta devido à absorção/permeabilidade dos materiais constituintes dos arruamentos e do atrito nas superfícies ao longo do percurso até à sarjeta.

Verifica-se, ainda, que o pico de caudal efluente é atingido num tempo reduzido (20 s) e coincidente em E0.1 e E0.2, o que comprova (nas condições ensaiadas) que esse tempo é independente do caudal introduzido, variando apenas os valores do caudal efluente (será tanto maior ou tanto menor, quanto maior ou menor for o caudal afluente). Este tempo reduzido é, igualmente, comparável com o do funcionamento de uma sarjeta.

No ensaio E0.3, constata-se que a base drenante não produziu nenhum efeito significativo no hidrograma do caudal efluente. O atraso no primeiro registo de caudal manteve-se igual (10 s), verificando-se apenas um aumento de 10 s no tempo que demora a atingir o pico do caudal efluente (30 s no total), que podem explicar-se pelo aumento da resistência hidráulica gerada pelos materiais da base drenante.

Após o “fecho da torneira”, cessando a entrada de caudal afluyente, observa-se que a parte final dos hidrogramas dos ensaios E0.1 e E0.2 apresentam um comportamento semelhante nos caudais efluentes de ambos, demorando 25 s até não sair mais água. Por sua vez, no ensaio E0.3, demorou 35 s entre a cessação do caudal afluyente e o término da saída de efluente, correspondendo a mais 10 s que nos ensaios E0.1 e E0.2. Nos três ensaios realizados ocorreram pequenas oscilações no final dos hidrogramas (entre os 2 min e 25 s e os 3 min, no caso de E0.1 e E0.2; e entre os 2 min e 35 s e os 3 min, no caso de E0.3), que são recorrentes durante todos os ensaios realizados neste estudo. Essas oscilações são resultado da escorrência de pequenos volumes acumulados nas arestas e mossas no fundo das estruturas metálicas dos CB, no dreno e nos materiais constituintes dos meios porosos. Ademais, a adição dos materiais constituintes dos meios porosos, aumentam quer os espaços onde a água pode ficar acumulada, quer a área de superfícies permeáveis/absorventes correspondente aos elementos do material utilizado, pelo que será expectável um crescimento desse valor à medida que são colocadas mais camadas de material dos meios porosos. Contudo, os valores correspondentes a essas acumulações são pequenos, quando comparados com a grandeza dos restantes valores medidos nos ensaios, pelo que são irrelevantes. Neste ensaio, os erros relativos percentuais máximos das medições efetuadas em E0.1, E0.2 e E0.3 foram estimados em $\pm 0,1\%$, $\pm 2,1\%$ e $\pm 0,6\%$, respetivamente.

4.2 Desempenho hidráulico dos SVDU

O desempenho hidráulico dos SVDU, neste caso em particular dos CB, com os meios porosos já definidos, pode ser avaliado de formas distintas, sendo que neste trabalho optou-se por avaliar três efeitos, nomeadamente: o efeito da composição dos CB, o efeito da variação do caudal afluyente e o efeito do regime de escoamento. Deste modo, é possível determinar se os SVDU cumprem os objetivos para os quais se dispõem, nomeadamente no desfasamento temporal entre a entrada do caudal afluyente e a saída do caudal efluente dos CB, no atraso do pico de caudal e na regularização do caudal afluyente. Além disso, os resultados obtidos nos ensaios efetuados, relativos ao desempenho hidráulico dos SVDU, serão comparados com a situação de referência, por forma a evidenciarem-se as diferenças entre os SVDU, sob a forma de CB, e os sistemas de drenagem tradicionais.

4.2.1 Efeito da composição dos canteiros de biofiltração

O estudo e a avaliação do efeito da composição dos CB têm como objetivo comparar as diferentes camadas dos meios porosos, testadas em paralelo e em simultâneo, e averiguar o efeito produzido por cada uma delas no caudal efluente. Para tal, foram desenvolvidos cenários onde se testam as diferentes camadas, submetidas ao mesmo valor de caudal afluente em regime permanente e em regime não permanente no padrão estabelecido na Metodologia de investigação.

- Apresentação dos resultados obtidos

Nos cenários 1a e 1b, foram introduzidas as primeiras camadas de meio filtrante em ambos os CB: no CB1 foi colocada uma camada de brita calcária misturada com desperdício têxtil (MP1.1) e no CB2 uma camada de areão (MP2.1), ambas com 30 cm de espessura. Nestes cenários dá-se especial atenção ao facto de a camada de areão ter um índice de vazios menor que o da brita (o areão tem granulometria inferior). Todavia, o facto da brita se encontrar misturada com o desperdício têxtil, pode minimizar esta diferença. É de salientar que no cenário 1a (ensaio E1.1), as camadas referidas foram testadas com o caudal afluente em regime permanente com valor de 0,250 L/s e no cenário 1b (E1.2) foram ensaiadas em regime não permanente, com caudal médio de 0,255 L/s. Note-se que, para não tornar a apresentação de resultados repetitiva, os cenários 2a, 3a, e 4a apontam para um caudal afluente de 0,250 L/s em regime permanente, tal como se sucede com o cenário 1a, ao passo que os cenários 2b, 3b e 4b, utilizam um caudal afluente médio de 0,255 L/s, em regime não permanente, tal como no cenário 1b.

Os hidrogramas resultantes dos ensaios E1.1 e E1.2 encontram-se expostos nas Figuras 21 e 22.

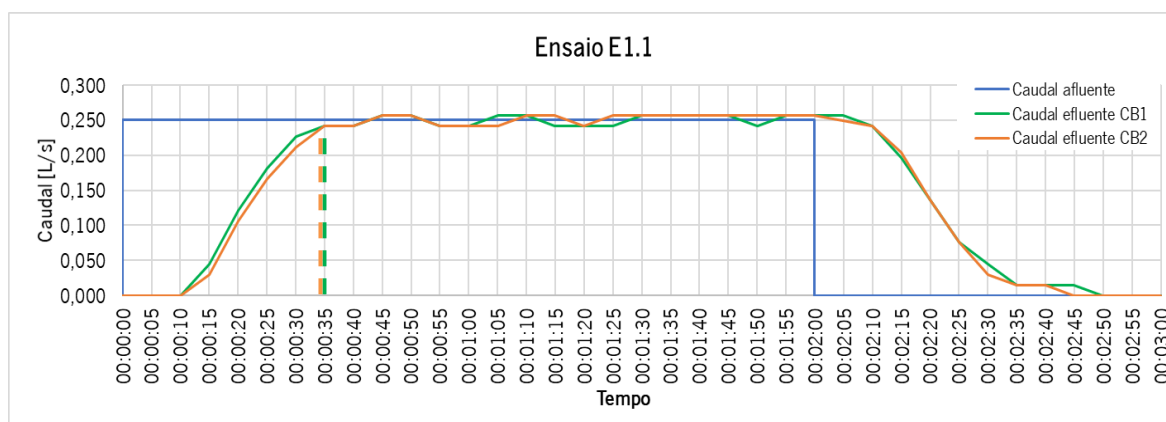


Figura 22 - Efeito da introdução das camadas MP1.1 e MP2.1 no caudal afluente em regime permanente

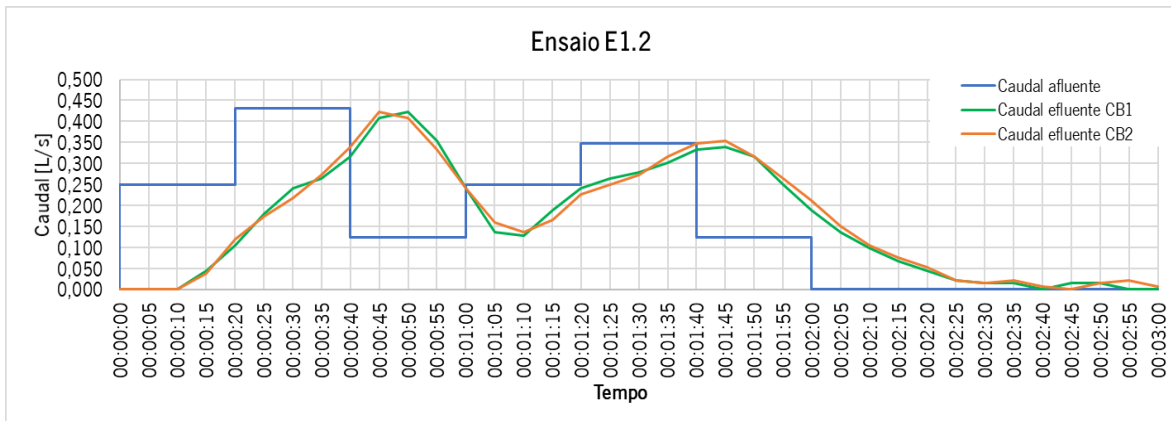


Figura 23 - Efeito da introdução das camadas MP1.1 e MP2.1 no caudal afluente em regime não permanente

Os ensaios E2.1 e E2.2 (Figuras 23 e 24) dos cenários 2a e 2b tem a particularidade de serem os únicos onde foram testadas camadas com materiais completamente diferentes ao nível da granulometria e da tipologia, uma vez que se colocou uma camada de esferas de argila com incorporação de pontas de cigarros, nas proporções mencionadas anteriormente, no CB1 (MP1.2) e uma camada de areia (MP2.2) no CB2, ambas com 20 cm de espessura. As esferas de argila utilizadas têm dimensões e porosidade (uma das suas características mais relevantes) superiores às das partículas de areia. Estas, pela sua dimensão mais reduzida, originam um menor índice de vazios na camada.

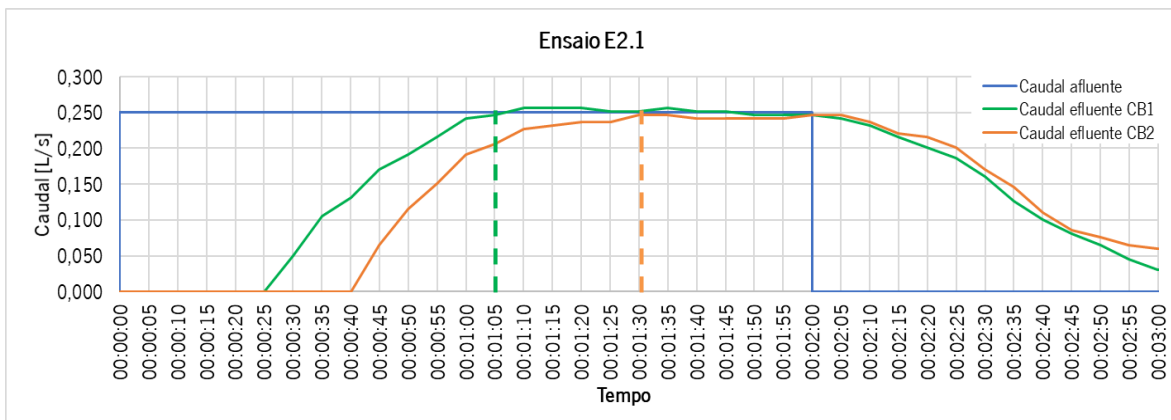


Figura 24 - Efeito da introdução das camadas MP1.2 e MP2.2 no caudal afluente em regime permanente

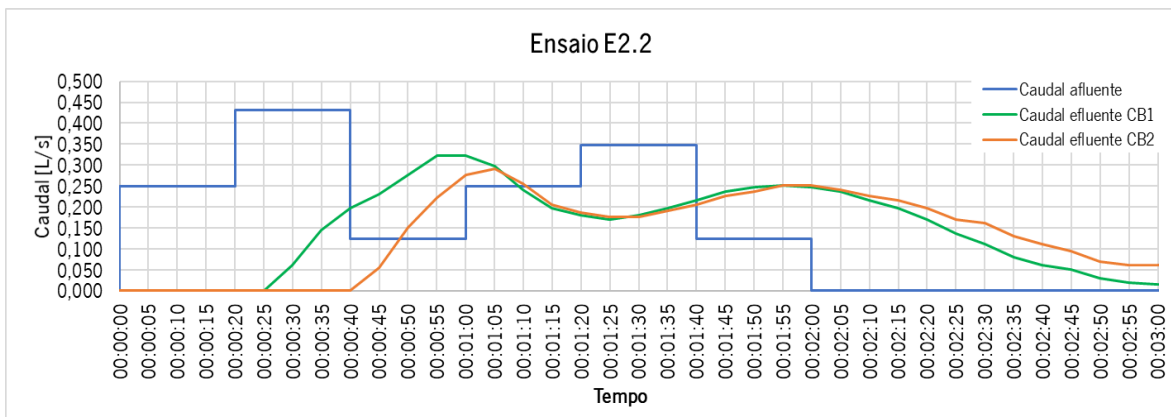


Figura 25 - Efeito da introdução das camadas MP1.2 e MP2.2 no caudal afluente em regime não permanente

Nos cenários 3a e 3b foram introduzidas as camadas de substrato vegetal, camadas essas que, expectavelmente, apresentariam maior resistividade hidráulica (maior perda de carga de para uma mesma espessura). Porém, a diferença entre as camadas nos dois CB é mínima, pois as cascas de ovos presentes na camada na camada do CB1 são de dimensão reduzida e encontram-se espalhadas no substrato vegetal.

Como já foi referido, a introdução das cascas de ovos no substrato vegetal do CB1 visava não apenas a valorização dum resíduo, mas também aproveitar o seu efeito nutritivo para as plantas e avaliar e o seu potencial contributo na retenção de poluentes dissolvidos nas escorrências pluviais (pelas razões já mencionadas, não foi possível avaliar este contributo através de outros ensaios/cenários).

Os hidrogramas resultantes dos ensaios E3.1 e E3.2 dos cenários 3a e 3b encontram-se expostos nas Figuras 25 e 26.

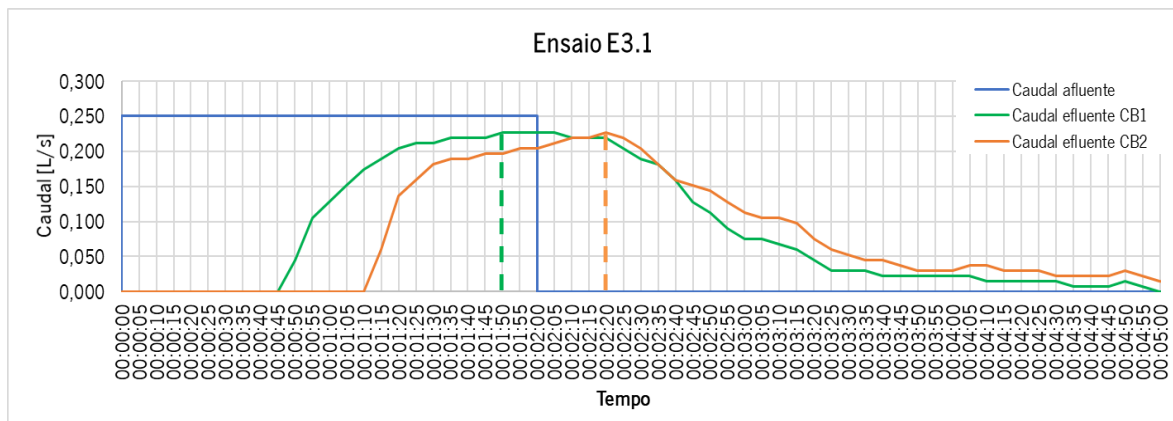


Figura 26 - Efeito da introdução das camadas MP1.3 e MP2.3 no caudal afluente em regime permanente

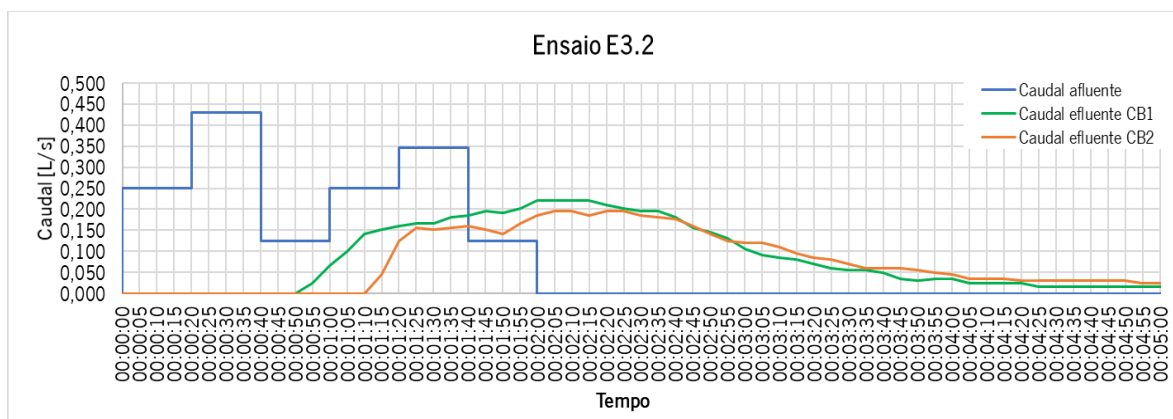


Figura 27 - Efeito da introdução das camadas MP1.3 e MP2.3 no caudal afluente em regime não permanente

O objetivo dos cenários 4a e 4b passou por averiguar se a adição da relva traria alguma diferença no caudal efluente. Note-se que a relva foi apenas colocada sobre o substrato vegetal, não existindo

penetração significativa das raízes no substrato vegetal. Assim sendo, é de salientar que os resultados poderiam ter sido diferentes caso as raízes estivessem consolidadas no substrato.

Além de se avaliar o efeito da relva, os resultados dos ensaios destes cenários (E4.1 e E4.2) serão os primeiros a retratar o comportamento dos meios porosos completos. As Figuras 27 e 28 apresentam os hidrogramas resultantes dos ensaios E4.1 e E4.2.

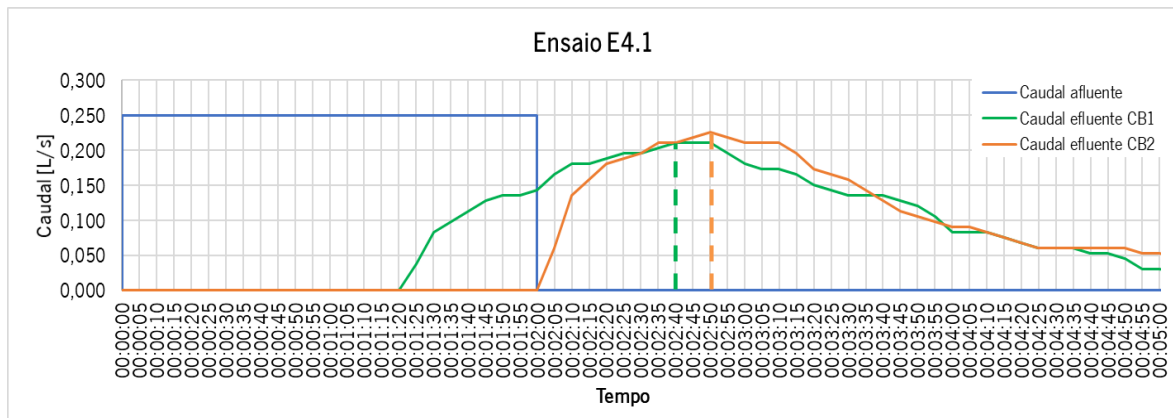


Figura 28 - Efeito das camadas MP4.1 e MP4.2 no caudal afluente em regime permanente

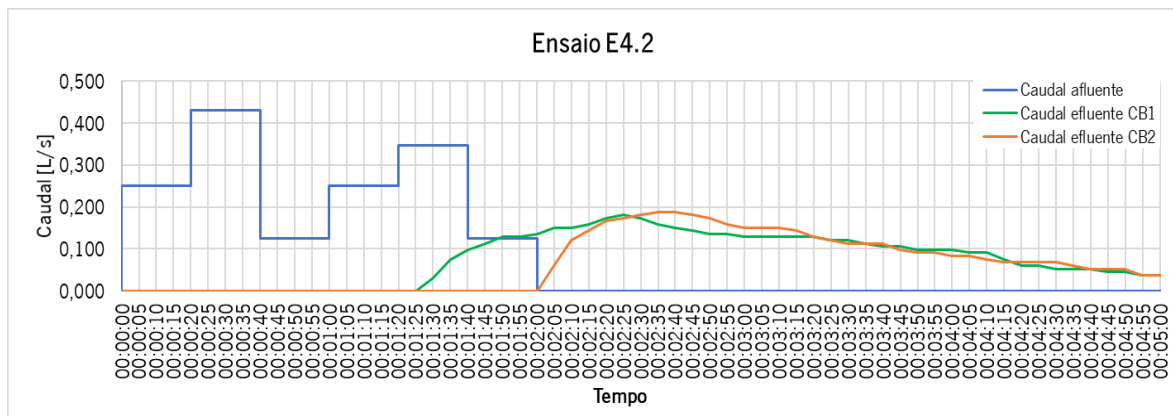


Figura 29 - Efeito das camadas MP1.4 e MP2.4 no caudal afluente em regime não permanente

- Análise dos resultados obtidos

Antes de se proceder à análise dos resultados, é importante referir que, pelo facto do caudal médio dos ensaios onde se utilizou o regime não permanente se situar nos 0,255 L/s (muito semelhante ao caudal afluente em regime permanente, com valor de 0,250 L/s), torna possível a comparação de alguns parâmetros dos resultados relativos aos ensaios dos dois tipos.

Nos hidrogramas dos ensaios E1.1 e E1.2, as curvas do caudal efluente apresentam um comportamento muito idêntico, o que significa que a camada de brita calcária misturada com desperdício têxtil no CB1 e camada de areão no CB2, produzem efeitos semelhantes nos caudais efluentes. Todavia, a partir dos

ensaios E2.1 e E2.2, começam a surgir dissimilaridades no comportamento dos caudais efluentes de CB1 e CB2. Nesses dois ensaios (E2.1 e E2.2) foi introduzida a camada de argila expandida incorporada com pontas de cigarros no CB1 e a camada de areia no CB2, sendo que as diferenças verificadas podem ter origem nas características dispares entre os materiais (granulometria, porosidade e índice de vazios) já abordadas anteriormente. Neste caso em particular, o menor índice de vazios da camada de areia aparenta influenciar mais o atraso do caudal efluente (45 s) que a porosidade das esferas de argila (30 s).

Com a adição sucessiva das respetivas camadas em ambos os CB, verificou-se uma evolução muito significativa nos atrasos da saída do caudal efluente, assim como no tempo que demora até se atingir os picos dos caudais efluentes (Figura 29). Mais concretamente, tanto no CB1, como no CB2, os primeiros registos de caudal efluente no ensaio E1.1 situam-se nos 15 s e o pico do caudal efluente é atingido aos 35 s do ensaio, ao passo que, com os meios porosos completos (em E4.1), os atrasos iniciais passam para 1min e 25 s no CB1 e 2 min e 5 s no CB2 e os picos de caudal ocorrem aos 2 min e 40 s e aos 2 min e 50 s, respetivamente. Comparando os resultados de E4.1 com a situação de referência (E0.1), as diferenças dos atrasos iniciais entre esses dois ensaios foram de 1 min e 15 s no CB1 e 1 min e 55 s no CB2, sendo que as diferenças dos atrasos dos picos de caudal afluente situam-se em 2 min e 20 s no CB1 e em 2 min e 30 s no CB2. Estes valores são relevantes, na medida em que foi possível atingir atrasos correspondentes à duração de eventos de precipitação relativamente comuns, com uma intensidade de precipitação (18 mm/h) relativamente alta.

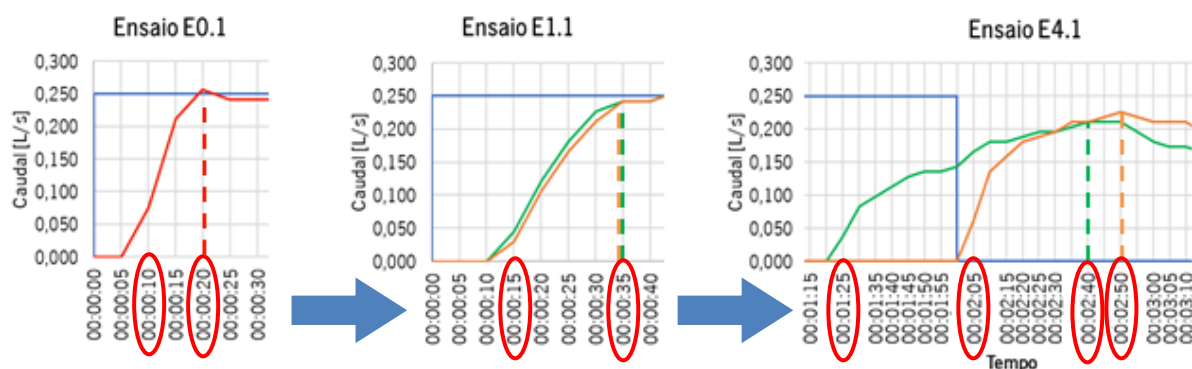


Figura 30 - Evolução dos atrasos na saída e nos picos dos caudais efluentes entre os ensaios E0.1, E1.1 e E4.1

É também possível verificar que os valores do atraso dos primeiros registos de caudal efluente são semelhantes entre os pares de ensaios em regime permanente e não permanente, existindo apenas duas pequenas diferenças de 5 s entre os ensaios E3.1 e E3.2 e entre os ensaios E4.1 e E4.2 na curva do caudal efluente CB1, não havendo uma razão fundamentada para justificar esse comportamento. Além

dos atrasos da saída inicial e do pico do caudal efluente, as camadas dos meios porosos produziram, igualmente, amortecimentos nos picos de caudal, visíveis nos ensaios E3.1 e E4.1. O valor desse amortecimento é muito semelhante em ambos os ensaios mencionados e constituem uma redução de 15,6% no CB1 e de 9,6% no CB2 no ensaio E4.1, face ao pico do caudal efluente do ensaio E0.1.

O hidrograma resultante do ensaio E1.2 permite verificar que os caudais efluentes de CB1 e CB2 seguem, de forma aproximada, o padrão do caudal afluente, sendo atingidos todos os picos (superiores e inferiores) desse padrão. Isto significa que nenhuma das camadas produz um efeito de amortecimento suficiente para que os picos não sejam atingidos. No ensaio E2.2 já é possível notar uma regularização do caudal efluente, com ligeiras diferenças entre as curvas dos caudais efluentes de CB1 e CB2, mas com os picos dos caudais efluentes superiores e inferiores mais longe de serem atingidos em ambos, quando comparado com o ensaio E1.2 (Figura 30).

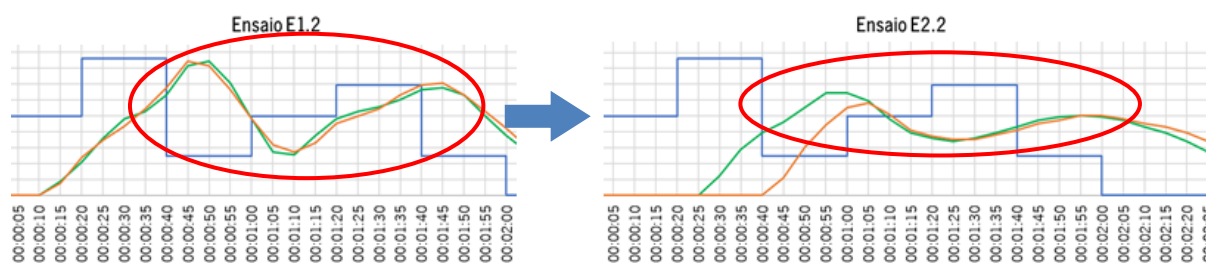


Figura 31 -Diferenças na regularização do caudal afluente em regime não permanente entre os ensaios E1.2 e E2.2

No hidrograma do ensaio E3.2 constata-se que já foi atingido um nível de regularização do caudal efluente praticamente total em ambas as instalações, atingindo a regularização total no hidrograma do ensaio E4.2, uma vez que a introdução dos meios porosos eliminou por completo quaisquer semelhanças com o padrão das oscilações introduzidas pelo caudal afluente (regime não permanente). Este fenómeno pode resultar do efeito da ocorrência de uma perda de carga elevada, no conjunto das camadas em ambos os CB, originando um atraso elevado no início do caudal efluente e a sua regularização. Para além da regularização proporcionada pelos meios porosos, é possível constatar que, no ensaio E4.2, o pico do caudal efluente ocorre ligeiramente mais cedo no CB1, apesar de ser mais reduzido que o do CB2. Passando a números, o pico do caudal na instalação-piloto 1 ocorre aos 2 min e 25 s com um valor de 0,181 L/s, ao passo que o pico do caudal na instalação-piloto 2 verifica-se aos 2 min e 35 s e com valor 0,189 L/s (Figura 31).

Outra característica relevante dos hidrogramas é a forma das curvas dos caudais efluentes. Observando os hidrogramas relativos aos ensaios E0.1, E1.1, E2.1, E3.1 e E4.1 é possível verificar que as curvas do caudal efluente começaram com uma forma semelhante a um trapézio (E0.1 e E0.2) e, a partir de E2.1, assemelham-se a metade de uma elipse (com as devidas diferenças), tal como é ilustrado na Figura 31.

Estas formas são produzidas pelos declives (principalmente os iniciais e os finais) das curvas de caudal efluente, que refletem o ritmo de variação dos caudais efluentes.

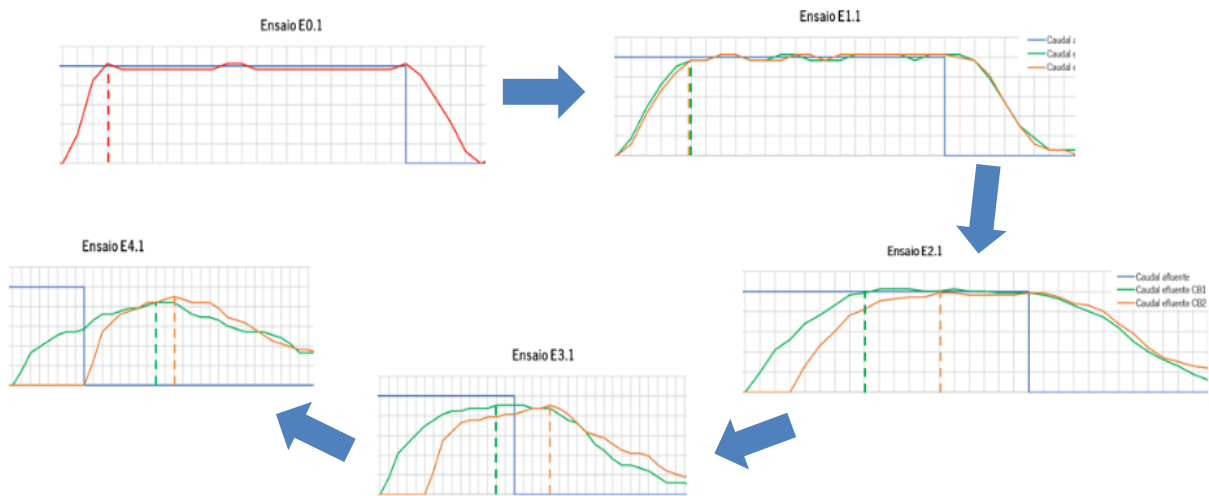


Figura 32 - Evolução das formas das curvas dos caudais efluente nos ensaios E0.1, E1.1, E2.1, E3.1 e E4.1

Nos ensaios E1.1 e E1.2, os declives das curvas dos caudais efluentes de ambos os CB são semelhantes, tanto na fase inicial, como na fase final do hidrograma, o que pode traduzir numa equivalência entre o efeito da presença do desperdício têxtil (absorção das primeiras gotas de água) e o efeito da granulometria mais reduzida (e com maior área específica de absorção) do areão. A partir dos ensaios E2.1 e E2.2, as curvas do caudal efluente do CB2 tendem a produzir declives mais acentuados na fase crescente (crescimento do caudal efluente) e mais suaves na fase decrescente (no final dos hidrogramas). O contrário acontece com o CB1, onde os declives da fase inicial das curvas do caudal efluente crescem de forma menos acentuada, mas na fase final, decrescem mais rapidamente que as do CB1 (Figura 32). Isto parece demonstrar que, o facto de a camada de argila expandida ter um índice de vazios maior que a camada de areia, permite uma passagem mais fluida do caudal, ao passo que o baixo índice de vazios da camada de areia produz uma resistência hidráulica maior. Ademais, é possível que a camada de areia retenha a água afluyente nos seus interstícios até que estes estejam praticamente preenchidos, e que, após esse preenchimento e no momento da passagem da água para as camadas subadjacentes, o caudal retoma um valor próximo, mas inferior, ao caudal afluyente.

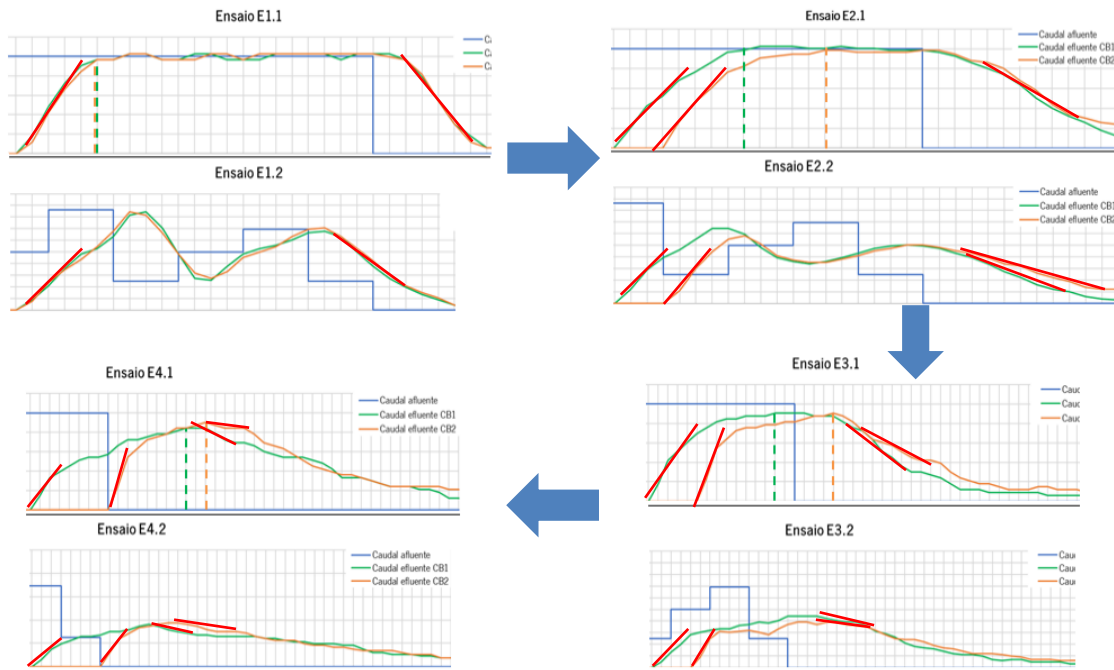


Figura 33 - Evolução dos declives (linhas vermelhas) das curvas dos caudais efluentes nos ensaios

Além disto, o CB1 demora menos tempo atingir o pico de caudal efluente em todos os ensaios realizados (exceto nos ensaios E1.1 e E1.2 onde as curvas dos dois CB são, praticamente, coincidentes). Porém, o pico do caudal efluente é superior no CB2 na maioria dos hidrogramas analisados. Tudo isto combinado parece indicar que o meio poroso convencional tenha uma capacidade de retenção maior numa fase inicial, ao passo que o meio poroso não convencional tende a produzir uma resistência hidráulica mais uniforme ao longo do processo de infiltração e com uma maior capacidade, ainda que ligeira, para amortecer os picos de caudal efluente.

Outra característica de relevo presente nos hidrogramas analisados neste item, é a tendência crescente para o prolongamento do tempo de saída do efluente. Aliás, quando comparados os resultados dos ensaios analisados, com os obtidos nos ensaios do cenário 0, é possível constatar um alongamento da base da área do hidrograma relativa à saída de água (efluente). Tal significa que, o acréscimo de camadas irá prolongar o tempo de saída da água dos CB. Mais concretamente, o primeiro aumento do tempo de registo de dados relevante ocorreu no ensaio E2.1, onde o caudal efluente cessou aos 4 min e 40 s no CB1, enquanto que no CB2 terminou aos 5 min e 10 s. As camadas MP1.3, MP1.4, MP2.3 e MP2.4 provocaram uma extensão ainda maior nestes tempos, tais que, nos ensaios E4.1 e E4.2, os CB cessaram o caudal efluente perto dos 15 min.

Por último, relativamente aos erros máximos relativos percentuais dos ensaios, estes foram contabilizados em $\pm 1,1\%$ para o Ensaio E1.1; $\pm 2,2\%$ para o Ensaio E1.2; $\pm 2,7\%$ para E2.1; $\pm 7,6\%$ para E2.2; $\pm 5,9\%$ para E3.1; $\pm 5,8\%$ para E3.2; $\pm 3,9\%$ para E4.1 e $\pm 10,4\%$ para E4.2.

4.2.2 Efeito da variação do caudal afluyente

O estudo do efeito da variação do caudal afluyente permitirá avaliar o comportamento dos meios porosos completos (meio poroso não convencional e meio poroso convencional) sob diferentes caudais afluyentes em regime permanente. Para tal, foram concebidos cenários de análise onde se fez variar o valor do caudal afluyente em regime permanente de formas distintas: os caudais afluyentes dos cenários 4c e 5 foram obtidos através da variação da intensidade de precipitação e o cenário 6 foram calculados pela variação da área da bacia contributiva. Na realidade, tanto a área, como a intensidade de precipitação, como a sua combinação, influenciam diretamente o caudal afluyente, e essa, sim, é a variável que importa simular no sentido de avaliar os seus efeitos nos hidrogramas do caudal efluente em cada um dos sistemas.

- Apresentação dos resultados obtidos

O cenário 4c representa o comportamento dos meios porosos completos sujeitos a um caudal de 0,250L/s. Note-se que os resultados do ensaio E4.1 (Figura 33) já foram utilizados no cenário 4a e servirão de base de comparação com os restantes ensaios do cenário 4c.

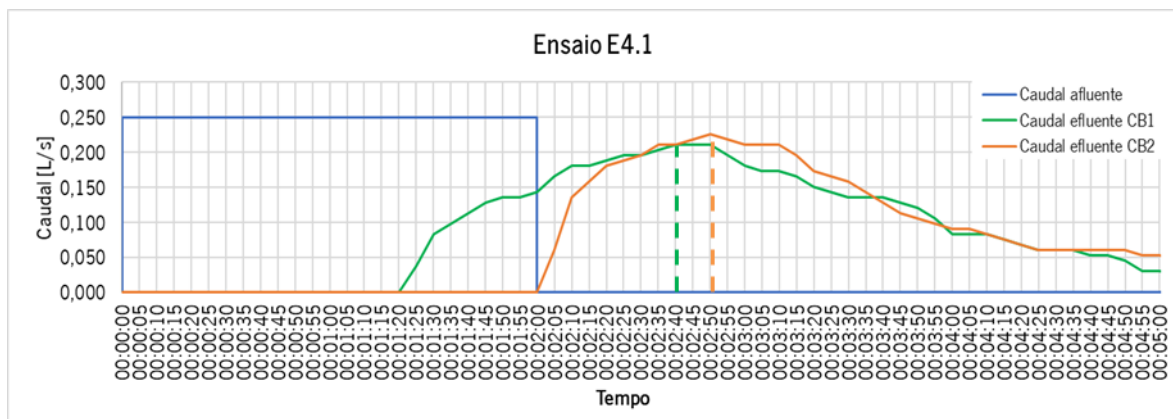


Figura 34 - Efeito da variação do caudal afluyente através da introdução dum caudal afluyente de 0,250 L/s em regime permanente no comportamento hidráulico dos CB

O cenário 5 preconiza a realização de dois ensaios com dois caudais distintos, com valores de 0,347 L/s (E5.1) e 0,431 L/s (E5.2). Estes caudais têm origem em duas intensidades de precipitação distintas

(25 mm/h e 31 mm/h) e maiores do que a que deu origem ao caudal afluyente do ensaio E4.1 (18mm/h). Nas Figuras 34 e 35 encontram-se representados os ensaios E5.1 e E5.2/E6.2⁵, respetivamente.

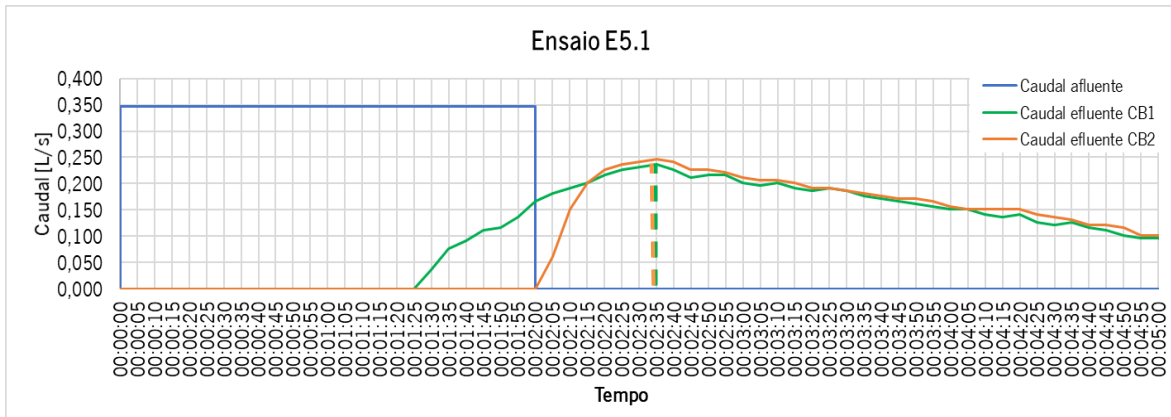


Figura 35 - Efeito da variação do caudal afluyente através da introdução dum caudal afluyente de 0,347 L/s em regime permanente no comportamento hidráulico dos CB

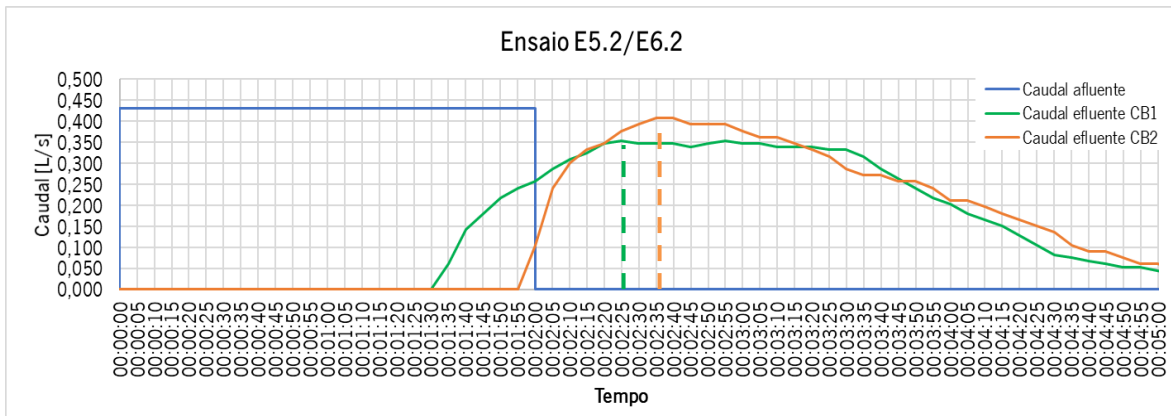


Figura 36 - Efeito da variação do caudal afluyente através da introdução dum caudal afluyente de 0,431 L/s em regime permanente no comportamento hidráulico dos CB

Ao contrário do cenário 5 (onde os caudais afluyentes foram calculados pela variação da intensidade de precipitação), no cenário 6 os caudais afluyentes foram calculados através da variação das áreas da bacia contributiva, nomeadamente pela redução da área contributiva modelo em 50% (25 m²) para o ensaio E6.1 (Figura 36) e no aumento dessa mesma área em 175% (87 m²) para o ensaio E6.2 (com os resultados expostos na Figura 35), admitindo uma intensidade de precipitação de 18 mm/h para ambos.

⁵ Relembra-se o facto de que no ensaio E5.2 se utiliza um valor de caudal afluyente muito semelhante ao que é proposto para o ensaio E6.2, assumindo-se que os resultados do ensaio E5.2 seriam os mesmos que os do ensaio E6.2.

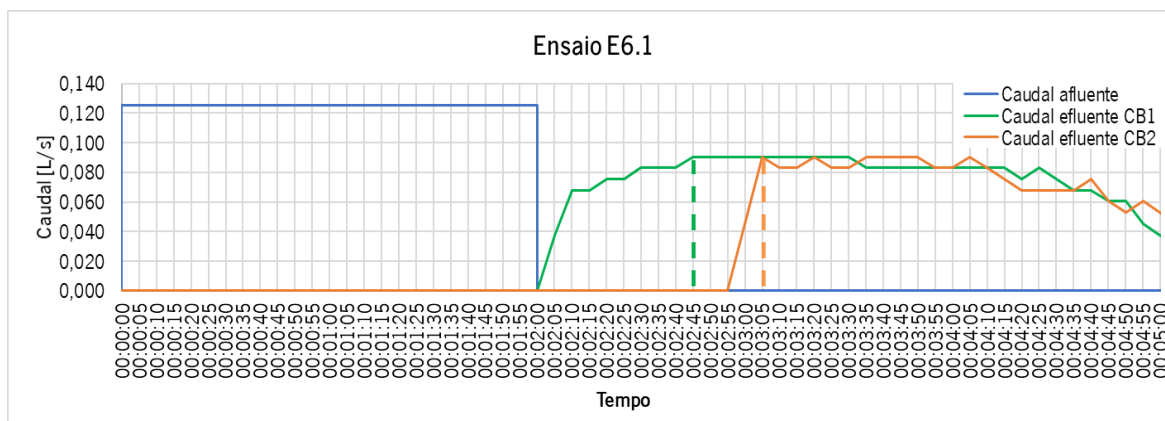


Figura 37 - Efeito da variação do caudal afluyente através da introdução dum caudal afluyente de 0,125 L/s em regime permanente no comportamento hidráulico dos CB

- Análise dos resultados obtidos

As características gerais das curvas do caudal efluente, relativas à forma e aos declives das fases ascendente e descendente do caudal efluente, são semelhantes nos ensaios E4.1, E5.1 e E5.2/E6.2, sendo ligeiramente diferentes em E6.1. Essas diferenças devem-se à magnitude dos valores utilizados ser mais reduzida em E6.1, que, aliado à escala dos eixos registado dos hidrogramas, faz com que as variações apareçam mais vincadas que nos restantes.

Nos ensaios E4.1, E5.1, E5.2/E6.2 e E6.1, verifica-se que os meios porosos produziram os efeitos esperados no que toca à regularização do caudal: o atraso da saída inicial do efluente é bastante significativo, bem como o atraso do pico de caudal efluente, que se situa em 2 min e 35 s no CB1 e no CB2 no ensaio E5.1; em 2 min e 25 s no CB1 e em 2 min e 35 s no CB2 nos ensaios 5.2/E6.2 e ainda em 2 min e 45 s no CB1 e em 3 min e 5 s no CB2 no ensaio E6.1.

Os caudais máximos dos ensaios ficam longe de ser atingidos em ambos os CB nos quatro ensaios (E4.1, E5.1, E5.2/E6.2 e E6.1), tendo-se obtido amortizações nos caudais efluentes de, aproximadamente: 15,6% no CB1 e de 9,6% no CB2 no ensaio E4.1; 32,0% no CB1 e 28,8% no CB2 no ensaio E5.1; 17,7% no CB1 e 5,3% no CB2 nos ensaios E5.2/E6.2; e 27,8%, em ambos os CB no ensaio E6.1. É, ainda, possível efetuar uma comparação entre o ensaio E0.2 da situação de referência e o ensaio E5.1, uma vez que preconizam o mesmo caudal afluyente, verificando-se uma redução de aproximadamente 30% no caudal máximo efluente em ambas as instalações. As reduções obtidas ao longo dos ensaios nem são proporcionais, nem inversamente proporcionais ao aumento do caudal afluyente, aparentando uma aleatoriedade na sua evolução, não existindo uma razão fundamentada que explique o sucedido

No Quadro 15 apresentam-se os fatores de proporcionalidade (ordem de grandeza da variação relativa) entre os caudais afluentes aos CB e os picos dos caudais efluentes de cada CB.

Quadro 15 - Fatores de proporcionalidade entre os caudais afluentes e os caudais efluentes dos CB

Caudal afluente		Caudal efluente			
CB1 e CB2	FP	CB1	FP	CB2	FP
0,125 L/s	2x	0,091 L/s	2,3x	0,091 L/s	2,5x
0,250 L/s	1,4x	0,211 L/s	1,1x	0,226 L/s	1,1x
0,347 L/s	1,2x	0,236 L/s	1,5x	0,247 L/s	1,7x
0,431 L/s		0,355 L/s		0,408 L/s	

Na análise dos fatores de proporcionalidade apresentados no Quadro 15, verifica-se não existir uma tendência definida para essa proporcionalidade, que caracterize o impacto do aumento dos caudais afluentes, no aumento dos caudais efluentes dos CB. Isto porque, enquanto os valores de caudal afluente apresentam uma tendência decrescente na sua grandeza, os caudais efluentes não têm uma tendência coerente na sua evolução, uma vez que seria expectável que os valores dos caudais efluentes seguissem uma tendência semelhante (de decréscimo, neste caso) à do caudal afluente.

Quanto aos erros relativos máximos obtidos nos ensaios deste cenário, os que são relativos aos ensaios E4.1, E5.1, E5.2/E6.2 e E6.1, cifram-se em $\pm 3,9\%$, $\pm 3,8\%$, $\pm 2,5\%$ e $\pm 19,0\%$. É de salientar que, apesar de o último valor ser mais elevado que os erros dos restantes ensaios, o valor do erro absoluto é semelhante ao dos ensaios anteriores. Isto porque, como a diferença entre o volume de entrada e de saída foi semelhante à dos ensaios anteriores e que o volume de entrada nestes ensaios foi menor, o denominador nessa equação é menor e, por conseguinte, o resultado do erro relativo será maior para valores iguais no numerador (diferenças).

A realização do cenário 7 consistiu na **avaliação da capacidade máxima** dos dois CB (CB1 e CB2), através da introdução do caudal máximo debitado pela torneira de alimentação ($\approx 0,450\text{L/s}$) em ambos. Para este ensaio não foram registados quaisquer tipo de dados, uma vez que consistiu na avaliação visual da presença de transbordamentos na instalação experimental. Tal como foi verificado nos cenários 3a e 4a, as camadas do meio poroso que provocam maior resistência, neste caso particular, é a combinação do substrato vegetal com a relva, pelo que é este conjunto que determina a capacidade máxima do sistema (pode nem sempre ser assim, caso exista alguma camada com resistência superior).

A introdução do caudal máximo da torneira não foi suficiente para fazer com que os CB entrassem em carga, pelo que não transbordaram. Deste modo, foi possível constatar que a capacidade máxima, em

ambas as instalações, é superior a 0,450L/s, que coincide a uma intensidade de precipitação de 36mm/h e a uma área drenagem de 50m². Este evento de precipitação ocorreu 2,79% do período chuvoso analisado e corresponde a 17 ocorrências em 5 anos (3,4 vezes por ano).

4.2.3 Efeito do regime de escoamento

A avaliação do efeito do regime de escoamento tem como objetivo elencar os principais efeitos e diferenças nos caudais efluentes após a introdução de caudais afluentes em regime permanente e regime não permanente. O caudal afluente utilizado em regime permanente tem o valor de 0,250 L/s e o caudal médio afluente em regime não permanente corresponde a 0,255 L/s. Dado que os dois caudais são muito semelhantes, é possível fazer este tipo de análise. Caso contrário, seriam comparados efeitos que estariam sob a influência direta da magnitude distinta dos dois caudais.

- Apresentação dos resultados obtidos

Tal como já foi mencionado anteriormente, os ensaios E4.1 e E4.2 (Figuras 37 e 38) constituem os hidrogramas obtidos nos ensaios onde os CB já possuem os meios porosos completos, testados com a introdução dum caudal afluente em regime permanente e dum caudal afluente em regime não permanente, por essa ordem.

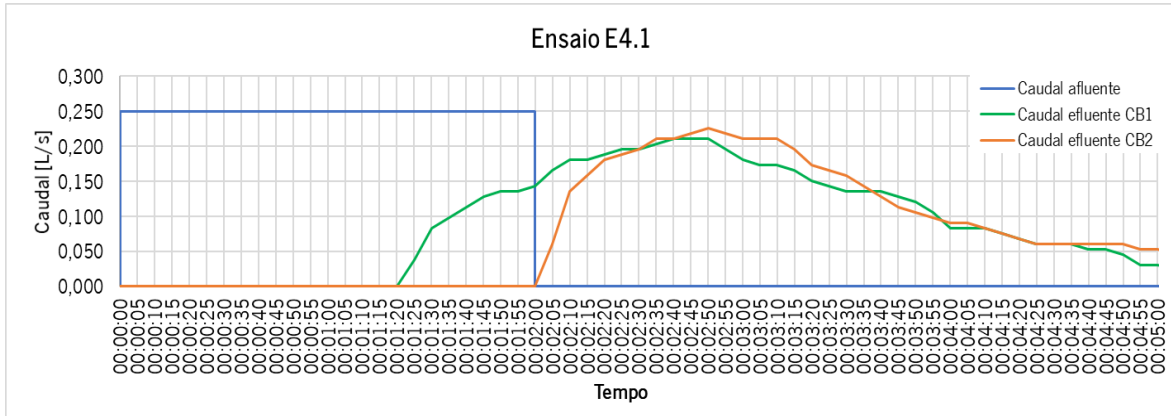


Figura 38 - Efeito do regime permanente no comportamento hidráulico dos CB

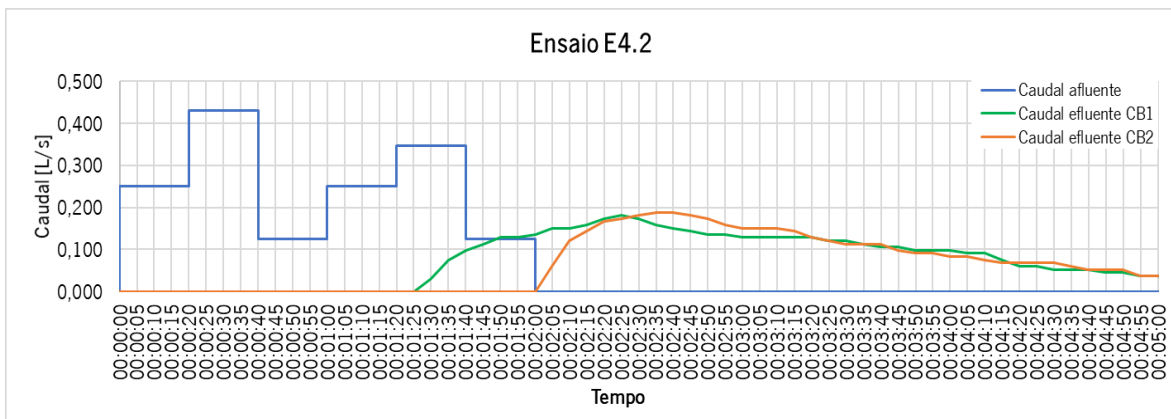


Figura 39 - Efeito do regime não permanente no comportamento hidráulico dos CB

- Análise dos resultados obtidos

Nos hidrogramas representados dos ensaios E4.1 e E4.2 é possível observar que as curvas do caudal efluente de ambos os CB apresentam comportamentos muito similares, o que sugere uma independência entre os caudais efluentes (tanto de CB1, como de CB2) e o regime de escoamento do caudal afluente, para os valores de caudal ensaiados.

Os tempos de atraso na saída do caudal efluente são muito semelhantes, bem como os declives da fase ascendente e descendente. Ainda assim, existem pequenas diferenças, relativas ao tempo de atraso dos picos de caudal: o CB1 atinge o pico de caudal efluente (0,211L/s) aos 2 min e 40 s no ensaio E4.1, enquanto que no ensaio E4.2 (0,181 L/s) é alcançado aos 2 min e 25 s; por sua vez, o CB2 atinge o pico de caudal efluente (0,226 L/s) em 2 min e 50 s no ensaio E4.1 e aos 2 min e 35 s (0,189 L/s) no ensaio E4.2. Isto significa que, apesar de no ensaio E4.2, o caudal afluente médio ser ligeiramente maior que o caudal afluente do ensaio E4.1, esse fator não reflete nos valores máximos de caudal efluente alcançados, uma vez que esses valores foram mais baixos em E4.2 que em E4.1, em ambos os CB. Além disso, os tempos com que foram atingidos esses máximos, são menores no ensaio E4.1, apesar de se ter alimentado um caudal em regime permanente.

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Os resultados obtidos nos ensaios, aliados à fundamentação teórica efetuada, permitem retirar as seguintes conclusões:

- O atraso observado no início da saída de caudal (efluente) foi significativo, mais concretamente na diferença entre a situação de referência (cenário 0) e os CB com os meios filtrantes completos, o que atesta a eficácia de ambos os meios porosos, apesar de o meio poroso convencional ter obtido melhores resultados neste ponto particular;
- O atraso do pico de caudal foi ainda mais significativo que o do início da saída da água filtrada, o que contrasta com o comportamento dos SDT, em que a contribuição dos ramais de ligação (ligação sarjeta/coletor) é praticamente instantânea, fazendo com que se atinja rapidamente um pico de caudal no coletor. Assim, a incorporação de SVDU poderá atenuar e atrasar o efeito da rápida ocorrência de picos de caudal no coletor, de modo a evitar o seu transbordamento
- Nos ensaios efetuados ocorreu uma redução significativa do pico de caudal, ficando comprovado o amortecimento dos picos de caudal replicável para as escorrências urbanas;
- Para os eventos de precipitação estudados e para as áreas da bacia de contribuição adotadas, o caudal efluente foi completamente regularizado por ambos os meios porosos (convencional e não convencional) nos ensaios em regime não permanente, deixando de ser possível distinguir o padrão das oscilações do caudal afluente. Assim, fica demonstrado que estes sistemas dão uma resposta eficiente a eventos de precipitação sucessivos, de intensidades distintas e de curta duração;
- Dos resultados obtidos nos ensaios, constatou-se a existência duma variação sucessiva da forma dos hidrogramas relativos ao caudal efluente, desde a forma trapezoidal (ensaios E0.1 e E1.1) até à elíptica nos cenários subsequentes. Tal sucede pelos atrasos crescentes, quer no início da saída, quer no pico do caudal efluente, devido ao aumento contínuo da resistividade hidráulica resultante da adição de camadas aos meios porosos.
- O aumento da resistividade hidráulica provoca uma diminuição no ritmo de variação dos caudais efluentes, o que significa que o tempo entre o primeiro registo de caudal efluente e o primeiro

registro do pico desse caudal vai aumentando à medida que se acrescentam outras camadas aos meios porosos, e também prolonga o tempo que demora a cessar a saída da água nos CB;

- A análise das curvas de caudal efluente revelou que, a partir dos ensaios E2.1 e E2.2, o CB2 tende a produzir declives mais acentuados na fase crescente (aumento do caudal efluente) e mais suaves na fase decrescente.
- O CB1 apresenta hidrogramas do efluente em que os declives são menos acentuados na fase crescente e mais pronunciados na fase descendente que os do CB2. Isto significa que os ritmos de variação do caudal efluente são diferentes nos dois CB: no CB2 o pico de caudal é atingido mais rapidamente que no CB1, mas neste último há uma diminuição mais rápida do caudal efluente após a interrupção do caudal afluente;
- Na avaliação do efeito da composição dos CB, ficaram patentes as semelhanças entre os resultados da brita calcária (CB1) e do areão (CB2), o que pode ser consequência duma equivalência entre o efeito da presença do desperdício têxtil (absorção das primeiras gotas de água) e o efeito da granulometria mais reduzida (e com maior área específica de absorção) do areão;
- As diferenças nos resultados no caudal efluente surgem após a introdução das esferas de argila expandida (CB1) e da areia (CB2). A resistência hidráulica oferecida pelo meio poroso não convencional no CB1 aparenta ser menor do que a produzida pelo meio poroso convencional no CB2, onde prevalece o menor índice de vazios da camada de areia. Para além disso, é possível que a camada de areia retenha a água afluente nos seus interstícios até estes estarem praticamente preenchidos e que, após esse preenchimento, a passagem da água para as camadas subjacentes retome um valor de caudal próximo, mas inferior, ao caudal afluente;
- Na avaliação do efeito do regime de escoamento, ficou comprovado que para determinados valores de caudal afluente, o caudal efluente escoado pelos meios porosos ensaiados têm, aproximadamente, o mesmo comportamento, independentemente do regime induzido pelo caudal afluente (permanente ou não permanente);
- Não foi possível estabelecer uma relação coerente entre o aumento dos caudais afluentes, com o aumento dos caudais efluentes dos CB;
- Os materiais não convencionais utilizados no CB1 (desperdício têxtil, esferas de argila expandida, neste caso, com incorporação de pontas de cigarros e as cascas de ovos – resíduos existentes

a valorizar) não revelaram nenhum inconveniente para o comportamento hidráulico desse sistema. Aliás, o meio poroso não convencional até produziu melhores resultados no amortecimento dos caudais efluentes. Desta forma ficou comprovada a viabilidade da sua utilização em SVDU, tendo como objetivo a substituição e reduzir a produção e utilização de materiais inertes convencionais.

- Tendo em conta os resultados obtidos, não foi possível selecionar qual o melhor dos meios porosos testados, pois se por um lado, o meio poroso convencional provocou um maior atraso na saída do caudal (efluente), por outro, essa saída foi mais abrupta que no caso do meio poroso não convencional. Logo, não se pode concluir que uma situação seja mais vantajosa que a outra, pois para um determinado contexto de aplicação pode ser mais benéfico um maior atraso inicial, se o tempo em que o pico de caudal é atingido for pouco relevante, mas para outro contexto de aplicação desta solução pode ser preferível assegurar um aumento gradual do caudal efluente;
- Os caudais utilizados durante os ensaios foram obtidos através de intensidades de precipitação que deram origem a diversas situações de inundações e transbordamentos de redes de drenagem tradicionais;
- A introdução do caudal máximo da torneira ($\approx 0,450$ L/s) não foi suficiente para fazer com que as instalações transbordassem. Deste modo, foi possível constatar que a capacidade máxima, em ambas os CB, é superior a $0,450$ L/s, coincidindo a uma intensidade de precipitação de 36 mm/h e a uma área drenagem de 50 m². Este evento de precipitação ocorreu $2,79\%$ do período chuvoso analisado, que corresponde a 17 ocorrências em 5 anos ($3,4$ vezes por ano).

Em suma, através dos ensaios realizados, ficaram comprovadas as funcionalidades e as vantagens que estes sistemas proporcionam aos meios urbanos ao nível do seu comportamento hidráulico. Ficou demonstrada, também, a potencialidade da utilização dos SVDU nas redes de drenagem urbanas, uma vez que estes sistemas têm uma boa capacidade de drenagem quando comparados com os sistemas de drenagem tradicionais. Além disso, os resultados dos dois meios porosos testados foram bastante similares, o que evidencia a potencialidade da utilização de novos materiais nos SVDU, nomeadamente resíduos abundantes na região de aplicação dos sistemas, tais como os desperdícios têxteis inertizados e as cascas de ovos.

5.2 Desenvolvimentos futuros

A temática dos SVDU, especialmente na componente teórica deste trabalho, foi abordada de forma genérica e muito ampla com o objetivo de demonstrar a relevância destes sistemas, bem como de compreender a abrangência do seu raio de ação e o impacto que poderão vir a ter na sociedade. A instalação experimental e os respetivos ensaios efetuados permitiram aferir as potencialidades dos SVDU, abrindo portas para investigações mais aprofundadas sobre estes sistemas no futuro, pelo que ainda resta uma panóplia de desenvolvimentos a investigar sobre esta temática. Assim, foi elaborada uma lista com alguns desses possíveis desenvolvimentos a averiguar no futuro, tendo em conta aquilo que foi abordado nesta dissertação, bem como o que faltou abordar, quer por falta de tempo, quer pela seleção do tipo de experimentação. Essa lista é a seguinte:

- Criar uma gama de meios porosos *standard* aplicáveis em locais com condições de drenagem semelhantes;
- Efetuar um estudo mais detalhado que relacione a capacidade de drenagem (infiltração) de determinados meios porosos (caudal efluente), com os caudais (afluentes) originados pela precipitação, com o objetivo de tentar estabelecer uma ligação (indireta) entre os caudais das escorrências e as áreas das bacias contributivas.
- Realizar estudo experimental para a avaliação do impacto dos materiais utilizados nos canteiros de biofiltração na qualidade da água e no meio onde estão inseridos, em particular os materiais reaproveitados de outros usos (desperdícios têxteis, entre outros);
- Desenvolver um estudo relativo à otimização da granulometria dos materiais e da composição e espessura das camadas constituintes dos vários tipos de SVDU;
- Avaliar as diferenças entre o comportamento dos meios porosos secos (situação das primeiras chuvas após um período seco) ou saturados (períodos contínuos de chuva);
- Avaliar o desempenho de materiais inovadores (e.g., nanomateriais e materiais adsorventes naturais) para incorporação nas camadas do meio poroso, visando a remoção de poluentes e a melhoria da qualidade das escorrências pluviais urbanas;
- Efetuar testes laboratoriais à escala piloto para avaliar a eficiência de remoção de poluentes habitualmente presentes nas águas pluviais urbanas;
- Avaliar os benefícios da incorporação de plantas e selecionar, com base em ensaios experimentais, quais as melhores espécies a aplicar em cada tipo de SVDU;

- Desenvolver critérios para a definição do posicionamento mais vantajoso dos SVDU em relação aos locais dos meios urbanos identificados como críticos dos meios urbanos. Ou seja, definir se é mais vantajoso ter estes sistemas num local mais a montante da secção de controlo ou mais próximos dessa mesma secção;
- Explorar a possibilidade dos sistemas de drenagem que contenham SVDU alimentarem diretamente estações de tratamento de água, com o objetivo de reduzir a dependência dos meios hídricos e combatendo a imprevisibilidade da qualidade da água nesses meios;
- Aprofundar o conhecimento de co-benefícios promovidos pelos SVDU, nomeadamente ao nível social, ambiental e saúde pública (física e mental).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Portuguesa do Ambiente. (2019a). Alterações Climáticas. Retrieved July 22, 2019, from Políticas website: <https://apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=81>
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2019b). Emissões de Gases com Efeito de Estufa. Retrieved August 9, 2019, from Relatório do Estado do Ambiente website: <https://rea.apambiente.pt/content/emissoes-de-gases-com-efeito-de-estufa>
- Alaska Department of Environmental Conservation. (2018). Alaska's Water Quality Standards, Assessment, and Restoration Program Annual Highlights 2018. Retrieved February 16, 2020, from <https://dec.alaska.gov/water/nonpoint-source-control/annual-highlights-2018/>
- Barbosa, A. E., Fernandes, J. N., & David, L. M. (2012). Key issues for sustainable urban stormwater management. *Water Research*, *46*(20), 6787–6798. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.05.029>
- Barbosa, A. E., Telhado, A., Caliço, J., Fernandes, J. N., Vieira, J., Almeida, L. V., ... Baguinho, R. (2011). *Directrizes para a Gestão Integrada das Escorrências de Estradas em Portugal* (Laboratóri; A. E. Barbosa, Ed.). Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Björnberg, K. E., Karlsson, M., Gilek, M., & Hansson, S. O. (2018). Climate and environmental science denial: A review of the scientific literature published in 1990–2015. *Journal of Cleaner Production*, *167*, 229–241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.066>
- Breuste, J., Artmann, M., Li, J., & Xie, M. (2015). Special Issue on Green Infrastructure for Urban Sustainability. *Journal of Urban Planning and Development*, *141*(3), A2015001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000291](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000291)
- Carvalho, J. (2018). *Estudos no âmbito da Valorização de Resíduos - Programa Guimarães for Circular Economy (G4CE)*. Guimarães.
- Chini, C. M., Canning, J. F., Schreiber, K. L., Peschel, J. M., & Stillwell, A. S. (2017). The green experiment: Cities, green stormwater infrastructure, and sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, *9*(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su9010105>
- Cohen, J. P., Field, R., Tafuri, A. N., & Ports, M. A. (2012). Cost Comparision of Conventional Gray Combined Sewer Overflow Control Infrastructure versus a Green/Gray Combination. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *138*(16), 534–540. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000432](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000432)
- Comissão Europeia. (2010). *Uma infra-estrutura verde*. Retrieved from http://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/green_infra/pt.pdf
- Comissão Europeia. (2013). *Infraestrutura Verde - Valorizar o Capital Natural da Europa*.

- Comissão Europeia. (2015a). *An ambitious EU circular economy package [Fact sheet]* (p. 2). p. 2. Retrieved from https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/circular-economy-factsheet-general_en.pdf
- Comissão Europeia. (2015b). *Clear targets and Tools for better Waste Management [Fact sheet]* (p. 2). p. 2.
- Comissão Europeia. (2015c). Climate Action. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.091101>
- Comissão Europeia. (2015d). *Fechar o ciclo – plano de ação da UE para a economia circular*. Retrieved from http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:8a8ef5e8-99a0-11e5-b3b7-01aa75ed71a1.0007.02/DOC_1&format=PDF
- Comissão Europeia. (2015e). *From waste to resource [Fact sheet]* (p. 2). p. 2. <https://doi.org/10.1111/j.1475-679X.2011.00423.x>
- Comissão Europeia. (2015f). *Nature-Based Solutions & Re-Naturing Cities*. <https://doi.org/10.2777/765301>
- Comissão Europeia. (2017a). Causes of climate change. Retrieved June 26, 2019, from https://ec.europa.eu/clima/change/causes_pt
- Comissão Europeia. (2017b). Climate change consequences. Retrieved June 26, 2019, from https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_en
- Cook, J., Nuccitelli, D., Green, S., Richardson, M., Winkler, B., Painting, R., ... Skuce, A. (2013). Quantifying the Consensus on Anthropogenic Global Warming in the Scientific Literature. *Environmental Research Letters*, 8. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024024>
- Crnčević, T., Tubić, L., & Bakić, O. (2017). Green infrastructure planning for climate smart and “green” cities. *Spatium*, 434(38), 35–41. <https://doi.org/10.2298/SPAT1738035C>
- Das, D. (2019). Smart City. In *The Wiley Blackwell Encyclopedia of Urban and Regional Studies* (Anthony Or). <https://doi.org/10.1002/9781118568446.eurs0294>
- Davis, A. P., Traver, R. G., Hunt, W. F., Lee, R., Brown, R. a., & Olszewski, J. M. (2012). Hydrologic Performance of Bioretention Storm-Water Control Measures. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(5), 604–614. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE)
- Demuzere, M., Orru, K., Heidrich, O., Olazabal, E., Geneletti, D., Orru, H., ... Faehnle, M. (2014). Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 146, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>
- Department of Environmental Protection - New York City. (2017). *Standard designs and guidelines for*

green infrastructure practices.

- Dhakal, K. P., & Chevalier, L. R. (2017). Managing urban stormwater for urban sustainability: Barriers and policy solutions for green infrastructure application. *Journal of Environmental Management*, *203*, 171–181. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.07.065>
- District Department of Transportation. (2014a). *Green Infrastructure Standards*. <https://doi.org/10.1177/089484538200900109>
- District Department of Transportation. (2014b). *Greening DC Streets*.
- Dong, X., Guo, H., & Zeng, S. (2017). Enhancing future resilience in urban drainage system: Green versus grey infrastructure. *Water Research*, *124*, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.07.038>
- Duarte, A. A. L. S. (2007). Impacto das alterações climáticas na gestão da água. *Revista Águas e Resíduos*, *III(2)*, 58–73. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/7718>
- Duarte, A. S. (2019). *Hidrologia Aplicada II* (pp. 1–19). pp. 1–19.
- Emanuel, K. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, *436(7051)*, 686–688. <https://doi.org/10.1038/nature03906>
- Farrugia, S., Hudson, M. D., & McCulloch, L. (2013). An evaluation of flood control and urban cooling ecosystem services delivered by urban green infrastructure. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, *9(2)*, 136–145. <https://doi.org/10.1080/21513732.2013.782342>
- Feitosa, T. M., Silva, J. de S., & Sabiá, R. J. (2017). Processo de alcalinização da água pelo calcário laminado: um estudo de caso. *Revista Ciência e Tecnologia*, *20(36)*, 61–66. Retrieved from <http://www.revista.unisal.br/sj/index.php/123/article/view/545>
- Fink, H. S. (2016). Human-nature for climate action: Nature-based solutions for urban sustainability. *Sustainability (Switzerland)*, *8(3)*. <https://doi.org/10.3390/su8030254>
- Foster, J., Lowe, A., & Winkelmann, S. (2011). The Value of Green Infrastructure for Urban Climate Adaptation. In *Center for Clean Air Policy*.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, *143*, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting cities for climate change: The role of the green infrastructure. *Built Environment*, *33(1)*, 115–133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>

- Goulden, S., Portman, M. E., Carmon, N., & Alon-Mozes, T. (2018). From conventional drainage to sustainable stormwater management: Beyond the technical challenges. *Journal of Environmental Management*, 219, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.066>
- Hoang, L., & Fenner, R. A. (2016). System interactions of stormwater management using sustainable urban drainage systems and green infrastructure. *Urban Water Journal*, 13(7), 739–758. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2015.1036083>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (Vol. 9781107025). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.009>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.Summary>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014a). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (The Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. Meyer, Eds.). Geneva, Switzerland: IPCC.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014b). Climate Change 2014 Part A: Global and Sectoral Aspects. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from papers2://publication/uuid/B8BF5043-C873-4AFD-97F9-A630782E590D
- Jacobson, C. R. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of Environmental Management*, 92(6), 1438–1448. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.018>
- Karhu, J. (2011). *Green Infrastructure Implementation: Proceedings of the European Commission Conference 19 November 2010 OR - European Commission*. 28. Retrieved from citeulike-article-id:13197395%5Cnhttp://ec.europa.eu/environment/nature/ecosystems/green_infrastructure.htm
- Kelemen, A., Munch, W., Poelman, H., Gakova, Z., Dijkstra, L., & Torighelli, B. (2009). Regions 2020: The climate change challenge for european regions. *European Commission*, p. 27. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.01.052>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Krauze, K., & Wagner, I. (2019). From classical water-ecosystem theories to nature-based solutions — Contextualizing nature-based solutions for sustainable city. *Science of the Total Environment*, 655, 697–706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.187>

- Laboratório da Paisagem. (2019a). *Sistemas Verdes Integrados de Retenção & Tratamento de Escorrências Urbanas Pluviais 1*.
- Laboratório da Paisagem. (2019b). *Sistemas Verdes Integrados de Retenção & Tratamento de Escorrências Urbanas Pluviais 2*.
- Lee, J. H., & Bang, K. W. (2000). Characterization of Urban Stormwater Runoff. *Water Resources*, 34(6), 1773–1780.
- Lencastre, A., & Franco, F. M. (1984). *Lições de Hidrologia*. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa.
- Lima, J. P. (2005). *Hidrologia Urbana* (p. 31). p. 31.
- Lucas, W. C., & Sample, D. J. (2015). Reducing combined sewer overflows by using outlet controls for Green Stormwater Infrastructure: Case study in Richmond, Virginia. *Journal of Hydrology*, 520, 473–488. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.029>
- Macy, J. T., & Quick, R. E. (2009). Transmission and Prevention of Water-Related Diseases. In *Encyclopedia Of Life Support Systems* (Vol. 1, pp. 104–121). UNESCO-EOLSS.
- Marlow, D. R., Moglia, M., Cook, S., & Beale, D. J. (2013). Towards sustainable urban water management: A critical reassessment. *Water Research*, 47(20), 7150–7161. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.07.046>
- Matos, M. R., & Silva, M. H. (1986). *Estudos de precipitação com aplicação no projecto de sistemas de drenagem pluvial. Curvas intensidade-duração-frequência da precipitação em Portugal*. LNEC.
- Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações. Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de Agosto. , Diário da República - I Série-B § (1995).
- Musa, S. (2016). Smart Cities - A Roadmap for Development. *Journal of Telecommunications System & Management*, 5(3), 3–5. <https://doi.org/10.4172/2167-0919.1000144>
- NASA's Jet Propulsion Laboratory. (2018). The Causes of Climate Change. <https://doi.org/10.1177/1091592305275181>
- NASA's Jet Propulsion Laboratory. (2019). The Effects of Climate Change. Retrieved June 26, 2019, from <https://climate.nasa.gov/effects/>
- National Association of City Transportation Officials. (2017). *Urban Street Stormwater Guide*. Island Press.
- Nellemann, C., & Corcoran, E. (2010). Dead Planet , Living Planet - Biodiversity and Ecosystem Restoring for Sustainable Development. In *A Rapid Response Assessment*. Retrieved from www.grida.no

- Odefey, J., Detwiler, S., Rousseau, K., Trice, A., Blackwell, R., O'Hara, K., ... Raviprakash, P. (2012). *Banking on Green*. Retrieved from https://www.asla.org/uploadedFiles/CMS/Government_Affairs/Federal_Government_Affairs/Banking_on_Green_HighRes.pdf
- Oliveira, L. P. S. (2016). *Estimação de curvas intensidade-duração-frequência baseadas em séries de duração parcial*. Instituto Superior Técnico.
- Pataki, D. E., Carreiro, M. M., Cherrier, J., Grulke, N. E., Jennings, V., Pincetl, S., ... Zipperer, W. C. (2011). Coupling biogeochemical cycles in urban environments: Ecosystem services, green solutions, and misconceptions. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(1), 27–36. <https://doi.org/10.1890/090220>
- Payne, E. G. I., Hatt, B. E., Deletić, A., Dobbie, M. F., McCarthy, D. T., & Chandrasena, G. I. (2015). *Adoption Guidelines for Stormwater Biofiltration Systems - Melbourne, Australia: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities*.
- Philadelphia Water Department. (2018). *Green Stormwater Infrastructure Planning & Design Manual*. Retrieved from http://documents.philadelphiawater.org/gsi/GSI_Planning_and_Design_Manual.pdf
- Portela, M. M., & Hora, G. R. da. (2002). Aplicação da fórmula racional à análise de cheias em Portugal Continental: valores do coeficiente C. *6 Congresso Da Água*, 22.
- Ramísio, P. J. (2016). *Hidrologia Aplicada* (p. 60). p. 60.
- Ribeiro, Á. (1987). *Hidráulica Aplicada - Hidrologia*. Porto.
- Ribeiro, C., Sepúlveda, D., Carvalho, J., Vilarinho, C., & Cristino, J. (2017). Guimarães: Circular Economy Towards a Sustainable City. *European Journal of Sustainable Development*, 6(3), 69–74. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2017.v6n3p69>
- Roser, M., Ritchie, H., & Ortiz-Ospina, E. (2019). World Population Growth. Retrieved August 21, 2019, from OurWorldInData.org website: <https://ourworldindata.org/world-population-growth>
- Saint-Gobain. (2019). Leca Portugal. Retrieved January 19, 2020, from <https://www.leca.pt/aplicacoes/gestao-urbana-das-aguas-pluviais/>
- Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., & Gustafsson, L. G. (2008). The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system. *Journal of Hydrology*, 350(1–2), 100–113. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.028>
- Sepúlveda, D., Loureiro, I., Vilarinho, C., & Carvalho, J. (2015). Municipal Waste Map: a Case Study of Guimarães, Portugal. *European Journal of Sustainable Development*, 5(3), 77–90. <https://doi.org/10.14207/ejsd.2016.v5n3p77>

- Stahel, W. R. (2018). Circular Economy. *Nature*, 253(7595), 435–438. <https://doi.org/10.4324/9781315270326-38>
- State of Green. (2015). *Sustainable Urban Drainage Systems* (p. 27). p. 27.
- The Weather Company. (2020). Weather Underground. <https://doi.org/10.1002/9781405198073.wbierp1554>
- TVI24. (2012). Não deite fora cascas de ovo antes de ler esta notícia. Retrieved from <https://tvi24.iol.pt/tecnologia/iol-push/nao-deite-fora-cascas-de-ovo-antes-de-ler-esta-noticia>
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 81(3), 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2018). *World Urbanization Prospects 2018*. Retrieved from <https://population.un.org/wup/>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2019). *World Population Prospects 2019*. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12283219>
- United States Environmental Protection Agency. (2019). What is Green Infrastructure? <https://doi.org/10.1177/0002764207302463>
- Vermont Green Infrastructure Initiative. (2017). *Green Stormwater Infrastructure* (p. 8). p. 8. <https://doi.org/10.1201/b10430-179>
- Vieira, J. (2019). *Directiva-Quadro da Água* (p. 49). p. 49.
- Viitanen, J., & Kingston, R. (2014). Smart cities and green growth: Outsourcing democratic and environmental resilience to the global technology sector. *Environment and Planning A*, 46(4), 803–819. <https://doi.org/10.1068/a46242>
- Wagner, I., Krauze, K., & Zalewski, M. (2013). Blue aspects of green infrastructure. *Sustainable Development Applications*, 4(April), 145–155. Retrieved from [http://www.sendzimir.org.pl/sites/default/files/mag4en/11_Blue aspects of green infrastructure.pdf](http://www.sendzimir.org.pl/sites/default/files/mag4en/11_Blue%20aspects%20of%20green%20infrastructure.pdf)
- World Economic Forum. (2019). *The Global Risks Report 2019 14th Edition Insight Report*. <https://doi.org/978-1-944835-15-6>
- World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation, & McKinsey & Company. (2014). *Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains*. <https://doi.org/10.1162/108819806775545321>



World Health Organization. (2019). Waterborne disease related to unsafe water and sanitation. Retrieved September 23, 2019, from Health and sustainable development website: <http://www.who.int/sustainable-development/housing/health-risks/waterborne-disease/en/>




Zalewski, M., & Wagner, I. K. (2009). *Blue-Green City Global Climate Change*. (January), 237. <https://doi.org/10.1007/s11157-009-9169-8>.Wojtasik

Anexos

ANEXO I – ILUSTRAÇÕES DOS TIPOS DE SVDU ABORDADOS

Tipo	Imagens
<p>Coberturas verdes</p>	
<p>Pavimentos permeáveis</p>	 <p>Porous concrete parking lane, VENTURA City of Ventura, CA</p> <p>Western Ave</p>
<p>Canteiros de biorretenção (<i>bioretention planter</i>)</p>	

Tipo	Imagens
<p>Canteiros de biofiltração (<i>biofiltration planter</i>)</p>	
<p>Valas de bio-retenção (<i>bioretention swale</i> ou <i>bioswales</i>)</p>	

Tipo	Imagens
<p>Árvores e suas Caldeiras (<i>tree pit</i> ou <i>tree well</i>)</p>	
<p>Jardins de chuva (<i>rain gardens</i>)</p>	
<p>Zonas húmidas (<i>wetlands</i>)</p>	

ANEXO II – ILUSTRAÇÕES DO ENSAIO FALHADO (ENTUPIMENTO PROVOCADPELA FORMAÇÃO DE LAMA NA CAMADA DE AREIA APÓS O CONTACTO COM A ÁGUA)



ANEXO III – CENÁRIOS DE ANÁLISE ENSAIADOS

Cenário 0							
Objetivo:	Situação de referência (reprodução do funcionamento dos sistemas de drenagem convencionais)						
Forma:	Introdução do caudal afluente em regime permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluente	Tipo de Afluente	Meio Poroso	Código
E0.1	CB ₁	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AL	MP0.1	CB1.C1.A1.Q1.AL.MP0.1
	CB ₂	C ₂	A ₁	Q _{in,2}	AL	MP0.1	CB2.C2.A1.Q2.AL.MP0.1
E0.2	CB ₁	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AL	MP0.2	CB1.C1.A1.Q1.AL.MP0.2
	CB ₂	C ₂	A ₁	Q _{in,2}	AL	MP0.2	CB2.C2.A1.Q2.AL.MP0.2

Cenário 1a							
Objetivo:	Testar o efeito das camadas MP1.1 e MP2.1 no desfasamento temporal entre a entrada e a saída do caudais dos CB e no atraso do pico de cheia						
Forma:	Introdução do caudal afluente em regime permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluente	Tipo de Afluente	Meio Poroso	Código
E1.1	CB ₁	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AL	MP1.1	CB1.C1.A1.Q1.AL.MP1.1
	CB ₂	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AL	MP2.1	CB2.C1.A1.Q1.AL.MP2.1

Cenário 1b							
Objetivo:	Testar o efeito das camadas MP1.1 e MP1.2 na regularização do caudal afluente						
Forma:	Introdução do caudal afluente em regime não permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia	Caudal afluente	Tipo de Afluente	Meio Poroso	Código
E1.2	CB ₁	C _x	A ₁	Q _{in,x}	AL	MP1.1	CB1.CX.A1.QX.AL.MP1.1
	CB ₂	C _x	A ₁	Q _{in,x}	AL	MP2.1	CB2.CX.A1.QX.AL.MP2.1

Cenário 2a							
Objetivo:	Testar o efeito das camadas MP1.2 e MP2.2 no desfasamento temporal entre a entrada e a saída do caudais dos CB e no atraso do pico de cheia						
Forma:	Introdução do caudal afluyente em regime permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluyente	Tipo de Afluyente	Meio Poroso	Código
E2.1	CB ₁	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AL	MP1.2	CB1.C1.A1.Q1.AL.MP1.2
	CB ₂	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AL	MP2.2	CB2.C1.A1.Q1.AL.MP2.2
Cenário 2b							
Objetivo:	Testar o efeito das camadas MP2.1 e MP2.2 na regularização do caudal afluyente						
Forma:	Introdução do caudal afluyente em regime não permanente						
Ensaio	Piloto	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluyente	Tipo de Afluyente	Meio Poroso	Código
E2.2	CB ₁	C _x	A ₁	Q _{in,x}	AL	MP1.2	CB1.CX.A1.QX.AL.MP1.2
	CB ₂	C _x	A ₁	Q _{in,x}	AL	MP2.2	CB2.CX.A1.QX.AL.MP2.2
Cenário 3a							
Objetivo:	Testar o efeito das camadas MP1.3 e MP2.3 no desfasamento temporal entre a entrada e a saída do caudais dos CB e no atraso do pico de cheia						
Forma:	Introdução do caudal afluyente em regime permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluyente	Tipo de Afluyente	Meio Poroso	Código
E3.1	CB ₁	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AL	MP1.3	CB1.C1.A1.Q1.AL.MP1.3
	CB ₂	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AL	MP2.3	CB2.C1.A1.Q1.AL.MP2.3
Cenário 3b							
Objetivo:	Testar o efeito das camadas MP2.3 e MP2.3 na regularização do caudal afluyente						
Forma:	Introdução do caudal afluyente em regime não permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluyente	Tipo de Afluyente	Meio Poroso	Código
E3.2	CB ₁	C _x	A ₁	Q _{in,x}	AL	MP1.3	CB1.CX.A1.QX.AL.MP1.3
	CB ₂	C _x	A ₁	Q _{in,x}	AL	MP2.3	CB2.CX.A1.QX.AL.MP2.3

Cenário 4a							
Objetivo:	Testar o efeito das camadas MP1.4 e MP2.4 no desfasamento temporal entre a entrada e a saída do caudais dos CB e no atraso do pico de cheia						
Forma:	Introdução do caudal afluyente em regime permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Q_{in}	Tipo de Afluyente	Meio Poroso	Código
E4.1	CB ₁	C ₁	A ₁	$Q_{in,1}$	AL	MP1.4	CB1.C1.A1.Q1.AL.MP1.4
	CB ₂	C ₁	A ₁	$Q_{in,1}$	AL	MP2.4	CB2.C1.A1.Q1.AL.MP2.4
Cenário 4b							
Objetivo:	Testar o efeito das camadas MP2.4 e MP2.4 na regularização do caudal afluyente						
Forma:	Introdução do caudal afluyente em regime não permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluyente	Tipo de Afluyente	Meio Poroso	Código
E4.2	CB ₁	C _x	A ₁	$Q_{in,x}$	AL	MP1.4	CB1.CX.A1.QX.AL.MP1.4
	CB ₂	C _x	A ₁	$Q_{in,x}$	AL	MP2.4	CB2.CX.A1.QX.AL.MP2.4
Cenário 4c							
Objetivo:	Testar o efeito da variação do caudal afluyente						
Forma:	Introdução do caudal afluyente $Q_{in,1}$ em regime permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluyente	Tipo de Afluyente	Meio Poroso	Código
E4.1	CB ₁	C ₁	A ₁	$Q_{in,1}$	AL	MP1.4	CB1.C1.A1.Q1.AL.MP1.4
	CB ₂	C ₁	A ₁	$Q_{in,1}$	AL	MP2.4	CB2.C1.A1.Q1.AL.MP2.4
Cenário 5							
Objetivo:	Testar o efeito da variação do caudal afluyente						
Forma:	Introdução dos caudais afluyentes $Q_{in,2}$ e $Q_{in,3}$ em regime permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluyente	Tipo de Afluyente	Meio Poroso	Código
E5.1	CB ₁	C ₂	A ₁	$Q_{in,2}$	AL	MP1.4	CB1.C2.A1.Q2.AL.MP1.4
	CB ₂	C ₂	A ₁	$Q_{in,2}$	AL	MP2.4	CB2.C2.A1.Q2.AL.MP2.4
E5.2	CB ₁	C ₃	A ₁	$Q_{in,3}$	AL	MP1.4	CB1.C3.A1.Q3.AL.MP1.4
	CB ₂	C ₃	A ₁	$Q_{in,3}$	AL	MP2.4	CB2.C3.A1.Q3.AL.MP2.4
Cenário 6							
Objetivo:	Testar o efeito da variação do caudal afluyente						
Forma:	Introdução dos caudais afluyentes $Q_{in,4}$ e $Q_{in,5}$ em regime permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluyente	Tipo de Afluyente	Meio Poroso	Código
E6.1	CB ₁	C ₁	A ₂	$Q_{in,4}$	AL	MP1.4	CB1.C1.A2.Q4.AL.MP1.4
	CB ₂	C ₁	A ₂	$Q_{in,4}$	AL	MP2.4	CB2.C1.A2.Q4.AL.MP2.4
E6.2	CB ₁	C ₁	A ₃	$Q_{in,5}$	AL	MP1.4	CB1.C1.A3.Q5.AL.MP1.4
	CB ₂	C ₁	A ₃	$Q_{in,5}$	AL	MP2.4	CB2.C1.A3.Q5.AL.MP2.4

Cenário 7							
Objetivo:	Testar a capacidade máxima do sistema						
Forma:	Introdução do caudal máximo debitado pela torneira de alimentação em regime permanente						
Ensaio	Canteiro de biofiltração	Chuvada	Área da Bacia Contributiva	Caudal afluente	Tipo de Afluente	Meio Poroso	Código
E7.1	CB ₁	C ₆	A ₃	Q _{in,6}	AL	MP1.5	CB1.C4.A1.Q6.AL.MP1.4
	CB ₂	C ₆	A ₃	Q _{in,6}	AL	MP2.5	CB2.C4.A1.Q6.AL.MP2.4

Cenário 8							
Objetivo:	Testar o efeito da presença de folhas na superfície (testar a colmatação superficial)						
Forma:	Introdução das camadas MP1.5 e MP2.5 (folhas de árvore)						
Ensaio	Piloto	Chuvada	Área da Bacia	Q _{in}	Tipo de Afluente	Meio Poroso	Código
E8.1	CB ₁	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AL	MP1.4	CB1.C1.A1.Q1.AL.MP1.5
	CB ₂	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AL	MP2.4	CB2.C1.A1.Q1.AL.MP2.5

Cenário 9							
Objetivo:	Testar a remoção de sedimentos e de turvação						
Forma:	Variação do Tipo de Efluente						
Ensaio	Piloto	Chuvada	Área da Bacia	Q _{in}	Tipo de Afluente	Meio Poroso	Código
E9.1	CB ₁	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AS/L	MP1.4	CB1.C1.A1.Q1.AS/L.MP1.4
	CB ₂	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AS/L	MP2.4	CB2.C1.A1.Q1.AS/L.MP2.4

Cenário 10							
Objetivo:	Testar a remoção de óleos						
Forma:	Variação do Tipo de Efluente						
Ensaio	Piloto	Chuvada	Área da Bacia	Q _{in}	Tipo de Afluente	Meio Poroso	Código
E10.1	CB ₁	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AO	MP1.4	CB1.C1.A1.Q1.AO.MP1.4
	CB ₂	C ₁	A ₁	Q _{in,1}	AO	MP2.4	CB2.C1.A1.Q1.AO.MP2.4