

1 2 9 0



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Diana Pereira Gonçalves

**DEFINIÇÃO DE METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO
DO COMPORTAMENTO DE FACHADAS VERDES:
APLICAÇÃO A UM SISTEMA MODULAR**

DEFINITION OF METHODOLOGIES FOR EVALUATING OF THE
BEHAVIOUR OF GREEN FACADES: APPLICATION TO A
MODULAR SYSTEM

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de
Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor
Doutor António Tadeu e pelo Doutor João Almeida e apresentada ao
Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra.

Setembro de 2020

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

Diana Pereira Gonçalves

Definição de metodologias para avaliação do comportamento de fachadas verdes: aplicação a um sistema modular

**Definition of methodologies for evaluating of the behavior of green facades:
application to a modular system**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,
orientada pelo Professor Doutor António Tadeu e pelo Doutor João Almeida

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Setembro de 2022



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Ao COMPETE 2020, dado que o presente trabalho foi realizado no âmbito do projeto “GREENFUTURE - Especialização de PME's no design, construção e manutenção de soluções de cobertura e fachada verdes” (POCI-01-0246-FEDER-181322) financiado pelo COMPETE 2020.

Ao Itecons por disponibilizar as suas instalações e a todos os técnicos envolvidos neste projeto pelo apoio e acompanhamento prestado durante as campanhas experimentais.

Ao professor António Tadeu e ao Doutor João Almeida pela orientação e pela oportunidade de trabalhar nesta dissertação. Um agradecimento à Doutora Andreia Cortês por todo o auxílio, orientação e contribuição para a realização deste trabalho.

À empresa Landlab pelo fornecimento de todo o material usado nos testes de caracterização do sistema WallGreen.

Aos meus pais por todo o apoio na minha vida profissional e pessoal.

O presente trabalho foi realizado com a colaboração institucional do Itecons.



RESUMO

O rápido crescimento da população e as alterações climáticas são responsáveis por um aumento significativo da vulnerabilidade dos centros urbanos. Neste sentido, é essencial, não só criar cidades mais amigas do ambiente, numa lógica de minimização dos impactes ambientais ao longo do ciclo de vida, mas também tomar medidas imediatas para mitigar as consequências das alterações climáticas (e.g., cheias, secas, ondas de calor, degradação da qualidade do ar, escassez energética, perda de biodiversidade).

Neste contexto, a Comissão Europeia tem vindo a incentivar adoção de soluções baseadas na natureza, nas quais se enquadram as soluções de fachada verde. De facto, quando aplicadas em contexto urbano, é esperado que estas soluções contribuam para atenuar o efeito da ilha de calor urbano, melhorar o isolamento térmico e acústico dos edifícios, reduzir o ruído ambiente, melhorar a qualidade do ar, amortecer os picos de cheias e aumentar a biodiversidade. Contudo, a complexidade dos fenómenos envolvidos e o elevado número de variáveis, de que depende o comportamento destas soluções, dificulta a avaliação do seu desempenho e quantificação dos seus reais benefícios.

Assim, no presente trabalho, são propostas várias abordagens metodológicas para caracterizar de forma sistemática soluções de fachada verde no que respeita ao seu desempenho térmico, acústico, mecânico, hídrico (capacidade de retenção e drenagem de água) e ambiental. Para testar e consolidar estas abordagens, as mesmas foram aplicadas na caracterização de um sistema disponibilizado pela empresa Landlab (WallGreen). Concluiu-se que é possível quantificar os principais benefícios de uma fachada verde de uma forma reprodutível e expedita, aplicando estratégias que permitam controlar em laboratório as principais variáveis que influem no desempenho deste tipo de sistemas e estabelecendo cenários que permitam reproduzir condições reais de aplicação.

Palavras-chave: fachadas verdes; isolamento térmico; absorção sonora; retenção de água; desempenho ambiental.

ABSTRACT

Rapid population growth and climate change are responsible for a significant increase in the vulnerability of urban centers. In this sense, it is essential not only to create more environmentally friendly cities, in a logic of minimizing environmental impacts throughout the life cycle, but also to take immediate actions to mitigate the consequences of climate change (e.g., floods, droughts, waves of heat, degradation of air quality, energy shortage, loss of biodiversity).

In this context, the European Commission has been encouraging the adoption of nature-based solutions, which include green facade. In fact, when applied in an urban context, it is expected that these solutions will contribute to attenuate the urban heat island effect, improve the thermal and acoustic insulation of buildings, reduce ambient noise, improve air quality, reduction of flood peaks and increase biodiversity. However, the complexity of the phenomena involved and the high number of variables, on which the behavior of these solutions depends, makes it difficult to assess their performance and quantify their real benefits.

Thus, in the present work, several methodological approaches are proposed to systematically characterize green facade solutions in terms of their thermal, acoustic, mechanical, hydric (water retention and drainage capacity) and environmental performance. To test and consolidate these approaches, they were applied in the characterization of a system provided by the company Landlab (WallGreen). It was concluded that it is possible to quantify the main benefits of a green facade in a reproducible and expeditious way, applying strategies that allow controlling in the laboratory the main variables that influence the performance of this type of systems and establishing scenarios that allow to reproduce real application conditions.

Keywords: green facade; thermal insulation; sound absorption; water retention; environmental performance.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Tabelas	viii
Abreviaturas.....	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
2 Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 Classificação das fachadas verdes	5
2.2 Benefícios proporcionados pelas fachadas verdes.....	7
2.2.1 Melhoria do isolamento térmico.....	7
2.2.2 Atenuação do efeito da Ilha de Calor Urbano	9
2.2.3 Melhoria do comportamento acústico	10
2.2.4 Retenção de águas pluviais.....	11
2.2.5 Melhoria da qualidade do ar	12
2.3 Avaliação do desempenho de fachadas verdes.....	13
3 Materiais e métodos	14
3.1 Estratégias metodológicas	14
3.1.1 Comportamento térmico	14
3.1.2 Comportamento acústico	15

3.1.3	Capacidade de retenção e drenagem de água	17
3.1.4	Comportamento mecânico	18
3.1.5	Desempenho ambiental.....	18
3.2	Sistema WallGreen	19
4	Resultados	22
4.1	Comportamento térmico	22
4.1.1	Preparação do provete de ensaio	22
4.1.2	Condições de Verão (estação de arrefecimento)	28
4.1.3	Condições de Inverno (estação de aquecimento)	32
4.2	Comportamento acústico	35
4.2.1	Preparação do provete de ensaio	35
4.2.2	Resultados.....	36
4.3	Capacidade de retenção e drenagem de água	39
4.3.1	Preparação dos provetes de ensaio	39
4.3.2	Resultados.....	41
4.4	Desempenho ambiental.....	43
4.5	Comportamento mecânico	47
4.5.1	Montagem do sistema de ensaio.....	47
4.5.2	Resultados.....	49
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	52
5.1	Conclusões.....	52
5.2	Trabalhos futuros.....	53
	Referências Bibliográficas.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Classificação das fachadas verdes, adaptado (Manso & Castro-Gomes, 2015 ^a). ..	5
Figura 2.2 – Exemplos de: a) parede verde indireta, USA (fonte:(GSRArchitectural, 2022)); b) parede verde direta, Golegã, Portugal (fonte:(Manso & Castro-Gomes, 2015 ^a)).	6
Figura 2.3 – Exemplo de: a) parede viva modular (fonte: P&P, 2018); b) parede viva contínua (fonte: Jordan Ardoin, 2022).	7
Figura 3.1 – Câmara bioclimática.	15
Figura 3.2 - Câmara reverberante instalada no Itecons (fonte: Itecons, 2022).	16
Figura 3.3 – Esquema ilustrativo do ensaio de retenção e drenagem de água.	17
Figura 3.4 - Sistema WallGreen: a) Módulos; b) Vaso e bolsa. (Fonte: Landlab).	20
Figura 3.5 - espécies de plantas usadas: a) <i>Dieffenbachia seguine</i> , b) <i>Nephrolepis exaltata</i> .	21
Figura 4.1 – Paredes de referência para os ensaios térmicos.	23
Figura 4.2 – Colocação dos termopares na superfície da parede: a) do sistema modular; b) de referência.	24
Figura 4.3 - Colocação dos termopares nas plantas: a) <i>dieffenbachia seguine</i> ; b) <i>nephrolepis exaltata</i> ; c) termopares próximos da parede de referência.	24
Figura 4.4 - Esquema representativo da colocação dos termopares nos módulos (unidades em m).	25
Figura 4.5 - Termofluxímetros na câmara que simula as condições interiores.	25
Figura 4.6 - Montagem completa do sistema modular de fachada verde.	26
Figura 4.7 – Esquema representativo da instalação dos termopares e termofluxímetros do sistema modular de fachada verde (unidades em m).	28
Figura 4.8 – Condições impostas nas câmaras interior e exterior, simulando condições de verão em regime transiente.	29
Figura 4.9 – Temperaturas medidas para a situação de verão.	29
Figura 4.10 – Fluxos de calor medidos para a situação de verão.	31
Figura 4.11 – Condições impostas nas câmaras interior e exterior, simulando condições de inverno em regime transiente.	33
Figura 4.12 - Temperaturas medidas para a situação de inverno.	33
Figura 4.13 - Fluxos de calor medidos para a situação de inverno.	34
Figura 4.14 – Montagem do sistema modular de fachada verde dentro da câmara reverberante.	36
Figura 4.15 - Representação gráfica do coeficiente de absorção sonora, α_s .	38

Figura 4.16 - Representação gráfica do coeficiente prático de absorção sonora (α_{pi}) e da curva de referência ajustada.	39
Figura 4.17 – aberturas no vaso para irrigação: a) abertura circular lateral; b) orifício no lado oposto à abertura circular.	40
Figura 4.18 – Montagem do provete de ensaio.	41

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 - Sensores colocados na câmara que simula as condições ambientais exteriores...	26
Tabela 4.2 - Sensores colocados na câmara que simula as condições ambientais interiores ...	27
Tabela 4.3 - Valores médios das temperaturas máximas e mínimas nos 3 dias de resultados apresentados para a situação de verão	30
Tabela 4.4 – Valores médios dos fluxos de calor obtidos nos 3 dias de resultados apresentados para a situação de verão.....	31
Tabela 4.5 - Valores médios das temperaturas máximas e mínimas nos 3 dias de resultados apresentados para a situação de inverno.....	33
Tabela 4.6 – Valores médios dos fluxos de calor obtidos nos 3 dias de resultados apresentados para a situação de inverno	35
Tabela 4.7 - Tempos de reverberação médios (T1 sem provete e T2 com provete)	37
Tabela 4.8 - Coeficiente de absorção sonora, α_s	37
Tabela 4.9 – coeficiente prático da absorção sonora, α_{pi} , e da curva de referência ajustada ...	38
Tabela 4.10 – Materiais usados e quantidades de acordo com a unidade funcional definida ..	44
Tabela 4.11 – Potenciais impactes ambientais para a etapa de produto do sistema de fachada verde WallGreen.....	45
Tabela 4.12 – Resultados da carga máxima respetivos ao ensaio de corte puro	49
Tabela 4.13 – Resultados da carga máxima nos ensaios de corte com flexão	51

ABREVIATURAS

AC – acidificação;

ACV – Avaliação de ciclo de vida;

AG – aquecimento global;

CO – monóxido de carbono;

DCO – depleção da camada de ozono;

DRA (elementos) – depleção de recursos abióticos;

DRA (fósseis) - depleção de recursos abióticos - combustíveis fósseis;

EUT – eutrofização.

ICU – Ilha de calor urbano;

NBS – Soluções baseadas na natureza (do inglês *Nature Based Solutions*);

PM – matéria particulada (do inglês *Particulate matter*);

OF – oxidação fotoquímica;

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Um relatório publicado pelas Nações Unidas torna evidente que, entre 1950 e 2018, a população mundial residente em áreas urbanas cresceu até quatro vezes mais, sendo que em 2007 a população urbana era superior à população residente em zonas rurais. Com base nas tendências atuais de crescimento urbano, espera-se que, em 2050, aproximadamente 68% da população mundial viva em cidades, tornando a gestão destas áreas cada vez mais complexa, nomeadamente no que respeita a necessidades energéticas e manutenção da qualidade do ar (Nations *et al.*, 2018).

Adicionalmente, de acordo com as projeções meteorológicas atuais, prevê-se um aumento da frequência de fenómenos climáticos extremos nos centros urbanos (e.g. chuvas intensas e ondas de calor) com consequentes impactos económicos e sociais. Por conseguinte, é fundamental aumentar a resiliência das cidades investindo na procura e implementação de soluções que possam adaptar os edifícios aos efeitos das alterações climáticas.

A Comissão Europeia aponta o uso de soluções baseadas na natureza (NBS, do inglês *Nature Based Solutions*) como uma estratégia para a melhoria da resiliência climática das cidades e a mitigação das consequências de eventos climáticos extremos. As NBS, onde se incluem as soluções de fachada verde, são soluções inspiradas, apoiadas ou copiadas da natureza, que podem proporcionar melhorias no desempenho dos edifícios e na qualidade de vida, ambiente e saúde das populações (European Commission. Directorate-General for Research and Innovation, 2015^a).

A implementação de plantas ao longo da fachada de um edifício pode oferecer diversos benefícios, tanto para os próprios edifícios, como para as áreas urbanas, contribuindo, nomeadamente, para melhorar o desempenho térmico e acústicos dos edifícios, melhorar a qualidade do ar, aumentar a biodiversidade, atenuar o ruído ambiente e mitigar a ilha de calor urbano, mas também para melhorar o bem-estar social e psicológico dos habitantes (Ottelé *et al.*, 2011a). Contudo, a avaliação do desempenho e a quantificação dos reais benefícios proporcionados por estes sistemas é difícil, devido, principalmente, ao elevado número de variáveis e à complexidade dos fenómenos envolvidos. Note-se que esta dificuldade representa um real obstáculo para uma adoção mais generalizada deste tipo de soluções.

1.2 Objetivos

Tendo em consideração as dificuldades inerentes à avaliação do desempenho e quantificação dos benefícios proporcionados por soluções de fachada verde aplicadas em contexto urbano, pretendeu-se com a presente dissertação estabelecer abordagens metodológicas que permitam avaliar de forma sistemática, reproduzível e expedita o desempenho deste tipo de sistemas, nomeadamente no que respeita ao seu comportamento térmico, acústico, mecânico, hídrico (em termos de capacidade de retenção e drenagem de água) e ambiental (numa perspetiva de ciclo de vida). Para testar e consolidar as abordagens metodológicas propostas, caracterizou-se o desempenho de um sistema de fachada verde modular disponibilizado pela empresa Landlab (WallGreen). Adicionalmente, pretendeu-se com este trabalho reforçar as vantagens oferecidas pelas fachadas verdes, incentivando a adoção deste tipo de soluções construtivas sustentáveis capazes de responder aos desafios atuais enfrentados pelos centros urbanos.

Destacam-se, desta forma, os seguintes objetivos específicos do presente trabalho:

- sistematizar os potenciais benefícios oferecidos pelas fachadas verdes;
- identificar trabalhos anteriores que auxiliem na definição de estratégias de caracterização deste tipo de sistemas;
- estabelecer metodologias que permitam avaliar o desempenho e quantificar alguns dos potenciais benefícios;
- definir condições de ensaio para aplicação prática das metodologias selecionadas;
- construir provetes e preparar para aplicação das metodologias selecionadas a um caso prático.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos diferentes. No presente capítulo introduz-se a principal motivação desta dissertação, enquadrando-se o problema alvo de estudo e definindo-se os principais objetivos.

No segundo capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica, onde se inclui um breve enquadramento histórico e descrição de alguns dos potenciais benefícios proporcionados pelas soluções de fachada verde.

No terceiro capítulo descreve-se, de forma geral, as metodologias exploradas com vista à avaliação do desempenho de soluções de fachada verde, no que respeita à caracterização do seu comportamento térmico, acústico, mecânico e ambiental, bem com da sua capacidade de retenção e drenagem de água.

No quarto capítulo descreve-se, de forma pormenorizada, as condições de ensaio, a forma como foram preparados os provetes e protótipos utilizados na caracterização do sistema WallGreen e os respetivos resultados obtidos, com vista à consolidação das metodologias propostas no terceiro capítulo.

No quinto e último capítulo apresentam-se as conclusões finais da presente dissertação e os trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A história ensina-nos que o uso de vegetação como um material de revestimento para os edifícios poder aportar benefícios como o aumento do isolamento térmico. Os nossos antepassados faziam uso de abrigos naturais à sua disposição, assim como grutas e cavernas, muitos dos quais estariam cobertos por vegetação, para se resguardarem de dias chuvosos, do frio, do calor e para a proteção contra os predadores. No decorrer dos séculos, estes abrigos naturais evoluíram para habitações construídas, no entanto, os elementos de vegetação foram mantidos e incorporados sob diversas formas ao longo da história como componentes da própria construção. Os primeiros exemplares de fachadas verdes tiveram origem nos Jardins Suspensos da Babilónia, e apesar da falta de registos claros, são descritos como um feito notável de engenharia com os seus jardins ascendentes em camadas que contemplavam uma diversidade de árvores, arbustos, trepadeiras e, possivelmente, o primeiro edifício da história com um sistema de irrigação instalado. No terceiro milénio, em todo o mediterrâneo, a popularidade da uva levou os romanos a cultivarem videiras (*Vitis spp.*) em campos, casas e pela extensão dos jardins que, para além dos benefícios económicos de produção de alimento, forneciam arrefecimento e sombreamento às fachadas (Medl *et al.*, 2017). No século XI, os tijolos de turfa eram um dos materiais usados na construção das habitações pelos vikings. A turfa é uma matéria vegetal parcialmente decomposta, formada em pântanos e ambientes semelhantes que permitia o crescimento natural de relva ao longo das paredes, cobrindo a habitação com vegetação e prolongando a duração das mesmas (Uzuhariah Abdullah *et al.*, 2016).

Ao longo dos anos, as soluções tecnológicas, que permitem a incorporação de vegetação em edifícios, têm apresentado diversas formas. Recentemente, as soluções de fachada verde têm vindo a apresentar-se como uma tipologia promissora que possibilita a mitigação das consequências das alterações climáticas em meio urbano. Neste contexto, têm vindo a ser realizadas inúmeras pesquisas e estudos de modo a, por um lado, caracterizar o desempenho destas soluções e, por outro, permitir impulsionar a sua evolução através do aumento dos benefícios ambientais, sociais e económicos proporcionados por estas soluções (Medl *et al.*, 2017; Serra *et al.*, 2017).

2.1 Classificação das fachadas verdes

Os sistemas de fachada verde apresentam uma elevada variedade de *designs* e de soluções construtivas, o que tem dificultado a definição e aceitação de uma norma de classificação harmonizada para este tipo de soluções. Neste trabalho foi adotado o sistema de classificação apresentado na figura 2.1, que se baseia no sistema proposto por Manso & Castro-Gomes, 2015^a. Neste sistema de classificação, as fachadas verdes podem ser divididas em paredes verdes e paredes vivas, sendo que, por sua vez, as paredes verdes subdividem-se entre paredes verdes diretas e indiretas, e as paredes vivas podem ser modulares ou contínuas (Manso & Castro-Gomes, 2015).

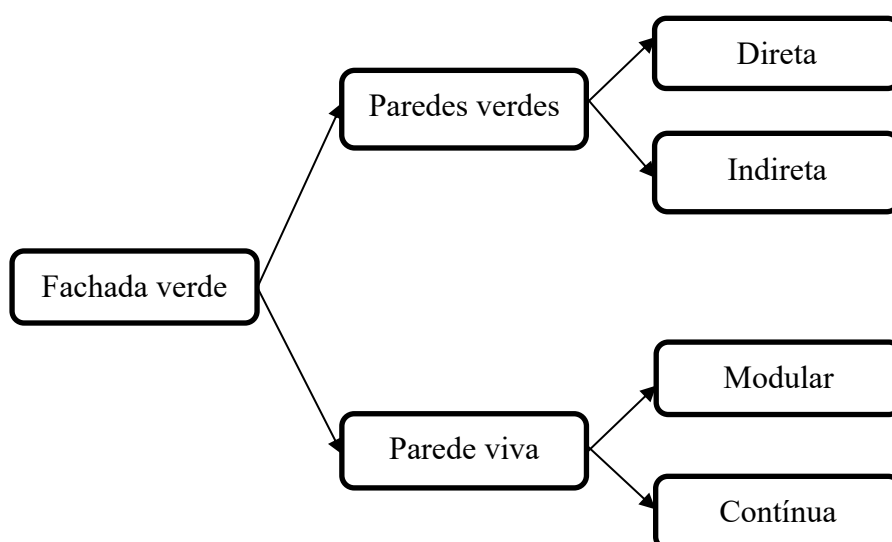
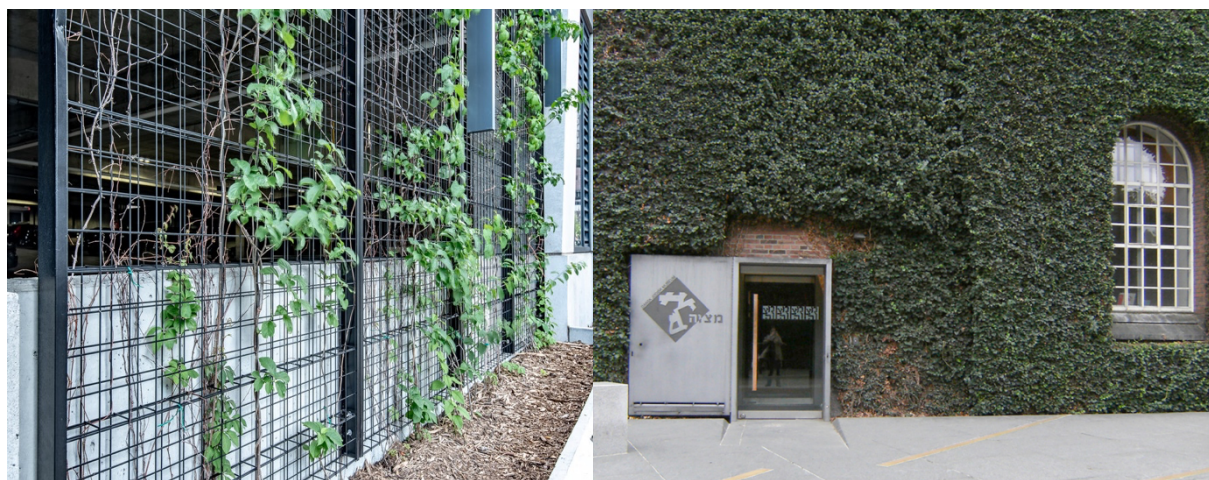


Figura 2.1 – Classificação das fachadas verdes, adaptado (Manso & Castro-Gomes, 2015^a).

As paredes verdes diretas são uma solução tradicional, sendo a sua construção realizada com recurso a plantas trepadeiras fixadas diretamente à parede de suporte onde se desenvolvem de forma a cobrir a fachada. No que respeita às paredes verdes indiretas é utilizada uma estrutura vertical de suporte, na qual as plantas crescem apoiadas o que permite uma maior proteção da parede (Manso & Castro-Gomes, 2015^a). Em ambos os tipos de soluções descritos, as plantas estão normalmente enraizadas diretamente no solo, mas há exemplos onde estas se encontram penduradas a determinada altura de forma a facilitar o recobrimento da fachada.

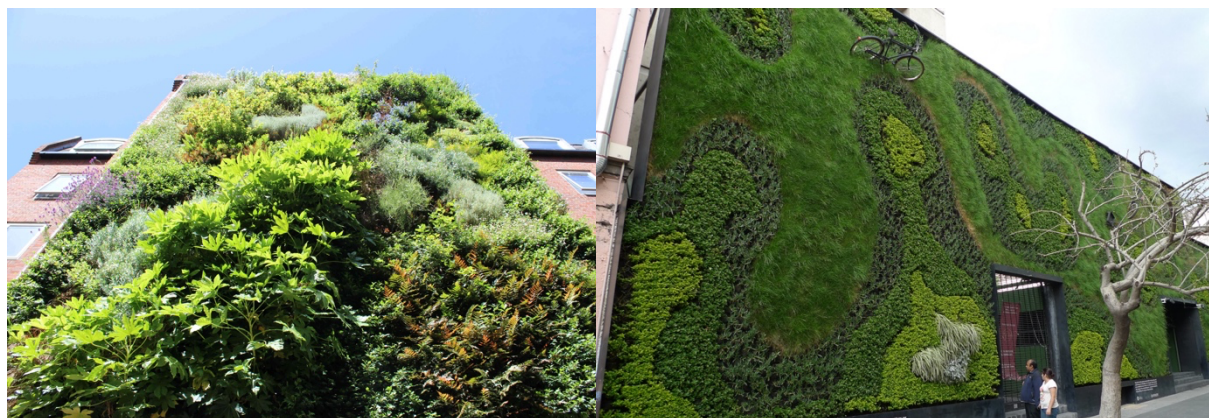


a)

b)

Figura 2.2 – Exemplos de: a) parede verde indireta, USA (fonte:(GSRArchitectural, 2022)); b) parede verde direta, Golegã, Portugal (fonte:(Manso & Castro-Gomes, 2015^a)).

De acordo com Manso & Castro-Gomes, 2015^a, as paredes vivas são soluções mais recentes e inovadoras, que envolvem o crescimento da planta a partir de uma superfície vertical. Estes sistemas permitem uma elevada variedade de escolha de plantas, bem como uma maior facilidade de substituição da vegetação débil ou morta. Adicionalmente, estas soluções possibilitam, geralmente, um recobrimento rápido e uniforme das fachadas e a criação de padrões florais distintos (Riley, 2017). Relativamente às paredes vivas modulares, estas caracterizam-se pela divisão das plantas por vários compartimentos com dimensões específicas, nos quais é incluído o substrato. As paredes vivas contínuas são normalmente sistemas hidropónicos, isto é, não requerem o uso de substrato como meio de crescimento e todos os nutrientes são fornecidos através dos sistemas de fertilização. Estas soluções são normalmente constituídas por telas leves e permeáveis, onde são colocadas as plantas e, em geral, podem apresentar diferentes *designs* e configurações que permitem a inserção das plantas em ângulo ou na vertical.



a)

b)

Figura 2.3 – Exemplo de: a) parede viva modular (fonte: P&P, 2018); b) parede viva contínua (fonte: Jordan Ardoin, 2022).

2.2 Benefícios proporcionados pelas fachadas verdes

Diversos estudos têm sido realizados com o intuito de demonstrar os benefícios da utilização de soluções de fachada verde, reportando que a inclusão destas soluções pode melhorar o desempenho dos edifícios e a qualidade de vida das populações residentes nas cidades. O aumento da biodiversidade, a melhoria da eficiência energética nos edifícios, a atenuação dos picos de cheia, a mitigação da ilha de calor urbano (Shafiee *et al.*, 2020), a melhoria da qualidade do ar (Ottelé *et al.*, 2010) e a atenuação do ruído (Azkorra *et al.*, 2015) são alguns dos principais benefícios apontados pela utilização de vegetação nas fachadas dos edifícios. Detalham-se, de seguida, alguns dos benefícios enumerados.

2.2.1 Melhoria do isolamento térmico

Atualmente, na Europa, os edifícios são responsáveis por cerca de 40% do consumo de energia e 36% das emissões de gases com efeito de estufa. Neste contexto, tem vindo a ser incentivada a adoção de estratégias e soluções, onde se incluem as coberturas e fachadas verdes, que possam mitigar alguns destes problemas e contribuir para a eficiência energética dos edifícios, (Bakhshoodeh *et al.*, 2022; Besir & Cuce, 2018; European Commission. Directorate-General for Research and Innovation, 2015). As fachadas verdes podem funcionar como um sistema passivo que permite a redução do consumo energético nos edifícios. Contudo, dada a diversidade de características das diferentes soluções existentes, a complexidade associada às condições climáticas, que variam com o local onde serão aplicadas, e a variedade de espécies vegetativas que podem ser usadas, torna-se extremamente complexa a avaliação do

desempenho térmico, a quantificação dos benefícios proporcionados e a comparação de diferentes tipos de soluções (Pérez *et al.*, 2014).

Apesar dos desafios descritos, existem na literatura diversos estudos que apontam para diversos benefícios das soluções de fachadas verdes em termos da melhoria do desempenho térmico. Serra *et al.*, 2017 avaliaram o comportamento térmico de um sistema modular de fachada verde, em Itália, para as estações de aquecimento e arrefecimento, tendo os resultados revelados impactos benéficos no desempenho térmico dos edifícios. Os resultados obtidos, revelaram uma diferença, entre as temperaturas máximas registadas no sistema modular de fachada verde em estudo e uma parede de referência, de 23°C durante a estação de aquecimento. Manso & Castro-Gomes, 2016 compararam o desempenho, na estação de aquecimento na Covilhã, em Portugal, de uma parede orientada a sul composta por um sistema modular de vegetação e uma parede de referência sem o sistema modular, por forma a estudar os benefícios da solução de fachada verde. Os resultados obtidos comprovaram a melhoria da eficiência térmica do edifício com a utilização do sistema modular com um aumento das temperaturas mínimas da superfície interna até 7°C. Cortês *et al.*, 2022 estudaram o desempenho térmico de uma solução de parede viva modular a partir de um protótipo constituído por 4 fachadas orientadas segundo as quatro direções cardeais principais (N, S, E e O) localizado em Coimbra, Portugal. Os resultados mostraram um bom desempenho da solução de fachada verde tanto para a estação de aquecimento como para a estação de arrefecimento.

Diversos trabalhos, publicados recentemente, procuram descrever os mecanismos e perceber o peso das principais variáveis que influenciam o desempenho térmico das soluções de fachada verde. De uma forma geral, os principais mecanismos que determinam o impacto das fachadas verdes, na redução do consumo energético, são o efeito de sombreamento da vegetação, o isolamento térmico fornecido pelo sistema, o efeito de arrefecimento evaporativo por meio da evapotranspiração, e o efeito de barreira contra o vento (Škerget *et al.*, 2021; Uzuahiah Abdullah *et al.*, 2016)

O efeito de sombreamento proporcionado pela vegetação em fachadas verdes é considerado por diversos autores como um dos parâmetros mais importantes no desempenho térmico destas soluções, pois atenua o fluxo de calor através da envolvente do edifício e reduz a temperatura da superfície externa da parede (Raji *et al.*, 2015). Os autores Ip *et al.*, 2010 estudaram o benefício do efeito de sombreamento proporcionado por plantas trepadeiras nas fachadas, agindo estas como dispositivos de proteção solar com efeito máximo durante o verão, quando a fachada está coberta de folhagem. Por outro lado, durante o outono, quando a fachada verde, já não apresenta folhagem, a incidência solar diretamente nas fachadas do edifício favorece os ganhos energéticos proporcionando o aquecimento do edifício.

Nas soluções de fachada verde em que exista uma cavidade de ar entre a parede do edifício e a fachada verde, é formado um ambiente microclimático com condições de temperatura e humidade próprios. A camada de ar criada produz um efeito adicional de isolamento, agindo como um amortecedor térmico e permitindo a redução do fluxo de calor pela envolvente da fachada (Pérez *et al.*, 2011; Raji *et al.*, 2015).

Os efeitos de arrefecimento por evapotranspiração são uma das vantagens do uso de vegetação nas fachadas dos edifícios, uma vez que contribui para a redução das temperaturas superficiais das mesmas, e, conseqüentemente para a diminuição das necessidades de arrefecimento dos edifícios (Raji *et al.*, 2015). A evapotranspiração envolve processos de evaporação e transpiração, nos quais é libertada água pelas plantas, durante a abertura dos estomas para a realização da fotossíntese, seguida pelo arrefecimento do ar em volta das folhas (Koch *et al.*, 2020).

Ao longo de uma fachada pode ocorrer a movimentação de ar devido ao vento o que promove a transferência de calor por convecção forçada. Quando as paredes se encontram cobertas por vegetação as plantas limitam o efeito de movimento do ar, funcionando como barreiras contra o vento (Eumorfopoulou & Kontoleon, 2009). No decorrer da estação fria, a particularidade da barreira contra o vento é útil na redução da perda de calor, reduzindo a necessidade de energia para aquecimento (Safikhani *et al.*, 2014). O principal objetivo de um estudo realizado por Perini *et al.*, 2011 foi a avaliação dos perfis de velocidade do vento, dentro e atrás de sistemas de fachadas verdes e o seu potencial efeito no desempenho térmico da solução. Segundo os resultados obtidos houve uma redução da velocidade do vento medida na camada atrás dos sistemas de fachada verde (<0,2 m/s), com conseqüências para o desempenho térmico dos sistemas.

2.2.2 Atenuação do efeito da Ilha de Calor Urbano

A “ilha de calor urbano” (ICU) é um fenómeno que acontece em áreas urbanizadas e que se caracteriza pela apresentação de temperaturas mais elevadas nas cidades comparativamente com as áreas envolventes, podendo chegar a atingir diferenças de 10°C (Kaloustian *et al.*, 2016; Tam *et al.*, 2015). Este fenómeno pode ser causado por vários fatores, nomeadamente, a utilização de materiais que absorvem e armazenam maiores quantidades de radiação, a redução dos processos de evapotranspiração e o aumento dos níveis de poluição atmosférica (Kaloustian *et al.*, 2016). Adicionalmente, o aumento das temperaturas médias globais, resultante das alterações climáticas, veio intensificar ainda mais este efeito tornando-o numa preocupação cada vez maior.

A utilização de fachadas verdes pode promover a mitigação do efeito de ilha de calor urbano uma vez que permite a redução das temperaturas superficiais e do ar envolvente através dos efeitos de sombreamento e evapotranspiração proporcionados pela vegetação (de Jesus *et al.*, 2017; Koch *et al.*, 2020). De forma a analisar o comportamento das fachadas verdes no microclima, os autores de Jesus *et al.*, 2017 realizaram um estudo experimental *in situ*, no centro de Madrid, usando uma parede revestida com um sistema de fachada verde e uma parede de referência, sem a vegetação. Os autores monitorizaram as paredes ao longo das estações de verão e outono. No decorrer da campanha realizada no verão, os resultados demonstraram um potencial de redução na temperatura do ar, à volta da fachada verde, atingindo uma redução da temperatura máxima entre 2,5°C e 2,9°C. Adicionalmente, os autores observaram que, mesmo durante o período de outono, a fachada verde proporcionou uma redução nas temperaturas do ar envolvente.

2.2.3 Melhoria do comportamento acústico

Em ambientes urbanos existe uma variedade de ruídos incómodos provenientes do tráfego rodoviário, fábricas, máquinas, trabalhos de construção, etc. Estas atividades humanas constituem fontes de poluição sonora, um reconhecido problema de saúde pública. Estima-se que aproximadamente 82 milhões de pessoas sejam afetadas, na Europa, dentro das áreas urbanas, pelos elevados níveis de tráfego rodoviário (EEA Report No 22/2019). Adicionalmente, calcula-se que ocorram, cerca de 12 000 mortes prematuras na Europa, por ano, devido à exposição a longo prazo à poluição sonora (EEA Report No 22/2019). Além disso, o ruído ambiental contribui para distúrbios de sono, estimando-se que cerca de 6,5 milhões de pessoas sofrem de elevado distúrbio crónico do sono. Neste contexto, a Organização Mundial de Saúde (OMS), em 1999, estabeleceu valores limite de ruído de forma a evitar perturbações do sono e minimizar o incómodo sentido pelas populações (APA, 2021).

A incorporação de fachadas verdes como um sistema de isolamento e absorção acústica pode constituir uma das soluções para o controlo do ruído em ambientes urbanos. A absorção sonora proporcionada por este tipo de soluções, dependente das características do substrato, da densidade da vegetação, bem como da configuração do sistema. As plantas representam uma parte importante na absorção do ruído podendo atuar como barreiras provocando múltiplas reflexões (Oquendo-Di Cosola *et al.*, 2022). Sumariamente, Azkorra *et al.*, 2015 explicam que os mecanismos pelos quais são possíveis as atenuações do som compreendem a reflexão, difração e a absorção sonora por parte da vegetação. Quando as ondas sonoras atingem os elementos vegetativos causam vibrações mecânicas dissipando a energia sonora. Também o substrato reduz os níveis sonoros, uma vez que promove a interferência das ondas sonoras e contribui para a reflexão e atenuação dos níveis de pressão sonora. Uma pequena camada de vegetação, entre 20 e 30 cm, pode possibilitar um aumento de 1dB no isolamento acústico de

ruído de tráfego, bem como um aumento entre 2 e 3 dB no isolamento do ruído rosa (Pérez *et al.*, 2016). Um estudo com uma parede verde modular realizado por Serra *et al.*, 2017 comprovou a existência de elevados valores do coeficiente de absorção sonora, que define a extensão pela qual a energia é absorvida pelo material, nas faixas entre 250 Hz e 3800 Hz, maioritariamente devido à presença do substrato. Adicionalmente, os resultados mostraram que em condições húmidas, a performance acústica diminui, pois, a presença de água aumenta a densidade do substrato, preenchendo poros. Para além da capacidade de absorção sonora, as fachadas verdes podem, ainda, conferir isolamento acústico aos edifícios onde estão instaladas. Os testes realizados em fachadas verdes demonstram que a capacidade de isolamento acústico tem um aumento na faixa das frequências médias, chegando a atingir um pico próximo dos 800 Hz, resultando do efeito da absorção do substrato. Adicionalmente, nas faixas das frequências altas, por efeito da dispersão na vegetação, há, igualmente, um aumento do isolamento acústico (Pérez *et al.*, 2016).

2.2.4 Retenção de águas pluviais

As mudanças climáticas têm um impacto nas alterações dos padrões de precipitação, de forma que, os eventos de chuva têm vindo a ocorrer cada vez mais, durante curtos períodos de tempo e com maior intensidade, com a ocorrência de eventos de seca entre eles (Enzi *et al.*, 2017). Estes padrões de precipitação conduzem, nas áreas urbanas, a caudais de escoamento elevados sobrecarregando os sistemas de drenagem de águas pluviais que podem, em alguns casos, não conseguir escoar caudais tão elevados causando inundações. Neste contexto, é essencial a procura de soluções e a adoção de medidas de forma a impedir a sobrecarga dos sistemas de drenagem urbana de águas pluviais permitindo mitigar os fenómenos de cheias registados.

As fachadas verdes podem contribuir para a interceção, ainda que limitada, de parte dos volumes de precipitação e contribuir para o amortecimento dos picos de cheia. As soluções de fachada verde são uma superfície permeável, a qual, nomeadamente, sob a influência do vento, pode receber parte da precipitação, reduzindo e atrasando os volumes de água que chegam aos sistemas de drenagem de águas pluviais (Serra *et al.*, 2017; van de Wouw *et al.*, 2017). Os reais benefícios proporcionados pelas fachadas verdes nesta matéria são, contudo, ainda pouco estudados. No entanto, existem já alguns trabalhos na literatura que apontam para potenciais benefícios das fachadas verdes nesta matéria. Tiwary *et al.*, 2018 usando dois modelos de fachada verde, uma completamente recoberta de folhas e outra sem folhagem, apenas com galhos das plantas, estudaram os efeitos da interceção da precipitação e atraso nos caudais drenados na base de ambas as fachadas. Os resultados mostraram uma interceção da precipitação que variou entre os 54% e 94% e um atraso de 30 minutos entre o início dos eventos de chuva até à primeira medição de caudal para a fachada totalmente recoberta de folhas. Para a fachada sem folhagem, apenas com galhos, a interceção da precipitação variou entre 10% e

55%, com um atraso de 15 minutos entre o início dos eventos de chuva até à primeira medição de caudal.

2.2.5 Melhoria da qualidade do ar

A poluição do ar provém tanto de fontes naturais como antropogénicas. No entanto, após o início da industrialização, as emissões antropogénicas aumentaram consideravelmente tornando-se uma ameaça à qualidade de vida e saúde das populações. De acordo com dados registados em 2016, estima-se que existam, a nível global, 4,2 milhões de mortes por ano como consequência da poluição atmosférica. A fraca qualidade do ar nas cidades europeias é atualmente uma forte preocupação em termos de saúde pública. Entre os principais poluentes atmosféricos encontram-se o ozono (O₃), o dióxido de azoto (NO₂), o dióxido de enxofre (SO₂), o monóxido de carbono (CO) e a matéria particulada (PM), onde se incluem as partículas com um diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 2,5 µm (PM_{2,5}) e partículas com um diâmetro aerodinâmico menor ou igual a 10 µm (PM₁₀) (Dogan Ozturk, 2013; WHO/HEP/ECH/EHD/22.01, 2022).

As paredes verdes apresentam a capacidade de capturar poluentes próximos das fontes emissoras, demonstrando serem particularmente mais eficazes na remoção de matéria particulada (PM, do inglês “*Particulate Matter*”), principalmente partículas finas e ultrafinas. A matéria particulada é constituída por diversos componentes de pequenas partículas, produtos químicos orgânicos, ácidos, metais, partículas de solo ou poeiras (Tomson *et al.*, 2021). Por forma a estudar a eficácia na recolha de PM_{2,5} de uma parede verde comparativamente com uma cobertura verde, foram implementados modelos computacionais de áreas urbanas (Viecco *et al.*, 2021). A partir das simulações realizadas, os autores concluíram que as paredes verdes demonstram ter maior impacto do que as coberturas verdes na melhoria da qualidade do ar.

O processo de fotossíntese realizado pelas plantas implica o sequestro de carbono atmosférico (Jansson *et al.*, 2010). Neste sentido, as fachadas verdes podem, ainda, contribuir para a melhoria da qualidade do ar através do sequestro e fixação do carbono presente na atmosfera. Cortês *et al.*, 2021 determinaram experimentalmente os valores anuais de sequestro de carbono de uma solução de parede viva modular com recurso a quatro fachadas (orientadas segundo as quatro direções cardeais principais) e cobertas pela solução de fachada verde, com duas espécies vegetativas diferentes *Thymus pulegioides* e *Festuca glauca*. Os autores recolheram periodicamente amostras de biomassa abaixo e acima do solo e determinaram o seu teor de carbono. Os resultados permitiram observar que o sistema de fachada verde em estudo teve uma capacidade de sequestrar, durante um ano, 371 gCm⁻² no caso da espécie *Festuca glauca* e de 68 gCm⁻² no caso da espécie de *Thymus pulegioides*.

2.3 Avaliação do desempenho de fachadas verdes

Como descrito na revisão da literatura acima apresentada, os potenciais benefícios associados às soluções de fachada verde, tanto para o edifício, como para o ambiente urbano, são inúmeros. É difícil, no entanto, avaliar a priori quais as soluções que melhor respondem a determinado cenário de aplicação. Para além disso, existe uma grande variedade de tipologias de sistema (e.g., diretas/indiretas, modulares/contínuas), aspetos construtivos (e.g., componentes, camadas, tipo de vegetação) e requisitos funcionais (e.g., capacidade de retenção e drenagem de água, mecânicos, térmicos, acústicos, ambientais), o que pode resultar num número muito elevado de soluções distintas com desempenhos diferentes. Adicionalmente, a complexidade dos fenómenos envolvidos e o elevado número de variáveis de que depende o comportamento deste tipo de soluções, dificulta a avaliação do desempenho e a quantificação dos reais benefícios proporcionados, limitando uma adoção mais generalizada deste tipo de soluções.

É, por isso, essencial estabelecer metodologias que permitam comparar de forma direta o desempenho de soluções concorrentes perante diferentes cenários de aplicação. Existem já alguns guias técnicos que visam fornecer informações para auxiliar a implementação de soluções de fachada verde, nomeadamente, em França (A.I.T.F. UNEP, 2016a, 2016b), na Alemanha (Fll – Landscape Development, 2018), no Reino Unido (Urban Greening and N. Building Landscape, 2017) e na Austrália (Victoria. Department of Environment and Primary Industries, 2013). No entanto, na sua grande maioria, estes guias tratam de aspetos gerais da sua construção e manutenção, pelo que as informações disponibilizadas são pouco úteis no estabelecimento de metodologias que visem caracterizar e comparar diferentes sistemas.

Assim, é objetivo do presente trabalho estabelecer abordagens metodológicas que possam ser usadas para a caracterizar de uma forma reprodutível e expedita o desempenho destas soluções e quantificar os seus potenciais benefícios. Muito embora a variedade de sistemas construtivos seja muito elevada, pretende-se que estas metodologias possam ser aplicadas, com adaptações relativamente simples, no estudo de sistemas com características distintas. Adicionalmente, é objetivo do presente trabalho estabelecer definir condições de ensaio e construir protótipos para aplicação prática das metodologias selecionadas a um sistema real.

A revisão bibliográfica apresentada, para além de permitir conhecer em detalhe os potenciais benefícios proporcionados e os fenómenos envolvidos, serviu de base à identificação de aproximações metodológicas utilizadas na caracterização de diferentes soluções de fachada verde.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Com base na revisão da literatura, foram definidas as estratégias metodológicas a explorar no âmbito deste trabalho de tese, que se descrevem sumariamente neste capítulo. Adicionalmente, é descrito o sistema WallGreen, utilizado na aplicação prática das respetivas metodologias.

3.1 Estratégias metodológicas

Neste subcapítulo são descritas as estratégias metodológicas exploradas para avaliar o desempenho de soluções de fachada verde do ponto de vista térmico, acústico, mecânico e ambiental, bem como da sua capacidade de retenção e drenagem de água. Uma descrição detalhada das condições de ensaio e da forma de preparação dos provetes e protótipos utilizados na caracterização do sistema WallGreen é apresentada no capítulo 4, juntamente com os respetivos resultados.

3.1.1 Comportamento térmico

O comportamento térmico das fachadas verdes pode contribuir de forma determinante para o conforto térmico no interior dos edifícios e promover a eficiência energética dos mesmos. Contudo, como descrito anteriormente, o comportamento térmico deste tipo de sistemas pode ser influenciado por inúmeras variáveis relacionadas, nomeadamente, com as condições climáticas locais, o que torna difícil e morosa a sua avaliação em termos experimentais. Assim, para caracterizar o desempenho térmico deste tipo de sistemas, propõe-se a utilização de uma câmara bioclimática, capaz de simular diferentes regimes de temperatura, humidade relativa, luz solar e precipitação. Uma abordagem experimental semelhante a esta foi explorada por outros autores para estudar o comportamento térmico de coberturas verdes (Almeida *et al.*, 2019; de Sousa & Coelho, 2019). A utilização de câmaras bioclimáticas apresenta a vantagem, relativamente a trabalhos *in situ*, de poder simular de forma reproduzível e num curto espaço de tempo diferentes condições climáticas, características de diferentes localizações e/ou estações do ano.

A câmara bioclimática utilizada para efeitos de estudo no âmbito desta tese é constituída por duas câmaras justapostas que permitem recriar, em simultâneo, as condições ambientais exteriores e interiores (Figura 3.1). A separar as duas câmaras existe um aro vertical amovível, com 2,30 m de altura e 2,40 m de largura, onde é construído o protótipo a ensaiar. A câmara

usada para simular as condições exteriores (FITOCLIMA 10000 HP) permite definir temperaturas entre 0°C e 45°C e valores de humidade entre os 40% e 90%. Adicionalmente, esta câmara tem incorporadas 16 lâmpadas capazes de simular parte do espectro da luz solar necessária para a fotossíntese, um ponto de entrada de água e coletores que permitem simular episódios de regas e/ou eventos de precipitação. A câmara usada para simular as condições interiores (FITOCLIMA 25000 PHARMA), permite definir temperaturas entre os 5°C e 45°C, e valores de humidade entre os 35% e 90%. Ambas as câmaras podem ser programadas para diferentes regimes climáticos com variações definidas ao longo do tempo, que permitem simular autonomamente as variações de condições climáticas ao longo do dia.



Figura 3.1 – Câmara bioclimática.

Assim, para avaliar o desempenho térmico de soluções de fachada verde, propõe-se a construção de uma parede de referência, dividida em duas partes por um material de isolamento capaz de evitar a transferência de calor entre si. Uma das partes deverá ser revestida com a solução de fachada verde a estudar, enquanto a outra servirá de solução comparativa. Termopares e termofluxímetros deverão ser utilizados para monitorizar temperaturas e fluxos de calor.

3.1.2 Comportamento acústico

Como descrito anteriormente, a incorporação de fachadas verdes pode contribuir para a diminuição dos níveis de ruído em ambientes urbanos. Desta forma, torna-se relevante o estudo da capacidade de absorção sonora das soluções de fachada verde com vista à avaliação dos potenciais benefícios a este nível. A capacidade de absorção sonora proporcionada pelas fachadas verdes depende, nomeadamente, das características do substrato, da densidade da

vegetação, bem como da configuração do sistema (Coma *et al.*, 2014), pelo que é fundamental estudar a solução completa. Assim, para caracterizar a absorção sonora deste tipo de sistemas, propõe-se a utilização de uma câmara reverberante (Figura 3.2), devidamente instrumentada para medição do nível de pressão sonora, e munida de uma fonte sonora de ruído, constituída por vários altifalantes, de modo a garantir um campo sonoro uniforme omnidirecional.

Durante a realização do ensaio deverão ser efetuadas medições para determinação dos tempos de reverberação, por banda de frequência de terços de oitava antes e depois da colocação da fachada verde na câmara. O tempo de reverberação consiste no intervalo de tempo necessário para um decaimento de 60 dB após interrupção da fonte, numa dada banda de frequências. Os tempos médios de reverberação por banda de frequência de terços de oitava, para a câmara sem e com a solução de fachada verde são determinados a partir da média do conjunto dos decaimentos da pressão sonora, determinando o tempo de reverberação a partir da curva de decaimento resultante. Partindo destes valores é possível calcular as áreas de absorção sonora equivalentes da câmara reverberante com e sem solução de fachada verde em estudo e determinar, pela diferença entre os dois valores, a área de absorção sonora equivalente do provete de ensaio. O coeficiente de absorção sonora por banda de terços de oitava (α_s) é obtido a partir do quociente entre área de absorção sonora equivalente do provete de ensaio e área real do mesmo.



Figura 3.2 - Câmara reverberante instalada no Itecons (fonte: Itecons, 2022).

3.1.3 Capacidade de retenção e drenagem de água

As fachadas verdes têm a capacidade de absorver água resultante da chuva podendo, por isso, contribuir, ainda que de forma limitada, para a redução dos picos de cheia nos centros urbanos. Por outro lado, apesar de todas as vantagens associadas às fachadas verdes, estas soluções têm por base a utilização de vegetação, o que implica, na grande maioria dos casos, o recurso a sistemas de irrigação para manter as suas funcionalidades e aspeto visual. Adicionalmente, estes tipos de soluções estão associados a elevados consumos de água, uma vez que estes sistemas, contrariamente a outro tipo de infraestruturas verdes, utilizam uma pequena quantidade de substrato (ou mesmo nenhuma, no caso dos sistemas hidropónicos), o que dificulta a retenção de água no sistema. A abordagem metodológica estabelecida para a avaliação da capacidade de retenção e drenagem de água do sistema envolveu a criação do dispositivo experimental que se ilustra na Figura 3.3.

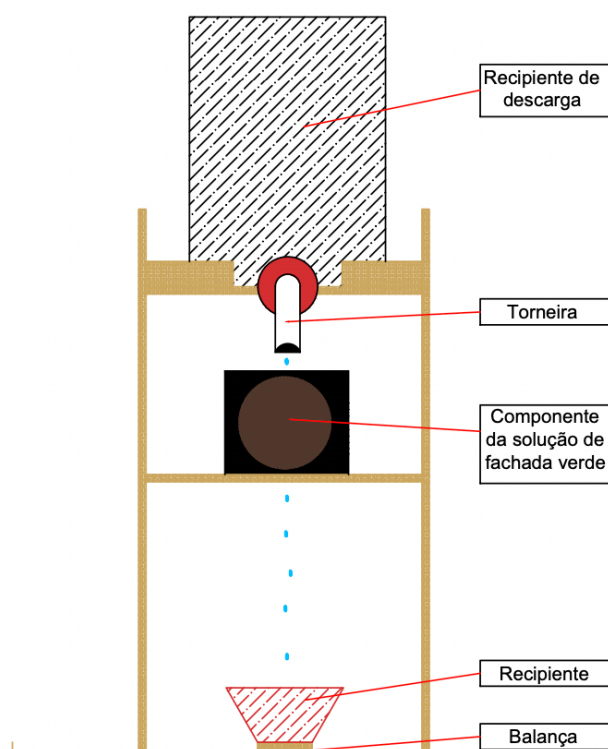


Figura 3.3 – Esquema ilustrativo do ensaio de retenção e drenagem de água.

Este dispositivo é constituído por uma estrutura de suporte contendo, na parte de cima, o recipiente de descarga de água (munido de uma válvula que permita o ajuste do caudal introduzido no sistema) e, na parte de baixo, o componente da solução de fachada verde objeto

de estudo. A quantidade de água drenada pelo sistema é, então, registada ao longo do tempo com recurso a uma balança disposta imediatamente por baixo desta estrutura.

3.1.4 Comportamento mecânico

As soluções de fachadas verdes são sistemas concebidos para revestirem as fachadas dos edifícios, pelo que importa assegurar que estas soluções apresentam características que lhes confirmem resistência mecânica e durabilidade adequadas, nomeadamente quando sujeitas a intempéries ou mesmo a esforços resultantes de ações de manutenção. Desta forma, considerou-se que, em paralelo com as características das soluções de fachada verde que possam conduzir a potenciais benefícios, era importante avaliar o desempenho mecânico.

Como foi referido anteriormente, existe uma grande variedade de soluções de fachada verde no mercado, pelo que as metodologias para avaliação do comportamento mecânico destas soluções poderão ter que ser adaptadas em função das características específicas da solução a avaliar. Assim, em traços gerais, a avaliação do comportamento mecânico das soluções de fachada verde deve iniciar-se por uma análise da geometria e dos mecanismos usados para a fixação do sistema à parede ou estrutura de suporte. A partir desta informação, deverão ser determinados o tipo de esforços a que o sistema poderá estar sujeito, recriando em laboratório condições semelhantes que permitam avaliar a resistência mecânica máxima para cada caso, nomeadamente, em termos de cargas de rotura. Estas devem ser, finalmente, interpretadas tendo em consideração as ações esperadas durante a sua vida útil do sistema.

3.1.5 Desempenho ambiental

Na literatura identificaram-se vários benefícios associados às fachadas verdes. No entanto, devido, em alguns casos, aos materiais usados e às elevadas necessidades de irrigação e manutenção, persistem ainda dúvidas sobre a sustentabilidade deste tipo de soluções (Feng & Hewage, 2014; Oquendo-Di Cosola *et al.*, 2020; Ottelé *et al.*, 2011b). Neste contexto, conhecer os potenciais impactes ambientais associados às soluções de fachadas verdes pode, por um lado, proporcionar uma visão mais concreta e abrangente sobre o desempenho ambiental deste tipo de soluções, e por outro, permitir identificar os *hotspots ambientais* do sistema com vista à melhoria do seu desempenho. A abordagem metodológica estabelecida consiste em utilizar a avaliação de ciclo de vida (ACV) para avaliar o desempenho ambiental das soluções de fachada verde.

A avaliação de ciclo de vida é uma metodologia que tem por base os referências normativos da ISO 14 040 e ISO 14 044 e que permite avaliar e quantificar ao longo das diferentes etapas do

ciclo de vida, os potenciais impactes ambientais associados a um produto ou serviço. Esta metodologia baseia-se na compilação de todos os fluxos de entrada e saída (mássicos e energéticos) desde a extração das matérias-primas até ao fim de vida do produto ou serviço em estudo. A ACV é constituída por quatro fases distintas que passam pela definição do objetivo e âmbito, inventário, avaliação de impactes e interpretação.

A fase de definição do objetivo e âmbito apresenta uma importância crucial num estudo de ACV, dado que nesta fase é descrita a sua finalidade, a qual está relacionada com os resultados a obter no mesmo. É nesta fase que é efetuada, nomeadamente, uma análise, descrição e apresentação do sistema e são definidas as fronteiras e unidade funcional do estudo. A unidade funcional deve descrever claramente a função do sistema de produto/serviço em estudo, tendo como principal objetivo estabelecer uma referência que permita relacionar as entradas e saídas do sistema, bem como os potenciais impactes ambientais.

Na fase de inventário do ciclo de vida são identificados e quantificados todos os recursos utilizados (matérias-primas e energia), assim como todos os fluxos de resíduos e emissões produzidas durante o ciclo de vida.

A fase de avaliação de impactes do ciclo de vida tem como objetivo compreender e avaliar os potenciais impactes ambientais relacionados com os fluxos de entrada e saída do sistema em estudo. Os dados de inventário são associados a categorias de impacto específicas, de acordo com o seu potencial impacto sobre o ambiente, saúde humana ou recursos.

Por último, na fase de interpretação são analisados os resultados obtidos nas fases anteriores, com o objetivo de estabelecer conclusões e recomendações, bem como explicar limitações do estudo.

3.2 Sistema WallGreen

Com o objetivo de testar e consolidar aspetos práticos da aplicação dos métodos selecionados, procedeu-se à caracterização do sistema WallGreen, disponibilizado pela empresa Landlab (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Sistema WallGreen: a) Módulos; b) Vaso e bolsa. (Fonte: Landlab).

O sistema WallGreen caracteriza-se por ser uma solução de parede viva modular constituída por módulos fabricados em plástico reciclado. Os módulos que constituem o sistema têm 680 mm de comprimento, 218,5 mm de largura e 200 mm de espessura. Para a construção da fachada verde os módulos são justapostos e fixados ao suporte por meio de parafusos e buchas.

Cada módulo do sistema WallGreen é composto por três compartimentos diferentes onde são colocados três vasos contendo, cada um, uma bolsa geotêxtil cheia de substrato para enraizamento da planta. Esta solução utiliza um sistema de irrigação, gota-a-gota, embutido nos módulos, que permite a rega automática e individualizada de cada planta. O vaso possui uma abertura circular, na lateral, a partir da qual é feita a irrigação da planta e um pequeno orifício, no lado oposto, que permite a drenagem da água em excesso. A bolsa geotêxtil possui um anel plástico, agregado, que assegura a fixação da bolsa, com o substrato e planta, ao vaso. A fixação dos vasos aos módulos é, por sua vez, assegurada a partir de pinos de travagem encaixados nos próprios módulos.

Neste trabalho, com vista à caracterização desta solução, foram usadas duas espécies de plantas, *Dieffenbachia seguine* e *Nephrolepis exaltata*, que representam um *mix* típico adaptado ao clima mediterrâneo (Figura 3.5).



a)



b)

Figura 3.5 - espécies de plantas usadas: a) *Dieffenbachia seguine* , b) *Nephrolepis exaltata*.

4 RESULTADOS

No capítulo anterior foram apresentadas, de forma geral, as abordagens metodológicas selecionadas com vista à caracterização de soluções de fachada verde. Neste capítulo, são descritas as condições de ensaio e os provetes/protótipos utilizados na aplicação prática das respetivas metodologias ao sistema WallGreen, bem como apresentados os respetivos resultados resultantes da caracterização deste sistema.

4.1 Comportamento térmico

Neste subcapítulo é descrita a aplicação da metodologia estabelecida no capítulo anterior para avaliação do desempenho térmico. Para este estudo foram considerados dois regimes climáticos distintos característicos das estações de verão e inverno em Portugal. Numa primeira fase, é descrita a preparação dos provetes de ensaio e sua instrumentação, sendo, de seguida apresentadas os regimes climáticos impostos e os resultados obtidos.

4.1.1 Preparação do provete de ensaio

Para a caracterização do comportamento térmico da fachada WallGreen foi necessária a construção das paredes convencionais no aro removível da câmara bioclimática. Ambas as paredes foram construídas com tijolo furado de 15 cm e rebocadas de ambos os lados. Para conseguir utilizar, no mínimo, dois módulos lado a lado a parede a revestir com a solução de fachada verde foi construída com dimensões de 1,40 m de largura e 2,30 m de altura, enquanto a parede a usar como solução de referência foi construída com dimensões de 0,90 m de largura por 2,30 m de altura. De modo a impedir a transferência de calor por condução entre ambas as paredes, foi colocado um isolamento de 0,10 m de poliestireno expandido (EPS). Uma imagem ilustrativa das paredes construídas no aro removível da câmara bioclimática é apresentada na Figura 4.1.



Figura 4.1 – Paredes de referência para os ensaios térmicos.

A montagem do sistema de fachada verde foi realizada tal como recomendado pelo fornecedor. Como referido anteriormente, foram usadas duas espécies de plantas, *Dieffenbachia seguine* e *Nephrolepis exaltata*, que representam um *mix* típico adaptado ao clima mediterrâneo. A colocação das plantas de cada espécie na fachada foi realizada de forma intercalada ficando as duas espécies completamente misturadas.

Para obter dados das temperaturas, foram instalados termopares ao longo de vários pontos de medição, dentro da câmara que simula as condições exteriores. Dois termopares foram colocados a meio da parede, na superfície, atrás dos módulos de fachada verde (TFV1, TFV2). À mesma altura e também a meio, foram colocados outros dois termopares na superfície da parede de referência (TR1 e TR2). Para o registo da temperatura ambiente foi, ainda, colocado um termopar adicional a medir a temperatura do ar ($T_{amb\ ext}$).

Imagens ilustrativas da colocação dos termopares nas superfícies das paredes com sistema WallGreen e na parede de referência são apresentadas na Figura 4.2.

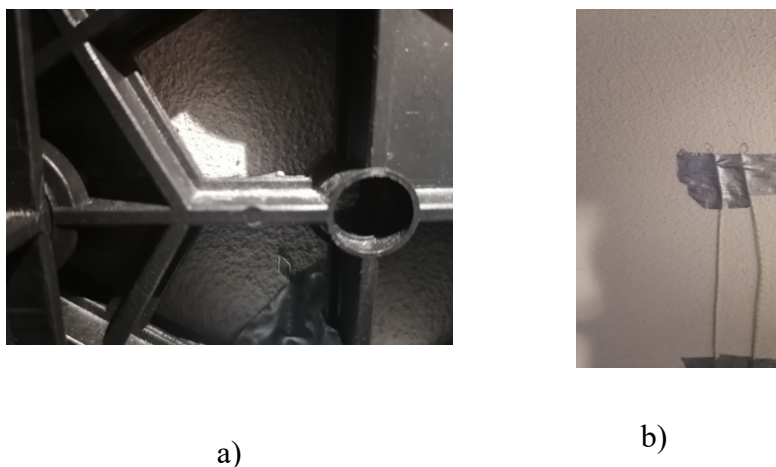


Figura 4.2 – Colocação dos termopares na superfície da parede: a) do sistema modular; b) de referência.

Por forma a poder avaliar as temperaturas no substrato, instalaram-se dois termopares em dois vasos diferentes (TS1 e TS2) ambos localizados também no centro da parede. Os termopares colocados no substrato foram introduzidos até sensivelmente a meio da espessura de substrato usado no sistema (a cerca de 7 cm da superfície). Adicionalmente, para avaliar a temperatura na camada de vegetação foram usados dois termopares (TV1 e TV2) colocados, no centro da parede, na vegetação. A colocação destes dois conjuntos de termopares está ilustrada na Figura 4.3.

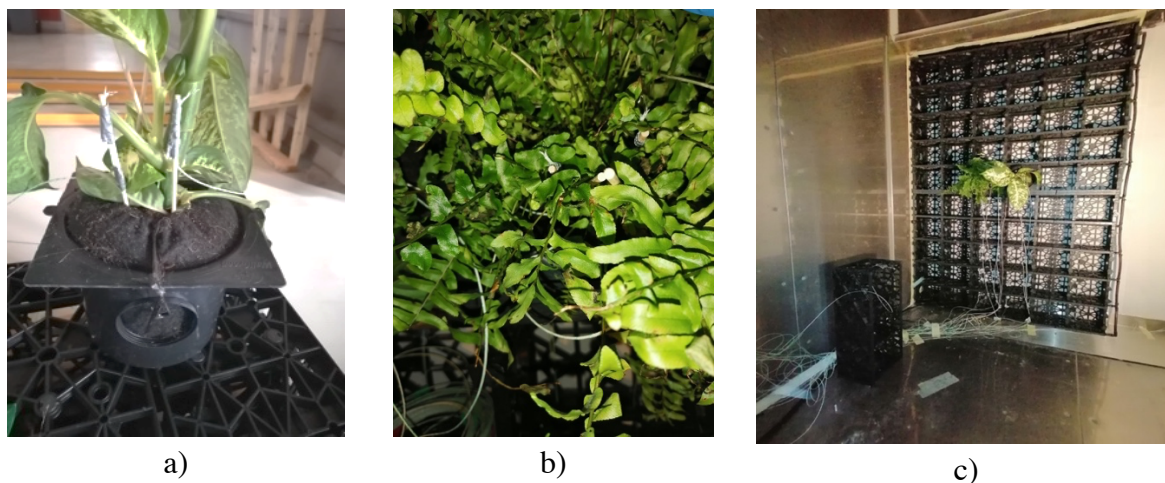


Figura 4.3 - Colocação dos termopares nas plantas: a) *dieffenbachia seguine*; b) *nephrolepis exaltata*; c) termopares próximos da parede de referência.

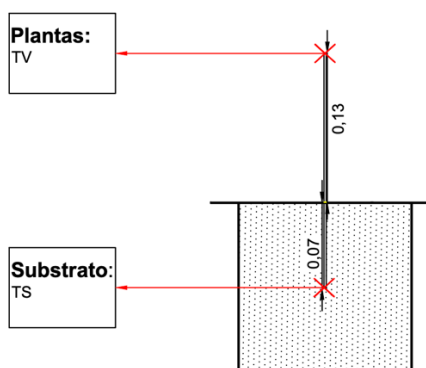
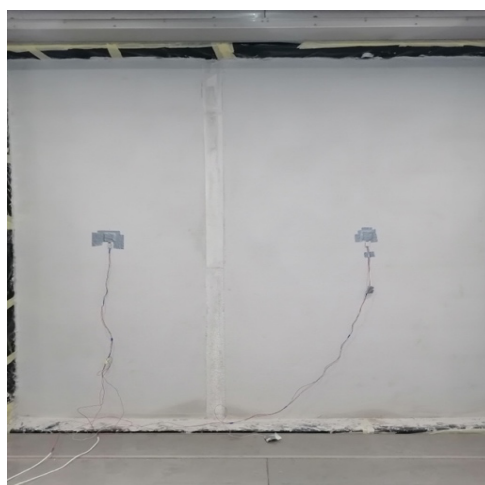


Figura 4.4 - Esquema representativo da colocação dos termopares nos módulos (unidades em m).

Na câmara que simula o ambiente interior, foram colocados dois termofluxímetros na superfície da parede do lado da câmara responsável pela simulação das condições interiores (Figura 4.5 - Termofluxímetros na câmara que simula as condições interiores).

Os termofluxímetros foram colocados no centro de ambas as paredes para medir os fluxos de calor a partir da parede de referência (TFR) e da parede revestida com a solução WallGreen (TFFV). Um termopar adicional foi colocado dentro da câmara interior, por forma a registar a temperatura do ar (Tamb int). Este termopar serviu apenas de controlo para que se pudesse assegurar que a temperatura nesta câmara se manteve constante e próxima dos 20°C durante os ensaios realizados.



a)

Figura 4.5 - Termofluxímetros na câmara que simula as condições interiores.

Todos os termopares e termofluxímetros foram conectados a um *data logger* para a registo de dados a cada 30 s. A montagem do sistema modular de fachada verde na câmara bioclimática encontra-se ilustrada na figura 4.6.



Figura 4.6 - Montagem completa do sistema modular de fachada verde.

As tabelas 4.1 e 4.2 contêm um resumo dos sensores colocados nas câmaras que simulam as condições exteriores e interiores, respetivamente.

Tabela 4.1 - Sensores colocados na câmara que simula as condições ambientais exteriores

Nomenclatura	Local de medição
TR1	Superfície da parede de referência
TR2	Superfície da parede de referência
TFV1	Superfície da parede do sistema modular
TFV2	Superfície da parede do sistema modular
TS1	Substrato
TS2	Substrato
TV1	Vegetação
TV2	Vegetação

Tamb ext	Ar
-----------------	----

Tabela 4.2 - Sensores colocados na câmara que simula as condições ambientais interiores

Nomenclatura	Tipo	Local de medição
Tamb int	Termopar	Ar
TFR	Termofluxímetro	Parede de referência
TFFV	Termofluxímetro	Parede oposta ao sistema modular de fachada verde

Adicionalmente, apresenta-se na figura 4.7 um esquema ilustrativo da colocação de todos os sensores nas duas paredes.

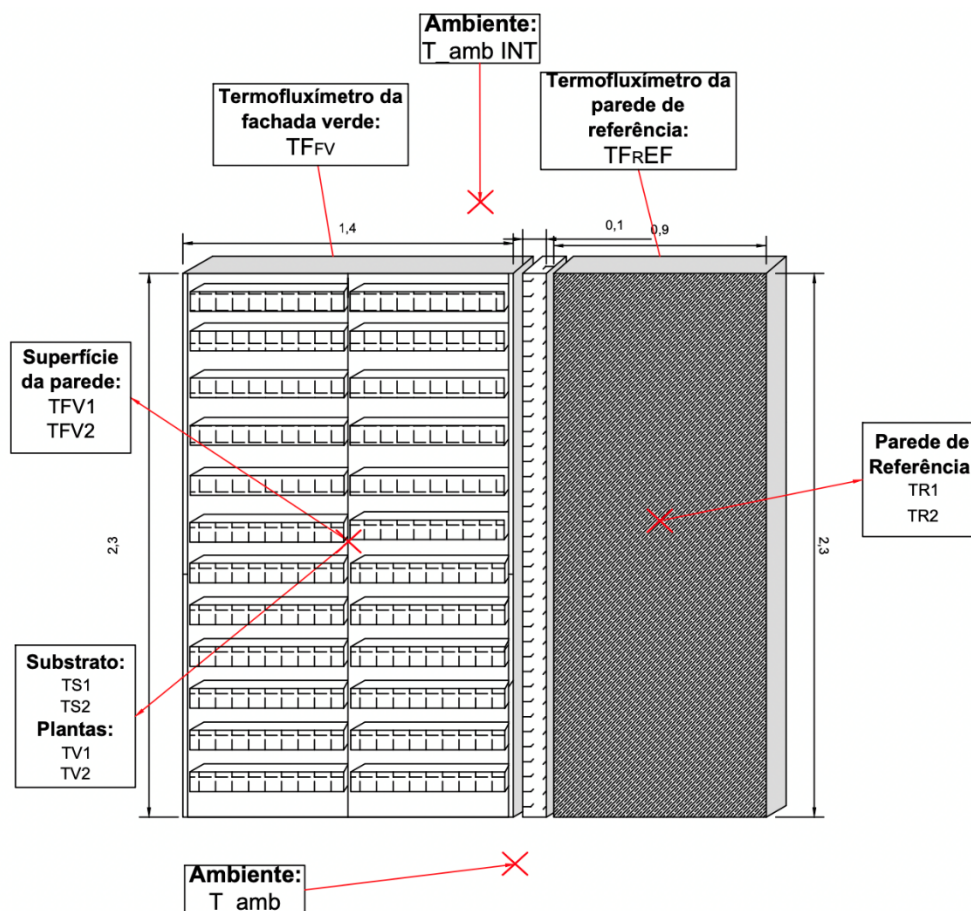


Figura 4.7 – Esquema representativo da instalação dos termopares e termofluxímetros do sistema modular de fachada verde (unidades em m).

4.1.2 Condições de Verão (estação de arrefecimento)

Os primeiros ensaios para avaliação do comportamento térmico da fachada verde em estudo, consistiram na simulação de uma situação de verão, durante 96 horas, em regime transiente, com ciclos de 24 horas, como se apresenta na figura 4.8. Para facilitar a análise apenas são apresentados os resultados obtidos para as últimas 72 horas de ensaio. A câmara que simula as condições exteriores foi programada de forma a fazer ciclos de 24 horas com variações de temperatura entre aproximadamente os 15°C e os 28°C e com um período de 14 horas de luz. A humidade relativa foi mantida constante a 65%. Importa salientar que para se assegurar a estabilidade de fluxos a câmara foi mantida, inicialmente, durante 48h, em regime estacionário com temperatura a 24°C. As condições na câmara que simula o ambiente interior foram mantidas constantes com 20°C de temperatura e 50% de humidade relativa, de forma a simular condições de conforto.

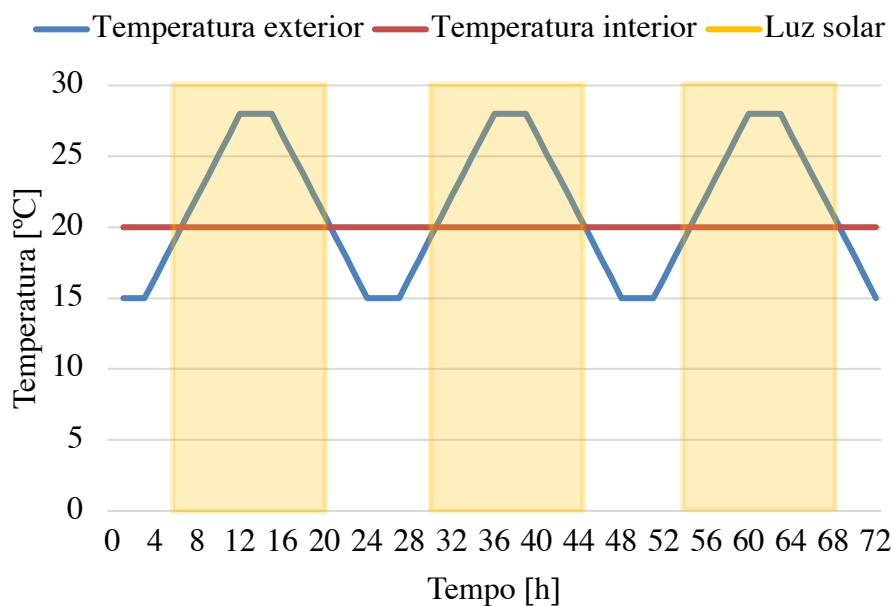


Figura 4.8 – Condições impostas nas câmaras interior e exterior, simulando condições de verão em regime transiente.

O gráfico da figura 4.9 apresenta as temperaturas medidas para a situação de verão simulada. A tabela 4.3 contém uma média, para os 3 dias de resultados, das temperaturas máximas e mínimas registadas em cada termopar.

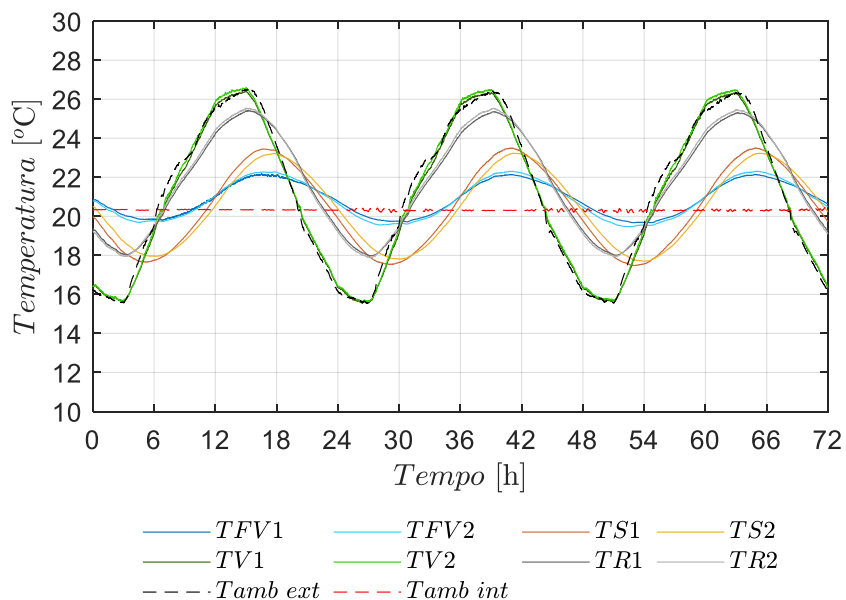


Figura 4.9 – Temperaturas medidas para a situação de verão.

Tabela 4.3 - Valores médios das temperaturas máximas e mínimas nos 3 dias de resultados apresentados para a situação de verão

Temperatura média [°C]	Tamb ext	TR1	TR2	TFV1	TFV2	TS1	TS2	TV1	TV2
Máximo	26.4	25.4	25.5	22.2	22.3	23.5	23.2	26.4	26.5
Mínimo	15.6	18.0	17.9	19.7	19.6	17.6	17.8	15.6	15.7

Em termos gerais, verifica-se que as temperaturas máximas registadas tanto na superfície da parede, atrás dos módulos da solução de fachada verde (TFV1, TFV2), como no substrato (TS1, TS2) são inferiores às registadas na superfície da parede de referência (TR1, TR2), chegando a atingir diferenças até 3,4°C e 2,3°C, respetivamente, que comprovam o benefício, em termos do isolamento térmico, proporcionado pela solução de fachada verde. Adicionalmente, analisando, ainda, as temperaturas registadas pelo mesmo conjunto de termopares, é possível notar atrasos em relação às temperaturas máximas, que chegam a ser superiores a 2 horas, tanto para as temperaturas superficiais, do lado da fachada verde, como para as temperaturas medidas no substrato, quando comparadas com as temperaturas superficiais medidas na parede de referência e com a temperatura ambiente (Tamb ext). Note-se, que, as temperaturas máximas superficiais medidas na parede de referência (TR1, TR2) são sempre cerca de 1°C inferiores à temperatura ambiente (Tamb ext). Em contexto real, para um dia de céu limpo, com valores de temperatura ambiente iguais aos impostos na câmara bioclimática, será expectável que as temperaturas superficiais medidas na parede de referência possam ser superiores às registadas durante este ensaio. Tal deve-se ao facto de as lâmpadas usadas para simular a radiação solar recriarem apenas a parte do espectro de radiação eletromagnética necessária para as plantas realizarem a fotossíntese.

Relativamente às temperaturas mínimas, é possível observar que as temperaturas superficiais registadas na parede com o sistema de fachada verde (TFV1, TFV2) são sempre consideravelmente superiores às temperaturas superficiais da parede de referência (TR1, TR2) com diferenças até 1,9°C. No que respeita às temperaturas medidas no substrato (TS1, TS2) são registados valores apenas ligeiramente inferiores aos registados na superfície da parede de referência (TR1, TR2).

Analisando, agora, as temperaturas medidas na camada de vegetação (TV1, TV2), verifica-se que não são encontradas diferenças significativas em relação à temperatura ambiente (Tamb ext). Tal pode dever-se, em parte, ao facto das condições reproduzidas durante o ensaio, em

termos da radiação, não permitirem observar nomeadamente o efeito de sombreamento produzido por esta camada.

Refira-se, ainda, que tal como inicialmente programado, a temperatura ambiente na câmara que simula as condições interiores ($T_{amb\ int}$), apresenta-se constante e próxima dos 20°C.

O gráfico da figura 4.10 apresenta os fluxos de calor medidos em ambas as paredes para a situação de verão simulada. A tabela 4.4 contém uma média, para os 3 dias de resultados, dos fluxos de calor registados em cada termofluxímetro.

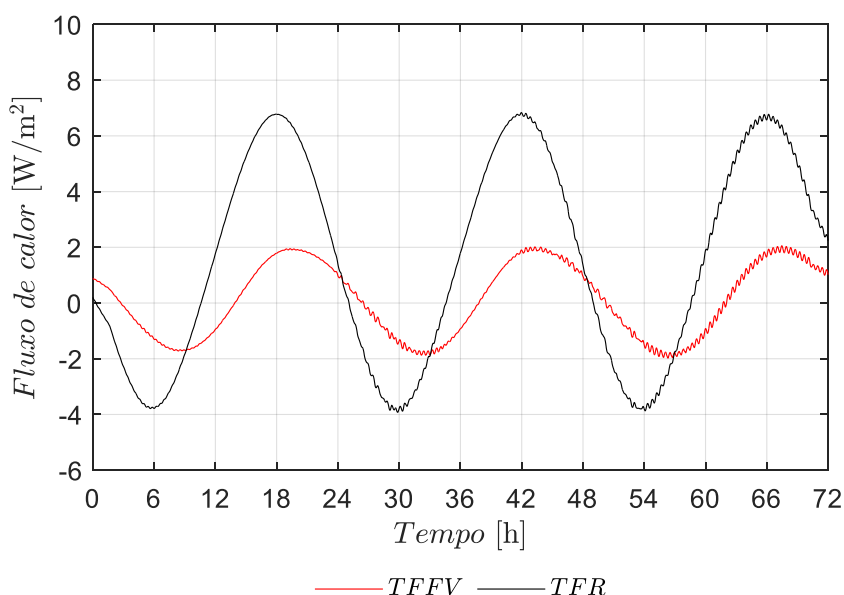


Figura 4.10 – Fluxos de calor medidos para a situação de verão.

Tabela 4.4 – Valores médios dos fluxos de calor obtidos nos 3 dias de resultados apresentados para a situação de verão

Fluxos de calor médios [W/m²]	TFFV	TFR
Máximo	2.0	6.8
Mínimo	-1.9	-3.9

De uma forma geral, observa-se que, tal como o esperado, ambas as paredes ganham calor a partir do exterior e perdem calor para o exterior em determinados períodos do dia. Contudo, é possível observar diferenças significativas entre os fluxos de calor registados nas duas paredes com amplitudes muito superiores na parede de referência comparativamente com a parede

contendo a fachada verde. A parede de referência (TFR) atinge ganhos de calor para o interior muito superiores aos ganhos registados na parede contendo a fachada verde (TFFV), com diferenças nos fluxos medidos que chegam aos $4,8 \text{ W/m}^2$. Também no que respeita às perdas de calor para o exterior, a parede de referência apresenta valores de fluxos muito superiores aos registados pela parede contendo a fachada verde, com diferenças que chegam aos $2,1 \text{ W/m}^2$. Estes resultados comprovam, uma vez mais, a eficácia do sistema modular de fachada verde para a melhoria do isolamento térmico nas condições estudadas.

4.1.3 Condições de Inverno (estação de aquecimento)

Os segundos ensaios para avaliação do comportamento térmico da fachada verde em estudo, consistiram na simulação de uma situação de inverno, durante 96 horas, em regime transiente, com ciclos de 24 horas, como se apresenta na figura 4.11. Tal como nos primeiros ensaios, para facilitar a análise, são apenas apresentados os resultados obtidos para as últimas 72 horas de ensaio. A câmara que simula as condições exteriores foi programada de forma a fazer ciclos de 24 horas com variações de temperatura entre aproximadamente os 5°C e os 11°C e com um período de 9 horas de luz. A humidade relativa foi mantida constante a 85%. Importa salientar que, de forma semelhante ao efetuado nos primeiros ensaios, para se assegurar a estabilidade de fluxos a câmara foi mantida, inicialmente, durante 48h, em regime estacionário com temperatura a 7°C . As condições na câmara que simula o ambiente interior foram mantidas constantes e exatamente iguais aos primeiros ensaios, ou seja, a 20°C de temperatura e 50% de humidade relativa.

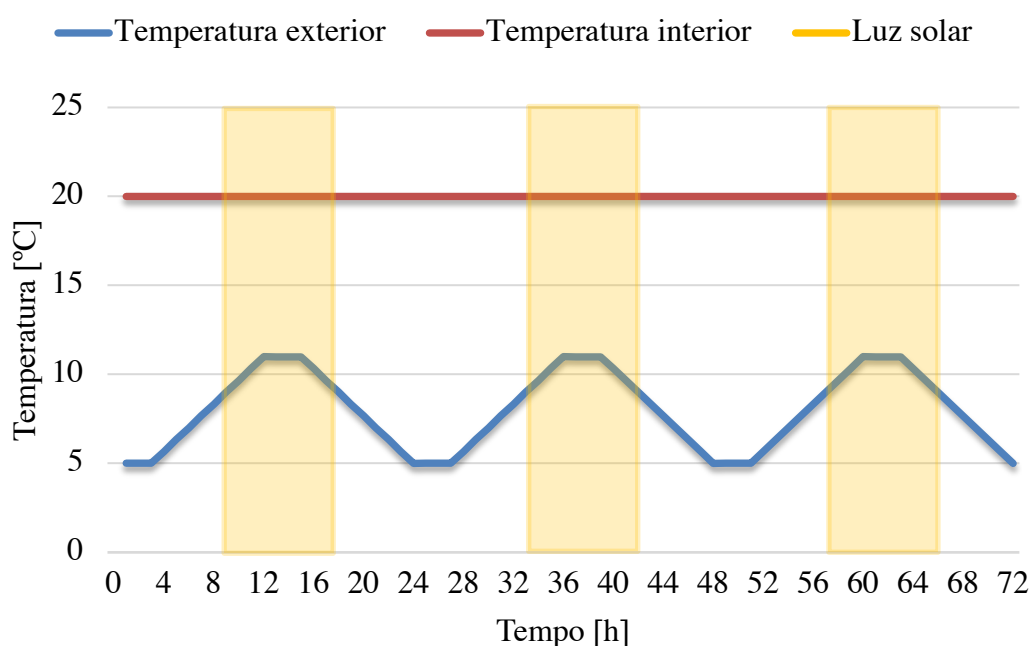


Figura 4.11 – Condições impostas nas câmaras interior e exterior, simulando condições de inverno em regime transiente.

O gráfico da figura 4.12 apresenta as temperaturas medidas para a situação de inverno simulada. A tabela 4.5 contém uma média, para os 3 dias de resultados, das temperaturas máximas e mínimas registadas em cada termopar.

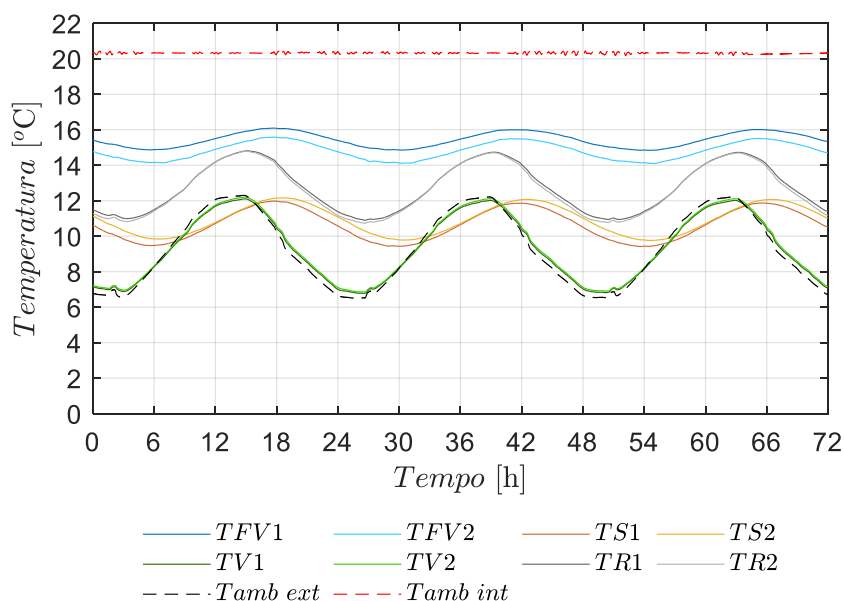


Figura 4.12 - Temperaturas medidas para a situação de inverno.

Tabela 4.5 - Valores médios das temperaturas máximas e mínimas nos 3 dias de resultados apresentados para a situação de inverno

Temperatura média [°C]	Tamb ext	TR1	TR2	TFV1	TFV2	TS1	TS2	TV1	TV2
Máximo	12.2	14.8	14.7	16.0	15.5	11.9	12.1	12.0	12.1
Mínimo	6.5	10.9	10.8	14.9	14.1	9.4	9.8	6.8	6.9

Em termos gerais verifica-se que as temperaturas registadas na superfície da parede, atrás dos módulos da solução de fachada verde (TFV1, TFV2), são sempre superiores às registadas na superfície da parede de referência (TR1, TR2), chegando a atingir diferenças até 1,3°C e 4,1°C entre as temperaturas máximas e mínimas, respetivamente, que comprovam, uma vez mais, o benefício, em termos do isolamento térmico, proporcionado pela solução de fachada verde.

Adicionalmente, é possível notar atrasos tanto em relação às temperaturas máximas como mínimas que podem ultrapassar as 2 e as 4 horas, respetivamente.

Relativamente às temperaturas medidas no substrato (TS1, TS2), é possível observar que estas são sempre inferiores às registadas na superfície da parede de referência (TR1, TR2). No que respeita, às temperaturas máximas é possível observar que os valores registados no substrato são muito próximos dos valores da temperatura ambiente ($T_{amb\ ext}$). Contudo, observando as temperaturas mínimas é possível notar temperaturas mais elevadas no substrato comparativamente com as temperaturas ambiente com diferenças que podem atingir os $3,3^{\circ}\text{C}$. Para além deste aspeto, verificam-se, ainda, atrasos que podem passar as 3 e as 4 horas tanto para temperaturas máximas como mínimas registadas no substrato, quando comparadas com as temperaturas obtidas na superfície da parede de referência e no ar ambiente, respetivamente.

Analisando, agora, as temperaturas medidas na camada de vegetação (TV1, TV2), verifica-se, uma vez mais, que não são encontradas diferenças significativas em relação à temperatura ambiente ($T_{amb\ ext}$).

A temperatura ambiente na câmara que simula as condições interiores ($T_{amb\ int}$) apresenta-se, tal como pretendido, constante e próxima dos 20°C durante todo o ensaio.

O gráfico da figura 4.13 apresenta os fluxos de calor medidos em ambas as paredes para a situação de inverno simulada. A tabela 4.6 contém uma média, para os 3 dias de resultados, dos fluxos de calor registados em cada termofluxímetro.

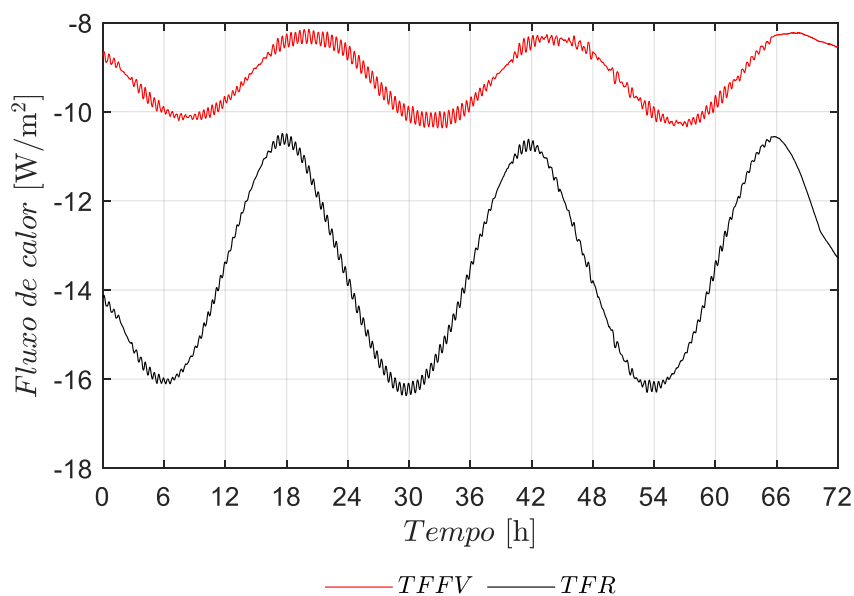


Figura 4.13 - Fluxos de calor medidos para a situação de inverno.

Tabela 4.6 – Valores médios dos fluxos de calor obtidos nos 3 dias de resultados apresentados para a situação de inverno

Fluxos de calor médios [W/m²]	TFFV	TFR
Máximo	-8.2	-10.6
Mínimo	-10.3	-16.3

De uma forma geral, observa-se que, tal como o esperado, ambas as paredes perdem calor para o exterior durante todo o dia, uma vez que a temperatura exterior é sempre inferior à temperatura interior. Contudo, é possível observar diferenças significativas entre os fluxos de calor registados nas duas paredes com amplitudes muito superiores na parede de referência comparativamente com a parede contendo a fachada verde. A parede de referência (TFR) atinge perdas de calor para o exterior sempre superiores às perdas registados na parede contendo a fachada verde (TFFV), com diferenças que chegam aos 2,4 W/m² nos valores máximos e 6,0 W/m² nos valores mínimos, resultados que sugerem, uma vez mais, a eficácia do sistema modular de fachada verde para a melhoria do isolamento térmico nas condições estudadas.

4.2 Comportamento acústico

Neste subcapítulo é descrita a aplicação da metodologia estabelecida no capítulo anterior para avaliação do comportamento acústico, em termos da capacidade de absorção sonora, da solução WallGreen. Numa primeira fase é descrita a preparação do provete de ensaio sendo de seguida apresentados os resultados obtidos.

4.2.1 Preparação do provete de ensaio

Para a caracterização da capacidade de absorção sonora da fachada WallGreen, em câmara reverberante, foi criada uma estrutura em contraplacado para fixar e suportar os módulos de fachada verde. Os módulos foram fixados à estrutura de suporte tal como o recomendado pelo fornecedor. No total foram usados 20 módulos, criando um provete com 2,30 m de altura e 1,40 m de largura, onde foram colocados os vasos com substrato e plantas e os sistemas de irrigação, tal como numa situação real. Foram utilizadas as mesmas espécies de plantas dos

ensaios do comportamento térmico (*Dieffenbachia seguine* e *Nephrolepis exaltata*) tendo a colocação das mesmas sido realizada da mesma maneira que anteriormente descrita, isto é, de forma intercalada para assegurar uma mistura das duas espécies. Na figura 4.14 são apresentadas imagens ilustrativas do provete colocado na câmara reverberante.



Figura 4.14 – Montagem do sistema modular de fachada verde dentro da câmara reverberante.

4.2.2 Resultados

Tal como descrito anteriormente, foram efetuadas medições para a determinação dos tempos de reverberação, por banda de frequência de terços de oitava, antes e depois da colocação do provete na câmara. O procedimento contemplou medições para 3 posições de microfone e 4 posições de fonte, registando os decaimentos em cada uma das 12 medições. Os resultados

obtidos para os tempos de reverberação médios com a câmara vazia e com a fachada verde, T_1 e T_2 , respetivamente, apresentam-se na tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Tempos de reverberação médios (T_1 sem provete e T_2 com provete)

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
T_1 (s)	13,05	10,50	9,23	7,83	7,75	7,49	8,28	9,09	8,52	7,95	7,30	6,77	5,99	5,23	4,27	3,61	3,32	2,64
T_2 (s)	13,05	8,46	7,10	5,86	4,98	4,20	4,39	4,98	4,91	4,77	4,36	4,09	3,78	3,39	2,95	2,71	2,56	2,20

Os valores obtidos para os tempos de reverberação com a fachada verde, são, como o esperado, menores em comparação com os valores obtidos na situação de câmara “vazia”.

Com base nestes resultados, determinaram-se os coeficientes de absorção sonora por banda de terços de oitava (α_s), entre 100 e 5000 Hz. A tabela 4.8 apresenta os valores obtidos para os coeficientes de absorção para a solução de fachada verde nas condições de ensaio apresentadas. O gráfico da figura 4.15 contém uma representação gráfica dos coeficientes de absorção sonora em função da frequência de ruído.

Tabela 4.8 - Coeficiente de absorção sonora, α_s

Freq. (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
α_s	0,00	0,25	0,36	0,46	0,78	1,14	1,16	0,99	0,94	0,91	0,99	1,04	1,05	1,11	1,14	1,01	1,02	0,92

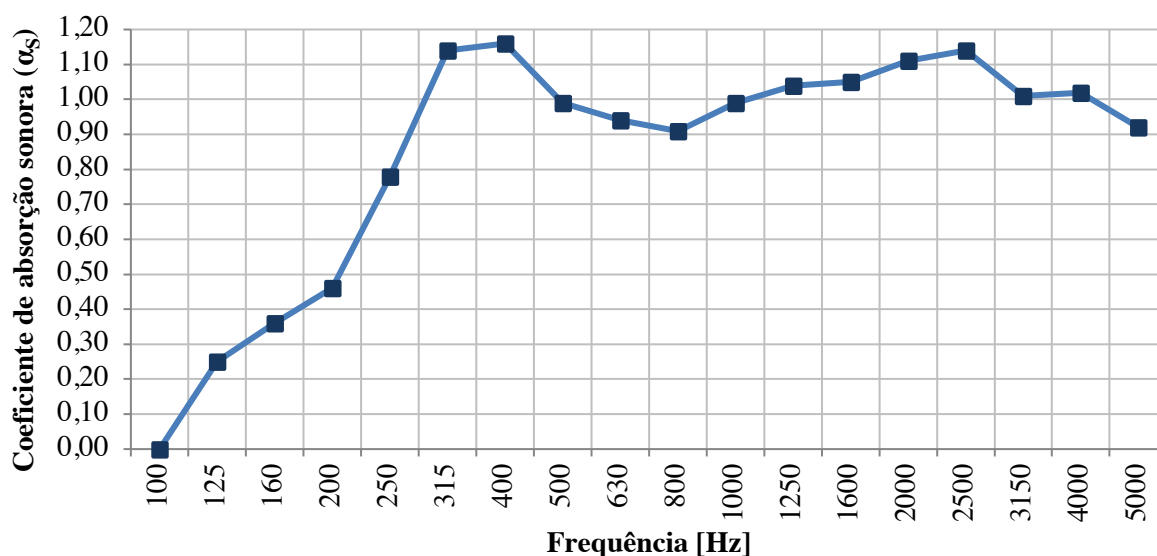


Figura 4.15 - Representação gráfica do coeficiente de absorção sonora, α_s .

Observa-se para os valores obtidos a partir dos 200 Hz, um α_s superior a 0,40, o que significa que o sistema modular em estudo apresenta propriedades sonoras absorventes relevantes a partir dessas frequências. Os valores do coeficiente de absorção sonora a partir dos 250 Hz, aumentam significativamente, o que significa que a solução de fachada verde apresenta uma boa capacidade de absorção em frequências mais elevadas.

A tabela 4.3, apresenta os valores da curva de referência e os valores obtidos para o coeficiente prático de absorção sonora, α_{pi} calculados pela norma EN ISO 11654:1997.

Tabela 4.9 – coeficiente prático da absorção sonora, α_{pi} , e da curva de referência ajustada

Freq. (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Curva de referência		0,80	1,00	1,00	1,00	0,90
α_{pi}	0,20	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00

Em traços gerais, os valores de α_{pi} são calculados para cada banda de oitava, a partir da média aritmética dos 3 coeficientes de absorção sonora, α_s , nas correspondentes bandas de terço de oitava. O valor de α_{pi} é limitado a 1,0 quando os valores médios arredondados são maiores que 1,0, pois fisicamente não são possíveis registarem-se valores superiores. Os valores

anteriormente obtidos, superiores a 1,0, ocorrem devido à utilização da fórmula aproximada para cálculo de coeficientes de absorção, deduzida por Sabine (Nowoświat *et al.*, 2016).

Neste caso, como os desvios em relação à curva de referência são inferiores a 0,10, a curva de referência ajustada é igual à curva de referência. A figura 4.16 representa, graficamente, o coeficiente prático de absorção sonora, α_{pi} e a curva de referência ajustada.

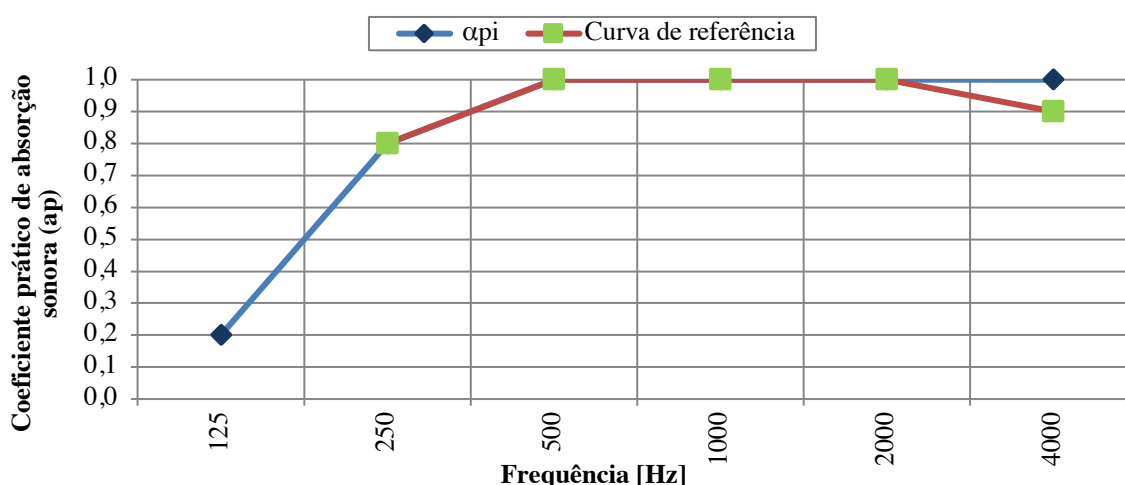


Figura 4.16 - Representação gráfica do coeficiente prático de absorção sonora (α_{pi}) e da curva de referência ajustada.

De acordo com a norma, o coeficiente de absorção sonora ponderado α_w , é igual ao valor da curva de referência ajustada para a banda dos 500 Hz, sendo, neste caso igual 1,00, o que corresponde a uma elevada capacidade de absorção sonora.

4.3 Capacidade de retenção e drenagem de água

Neste subcapítulo é descrita a montagem do sistema de ensaio e são apresentados os resultados obtidos para caracterização do sistema WallGreen.

4.3.1 Preparação dos provetes de ensaio

Para a avaliação da capacidade de retenção e drenagem de água do sistema WallGreen foi construído um dispositivo experimental muito semelhante ao descrito anteriormente, no capítulo 3, e ilustrado na figura 4.18.

No caso da solução de fachada verde em estudo, a retenção e drenagem de água no sistema são controladas somente pelo vaso com filtro e substrato. Desta forma, os ensaios foram realizados sobre este componente do sistema. A água colocada a partir do recipiente de descarga é

introduzida no vaso pela abertura circular na lateral do mesmo, por onde normalmente é feita a irrigação. A drenagem da água em excesso é feita a partir do pequeno orifício, no lado oposto à abertura circular (figura 4.17).

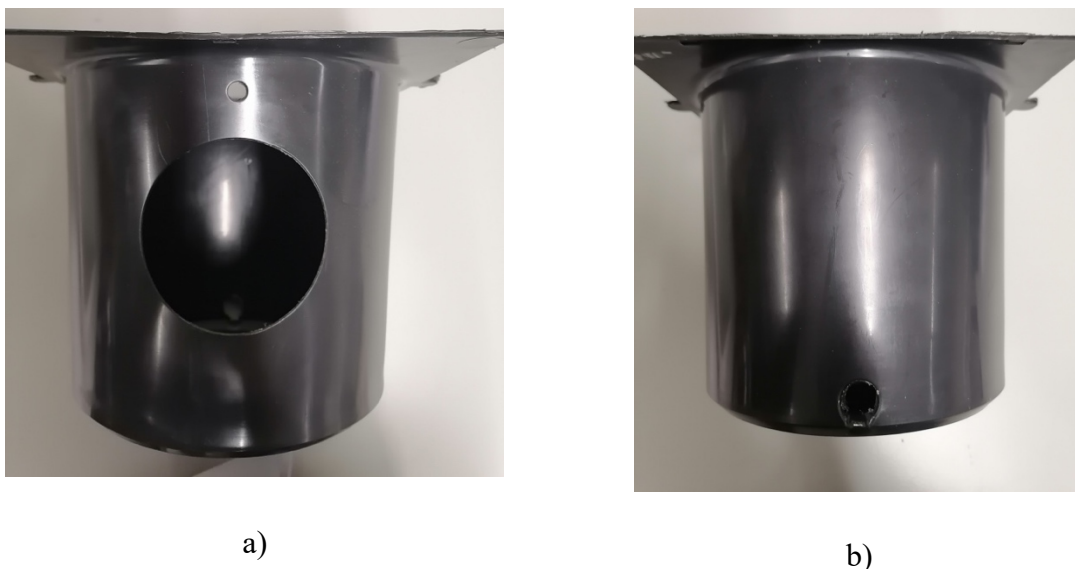


Figura 4.17 – aberturas no vaso para irrigação: a) abertura circular lateral; b) orifício no lado oposto à abertura circular.

A água drenada a partir do vaso é recolhida num recipiente posicionado sobre uma balança verificada, capaz de pesar até 14 kg com uma sensibilidade $\pm 0,01$ g, a qual se encontra ligada a um computador que faz a aquisição de 5 leituras por segundo. Os ensaios foram realizados numa sala com controlo de temperatura e humidade relativa, a 23°C e 50%, respetivamente.

Nos ensaios realizados, o caudal de água introduzido no sistema foi ajustado, na torneira do recipiente de descarga, de forma a simular o caudal de rega gota-a-gota usado nesta solução. Sobre o mesmo provete foram realizadas 4 descargas sucessivas a cada 24 horas. Foram colocados 5 l de água no recipiente de descarga de forma a garantir que o provete atingia o máximo de retenção de água e drenava água em excesso a partir deste. Importa referir que o dispositivo de descarga manteve sempre, no final de cada ensaio, um pequeno filme de água, no fundo. Essa quantidade de água, que praticamente não variou entre descargas, foi sempre pesada por forma a poder ser descontada do valor total de água inicial.

Para avaliar o perfil e os caudais da água drenada partir do vaso, isto é, sem os elementos absorventes (filtro e substrato) foi realizada, uma descarga apenas com o vaso.

Antes do início da primeira descarga com o substrato e filtro, o substrato foi submetido a condicionamento numa câmara climática, com controlo de temperatura a 23°C e humidade

relativa a 50%. O substrato foi mantido em condicionamento até se obter uma diferença de massa inferior a 2% entre pesagens sucessivas a cada 24h. A quantidade de substrato colocada dentro do vaso foi aproximadamente 1 kg.



Figura 4.18 – Montagem do provete de ensaio.

4.3.2 Resultados

Os resultados obtidos em termos dos perfis de água drenada acumulada, para cada descarga efetuada, apresentam-se, graficamente, na Figura 4.19. Uma vez que a quantidade máxima de água drenada a partir do vaso é atingida ao fim de poucas horas, são apresentadas apenas as primeiras 12 horas de ensaio.

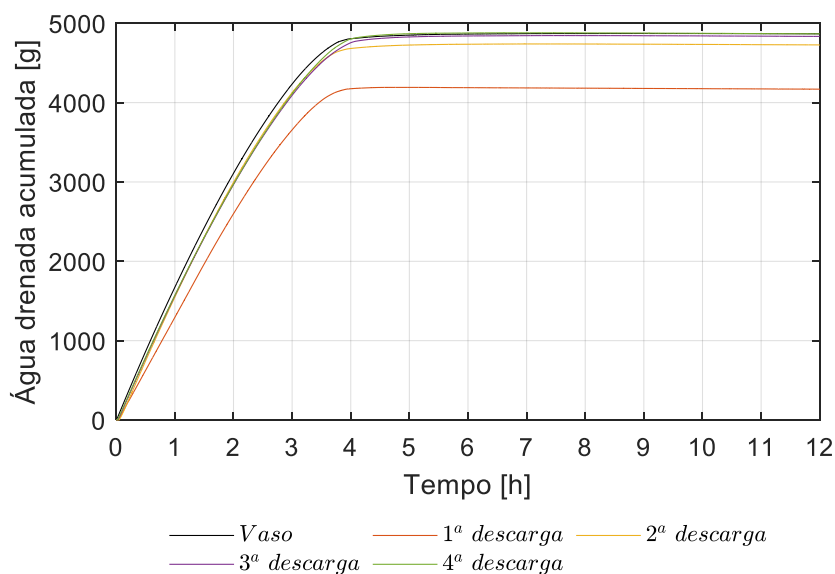


Figura 4.19 – Gráfico representativo da água drenada acumulada ao longo do tempo.

Observando os resultados é possível verificar que a 1ª descarga, realizada sobre o vaso com filtro e substrato secos, conduz a uma quantidade de água drenada acumulada consideravelmente inferior às restantes descargas, com uma diferença, entre esta descarga e a realizada apenas com o vaso, de 680,0 g em relação ao máximo de água drenada. Estes resultados sugerem que a solução tem, como o esperado, capacidade de reter uma quantidade significativa de água. No que respeita às descargas subsequentes não são encontradas diferenças significativas entre as mesmas nem em relação à descarga efetuada com o vaso sem filtro e substrato.

O gráfico da Figura 4.20 contém os caudais instantâneos da água drenada. Tal como anteriormente, são apresentados apenas os resultados para as primeiras 12 horas de ensaio.

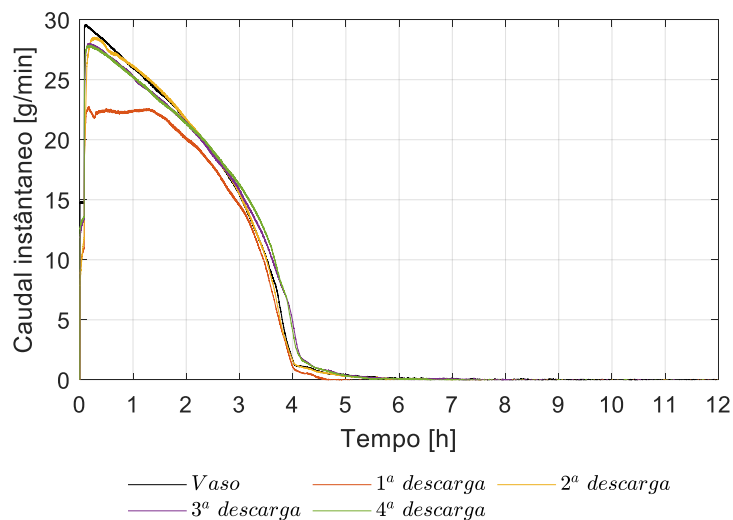


Figura 4.20 – Gráfico representativo do caudal instantâneo registado ao longo do tempo.

Tal como o expectável, a 1ª descarga conduz a caudais de água drenada inferiores às restantes descargas com uma diferença que chega às 6,8 g/min entre o caudal máximo atingido nesta descarga e na realizada apenas com o vaso. Nas restantes descargas não são encontradas diferenças significativas. Contudo, a descarga realizada apenas com o vaso apresenta um valor ligeiramente superior às restantes.

4.4 Desempenho ambiental

Neste subcapítulo são apresentados os resultados do estudo de avaliação de ciclo de vida efetuado com vista à caracterização do desempenho ambiental do sistema de fachada verde, WallGreen, na etapa de produto. Desta forma, foi realizado um estudo ACV “do-berço-ao-portão” (do inglês, “cradle-to-gate”), no qual foram avaliados todos os potenciais impactes ambientais desde a extração de matérias-primas até à saída de todos os componentes da fábrica. As fronteiras do sistema em estudo encontram-se esquematicamente representadas na figura 4.21. A unidade funcional usada foi 1 m² de fachada verde com um período de vida útil de 50 anos. O *software* usado para a modelação e cálculo dos potenciais impactes ambientais foi o SimaPro (versão 9.1.).

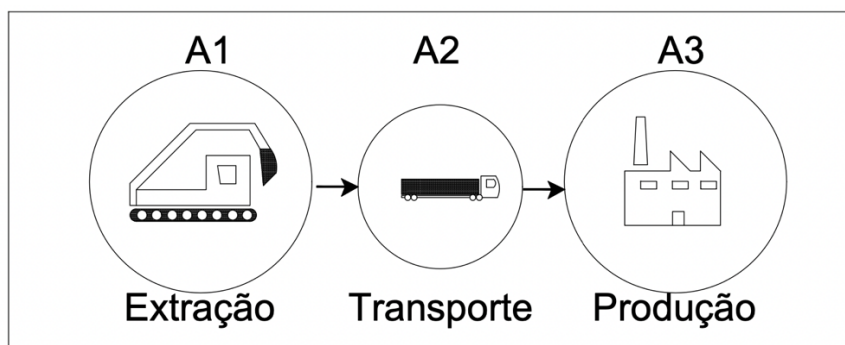


Figura 4.21 - Fronteiras definidas para o estudo de ACV.

Os dados de inventário foram obtidos a partir de fichas técnicas e dados recolhidos a partir dos protótipos preparados para os restantes ensaios. A tabela 4.10 apresenta os dados de inventário compilados de acordo com a unidade funcional definida. Para facilitar a análise e de forma semelhante ao efetuado, anteriormente, por outros autores (Cortês et al., 2021), os dados de inventário foram divididos em 5 categorias de componentes que regra geral constituem uma parede vida do tipo modular como a solução de fachada verde WallGreen: componentes de fixação, elementos de suporte da vegetação, substrato, vegetação e sistema de irrigação.

Tabela 4.10 – Materiais usados e quantidades de acordo com a unidade funcional definida

Categoria de componente	Material	Quantidade total (kg)
Componentes de fixação	Aço inox; Nylon	0,57
Elementos de suporte da vegetação	Tinta asfáltica; Polipropileno reciclado enriquecido com aditivos UV; Filtro geotêxtil	21,63
Substrato	Substrato técnico	31,03
Vegetação	<i>Dieffenbachia seguine</i> e <i>Nephrolepis exaltata</i>	2,59
Sistema de irrigação	Polietileno	0,23

Para modelar a produção de todos os componentes foram usados dados obtidos a partir de fichas técnicas, de declarações ambientais de produto (DAP) e das bases de dados Ecoinvent v3.8 e EF Database 2.0.

Com base na modelação efetuada foram calculados os potenciais impactes ambientais usando o método CML-IA v.4.7. Este método faz uso de sete categorias de impacto: depleção de recursos abióticos - elementos (DRA (elementos)), depleção de recursos abióticos - combustíveis fósseis (DRA (fósseis)), aquecimento global (AG), depleção da camada de ozono (DCO), oxidação fotoquímica (OF), acidificação (AC) e eutrofização (EUT). Os resultados obtidos para a etapa de produto são apresentados na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Potenciais impactes ambientais para a etapa de produto do sistema de fachada verde WallGreen

Wallgreen	Componentes de fixação	Elementos de suporte da vegetação	Substrato	Vegetação	Sistemas de irrigação	Unidade
Depleção abiótica (elementos)	5,51E-05	1,46E-05	1,10E-05	1,44E-06	1,41E-07	Kg Sb eq.
Depleção abiótica (combustíveis fósseis)	3,31E+01	5,93E+02	6,04E+01	1,41E+00	1,72E+01	MJ
Aquecimento global	3,07E+00	4,12E+01	5,86E+00	1,77E-01	5,95E-01	Kg CO ₂ eq.
Depleção da camada de ozono	9,75E-08	2,18E-06	4,16E-07	8,83E-09	1,34E-08	Kg CFC-11 eq.
Oxidação fotoquímica	6,64E-04	9,50E-03	1,59E-03	3,64E-05	1,66E-04	Kg C ₂ H ₄ eq.
Acidificação	1,36E-02	1,41E-01	3,82E-02	8,32E-04	2,09E-03	Kg SO ₂ eq.
Eutrofização	1,63E-03	2,12E-02	5,00E-03	3,57E-04	2,09E-04	Kg PO ₄ eq.

Por forma a facilitar uma análise dos resultados, os mesmos encontram-se normalizados para 100% e representados na figura 4.22.

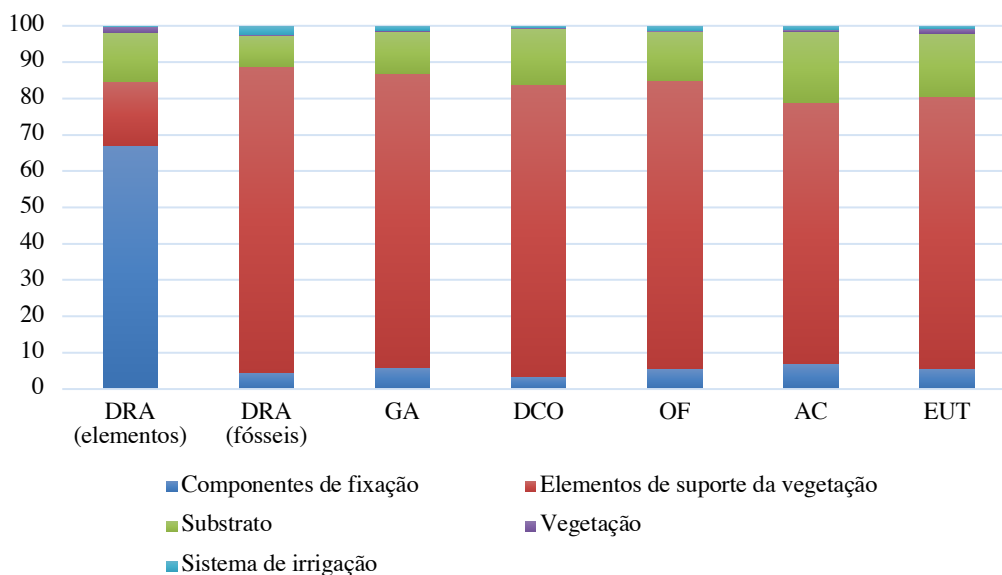


Figura 4.22 – Impactes ambientais potenciais para a etapa de produto do sistema de fachada WallGreen, normalizados para 100%.

Os resultados mostram que os elementos de suporte da vegetação apresentam a maior contribuição para todas as categorias de impacte analisadas (DRA (fósseis): 84,1%, AG: 81,0%, DCO: 80,3%, OF: 79,5%, AC: 72,0% e EUT: 74,7) com a exceção da depleção de recursos abióticos - elementos onde a maior contribuição provém dos elementos de fixação (DRA (elementos): 66,9%). Este facto deve-se em grande medida aos módulos do sistema que apresentam uma massa significativa na massa total da solução (30,9%). Importa referir, contudo, que este módulo poderia trazer mais potenciais impactes se, em vez de usar polipropileno reciclado, usasse o material virgem. Por sua vez, os componentes de fixação apresentam uma elevada contribuição para a depleção de recursos abióticos - elementos devido ao aço inox de que são feitos os parafusos.

O substrato apresenta sempre a segunda maior contribuição para todas as categorias de impacte (DRA (fósseis): 8,6%, AG: 11,5%, DCO: 15,3%, OF: 13,3%, AC: 19,5% e EUT: 17,6) com a exceção da depleção abiótica (elementos) em que é a terceira. Estes resultados devem-se à elevada massa do substrato usado no sistema (55,4%).

O sistema de irrigação e a vegetação apresentam, por sua vez, contribuições pouco significativas para todas as categorias de impacte analisadas.

4.5 Comportamento mecânico

Neste subcapítulo é descrita, numa primeira fase, a montagem do sistema de ensaio usado para estudar a resistência dos módulos de fachada verde WallGreen, seguindo-se a apresentação dos resultados obtidos.

4.5.1 Montagem do sistema de ensaio

Tal como descrito anteriormente, estes trabalhos iniciaram-se com levantamento e estudo da forma de fixação dos módulos WallGreen à parede de suporte. Os módulos são, normalmente, fixados à parede de suporte por meio da utilização de buchas, parafusos e anilhas. Os parafusos deverão ser introduzidos em 8 orifícios distribuídos por cada módulo como ilustra a Figura 4.23.

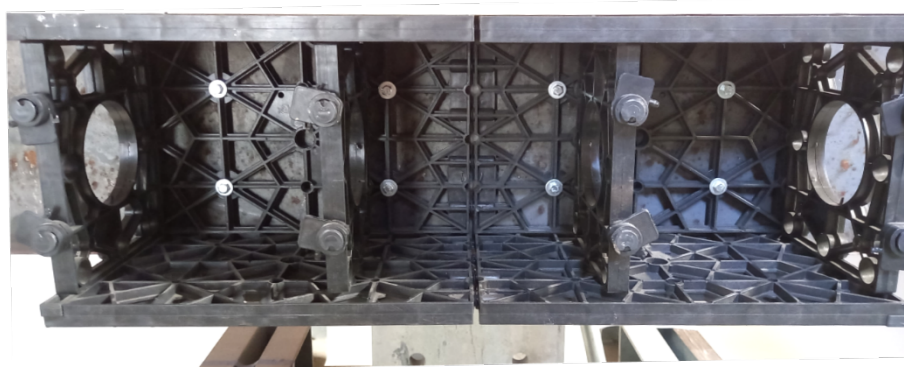
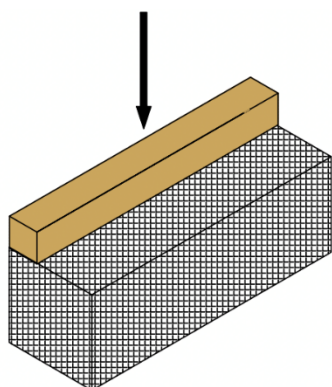
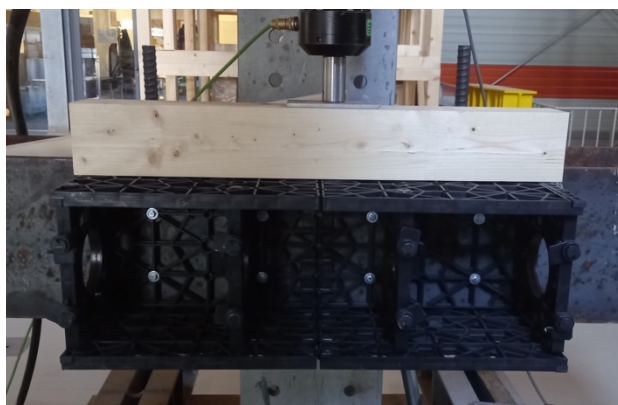


Figura 4.23 – Colocação dos parafusos no módulo WallGreen.

Desta forma, para testar a resistência dos módulos à colocação de cargas, que podem resultar do peso próprio do sistema, de esforços realizados durante operações de manutenção ou de ações indevidas sobre o sistema, foram idealizados dois tipos de testes. Os primeiros testes consistiram na aplicação de uma carga distribuída na borda mais atrás do módulo, conforme se ilustra na figura 4.24 exercendo-se uma força de corte sobre o módulo. Os segundos testes consistiram na aplicação de uma carga distribuída na borda mais à frente do módulo, conforme se ilustra na figura 4.25, exercendo-se uma força sobre o módulo que gera predominantemente esforços de flexão e corte.

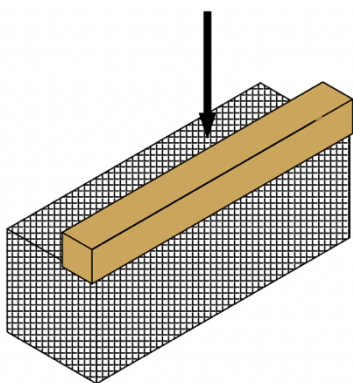


a)

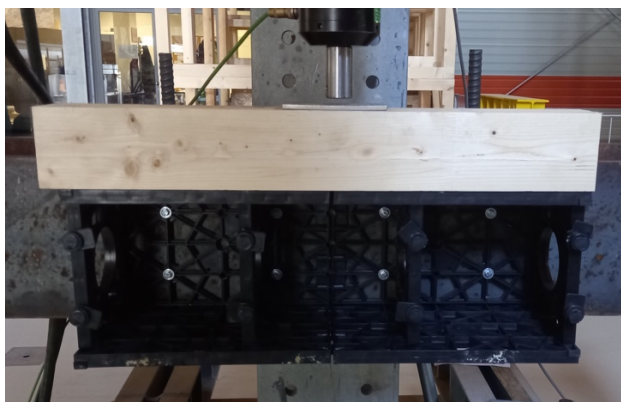


b)

Figura 4.24 - Ensaio de corte puro: a) esquema representativo; b) montagem do sistema de ensaio.



a)



b)

Figura 4.25 - Ensaio de flexão: a) esquema representativo; b) montagem do sistema de ensaio.

Para a realização de ambos os ensaios os módulos foram fixados a uma placa de aço para garantir a resistência do suporte e assegurar que a rotura não era afetada pelo estado/tipo do suporte. Nas duas tipologias de ensaios as cargas foram aplicadas através de um atuador (Instron

59-R8KN100), sobre uma barra, com rigidez apreciável (de modo a garantir uma distribuição de cargas próxima da uniformemente distribuída), com 80 mm de largura e com o mesmo comprimento do módulo, até à rotura dos provetes. A velocidade de carregamento foi definida em deslocamento (5 mm/min), tendo sido usada uma célula de carga de 50 kN calibrada (Interface 1210CDC-50KN-B). Para cada tipo de teste foram testados 3 conjuntos de módulos de fachada verde.

4.5.2 Resultados

Os resultados obtidos para a primeira tipologia de ensaio descrita, isto é, com a aplicação de carga de corte, são apresentados no gráfico da figura 4.26. A tabela 4.12 apresenta as cargas máximas suportadas pelos provetes antes da rotura.

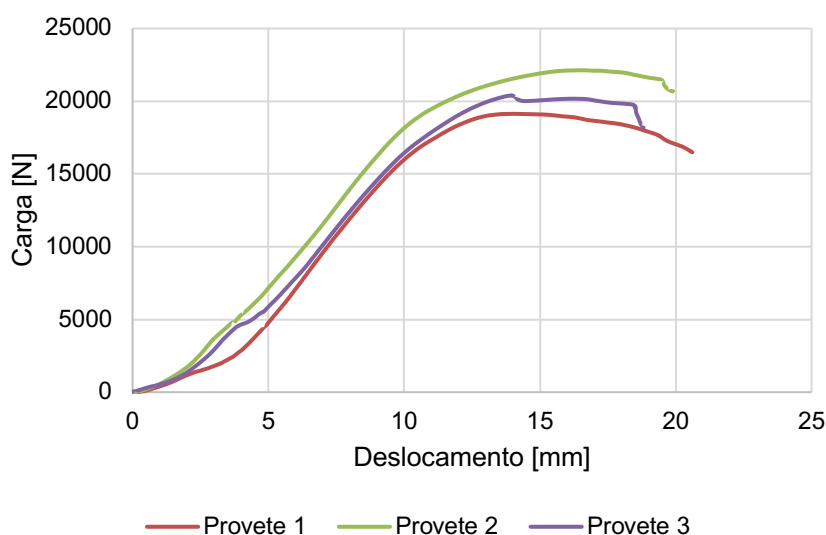


Figura 4.26 - Representação gráfica dos ensaios de corte puro.

Tabela 4.12 – Resultados da carga máxima respetivos ao ensaio de corte puro

Provede	Carga máxima (kN)
1	19,1
2	22,1
3	20,4
Média	20,6

De maneira geral, observa-se a partir dos resultados obtidos um comportamento semelhante para os 3 provetes ensaiados, registando-se alguma plastificação antes da rotura. As cargas de

rotura obtidas correspondem a valores bastante elevados o que evidencia um bom desempenho por parte dos módulos de fachada nas condições ensaiadas. A figura 4.27 ilustra as roturas e deformações (residuais resultantes dos fenómenos de plastificação) nos módulos resultantes das tensões geradas, predominantemente de corte.

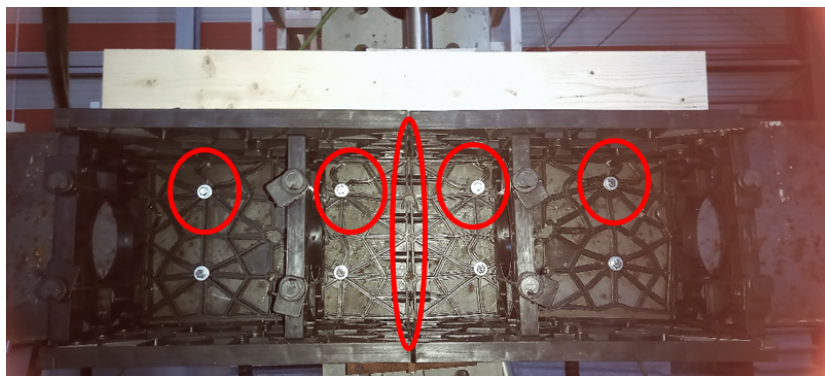


Figura 4.27 - Roturas e deformações nos módulos resultantes da carga de corte aplicada.

Os resultados obtidos para a segunda tipologia de ensaio descrita, isto é, com a aplicação de cargas de flexão, são apresentados no gráfico da figura 4.28. A tabela 4.13 apresenta as cargas máximas suportadas pelos provetes antes da rotura.

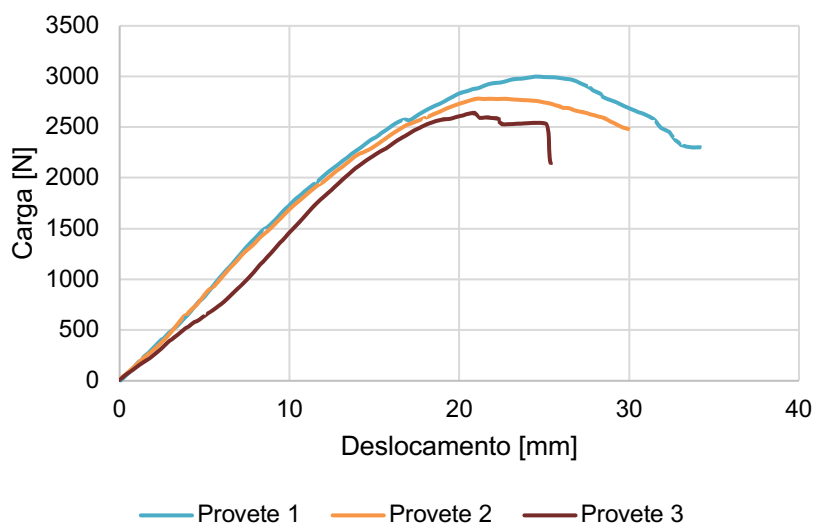


Figura 4.28 - Representação gráfica dos ensaios de corte com flexão.

Tabela 4.13 – Resultados da carga máxima nos ensaios de corte com flexão

Provete	Carga máxima (kN)
1	3,0
2	2,8
3	2,6
Média	2,81

Tal como nos ensaios anteriores, é possível observar que, de maneira geral, os provetes testados apresentam um comportamento semelhante, evidenciando novamente a ocorrência de fenómenos de plastificação antes da rotura. As cargas de rotura obtidas neste ensaio são, tal como o expectável, bastante mais baixas do que as anteriores. A figura 4.29 ilustra as roturas e deformações nos módulos resultantes das cargas de flexão aplicadas.

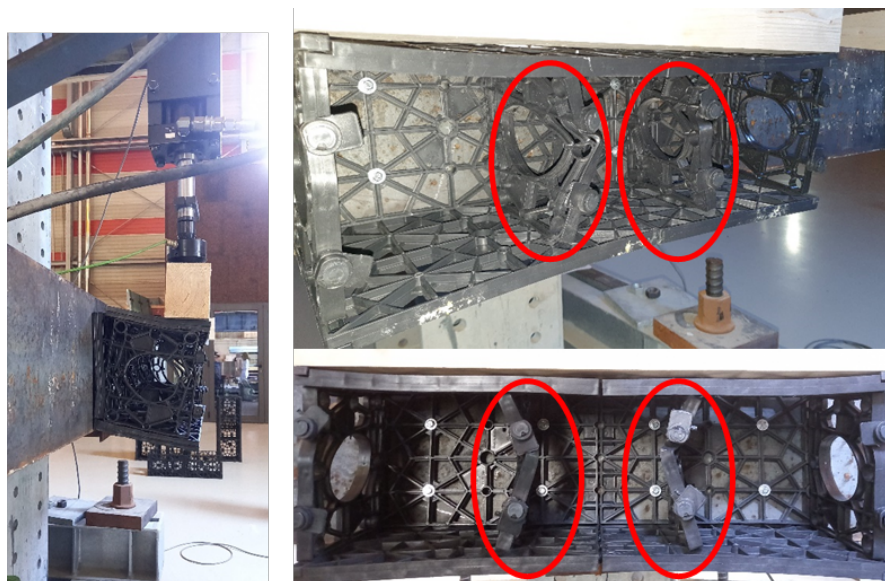


Figura 4.29 - Roturas e deformações nos módulos resultantes das cargas de flexão aplicadas.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

As consequências das alterações climáticas são já notáveis na grande maioria dos centros urbanos. Neste contexto, as fachadas verdes têm vindo a ser reconhecidas como soluções que podem auxiliar na mitigação de alguns destes efeitos. No decurso da revisão bibliográfica efetuada, foram referidos os potenciais benefícios das fachadas verdes, que passam, nomeadamente, pela melhoria do isolamento térmico dos edifícios, pela redução dos níveis de poluição sonora e pela mitigação das cheias urbanas.

Todavia, a complexidade dos fenómenos envolvidos e o elevado número de variáveis de que depende o comportamento das fachadas verdes, bem como a diversidade *designs* e de soluções construtivas existentes, dificulta a avaliação do desempenho e a quantificação dos benefícios proporcionados por estes sistemas. Neste contexto, foram definidas, no âmbito deste trabalho, abordagens metodológicas para caracterizar de forma sistemática, reproduzível e expedita o desempenho destas soluções, com enfoque no comportamento térmico, acústico, mecânico, hídrico (capacidade de retenção e drenagem de água) e ambiental. Com o objetivo de testar e consolidar as abordagens propostas, as mesmas foram aplicadas na caracterização do desempenho de um sistema de fachada verde modular disponibilizado pela empresa Landlab (WallGreen).

Os primeiros ensaios foram realizados com vista à caracterização do comportamento térmico da solução de fachada verde WallGreen. A abordagem baseou-se no uso de uma câmara bioclimática que permitiu a simulação de regimes transientes para condições de verão e inverno. Os resultados revelaram temperaturas superficiais mais baixas atrás dos módulos de fachada verde comparativamente com as temperaturas superficiais medidas na parede de referência, durante a simulação de verão. Adicionalmente, medições realizadas durante a simulação de inverno permitiram observar temperaturas superficiais mais altas, durante todo o dia, atrás dos módulos de fachada verde comparativamente com as temperaturas superficiais medidas na parede de referência. Os resultados obtidos permitiram observar os benefícios proporcionados, em termos de isolamento térmico, pela solução de fachada verde em estudo.

Relativamente ao desempenho acústico, foi avaliada a capacidade de absorção sonora proporcionada pela solução, através de uma câmara reverberante. Os resultados obtidos para o

comportamento acústico do sistema modular permitiram concluir que a solução estudada apresenta uma capacidade de absorção sonora relevante, tendo-se obtido um coeficiente de absorção sonora ponderado, α_w , igual a 1,00.

Para a determinação da capacidade de retenção e drenagem destes sistemas, foi utilizado um dispositivo experimental que permitiu simular várias descargas com um caudal semelhante ao usado nos sistemas de irrigação utilizados por este tipo de soluções. Os resultados evidenciam que a solução apresenta capacidade de reter uma quantidade significativa de água, conduzindo a caudais de água drenada consideravelmente inferiores aos obtidos nas restantes descargas efetuadas.

Adicionalmente, por forma a avaliar o desempenho ambiental da solução em causa, foi realizado um estudo de avaliação de ciclo de vida *cradle-to-gate*. Os resultados obtidos permitiram identificar, em traços gerais, os materiais e componentes que apresentam maior influência no desempenho ambiental da solução.

Por fim, de forma complementar, para assegurar a resistência estrutural das soluções de fachada verde no revestimento de edifícios, identificou-se a necessidade de implementar ensaios para a caracterização do comportamento mecânico destas soluções. A aplicação à solução de fachada verde em estudo consistiu na realização de ensaios que envolveram o carregamento na parte superior dos módulos de fachada. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema apresenta resistências mecânicas adequadas à aplicação.

Concluiu-se que é possível quantificar os principais benefícios de uma fachada verde de uma forma reprodutível e expedita, aplicando estratégias que permitam controlar em laboratório as principais variáveis que influem no desempenho deste tipo de sistemas e estabelecendo cenários que permitam reproduzir condições reais de aplicação. De uma forma geral, os resultados obtidos para o sistema WallGreen mostraram vantagens na instalação deste sistema, oferecendo melhorias para o edifício e para o ambiente.

5.2 Trabalhos futuros

Este trabalho permitiu estabelecer metodologias com vista à avaliação de soluções de fachada verde em termos do seu desempenho térmico, acústico, mecânico e ambiental e da sua capacidade de retenção e drenagem de água. Embora os objetivos inicialmente estabelecidos tenham sido alcançados, reconhece-se que este trabalho possa, ainda, ser estendido com a definição de outras metodologias que permitam avaliar, nomeadamente, a capacidade de sequestrar carbono e de fixar outros poluentes atmosféricos, o comportamento de reação ao fogo e os efeitos da evapotranspiração. Adicionalmente, poderão ser realizados estudos de aplicação prática das metodologias estabelecidas a outras soluções de fachada verde.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.I.T.F. UNEP, F. F. P. H. L. V. D. L. V. A. (2016a). *Recommandations professionnelles B.C.3-R0: Conception, réalisation et entretien de solutions de végétalisation de façades par bardage rapporté*. https://www.vert-tical.com/ressources/common/B.C.3-R0_Conception_realisation_et_entretien_de_solutions_de_vegetalisation_de_facades_par_bardage_rapporte_de_septembre_2016.pdf
- A.I.T.F. UNEP, F. F. P. H. L. V. D. L. V. A. (2016b). *Recommandations professionnelles B.C.5-R0: Conception, réalisation et entretien de solutions de végétalisation de façades par plantes grimpantes*.
- Almeida, R., Simões, N., Tadeu, A., Palha, P., & Almeida, J. (2019). Thermal behaviour of a green roof containing insulation cork board. An experimental characterization using a bioclimatic chamber. *Building and Environment*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106179>
- APA. (2021). *Ruído Ambiente*. <https://apambiente.pt/Ar-e-Ruido/Ruido-Ambiente>. <https://apambiente.pt/ar-e-ruido/ruido-ambiente>
- Azkorra, Z., Pérez, G., Coma, J., Cabeza, L. F., Bures, S., Álvaro, J. E., Erkoreka, A., & Urrestarazu, M. (2015). Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. *Applied Acoustics*, 89, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>
- Bakhshoodeh, R., Ocampo, C., & Oldham, C. (2022). Thermal performance of green façades: Review and analysis of published data. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 155). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111744>
- Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 82, pp. 915–939). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>

- Coma, J., Pérez, G., Solé, C., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2014). New green facades as passive systems for energy savings on Buildings. *Energy Procedia*, 57, 1851–1859. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.049>
- Cortês, A., Almeida, J., Santos, M. I., Tadeu, A., de Brito, J., & Silva, C. M. (2021). Environmental performance of a cork-based modular living wall from a life-cycle perspective. *Building and Environment*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107614>
- Cortês, A., Almeida, J., Tadeu, A., Ramezani, B., Fino, M. R., de Brito, J., & Silva, C. M. (2022). The effect of cork-based living walls on the energy performance of buildings and local microclimate. *Building and Environment*, 216, 109048. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109048>
- Cortês, A., Tadeu, A., Santos, M. I., de Brito, J., & Almeida, J. (2021). Innovative module of expanded cork agglomerate for green vertical systems. *Building and Environment*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107461>
- de Jesus, M. P., Lourenço, J. M., Arce, R. M., & Macias, M. (2017). Green façades and in situ measurements of outdoor building thermal behaviour. In *Building and Environment* (Vol. 119, pp. 11–19). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.03.041>
- de Sousa, K., & Coelho, D. (2019). *AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA MODULAR DE COBERTURA VERDE: COMPORTAMENTO TÉRMICO, HÍDRICO E ACÚSTICO* *EVALUATION OF A MODULAR GREEN ROOF SYSTEM: THERMAL, HYDROLOGICAL AND ACOUSTIC BEHAVIOUR*. DEC.
- Dogan Ozturk, E. (2013). *Europe's urban air quality - re-assessing implementation challenges in cities*. *EEA Report*(24/2018).
- Enzi, V., Cameron, B., Dezsényi, P., Gedge, D., Mann, G., & Pitha, U. (2017). *Nature-Based Solutions and Buildings – The Power of Surfaces to Help Cities Adapt to Climate Change and to Deliver Biodiversity* (pp. 159–183). https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_10
- Eumorfopoulou, E. A., & Kontoleon, K. J. (2009). Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment*, 44(5), 1024–1038. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.004>
- European Commission. Directorate-General for Research and Innovation. (2015). *Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing*
-

cities : final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities' : (full version). Publications Office of the European Union.

European Environmental Agency, E. (2019). *Environmental noise in Europe - 2020*. <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>

Feng, H., & Hewage, K. (2014). Lifecycle assessment of living walls: Air purification and energy performance. *Journal of Cleaner Production*, 69, 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.041>

Fll - Landscape Development, L. R. S. e. v. (2018). *Fassadenbegrünungsrichtlinien – Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen*.

GSRArchitectural. (2022). *Vegetative Screens*. <https://www.gsrarch.com/vegetative-screens>.

Ip, K., Lam, M., & Miller, A. (2010). Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment*, 45(1), 81–88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.003>

Itecons. (2022). <https://www.itecons.uc.pt/about/facilities/7>.

Jansson, C., Wullschleger, S. D., Kalluri, U. C., & Tuskan, G. A. (2010). Phytosequestration: Carbon biosequestration by plants and the prospects of genetic engineering. *BioScience*, 60(9), 685–696. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.9.6>

Jordan Ardoin. (2022, May 3). *Green Walls: How to Create a Living Landscape (or Wallscape)*. <https://www.lawnstarter.com/blog/landscaping/green-walls/>.

Kaloustian, N., Bitar, H., & Diab, Y. (2016). Urban Heat Island and Urban Planning in Beirut. *Procedia Engineering*, 169, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.009>

Koch, K., Ysebaert, T., Denys, S., & Samson, R. (2020). Urban heat stress mitigation potential of green walls: A review. In *Urban Forestry and Urban Greening* (Vol. 55). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126843>

Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015a). Green wall systems: A review of their characteristics. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 41, pp. 863–871). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>

- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015b). Green wall systems: A review of their characteristics. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 41, pp. 863–871). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- Manso, M., & Castro-Gomes, J. P. (2016). Thermal analysis of a new modular system for green walls. *Journal of Building Engineering*, 7, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.03.006>
- Medl, A., Stangl, R., & Florineth, F. (2017). Vertical greening systems – A review on recent technologies and research advancement. In *Building and Environment* (Vol. 125, pp. 227–239). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.054>
- Nations, U., of Economic, D., Affairs, S., & Division, P. (2018). *World Urbanization Prospects The 2018 Revision*. <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>
- Nowoświat, A., Olechowska, M., & ĩusarek, J. (2016). Prediction of reverberation time using the residual minimization method. *Applied Acoustics*, 106, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.12.024>
- Oquendo-Di Cosola, V., Olivieri, F., & Ruiz-García, L. (2022). A systematic review of the impact of green walls on urban comfort: temperature reduction and noise attenuation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112463>
- Oquendo-Di Cosola, V., Olivieri, F., Ruiz-García, L., & Bacenetti, J. (2020). An environmental Life Cycle Assessment of Living Wall Systems. *Journal of Environmental Management*, 254, 109743. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109743>
- Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011a). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43(12), 3419–3429. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010>
- Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011b). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43(12), 3419–3429. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010>
- Ottelé, M., van Bohemen, H. D., & Fraaij, A. L. A. (2010). Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering*, 36(2), 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.007>

- Pérez, G., Coma, J., Barreneche, C., de Gracia, A., Urrestarazu, M., Burés, S., & Cabeza, L. F. (2016). Acoustic insulation capacity of Vertical Greenery Systems for buildings. *Applied Acoustics*, 110, 218–226. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.03.040>
- Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2014). Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 39, pp. 139–165). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.055>
- Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M., & Cabeza, L. F. (2011). Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy*, 88(12), 4854–4859. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.032>
- Perini, K., Ottelé, M., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46(11), 2287–2294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>
- P&P. (2018). *Pritchard & Pritchard*. Modular Living Walls – Commercial Transformation.
- Raji, B., Tenpierik, M. J., & van den Dobbelen, A. (2015). The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 45, pp. 610–623). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011>
- Riley, B. (2017). The state of the art of living walls: Lessons learned. In *Building and Environment* (Vol. 114, pp. 219–232). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.016>
- Safikhani, T., Abdullah, A. M., Ossen, D. R., & Baharvand, M. (2014). A review of energy characteristic of vertical greenery systems. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 40, pp. 450–462). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.166>
- Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., Giordano, R., Montacchini, E., Tedesco, S., Larcher, F., & Schiavi, A. (2017). A novel vertical greenery module system for building envelopes: The results and outcomes of a multidisciplinary research project. *Energy and Buildings*, 146, 333–352. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.046>
- Shafiee, E., Faizi, M., Yazdanfar, S. A., & Khanmohammadi, M. A. (2020). Assessment of the effect of living wall systems on the improvement of the urban heat island phenomenon. *Building and Environment*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106923>

- Škerget, L., Tadeu, A., & Almeida, J. (2021). Article unsteady coupled moisture and heat energy transport through an exterior wall covered with vegetation. *Energies*, *14*(15). <https://doi.org/10.3390/en14154422>
- Tam, B. Y., Gough, W. A., & Mohsin, T. (2015). The impact of urbanization and the urban heat island effect on day to day temperature variation. *Urban Climate*, *12*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.12.004>
- Tiwary, A., Godsmark, K., & Smethurst, J. (2018). Field evaluation of precipitation interception potential of green façades. *Ecological Engineering*, *122*, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.026>
- Tomson, M., Kumar, P., Barwise, Y., Perez, P., Forehead, H., French, K., Morawska, L., & Watts, J. F. (2021). Green infrastructure for air quality improvement in street canyons. In *Environment International* (Vol. 146). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106288>
- Urban Greening and N. Building Landscape. (2017). *Uk Guide to Green Walls - a Introductory Guide to Designing and Constructing Green Walls in the UK*. <https://www.urbangreening.info>
- Uzuhariah Abdullah, A., Ossen, D., & Sadeghian, M. M. (2016). *A Review on Green Wall, Classification and Function Related papers Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review Julià Coma, Ingrid Martorell The Integration of Vegetation in Architecture, Vertical and Horizontal Greened Surfaces Adriano Magliocco A review of energy characteristics of vertical greenery systems A Review on Green Wall, Classification and Function*. www.ijrst.com
- van de Wouw, P. M. F., Ros, E. J. M., & Brouwers, H. J. H. (2017). Precipitation collection and evapo(transpi)ration of living wall systems: A comparative study between a panel system and a planter box system. *Building and Environment*, *126*, 221–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.10.002>
- Victoria. Department of Environment and Primary Industries. (n.d.). *Growing green guide : a guide to green roofs, walls and facades in Melbourne and Victoria, Australia*.
- Viecco, M., Jorquera, H., Sharma, A., Bustamante, W., Fernando, H. J. S., & Vera, S. (2021). Green roofs and green walls layouts for improved urban air quality by mitigating particulate matter. *Building and Environment*, *204*. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108120>
-

WHO/HEP/ECH/EHD/22.01. (2022). *Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment 2022 update*. <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HEP-ECH-EHD-22.01>
