



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Rui Domingos Figueiredo Afonso

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE
UMA COBERTURA VERDE EM CONTEXTO REAL

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Cidades Sustentáveis, orientada pelo Professor Doutor Nuno Simões e pelo Professor Doutor António Tadeu e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Setembro de 2022

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

Rui Domingos Figueiredo Afonso

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA COBERTURA VERDE EM CONTEXTO REAL

EVALUATION OF THE THERMAL BEHAVIOR OF A GREEN ROOF IN A REAL CONTEXT

Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Cidades Sustentáveis,
orientada pelo Professor Doutor Nuno Simões e pelo Professor Doutor António Tadeu.

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

A concretização desta dissertação marca o fim de uma importante etapa da minha vida, pelo que não poderia perder a oportunidade de mostrar todo o meu agradecimento às pessoas que me ajudaram ao longo da mesma.

As minhas primeiras palavras de gratidão são dirigidas ao meu orientador, Professor Nuno Simões, e ao meu coorientador, Professor António Tadeu, por toda a disponibilidade, sugestões, esclarecimentos e conhecimentos partilhados que me foram tão úteis.

Ao Itecons por permitir participar neste projeto e aos seus colaboradores pelo auxílio sempre que foi necessário, em particular à Arquiteta Katya Coelho.

A todos os meus amigos que me acompanharam, o meu obrigado pela paciência e acima de tudo o companheirismo de todos os dias.

Aos meus familiares por todo o apoio e incentivo demonstrado durante todo o percurso académico.

Aos meus pais por todo o esforço e pela educação que me deram e que faz de mim o que sou hoje.

Cabe ainda um agradecimento à Empresa Neoturf e à Câmara Municipal de Maia, pelo apoio prestado ao longo de todo o trabalho.

O presente trabalho teve o apoio do Portugal 2020 através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), através do projeto GREENFUTURE - Especialização de PME's no design, construção e manutenção de soluções de cobertura e fachada verdes com a referência POCI-01-0246-FEDER-181322.

Com a Colaboração do:



RESUMO

Nas últimas décadas, problemas como a poluição, a impermeabilização dos solos, a densidade urbana, a falta de qualidade dos edifícios, a ineficiência energética, a perda de biodiversidade, os fenómenos climáticos extremos, tais como ondas de calor/seca ou fenómenos de precipitação extrema, são adversidades que o Homem enfrenta e para os quais precisa de encontrar soluções.

A evidência de muitos benefícios que as coberturas verdes podem trazer para o ambiente urbano, incentivam a que estas sejam eleitas para fazer parte da estratégia ambiental das cidades do futuro. A retenção da água da chuva e o atraso dos picos de cheia, o isolamento térmico, a criação de nichos de biodiversidade, a captura de dióxido de carbono e a produção de oxigénio, a melhoria da paisagem urbana e a valorização dos edifícios, fazem parte do conjunto de argumentos do inegável valor das coberturas verdes e que tornam inquestionável a necessidade de as introduzir nas cidades. As coberturas verdes devem ser encaradas como uma solução construtiva a aplicar em edifícios novos e em reabilitações, caso seja possível.

O comportamento térmico das coberturas verdes é complexo devido à variabilidade das propriedades das suas componentes, nomeadamente em função do teor em água e da presença da vegetação (a que se associa os efeitos da evapotranspiração e da sombra que esta cria). Para que seja possível estimar com o máximo de rigor esse comportamento é necessário desenvolver métodos de caracterização específicos. O presente trabalho centra-se na apresentação dos resultados de monitorização duma cobertura verde instalada em contexto real durante a reabilitação de um edifício. A recolha e tratamento dos dados de monitorização servem para compreender melhor o comportamento das coberturas, mas também para serem usados no desenvolvimento de estudos teóricos, ou seja, na criação de modelos de cálculo que nos permitam fazer a simulação do comportamento de coberturas verdes ainda na fase de projeto. No âmbito desta dissertação ainda se aplicaram ferramentas de cálculo com o objetivo de melhor se discutirem e compreenderem os resultados das medições.

A solução de cobertura verde utilizada explora o uso de aglomerado de cortiça expandida, que desempenha em simultâneo a função de isolamento térmico e de camada de retenção de água (sem comprometer a capacidade de drenagem). Conclui-se que esta camada juntamente com o substrato garante uma proteção térmica à cobertura bastante significativa.

Palavras-chave: cobertura verde; contexto real; aglomerado de cortiça expandida; comportamento térmico; monitorização; simulações.

ABSTRACT

In the last decades, problems such as pollution, soil sealing, urban density, poor quality buildings, energy inefficiency, loss of biodiversity, extreme weather phenomena such as heat waves/dry spells or extreme precipitation phenomena are adversities that mankind is facing and needs to find solutions for.

The evidence of many benefits that green roofs can bring to the urban environment, encourages them to be elected to be part of the environmental strategy of the cities of the future. The retention of rainwater and the delay of flood peaks, thermal insulation, the creation of biodiversity niches, carbon dioxide capture and oxygen production, the improvement of urban landscape and the enhancement of buildings, are part of the set of arguments of the undeniable value of green roofs and that make unquestionable the need to introduce them in cities. The green roofs should be seen as a constructive solution to be applied in new buildings and in refurbishments, if possible.

The thermal behaviour of the green roofs is complex due to the variability of the properties of its components, namely in function of the water content and of the presence of the vegetation (associated to the effects of evapotranspiration and of the shade it creates). In order to be able to estimate with the maximum accuracy that behaviour, it is necessary to develop specific characterisation methods. The present work focuses on the presentation of the monitoring results of a green roof installed in a real context during the rehabilitation of a building. The collection and treatment of the monitoring data are useful to better understand the behaviour of the roofs, but also to be used in the development of theoretical studies, *i.e.*, in the creation of calculation models to simulate the behaviour of green roofs during the design phase. Within the ambit of this dissertation, calculation tools were also applied in order to better discuss and understand the results of the measurements.

The green roof solution used explores the use of expanded insulation corkboard, which simultaneously performs the function of thermal insulation and water retention layer (without compromising drainage capacity). It is concluded that this layer together with the substrate ensures a very significant thermal protection to the roof.

Keywords: green roof; real context; expanded insulation corkboard; thermal behaviour; monitoring; simulations.

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de Figuras	vii
Índice de Quadros.....	viii
Índice de Gráficos.....	ix
Abreviaturas.....	x
Simbologia.....	xi
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Considerações gerais.....	5
2.2 Constituição geral de uma cobertura verde.....	7
2.2.1 Membrana de impermeabilização.....	7
2.2.2 Camada de proteção anti raízes	7
2.2.3 Camada de drenagem.....	8
2.2.4 Camada filtrante	8
2.2.5 Camada de substrato	8
2.2.6 Sistema de irrigação.....	8
2.2.7 Camada de vegetação	9
2.3 Aglomerado de cortiça expandida (ICB)	10
2.4 Tipos de coberturas verdes.....	11
2.4.1 Coberturas verdes extensivas.....	12
2.4.2 Coberturas verdes intensivas	12

2.4.3	Coberturas verdes semi-intensivas	12
2.4.4	Comparação de coberturas verdes	12
2.5	Benefícios de coberturas verdes	14
2.5.1	Benefícios ambientais	14
2.5.2	Benefícios económicos	18
2.6	Obstáculos à implementação das coberturas verdes	20
2.7	Legislação aplicável e incentivos.....	23
2.7.1	Legislação aplicável	23
2.7.2	Incentivos às coberturas verdes	24
3	Materiais e Métodos	28
3.1	Âmbito	28
3.2	Descrição do caso de estudo	28
3.3	Cobertura verde instalada	29
3.4	Sistema de aquisição de dados	31
3.4.1	Temperatura.....	31
3.4.2	Radiação Solar.....	32
3.4.3	Fluxo de Calor	32
3.5	Zonas de monitorização	32
3.6	Simulação.....	35
4	Resultados	38
4.1	Introdução	38
4.2	Monitorização	39
4.2.1	Medições à superfície	39
4.2.2	Medições sob a camada do ICB	40
4.2.3	Medições relativas ao ponto 5	41
4.2.4	Avaliação do impacto da altura do substrato.....	44
4.2.5	Análise dos fluxos de calor.....	46
4.2.6	Estimativa do coeficiente de transmissão térmica.....	48
4.3	Simulação: Regime Permanente	50
4.3.1	Cálculo do coeficiente de transmissão térmica, U.....	50

4.3.2	Análise de sensibilidade	53
4.4	Simulação: Regime Transiente	54
4.4.1	Análise sem radiação solar	54
4.4.2	Análise com radiação solar	55
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	58
5.1	Considerações finais	58
5.2	Propostas de trabalhos futuros	59
	Referências Bibliográficas.....	60
Anexo A	– Estratégias Bioclimáticas, Clima I2/V1. Fonte: (Gonçalves e Graça, 2004)	A-1
Anexo B	– Localização em planta dos pontos de medição (Adaptado do Itecons).....	B-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Componentes de uma cobertura verde (sem escala). Adaptado de: (Agência para a Energia - ADENE et al., 2018).....	7
Figura 2.2 - Camadas transversais típicas de coberturas verdes e a sua classificação (sem escala). Adaptado de (Calheiros e Stefanakis, 2021).	11
Figura 2.3 - Cobertura verde localizado na Praça de Lisboa, Porto, no contexto do edifício e da integração da cidade. Fonte: (Calheiros e Stefanakis, 2021).....	27
Figura 3.1 - Vista superior da cobertura verde. Fonte: (Neoturf, 2018).....	28
Figura 3.2 - Espécies nativas utilizadas na cobertura verde. Fonte: (Landlab, 2019).	30
Figura 3.3 - Composição da cobertura verde estudada (sem escala). Adaptado de: (Itecons, 2018).....	30
Figura 3.4 - Cobertura verde com a representação dos pontos estudados. Adaptado de: (Itecons).	33
Figura 3.5 - Instalação dos termopares em diferentes localizações e instalação de uma estação meteorológica. Fonte: (Itecons).....	34
Figura 4.1 - Perfil da cobertura verde, com a indicação da profundidade dos pontos de medição, representados a verde (sem escala).....	38
Figura 4.2 - Coberturas desenhadas no software <i>Therm</i> , com a descrição dos materiais e das alturas utilizadas (sem escala).	50
Figura 4.3 - Zonas de coberturas (pontos 1, 4 e 5) representadas no software <i>Therm</i> , através da opção de visualização termografia por infravermelhos (sem escala).	52

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Comparação entre as diferentes classificações de coberturas verdes. Adaptado de (Calheiros e Stefanakis, 2021).....	13
Quadro 3.1 - Altura máxima do substrato e relação dos termopares instalados em cada ponto de medição.....	35
Quadro 3.2 - Características e localização dos termofluxímetros.	35
Quadro 3.3 - Propriedades dos materiais que constituem as camadas dos três pontos de estudo. Adaptado do (Itecons, 2018).	36
Quadro 4.1 - Temperaturas dos termopares do ponto 5 para o meio-dia e meia-noite, da cobertura de controlo e temperatura do ar, ao longo da semana de novembro.	43
Quadro 4.2 - Temperaturas dos termopares do ponto 5 para o meio-dia e meia-noite, da cobertura de controlo e temperatura do ar, ao longo da semana de março.....	44
Quadro 4.4 - Valores utilizados para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (1, 2 e 3 de novembro).....	48
Quadro 4.5 - Valores obtidos do cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (1, 2 e 3 de novembro). Adaptado do (Itecons, 2018).....	48
Quadro 4.5 - Valores tabelados e valores medidos em laboratório.	49
Quadro 4.6 - Condições consideradas para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (Ponto 4).	52
Quadro 4.7 - Condições consideradas para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (Ponto 1 e 5).	53
Quadro 4.8 - Condições consideradas para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (Caso 1.1 e 1.2).....	54

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 - Temperaturas dos termopares da superfície do substrato, correspondentes à semana de 1 a 7 de novembro, assim como a temperatura do ar e radiação.	39
Gráfico 4.2 - Temperaturas dos termopares da superfície do substrato, correspondentes à semana de 14 a 20 de março, assim como a temperatura do ar e radiação.....	39
Gráfico 4.3 - Temperaturas dos termopares sob a camada ICB, correspondentes à semana de 1 a 7 de novembro, assim como a respetiva temperatura do ar.	40
Gráfico 4.4 - Temperaturas dos termopares sob a camada ICB, correspondentes à semana de 14 a 20 de março, assim como a respetiva temperatura do ar.	41
Gráfico 4.5 - Temperaturas dos termopares, radiação solar e temperatura do ar, para a semana de 1 a 7 de novembro, no ponto 5.	42
Gráfico 4.6 - Temperaturas dos termopares, radiação solar e temperatura do ar, para a semana de 14 a 20 de março, no ponto 5.....	42
Gráfico 4.7 - Efeito da altura do substrato, na semana de 1 a 7 de novembro.	45
Gráfico 4.8 - Efeito da altura do substrato, na semana de 14 a 20 de março.	45
Gráfico 4.9 - Fluxos de calor, respetivos a 72h (1, 2, 3 de novembro), com a radiação representada.	46
Gráfico 4.10 - Fluxos de calor, respetivos a 72h (14, 15, 16 de março), com a radiação representada.	46
Gráfico 4.11 - Fluxos de calor, respetivos a 72h (1, 2, 3 de novembro), com a temperatura do ar representada.	47
Gráfico 4.12 - Fluxos de calor, respetivos a 72h (14, 15, 16 de março), com a temperatura do ar representada.	47
Gráfico 4.13 - Simulação em regime transiente sem radiação solar ($T_i = 25.^{\circ}\text{C}$), do ponto 5, com recurso ao <i>Bistra</i> . Adaptado do (Itecons).	55
Gráfico 4.14 - Simulação em regime transiente com radiação solar ($T_i = 25.^{\circ}\text{C}$), do ponto 5, com recurso ao <i>Bistra</i> . Adaptado do (Itecons).	56
Gráfico 4.15 - Simulação em regime transiente com radiação solar ($T_i = 22.^{\circ}\text{C}$), do ponto 5, com recurso ao <i>Bistra</i> . Adaptado do (Itecons).	56

ABREVIATURAS

ANCV - Associação Nacional de Coberturas Verdes

AVAC - Sistema de Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado

DPA - Declaração Ambiental de Produto

EPS - Poliestireno Expandido Moldado

FLL - Diretrizes para o Planeamento, Instalação e Manutenção de Coberturas Verdes

ICB - Aglomerado de Cortiça Expandida

ICU - Ilha de Calor Urbana

ITECONS - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade

LAI - Índice de Área Foliar

LECA - Argila Expandida Leve

LIDERA - Liderar pelo Ambiente para a Construção Sustentável

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

PQAP - Projeto Quinto Alçado do Porto

PU - Poliuretano

SI - Sistema Internacional de Unidades

TC - Termopar

TF - Termofluxímetro

MW - Lã de Rocha

XPS – Poliestireno Expandido Extrudido

SIMBOLOGIA

U - Coeficiente de Transmissão Térmica [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]

q_j - Fluxo de Calor [W/m^2]

T_{ij} - Temperatura Ambiente Interior [$^\circ C$]

T_{ej} - Temperatura Ambiente Exterior [$^\circ C$]

λ - Condutibilidade Térmica [$W/(m \cdot ^\circ C)$]

u - Teor em Água [kg/kg]

R_{se} - Resistência Térmica Superficial Exterior [$(m^2 \cdot ^\circ C)/W$]

R_{si} - Resistência Térmica Superficial Interior [$(m^2 \cdot ^\circ C)/W$]

R_j - Resistência Térmica Superficial Condutiva [$(m^2 \cdot ^\circ C)/W$]

e - Espessura [m]

h_{se} - Coeficiente de Condutância Térmica Superficial Exterior [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]

h_{si} - Coeficiente de Condutância Térmica Superficial Interior [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]

ε - Emissividade [-]

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

À medida que o mundo continua a urbanizar-se, o desenvolvimento sustentável depende cada vez mais da gestão bem sucedida do crescimento urbano. De acordo com o relatório das Nações Unidas, até 2050, duas em cada três pessoas deverão estar a viver em cidades ou outros centros urbanos, salientando a necessidade de um planeamento urbano e serviços públicos mais sustentáveis (UNO, 2018). Uma consequência significativa da urbanização é o aumento da percentagem da área de superfície impermeável. Assim sendo pode causar consequências adversas para as infraestruturas das cidades e para o ambiente circundante, uma vez que durante os episódios de chuva nem sempre se tem capacidade plena de escoamento das águas pluviais, sendo frequente situações de cheia. Além disso, a substituição de florestas, prados e terras agrícolas por áreas impermeáveis, tais como edifícios, passeios, ruas e estradas, aumenta significativamente o escoamento superficial de águas pluviais, e conseqüente diminuição da quantidade de águas subterrâneas e intensificação da erosão dos rios (Antrop, 2004). Devido ao aumento do escoamento das águas pluviais e ao aumento da área impermeável, menos água pode ser absorvida pelo solo, e a frequência e a gravidade das cheias nas regiões urbanas aumenta. Além disso, estudos demonstraram que o aquecimento global pode causar ocorrências mais frequentes de precipitação extrema em algumas regiões, o que também contribuirá para o aumento das cheias urbanas (Hashemi et al., 2015).

Os eventos climáticos extremos, sentidos globalmente, aumentaram drasticamente nas últimas duas décadas, impulsionados pelas alterações climáticas e pelo aquecimento global. Em particular, a seca severa e as ondas de calor levaram a múltiplos problemas ambientais, tais como a degradação das condições ambientais exteriores/interiores (temperaturas mais elevadas ou mais baixas durante períodos mais prolongados). Conseqüentemente, verifica-se o aumento do consumo de energia de arrefecimento dos edifícios. Similarmente, as vagas de frio provocam o aumento do consumo de energia para aquecimento.

Uma das estratégias que tem sido apontada para reduzir o risco de cheias e minimizar o efeito das ondas de calor são as infraestruturas verdes, verificando-se um crescimento da sua aplicação em todo o mundo. Assume-se ser uma tecnologia de arrefecimento passivo dos edifícios. Sendo uma categoria com grande importância das infraestruturas verdes, as coberturas verdes, são uma técnica passiva não só para arrefecer os edifícios, mas também para preservar o calor neles, contribuindo respetivamente para a redução do consumo de energia para arrefecimento e aquecimento (Zheng et al., 2022).

As coberturas verdes no mundo são uma tecnologia em expansão. Com a propagação desta tecnologia, surge a necessidade de compreender e prever os efeitos térmicos associados à adição de uma camada de solo e vegetação a um invólucro de construção. A magnitude da redução da temperatura e a consequente redução do fluxo de calor nas estruturas, depende de muitos fatores associados à construção de uma cobertura verde (*e.g.* radiação solar, temperatura do ar, humidade relativa, humidade do solo) e ao clima local (Ayata et al., 2011).

Estas infraestruturas verdes têm potencial para proporcionar um espaço verde apelativo nas zonas do centro da cidade, onde o espaço verde no solo é limitado ou simplesmente inexistente. Em muitos países, o interesse por coberturas verdes está a aumentar. A concepção de coberturas verdes varia entre diferentes localidades e depende da sua finalidade (Czemieli Berndtsson, 2010).

Os espaços verdes urbanos como parques e zonas verdes residenciais podem ajudar a promover a saúde mental e física, proporcionando relaxamento psicológico e alívio do stress. A natureza tem um efeito restaurador no ser humano, ajudando a recuperar a fadiga, a atenção e o stress. O contacto frequente com espaços verdes tem também benefícios significativos para o bem-estar dos seus utilizadores. Em 2020, o vírus SARS-COV-2 espalhou-se por todo o mundo. A maioria dos países fechou empresas não essenciais e recomendou aos residentes que permanecessem em casa. Dentro das restrições de confinamento, os parques públicos e outras áreas recreativas foram fechados para evitar a concentração de pessoas. Os cidadãos foram limitados ao espaço das suas habitações a maior parte do tempo e a necessidade de espaço exterior e aberto no contexto habitacional tornou-se mais necessária do que nunca (Manso et al., 2021).

A contínua e rápida expansão da urbanização representa uma ameaça crescente à biodiversidade. Apesar destas ameaças, tem havido uma tendência crescente nas iniciativas de investigação, destinadas a compreender a melhor forma de conservar e promover a biodiversidade em áreas onde o espaço é limitado (Lepczyk et al., 2017). Os ecossistemas urbanos são refúgios importantes para a formação de novas espécies, por vezes abrigando tanto espécies nativas em vias de extinção (Wallach et al., 2020) como espécies globalmente ameaçadas (Wooster et al., 2022), que se podem introduzir nestes novos ambientes. O sucesso dos espaços verdes como ecossistema urbano na promoção da biodiversidade e na criação de habitat está dependente do seu número, qualidade e conectividade. As coberturas verdes podem servir de habitat a uma variedade de espécies de insetos (Grant, 2002) e de habitat de nidificação para aves marinhas e costeiras (Baumann, 2006). Foram também observadas espécies de plantas, não plantadas inicialmente, a estabelecerem-se em coberturas verdes, provavelmente como resultado da dispersão de sementes trazidas pelas aves e vento (Wooster et al., 2022).

As coberturas verdes são cada vez mais utilizadas na construção de edifícios sustentáveis. Mas para implementar plenamente as coberturas verdes, é importante que:

- as barreiras sejam identificadas e ultrapassadas;
- a normalização seja definida para atribuir responsabilidades;
- as políticas, incentivos e estratégias sejam devidamente estabelecidas;
- as organizações que prestam serviços de apoio orçamental nacional sejam alavancadas;
- a sensibilização e a promoção da divulgação, como investimento na educação, sejam consideradas (Calheiros e Stefanakis, 2021).

Embora as coberturas verdes tenham benefícios claramente identificados, este tema ainda carece de estudos que ajudem a quantificar esses benefícios. As especificidades do clima, das opções construtivas da cobertura e da seleção de componentes e plantas, têm grande relevância no comportamento térmico final e merecem toda a atenção por parte de investigadores e projetistas.

1.2 Objetivos

Como as coberturas verdes constituem um tema muito extenso, um dos primeiros objetivos deste trabalho consistiu na realização duma revisão bibliográfica em que se aprofundou o conceito coberturas verdes, se identificaram os vários tipos de cobertura existentes, suas componentes principais e respetivas funções. Detalharam-se os benefícios deste tipo de solução, bem como algumas das barreiras à sua implementação. Por fim, deram-se exemplos de legislação nacional e internacional assim como de políticas de incentivo.

No entanto, na presente dissertação o objetivo principal foi levar a cabo a avaliação do comportamento térmico de uma cobertura verde em contexto real. Este estudo contempla medições no exterior e um dos objetivos passa por avaliar a evolução de temperaturas e fluxos de calor na cobertura verde em função das condições climatéricas, ao longo do tempo. A instrumentação da cobertura incidiu em cinco pontos com altura de substrato variável.

Este trabalho contemplou ainda criar modelos simples para simular o comportamento térmico da cobertura, utilizando para o efeito programas de cálculo de transferência de calor.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação compreende os seguintes pontos:

- Introdução ao tema e identificação dos objetivos pretendidos com a dissertação;
- Apresentação do estado da arte e os conceitos relativos às coberturas verdes;

- Análise das características do tipo de solução implementada;
- Estudo do desempenho de uma cobertura verde em contexto real, analisando vários parâmetros;
- Simulação do caso de estudo, através de dois softwares de análise do comportamento térmico;
- Considerações finais e sinalizar possíveis trabalhos futuros.

Deste modo, o trabalho foi organizado em um total de cinco capítulos: a Introdução; a Revisão Bibliográfica; os Materiais e Métodos; os Resultados; as Conclusões e Trabalhos Futuros.

No capítulo 1 é feito um enquadramento do tema, e são enunciados os objetivos a que este trabalho pretende responder.

No capítulo 2 são definidos conceitos teóricos fundamentais sobre coberturas verdes. São identificados os vários tipos de cobertura existentes, as suas componentes principais e respetivas funções. Introduzem-se os benefícios deste tipo de solução, bem como algumas das barreiras à sua implementação. Finalmente apresentam-se exemplos de legislação nacional e internacional assim como de políticas de incentivo.

No capítulo 3 é descrito o caso de estudo e analisa-se a cobertura verde instalada. É feita ainda a caracterização do sistema de aquisição de dados e dos parâmetros a obter na monitorização, e uma descrição técnica dos equipamentos e processos utilizados na obtenção de dados. Por fim, são apresentados os dois softwares utilizados na simulação, assim como as propriedades dos materiais consideradas.

O capítulo 4 é dedicado à apresentação dos resultados obtidos na monitorização e na simulação, e faz-se a sua análise.

O capítulo 5 enumera as principais conclusões obtidas ao longo do estudo e possíveis trabalhos futuros com interesse no presente tema e desenvolvimento do mesmo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações gerais

“É designada cobertura verde (ou cobertura ajardinada ou cobertura viva) todo o tipo de instalação de vegetação sobre uma estrutura construída, independentemente do tipo de construção ou do tipo de vegetação. Apenas se excluem as paredes verdes construídas com trepadeiras ou sistemas de jardins verticais. Tipicamente são executadas recorrendo a um sistema com diversos materiais dispostos em camadas, que devem assegurar o bom desenvolvimento da vegetação, respeitando e promovendo a integridade física da estrutura construída” (ANCV, 2020).

O desenvolvimento de uma cobertura verde pode utilizar diversas técnicas de construção tais como: sistema completo, sistema modular ou tapetes pré-cultivados (Kim et al., 2012). O sistema completo engloba toda a cobertura, enquanto os outros dois são plantados antes de serem integrados acima da estrutura da cobertura (Berardi et al., 2014).

A fim de considerar uma cobertura verde como uma tecnologia amiga do ambiente, deve ser dada particular atenção à seleção dos materiais de isolamento, substrato e mesmo vegetação (que não exija por exemplo grandes quantidades de rega). A eficácia e desempenho das coberturas verdes depende da composição e propriedades das camadas: uma combinação adequada pode resultar num melhor desempenho no inverno (Jaffal et al., 2012), enquanto que a escolha apropriada da vegetação pode levar ao aumento do potencial de arrefecimento passivo da cobertura verde no verão (Chen, 2013). A escolha da vegetação pode também afetar a qualidade do escoamento das águas pluviais (Oberndorfer et al., 2007).

Um dos fenómenos físicos mais importantes que ocorrem numa superfície vegetativa é a evapotranspiração. A evapotranspiração desempenha um papel fundamental nos processos da cobertura verde, dissipando parte do fluxo de calor superficial em libertações de calor latente para o ambiente externo (Nagase e Dunnett, 2013). Nesse seguimento, alguns autores defendem que a irrigação melhora o desempenho térmico da cobertura verde, aumentando favoravelmente a eficiência energética do edifício e sendo uma estratégia de arrefecimento mais rentável do que a operação de aparelhos de ar condicionado (Yang et al., 2008). Além disso, as camadas extra (verdes) da cobertura conferem inércia térmica adicional e isolamento à cobertura existente, impedindo que o fluxo de calor seja transferido facilmente para o ambiente interior no verão (Bevilacqua, 2021).

No entanto, os fenómenos físicos envolvidos numa cobertura verde, devido à presença de camadas bióticas e abióticas, não são simples de descrever. Contabilizando simultaneamente a

transferência de calor e massa, variação das propriedades térmicas das camadas com o teor em água (K. Y. Liu e Baskaran, 2005), fotossíntese, não uniformidade da distribuição da vegetação pela superfície da cobertura (Sun et al., 2013), variabilidade sazonal das características das plantas (Molineux et al., 2009) e variação da composição das plantas (Jim e Tsang, 2011). Um aspeto em que vários autores concordam é que a camada de isolamento afeta fortemente o desempenho térmico de uma cobertura verde. Um nível elevado de isolamento térmico da envolvente do edifício, pode mesmo piorar o desempenho do edifício, já que se pode conduzir a um aumento das necessidades de arrefecimento, e por conseguinte do consumo de energia (Emilsson, 2008; Wong et al., 2003). Um nível elevado de isolamento na cobertura (alta resistência térmica) pode limitar o fluxo de calor, determinando um aumento da temperatura da camada superior da cobertura e, conseqüentemente, inibindo a eficácia do fenómeno de arrefecimento passivo (Rowe et al., 2012). Em edifícios não isolados, o impacto das coberturas verdes é muito maior do que nos isolados (Bevilacqua, 2021).

Para as coberturas verdes serem consideradas ambientalmente favoráveis, é necessário seleccionar as componentes mais apropriadas, assim como uma conceção e manutenção adequadas (Vijayaraghavan e Joshi, 2014). Contudo, na prática, os materiais de substrato das coberturas verdes não costumam ser seleccionados com base na sua capacidade de adsorção/absorção ou menor tendência para lixiviação (Rowe, 2011). O lixiviado das coberturas verdes pode conter poluentes e tornar-se uma nova fonte de poluição em áreas urbanas (Chen, 2013). As características ideais para os substratos das coberturas verdes devem ser leves, e possuir elevada capacidade de retenção de água, mas ao mesmo tempo facilitar a drenagem e terem porosidade cheia de ar (Vijayaraghavan e Joshi, 2014). As plantas de coberturas verdes são geralmente seleccionadas com base na sua tolerância à seca e estética (Vijayaraghavan e Joshi, 2014). A sua capacidade de absorção de contaminantes é geralmente ignorada na fase de conceção (W. Liu et al., 2019). Os fatores vitais a julgar quando se constrói uma cobertura verde são o sistema de drenagem, o contacto com o sol e o vento, e os tipos de plantas adequados ao clima, que podem ser escolhidos por um arquiteto paisagista local (Almusaed, 2011).

De acordo com (Berardi et al., 2014), ocorrem diferentes fenómenos nas coberturas verdes:

- O solo funciona como uma massa com elevada capacidade térmica, conferindo-lhe inércia e capacidade de desfasamento térmico temporal e baixa-lhe o coeficiente de transmissão térmica.
- As folhas das plantas comportam-se como um dispositivo de sombreamento sob o qual a convecção do ar se reduz, baixando a taxa de trocas térmicas. Além disso, a folhagem absorve parte da energia térmica para o seu processo de fotossíntese.
- O solo e as camadas vegetativas induzem o arrefecimento por evapotranspiração.

2.2 Constituição geral de uma cobertura verde

A seleção ótima de cada componente de uma cobertura verde é muito importante para obter os melhores resultados desta infraestrutura verde. Cada componente é igualmente relevante e desempenha um papel essencial para o melhor funcionamento da cobertura verde numa determinada área (Shafique et al., 2018). A Figura 2.1 ilustra a constituição comum de uma cobertura verde.



Figura 2.1 - Componentes de uma cobertura verde (sem escala). Adaptado de: (Agência para a Energia - ADENE et al., 2018).

2.2.1 Membrana de impermeabilização

Esta membrana estabelece a separação física entre a camada de proteção anti raiz e os suportes estruturais em baixo. Se uma camada de proteção anti raiz não tiver sido introduzida antes, nas camadas superiores, pode atuar como uma membrana impermeável com características anti raiz (Calheiros e Stefanakis, 2021).

2.2.2 Camada de proteção anti raízes

Esta camada protege contra danos mecânicos, podendo contribuir para a impermeabilização da cobertura verde, geralmente feita de poliuretano (sigla em inglês, PU) e borracha. Em coberturas invertidas, a camada de proteção é comumente em poliestireno expandido extrudado (sigla em inglês, XPS), cumprindo também a função de isolamento térmico (Calheiros e Stefanakis, 2021).

2.2.3 Camada de drenagem

A camada de drenagem tem que assegurar que o excesso de água do substrato seja drenado para que a cobertura não fique alagada. Desta forma, evita-se que o substrato fique saturado, mantendo a humidade estável, e assim contribuindo para manter saudável a microfauna. Esta camada é frequentemente feita de polietileno de alta densidade (PEAD), poliestireno, ou argila expandida leve (acrónimo em inglês, LECA). Tem havido um esforço para trazer ao mercado soluções mais ecológicas, como por exemplo a solução produzida por resíduos de cortiça, ou seja, placas de aglomerado de cortiça expandida (sigla em inglês, ICB). Esta solução tem potencial para substituir o produto de referência de poliolefinas (Almeida et al., 2019; Calheiros e Stefanakis, 2021).

2.2.4 Camada filtrante

Camada filtrante, também conhecida como folha filtrante ou camada de separação, de base geotêxtil, foi concebida para evitar que partículas do substrato sejam transportadas para a camada de drenagem e consequentemente entupidadas (Calheiros e Stefanakis, 2021).

2.2.5 Camada de substrato

O substrato funciona como suporte das plantas e alberga a biodiversidade (microfauna e macrofauna) associada ao sistema de uma cobertura verde. Fornece também água e nutrientes. As características do substrato variam de acordo com o desenho da cobertura verde e as especificações técnicas estabelecidas para um funcionamento eficiente do sistema, nomeadamente no que diz respeito ao armazenamento e drenagem de água, isolamento térmico, e condições adequadas para o desenvolvimento das plantas. Normalmente, um substrato técnico/comercial fornecido por uma entidade certificada é adequado para este fim, sendo feito à medida para aplicação em coberturas verdes, com garantia de desempenho. São misturas especiais de materiais leves, compostas principalmente de componentes minerais, com um conteúdo orgânico adequado, quer a categorias extensivas, quer a categorias intensivas. A utilização de solo normal não é adequada, em geral, devido a problemas relacionados com a compactação, restrições hidráulicas, obstrução da camada filtrante, e presença de propágulos, sementes, ou partes de espécies de ervas daninhas com elevados custos de manutenção (Calheiros e Stefanakis, 2021).

2.2.6 Sistema de irrigação

Esta componente é da maior importância, especialmente quando confrontada com a imprevisibilidade das alterações climáticas e em regiões onde são esperados longos períodos de seca. Um plano de irrigação pode ser delineado, embora a utilização de água deva ser mantida

a um nível mínimo e quando estritamente necessário, tendo em vista uma gestão adequada e eficiente da água. Durante a fase de enraizamento das plantas é normalmente necessária mais água, enquanto que depois a procura de água diminui drasticamente (Calheiros e Stefanakis, 2021).

2.2.7 Camada de vegetação

Esta camada é considerada a primeira camada (superior) da cobertura, colocada sobre um substrato técnico. A escolha das espécies de plantas deve considerar o tipo de cobertura verde planeado, os serviços ambientais que devem ser prestados, as condições climáticas, e os requisitos de irrigação (Calheiros e Stefanakis, 2021).

Diferentes escolhas de plantas em coberturas verdes levam a variações significativas no valor do isolamento térmico. O *sedum*, um dos tipos de plantas mais populares para coberturas verdes, proporciona um elevado sombreamento contra a radiação solar, tem uma estrutura de raiz curta e é compatível com fontes de água limitadas (Emilsson, 2008; Rowe et al., 2012). Contudo, é incapaz de evitar a transferência de calor convectivo sob as suas folhas e, conseqüentemente, tem um baixo valor de resistência térmica (Emilsson, 2008; Rowe et al., 2012). Por outro lado, o azevém [*lolium*] permite uma grande circulação de ar, mas o seu potencial de sombreamento é limitado. Pervinca [*vinca*] garante melhor sombreamento em comparação com os outros, mas por outro lado permite a transferência de calor convectivo (Berardi et al., 2014).

As características mais importantes da vegetação que influenciam a transferência de calor de uma cobertura verde são a altura da planta, índice de área foliar (sigla em inglês, LAI), cobertura fracionária, albedo, e resistência estomacal (Alexandri e Jones, 2007; Sailor, 2008). O LAI descreve a quantidade de área foliar por unidade de superfície terrestre horizontal, é um parâmetro-chave da vegetação para modelar a troca de massa (água e carbono) e energia (radiação e calor) entre a biosfera e a atmosfera. Os valores do LAI dependem do tipo de planta, e estão tipicamente na faixa de 0,5 a 5,0. A cobertura fracionária mede a fração da superfície da cobertura que é diretamente coberta por pelo menos uma folha. Este parâmetro caracteriza as características radiativas do meio dos solos. O albedo é a refletividade da superfície em relação à energia solar incidente sobre a camada vegetal. Finalmente, a resistência estomacal é um parâmetro biofísico que rege a taxa a que a planta transpira humidade (os estomas são as aberturas intercelulares entre as células epidérmicas nas superfícies foliares, e através da abertura e cessamento permitem que ocorra transpiração) (Berardi et al., 2014).

A evapotranspiração é um dos fatores mais importantes que contribuem eficazmente para o potencial de arrefecimento das coberturas verdes. É a combinação de dois fenómenos: a evaporação e a transpiração. O processo físico em que a água é transferida do solo para a atmosfera é chamado evaporação. A transpiração é um processo fisiológico nas plantas, através

do qual a água escapa através das aberturas estomáticas para o ambiente. A evapotranspiração em coberturas verdes depende das características da cobertura, do meio de cultivo e de fatores ambientais (Raji et al., 2015). (Theodosiou, 2003) aborda a importância da velocidade do vento e da humidade relativa para a capacidade de arrefecimento das coberturas verdes. Este autor explica que um ambiente seco aumenta a taxa de evapotranspiração, enquanto que o vento acelera esta tendência ao remover a humidade da vizinhança da vegetação, aumentando assim o efeito de arrefecimento (Raji et al., 2015).

As plantas são a parte mais visível da cobertura verde e, funcionam como um indicador importante do estado operacional do sistema. Além disso, têm um papel importante em relação à promoção da biodiversidade abaixo (sistema de enraizamento) e acima do solo. Estas também proporcionam proteção contra a erosão do substrato e refletem parte da radiação solar (Calheiros e Stefanakis, 2021).

2.3 Aglomerado de cortiça expandida (ICB)

A cortiça é a casca exterior do sobreiro *Quercus suber L.* Esta também pode ser obtida a partir de cascas de outras espécies, como no caso do carvalho turco, *Quercus cerris* (Şen et al., 2014) Este polímero natural tem uma estrutura celular alveolar com um interessante conjunto de propriedades: baixa permeabilidade ao gás e líquido (Lequin et al., 2012), estabilidade química e microbiológica (Pereira, 2007), baixa condutividade (Mano et al., 1995) e notável elasticidade com recuperação dimensional (Anjos et al., 2014). Tendo em conta estas características, a cortiça é utilizada em muitos campos como isolamento (Abenojar et al., 2014). Devido à geometria das células, dispostas numa estrutura alveolar em favo de mel, a cortiça é um material anisotrópico. A composição química da cortiça depende principalmente da origem geográfica, da idade da árvore (virgem ou reprodução), da origem genética e das condições de crescimento. (Lagorce-Tachon et al., 2015)

A extração de cortiça é um processo sustentável porque não danifica a árvore, e após a extração, novas cascas de cortiça voltam a crescer. Dependendo da área de cultivo, o processo de extração de cortiça, ocorre a cada 9-14 anos, até que a árvore tenha aproximadamente 180-200 anos (Pereira e Tomé, 2004). A maior parte da exploração da cortiça está concentrada em Portugal e Espanha, sendo que estes dois países fornecem 80% da cortiça extraída a nível mundial (161.504 toneladas) (Sierra-Pérez et al., 2015). A importância ambiental da cortiça, verifica-se no papel fundamental que ela desempenha em processos ecológicos como a retenção de água, conservação do solo e armazenamento de carbono (Sierra-Pérez et al., 2016).

O ICB é produzido a partir do aglomerado de cortiça expandida, e vendido como placas de isolamento de diferentes espessuras, dependendo da sua aplicação final. É cada vez mais

utilizado na construção de edifícios devido às suas excelentes características de isolamento, que podem ser ainda melhores do que as da cortiça natural (Barreca e Fichera, 2016). Além disso, é um material renovável, feito com resíduos de cortiça ou silvicultura de baixo valor. O fabrico de ICB, é produzido através de grânulos de cortiça, principalmente dos ramos podados do sobreiro, que são expandidos (com suporte de vapor) em autoclaves ($>300^{\circ}\text{C}$) e aglomerados juntos por pressão e temperatura sem qualquer cola exógena (Gil, 2013). Assim, o ICB é um produto totalmente natural, completamente reciclável, e durável. Algumas amostras e testes de placas de cortiça de isolamento utilizadas em edifícios durante 30 e 50 anos mostraram que o seu aspeto e propriedades essenciais não mudaram significativamente com o tempo (Gil, 2013). Com base nas características acima mencionadas e nas diretrizes para produtos sustentáveis (Allione et al., 2012), pode-se assumir que o ICB é uma solução verde e sustentável para o isolamento térmico de edifícios, considerando que não excede a capacidade natural de regeneração do sobreiro. Apesar das vantagens do ICB, o mercado europeu de materiais de isolamento ainda é dominado por materiais fibrosos inorgânicos para isolamento (cerca de 60% do mercado), tais como lã de rocha (sigla em inglês, MW), seguidos pelos materiais espumosos orgânicos (cerca de 30% do mercado), tais como poliestireno expandido moldado (sigla em inglês, EPS), XPS e PU. A restante quota de mercado é composta por outros materiais, incluindo LECA, aglomerados de cortiça, fibras de *kenaf*, juta, algodão, cânhamo, linho, entre outros (Sierra-Pérez et al., 2016; Tártaro et al., 2017).

2.4 Tipos de coberturas verdes

Podem ser classificadas, de acordo com diretrizes padrão (ANCV, 2020), como sendo intensivas, semi-intensivas e extensivas, em função da sua composição estrutural e especificações de manutenção. A Figura 2.2 ilustra os vários tipos de coberturas verdes.

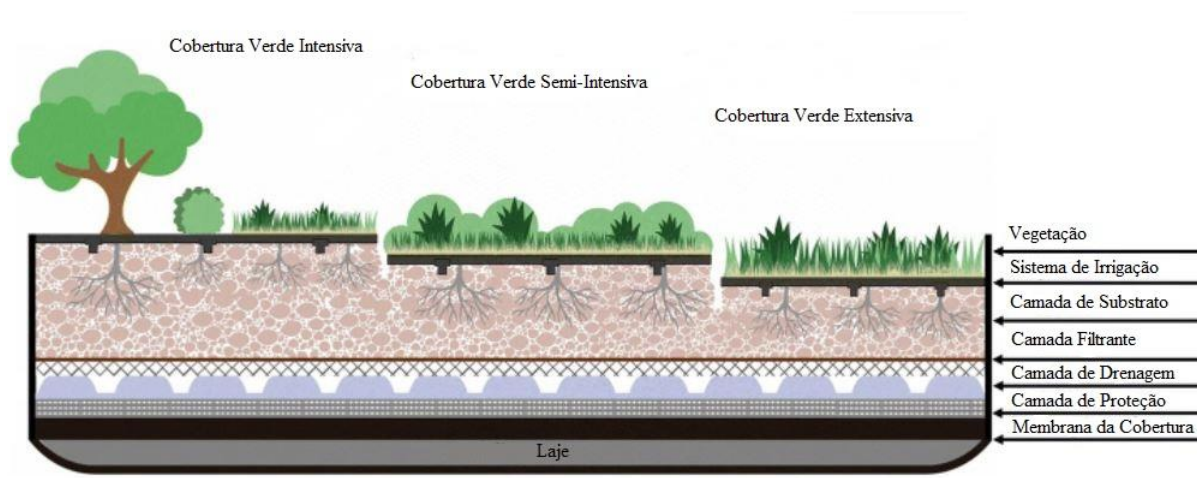


Figura 2.2 - Camadas transversais típicas de coberturas verdes e a sua classificação (sem escala). Adaptado de (Calheiros e Stefanakis, 2021).

2.4.1 Coberturas verdes extensivas

As coberturas verdes extensivas são uma alternativa ecológica à proteção convencional de superfícies. São leves e têm uma altura de construção pouco profunda. As plantas adequadas incluem várias espécies de *sedum*, ervas aromáticas e algumas gramíneas. Após o estabelecimento da vegetação, a manutenção é limitada a uma ou duas inspeções por ano (ZinCo, 2019).

2.4.2 Coberturas verdes intensivas

As coberturas verdes intensivas podem ser mais facilmente comparadas à construção de um jardim sobre um telhado. São normalmente multifuncionais e acessíveis. Requerem mais peso e um sistema de construção mais profundo. A manutenção é regular e depende do desenho da paisagem e do tipo de vegetação escolhido (ZinCo, 2019).

2.4.3 Coberturas verdes semi-intensivas

As coberturas verdes semi-intensivas em termos de necessidades situam-se entre coberturas verdes extensivas e intensivas. Este sistema pode ser utilizado como um espaço exterior funcional, por este motivo, o nome. A necessidade ou não de irrigação depende do clima local e da variedade de plantas que são utilizadas. Os arbustos, ervas e gramíneas podem ser utilizados em coberturas verdes semi-intensivas. A manutenção é ainda bastante trabalhosa porque o conceito da maioria das coberturas verdes semi-intensivas continua a ser um jardim. Este tipo de coberturas verdes requer manutenção suplementar, custos mais elevados e mais peso, em comparação com as coberturas verdes extensivas (Almusaed, 2011).

2.4.4 Comparação de coberturas verdes

Os três tipos de coberturas variam entre o tipo de vegetação, altura da camada de substrato, peso, acessibilidade e manutenção. O Quadro 2.1 compara estas características entre cada tipo de cobertura.

Quadro 2.1 - Comparação entre as diferentes classificações de coberturas verdes. Adaptado de (Calheiros e Stefanakis, 2021).

Critérios	Tipos de Coberturas Verdes		
	Cobertura verde intensiva	Cobertura verde semi-intensiva	Cobertura verde extensiva
Manutenção	Intensa	Moderada	Reduzida
Irrigação	Regular	Periódica	Pontual
Camada de substrato	>25 cm	15 – 25 cm	8 – 15 cm
Vegetação	Gramíneas, suculentas, herbáceas, arbustos e árvores.	Gramíneas, suculentas, herbáceas e arbustos (apenas de pequena dimensão).	Musgos, gramíneas e suculentas (apenas algumas).
Peso do sistema	>350 kg/m ² (3,43 kN/m ²)	150 – 350 kg/m ² (1,47 – 3,43 kN/m ²)	80 – 180 kg/m ² (0,59 – 1,77 kN/m ²)
Acessibilidade	De modo geral, sem limitações	Espaço limitado	Não pisar, a menos que seja para manutenção

Outros tipos de cobertura verde são também amplamente aplicados, tais como a cobertura bio solar, cuja principal vantagem é fornecer energia renovável através de painéis fotovoltaicos, em combinação com os outros benefícios proporcionados pelos painéis e pelo ecossistema gerado subsequentemente. A vegetação permite benefícios de desempenho adicionais para os painéis (Chemisana e Lamnatou, 2014). As coberturas azul-verde são outra variação, em que a vegetação de uma estrutura de cobertura é combinada com elementos de gestão de águas pluviais, a fim de promover o aumento, tanto do volume de água armazenada, como da quantidade de água libertada (Andenæs et al., 2018). As coberturas de biodiversidade são concebidas para abrigar uma maior biodiversidade, em termos de fauna e flora, do que as categorias convencionais de coberturas verdes. Compreendem diferentes espessuras de substrato e podem ter elementos estruturais para fornecer habitat e abrigo a diferentes espécies (Calheiros e Stefanakis, 2021).

2.5 Benefícios de coberturas verdes

2.5.1 Benefícios ambientais

- Gestão de águas pluviais, filtragem e melhoria da qualidade das águas

As plantas e os sistemas de drenagem são considerações importantes na conceção de uma cobertura verde para a gestão de águas pluviais. No ambiente urbano, a cobertura verde representa uma solução sustentável para reduzir os volumes de água pluviais conduzidos para os sistemas de esgotos. É comum dizer-se que a cobertura verde tem um efeito de esponja. A crescente urbanização gera o aumento de superfícies impermeáveis, de edifícios, estradas e parques de estacionamento. Este processo produz uma mudança no ciclo hidrológico natural com a consequência de um aumento do volume de escoamento superficial sobre a bacia hidrográfica. O maior volume de escoamento esgota os sistemas urbanos que não conseguem, responder para além da capacidade de projeto e causa o risco de inundação. O escoamento superficial urbano também ameaça a qualidade da água ao lavar poluentes das estradas, parques de estacionamento, e telhados para os cursos de água locais (Carbone et al., 2014).

As coberturas verdes absorvem e retêm a água da chuva e podem ser utilizadas para gerir o escoamento das águas pluviais em ambientes urbanos. O substrato e a vegetação desempenham um papel crítico na influência da qualidade dos escoamentos da cobertura verde através da absorção e filtragem de poluentes (W. Liu et al., 2019; Vijayaraghavan et al., 2019). A vegetação pode acumular partículas e pó transportados pelo ar, assim eliminando-os da precipitação. Além do mais, o material do substrato pode atuar como um filtro de troca iónica para poluentes, nutrientes e metais presentes nas águas da chuva.

O escoamento de águas pluviais pode ser reduzido ou retardado, porque este é retido parcialmente no substrato, e posteriormente armazenado na folhagem, caules e raízes de plantas, assim como vai ser evaporado diretamente do substrato. A retenção adicional de água em sistemas de cobertura verde pode ser conseguida através da incorporação de uma camada de armazenamento de água na base do substrato (designada comumente por tela de drenagem). Vários fatores, incluindo a profundidade e as propriedades do substrato, tipo de tela de drenagem utilizada e inclinação do telhado, influenciam a medida em que uma cobertura verde pode reduzir o volume do escoamento de água para o sistema de águas pluviais (DEPI, 2014).

- Criação e preservação de habitats e biodiversidade

As coberturas verdes podem contribuir para aumentar a biodiversidade, fornecendo novos habitats urbanos de diversas espécies de plantas ou animais. Estas coberturas podem também fornecer uma interligação de habitats, e assim ajudar na migração de invertebrados e aves.

Quanto maior for a diversidade das espécies, maior será a produtividade dos ecossistemas dos quais dependemos. A conceção em prol da biodiversidade requer uma consideração precoce no desenvolvimento de projetos, no que diz respeito a espécies vegetais, fontes alimentares, características de habitat, pontos de acesso e alturas de construção. O tipo de vegetação utilizada é o fator mais importante na capacidade de uma cobertura verde para incentivar a biodiversidade. O cultivo em profundidade, a variação da altura e espaçamento das plantas também afetam a biodiversidade. As coberturas verdes, particularmente as intensivas, podem ser concebidas para integrar múltiplos habitats e microclimas, proporcionando assim, condições apropriadas para uma variedade de plantas e animais prosperarem. Podem também ser concebidos para imitar os habitats nativos locais, alargando a área disponível para as espécies nativas colonizarem (DEPI, 2014; GSA (General Services Administration), 2011).

- Mitigação do efeito de ilha de calor urbano e regulação da temperatura

Superfícies duras em ambientes urbanos, tais como betão, tijolo, vidro, asfalto e telhados, têm uma elevada massa térmica, recolhendo o calor do sol durante o dia e voltando a irradiá-lo, durante a noite, lentamente para a atmosfera. Isto contribui para um aumento da temperatura ambiente nas cidades, criando grandes massas estáveis de ar quente, alteram o microclima urbano e acentuam o efeito de "ilha de calor urbano" (ICU) (DEPI, 2014). Este efeito tem inúmeros impactos no consumo de energia dos edifícios, no conforto e saúde dos cidadãos e, na qualidade do ar urbano. O fenómeno tem origem na alteração do espetro radiativo e do balanço energético, em que o calor libertado pelas actividades antropogénicas é um forte contribuinte para o efeito ICU. De facto, a libertação de poluentes e calor antropogénico ocorre principalmente através da refrigeração e aquecimento dos edifícios e é responsável por um aumento da temperatura do ar urbano entre 0,2 e 2,5 °C. Neste contexto, a avaliação do isolamento de edifícios permite: (i) mitigar o efeito ICU (através da diminuição da libertação de calor e dos poluentes inerentes à utilização de sistemas de climatização) e os seus efeitos nocivos; (ii) economias monetárias subsequentes, e (iii) reduzir as emissões de gases de efeito de estufa à escala global (Stella e Personne, 2021).

Conforme já foi referido, as temperaturas podem ser reduzidas cobrindo uma cobertura ou uma parede com uma camada de vegetação. Desta forma, sombreiam-se os materiais de construção, reduzindo o seu potencial de absorção de calor. A evapotranspiração proporciona efeitos de arrefecimento, uma vez que, este fenómeno de libertação de água, ocorre através do solo, raízes, folhas e plantas. A energia do sol, que de outra forma aqueceria as superfícies da cobertura e/ou das paredes e aumentaria a temperatura do ar ambiente é, em vez disso, utilizada no processo de evapotranspiração, resultando em perda de calor latente baixando a temperatura do ar circundante. Uma estratégia coletiva de implementação de coberturas, muros e fachadas verdes, à escala da cidade, teria a capacidade de mitigar algumas das consequências negativas da ICU.

Tendo sempre em consideração, a fauna mais adequada para a região a acionar, bem como, a altura de substrato conveniente para os edifícios abrangidos. Desta forma, o arrefecimento urbano seria maximizado, melhorando a estabilidade da dinâmica ecológica e qualidade de vida dos habitantes. (DEPI, 2014).

- Melhoria da qualidade do ar e descarbonização da construção

As coberturas, paredes e fachadas verdes podem contribuir para a remoção de poluentes atmosféricos, como dióxido de carbono, monóxido de carbono, compostos orgânicos, partículas e diminuir a formação de *smog*, embora a sua eficácia varie com as espécies vegetais e a área vegetativa de cobertura e respetiva LAI. As plantas com uma alta densidade de folhagem ou com superfícies foliares texturizadas que fixam pequenas partículas, também ajudam a remover a poluição por partículas, através da deposição seca na folhagem ou através da lavagem com chuva e posterior filtragem no substrato. Em maior escala, estas infraestruturas verdes podem ajudar a reduzir o ganho global de calor ambiental (radiação de calor de materiais de construção com elevada massa térmica). Por sua vez, melhorando a qualidade do ar à medida que menos poluentes fotoquímicos são produzidos (temperaturas do ar mais baixas). Em ambientes interiores, foi provado que as plantas têm uma capacidade significativa de reduzir compostos orgânicos voláteis do ar (DEPI, 2014; GSA (General Services Administration), 2011). As plantas interiores reduzem os compostos orgânicos voláteis por absorção do ar através das suas folhas e depois transportam os compostos orgânicos voláteis para a sua zona radicular, onde os micróbios os decompõem. Os micróbios no solo podem utilizar poluentes como fonte alimentar.

Relativamente ao armazenamento de carbono, parte do carbono fixado pelos sobreiros é transferido para produtos de cortiça. Posto isto, sugere-se a utilização de produtos de cortiça, pois possuem o potencial de contribuir na mitigação das alterações climáticas. Registe-se que se considera o ICB um material com uma grande durabilidade, mantendo as características técnicas (testes oficiais comprovam a preservação do material e suas características principais por períodos de 30 a 50 anos) (Gil, 2013; Sierra-Pérez et al., 2016).

- Isolamento acústico e diminuição da intensidade do ruído

As coberturas verdes são cada vez mais utilizadas na construção de edifícios sustentáveis. Têm o potencial de melhorar os ambientes acústicos dentro e fora dos edifícios devido às características benéficas de isolamento sonoro a sons aéreos e de absorção sonora. A atenuação do ruído é fundamental para assegurar a nossa saúde e bem-estar. Através da absorção sonora, as coberturas verdes têm o potencial de reduzir a intensidade de ruído e conseqüentemente a poluição sonora em áreas urbanas (M. R. Connelly et al., 2011).

Os materiais de coberturas verdes com absorção sonora, colocados sobre membranas da cobertura, tipicamente leves e acusticamente refletoras, modificarão significativamente a propagação do som, uma vez que, a energia é principalmente dissipada pela vegetação e pelo substrato (Van Renterghem e Botteldooren, 2008). As condições-limite das camadas de material, desempenharão um papel no comportamento acústico, dependendo da profundidade do substrato e do tipo e densidade da vegetação (M. Connelly e Hodgson, 2015).

- Agricultura urbana e criação de comunidade

Em comparação com as plantas no rés do chão, as plantas cultivadas em coberturas estão menos sujeitas a danos causados por insetos, roedores e mamíferos de médio/grande porte. O cultivo de alimentos em coberturas pode contribuir para a geração de empregos. As agriculturas urbanas têm potencial para aumentar o valor da propriedade e a viabilidade comercial da construção. Esta agricultura proporciona um acesso mais fácil a produtos frescos, e uma forma de educar a comunidade local sobre a produção de alimentos e variedade sazonal. A agricultura urbana é capaz inclusive de reduzir as emissões de carbono associados à distribuição de alimentos, visto que existiria mais oferta local (GSA (General Services Administration), 2011).

- Melhoria do desempenho térmico

As coberturas verdes são reconhecidas como uma forma eficiente de poupança de energia no sector da construção (Saadatian et al., 2013). Devido ao sombreamento da vegetação, ao arrefecimento evaporativo e, ao isolamento adicional, as coberturas verdes ajudam a reduzir diretamente o consumo de energia, mas também indiretamente através da mitigação da ICU. No entanto, o desempenho térmico das coberturas verdes é altamente variável de acordo com as características do substrato e da vegetação, características dos edifícios, e condições climáticas locais (Stella e Personne, 2021). As coberturas verdes tornam as coberturas mais eficientes em termos energéticos, reduzindo as temperaturas do ar no verão, diretamente acima de um edifício, uma vez que, uma temperatura do ar ambiente mais fresco pode diminuir a energia de consumo, relacionado com o arrefecimento de edifícios. Dependendo do clima, as coberturas verdes podem reduzir os picos de temperatura e as exigências de energia para o arrefecimento no verão. No inverno, os isolamentos em simultâneo com o substrato e vegetação permitem reduzir a perda de calor através da cobertura verde, comparativamente com as coberturas convencionais. As coberturas verdes podem, portanto, reduzir também, a procura de aquecimento de edifícios no inverno (GSA (General Services Administration), 2011).

- Prevenção de fenómenos extremos

O aquecimento global está a provocar muitas variações dos padrões meteorológicos em todas as regiões do planeta, incluindo o aumento das chuvas, o potencial de secas, a maior ocorrência de eventos climáticos extremos, o aumento e a diminuição de temperaturas, o aumento do nível do mar e de inundações entre outros. Uma das soluções para mitigar este problema passa por planejar edifícios, cidades e infraestruturas verdes que se possam conectar e adaptar às projeções futuras das alterações climáticas, incluindo as condições em que os edifícios são construídos.

- Proteção dos edifícios e longevidade da cobertura

As coberturas verdes podem prolongar a vida útil, comparativamente a uma superfície de cobertura tradicional. Protegem as coberturas, criam uma proteção à radiação solar e adicionam materiais isolantes (vegetação, substrato e outras camadas) para reduzir as severas flutuações de temperatura na superfície da cobertura (DEPI, 2014). Permitem, por exemplo, assegurar uma maior longevidade das telas de impermeabilização.

- Aumento da qualidade de vida, valor estético e terapia hortícola

As coberturas verdes servem para proporcionar maior conforto térmico e reduzir a temperatura da superfície da cobertura. O sombreamento direto das superfícies e o arrefecimento do ar ambiente são dois fenómenos importantes que proporcionam maior conforto térmico. Este benefício térmico é o resultado do ganho de calor solar para a transpiração e a fotossíntese (Saadatian et al., 2013).

As coberturas verdes intensivas em particular podem oferecer um local de refúgio e relaxamento para as pessoas que trabalham num edifício, assim reduzir o stress e aumentar a produtividade dos trabalhadores (GSA (General Services Administration), 2011).

A terapia hortícola tem mostrado ser uma estratégia que contribui para a melhoria da saúde das populações envelhecidas. As taxas de recuperação de pacientes hospitalares são mais rápidas na presença de ambientes mais naturais (Sempergreen, 2021).

2.5.2 Benefícios económicos

- Redução do consumo de energia

Um benefício significativo das coberturas verdes é o potencial para reduzir o consumo de energia de aquecimento e arrefecimento. As coberturas verdes reduzem a transferência de calor

e automaticamente os custos de operação dos sistemas de aquecimento e arrefecimento (AVAC) (DEPI, 2014).

- Aumento do isolamento térmico nas reabilitações

A estratégia da cobertura verde não é apenas uma solução para novos projectos construídos, mas também é sugerida como uma solução lucrativa e viável para projectos de reabilitação. A duração de vida das coberturas verdes estimada é entre os 40 e 55 anos, o que é um fator importante do ponto de vista económico (Saadatian et al., 2013). Conforme referido anteriormente, as coberturas verdes asseguram um prolongamento da vida útil dos sistemas de impermeabilização.

- Melhoria do desempenho dos painéis fotovoltaicos

As coberturas verdes proporcionam uma temperatura ambiente inferior na sua vizinhança, resultando em vários benefícios nos painéis solares (*e.g.* melhoria da eficiência) (ZinCo, 2019).

- Proteção contra incêndios

As coberturas verdes podem fornecer uma barreira à propagação do fogo entre edifícios. O próprio sistema de rega pode servir como sistema de combate em caso de incêndio. No entanto, para coberturas compostas por vegetação com potencial combustível, recomenda-se o uso regular de barreira corta-fogo com materiais não combustíveis ao redor do perímetro da cobertura (Peck et al., 1999). Além desse tipo de solução construtiva, também podem ser utilizadas suculentas, que, devido ao seu alto teor de água, podem retardar a propagação do fogo (Neoturf, 2017). Esta contribuição pode ser maior se, o sistema de irrigação da cobertura (se houver), poder comunicar com alarmes de incêndio.

- Valorização imobiliária

Os proprietários e promotores imobiliários estão cada vez mais a instalar coberturas, paredes ou fachadas verdes para acrescentar valor às frações e obter retornos financeiros superiores (DEPI, 2014).

- Responsabilidade ambiental dos edifícios

A certificação ambiental é muito importante, nomeadamente a otimização energética, na área da construção. A minimização do impacto negativo sobre o ambiente é uma prioridade neste setor. Nesse sentido, existem várias certificações que são capazes de identificar o

comportamento ambiental das edificações e pressionar os responsáveis a optarem por decisões mais sustentáveis.

- Espaços de lazer/recreação

A habitabilidade das cidades está cada vez mais dependente da disponibilidade e do acesso a espaços verdes. Converter ou conceber áreas normalmente não utilizadas em coberturas verdes, particularmente para uso recreativo ou desportivo, não só faz uso de espaço dispendioso, como poupa os custos de aquisição de terrenos adicionais.

- Geração de emprego e desenvolvimento económico

A tecnologia das infraestruturas verdes, oferece oportunidades para futuros empregados desenvolverem competências comercializáveis, nas áreas de paisagismo e manutenção de coberturas verdes. As coberturas verdes oferecem oportunidades de emprego tanto para trabalhadores qualificados como não qualificados. Estas infraestruturas podem proporcionar a geração de empregos através da produção, instalação e manutenção. As coberturas verdes têm potencial para propiciar benefícios de investimento aos promotores desta tecnologia e aos proprietários de edifícios, pela já referida valorização comercial. Alguns indícios sugerem que, preços de compra e vendas mais rápidas e, alta procura de alojamento podem resultar da presença de uma cobertura verde (DEPI, 2014; GSA (General Services Administration), 2011). Ter em consideração as condições ambientais internas e externas é essencial para criar edificações saudáveis e nas quais as pessoas estejam motivadas para trabalhar.

2.6 Obstáculos à implementação das coberturas verdes

Os custos iniciais e os custos relacionados com a manutenção são indicados como as principais barreiras para a instalação de coberturas verdes (Mahdiyari et al., 2016). Em primeiro lugar, o fator de impedimento é o custo da cobertura verde. É frequentemente considerado que as coberturas verdes são investimentos significativos, apesar de poderem ter um período de retorno curto (Bianchini e Hewage, 2012). Naturalmente que o custo de instalação é variável, em função do tipo de cobertura, localização e acessibilidades, mão-de-obra e equipamento (Vijayaraghavan, 2016).

A manutenção de coberturas verdes é outra barreira importante que desincentiva os proprietários de edifícios e a investigação sobre este aspeto é ainda muito limitada. Verifica-se frequentemente que os promotores dão garantias irrealistas para esta tecnologia, indicando por exemplo que as coberturas verdes não necessitam de irrigação, não precisam de fertilização, e não têm problemas de crescimento de ervas daninhas, entre outros. Na realidade, algumas das coberturas verdes necessitam de irrigação constante, pelo menos durante a estação de verão, e

fertilização ocasional. Esta adição de fertilizantes ao substrato que, por sua vez, promove o crescimento de ervas daninhas e, por conseguinte, requer um controlo de manutenção regular (Vijayaraghavan, 2016). A disponibilidade de água influencia a humidade do solo e a saúde da vegetação, o que tem impacto nas propriedades refrigerantes ou isolantes da cobertura. Dependendo das espécies vegetais, da profundidade do solo e das propriedades de retenção de água, uma cobertura verde pode requerer manutenção e irrigação adicional (William et al., 2016).

Os componentes modernos de coberturas verdes são geralmente fabricados a partir de materiais poliméricos, com a exceção do meio de crescimento e da vegetação. A substituição dos componentes tradicionais por materiais modernos mais duráveis, deve-se à necessidade de ultrapassar problemáticas relacionadas com a limitação de peso e as condições extremas a que as coberturas verdes estão sujeitas. Segundo (Bianchini e Hewage, 2012), as camadas de drenagem e filtragem das coberturas verdes são fabricadas com 40% de polipropileno reciclado enquanto, que a camada de retenção de água utiliza fibras poliméricas 100% recicladas. Todavia, o processo de produção de polímeros está associado a poluição atmosférica. Como tal, o ciclo de vida da cobertura verde deve ser analisado, para que seja possível conferir o potencial compensador a longo-prazo, isto é, o contributo do projeto para a sustentabilidade ambiental durante o período de vida útil do mesmo. (Vijayaraghavan, 2016).

Nos últimos anos, as infraestruturas verdes têm-se afirmado, estimulando o interesse de investigadores e decisores em compreender o desempenho e benefícios destas soluções. Em (Teotónio et al., 2021), encontra-se uma revisão sistemática da literatura publicada, dedicada a infraestruturas verdes. Neste estudo foram analisados 79 artigos que, por sua vez, avaliaram 184 "*nature-based solutions*" e, que foram categorizadas em coberturas verdes, paredes verdes e outras soluções. Foi demonstrado, um aumento exponencial de publicações científicas, maioritariamente, a partir de 2015. A origem destes estudos, vai ao encontro da taxa real de implementação destas soluções nestes países, apresentados seguidamente, por ordem de quantidade de estudos realizados: Estado Unidos da América (123), Europa (84), seguida pela Turquia e Chipre, China, Malásia e Singapura, Caraíbas, Austrália, Coreia, Tailândia, e por último o Brasil com apenas 2 estudos de caso. Apesar da Alemanha ser um líder de mercado de coberturas verdes, este país apenas relatou um estudo dedicado a esta matéria. O atual envolvimento científico nesta área, reflete um expectável crescimento da mesma, acompanhado do aumento do número de projetos de implementação a nível global.

Qualquer cobertura tem o potencial de fuga. Os danos na camada de barreira radicular podem ser causados, por exemplo, pelas raízes de plantas de maiores dimensões que penetram na membrana de impermeabilização, e comprometem a sua estanquidade. Isto pode resultar em danos nos edifícios, causados pela água proveniente da cobertura. No entanto, a ideia de que a

instalação de coberturas verdes aumenta as hipóteses de fugas é incorreta. De facto, vários autores provaram que a cobertura verde melhora a vida útil da cobertura ao proteger a membrana à prova de radiação ultravioleta, amplitudes térmicas, assim como de danos mecânicos (Vijayaraghavan, 2016).

As coberturas verdes possuem uma carga considerável, resultante principalmente do peso do substrato, dependendo naturalmente do tipo e espessuras utilizadas. Porém, existem um conjunto de cargas variáveis – acesso de pessoas, neve, retenção (prevista) de água da chuva, solicitações sísmicas - que devem ser contabilizadas, aquando da avaliação da estabilidade do sistema. Dependendo do tipo de cobertura verde, são necessárias diferentes quantidades de solo, e/ou sistemas de irrigação e drenagem. Quando se incluem árvores, as cargas estáticas podem tornar-se uma questão importante, e os custos de instalação e manutenção serão mais elevados (Brudermann e Sangkakool, 2017). Embora se conheçam poucos relatos de colapsos de edifícios, uma avaliação cuidadosa da capacidade estrutural por peritos e a seleção de componentes adequados, previne danos estruturais. Considerando a viabilidade e volume de componentes necessários para construir coberturas verdes, a eliminação final de coberturas verdes gera sérias preocupações no que diz respeito à necessidade de mão de obra especializada, custo e implicações ambientais (Vijayaraghavan, 2016).

Sobretudo nas cidades europeias, parece haver grandes dificuldades quanto à possibilidade de combinar arquitetura antiga e a adoção destas soluções. As estratégias de planeamento dos centros urbanos, por vezes não permitem a modificação arquitetónica dos imóveis situados em áreas com património histórico qualificado, impossibilitando a implementação de infraestruturas verdes. Embora várias cidades apoiem ativamente o desenvolvimento e integração de soluções construtivas ecológicas, pode observar-se uma clara falta de apoio político em muitas outras cidades. Isto é especialmente verdade no que diz respeito ao financiamento. Nos países da Europa Central, o foco tem sido o subsídio para a instalação de módulos solares fotovoltaicos para telhados. Tem sido dada pouca atenção ao subsídio de coberturas verdes, ou à integração de coberturas verdes com tecnologias de energias renováveis. Este cenário demonstra, um evidente estado de concorrência do setor de infraestruturas verdes, com os restantes possíveis usos das coberturas de edifícios, nomeadamente o setor energético. A sinergia entre coberturas verdes e produção energética solar, deve ser considerada, de forma a garantir a rentabilidade e benefícios máximos de utilização de área das coberturas (Brudermann e Sangkakool, 2017).

2.7 Legislação aplicável e incentivos

2.7.1 Legislação aplicável

A maior parte da investigação inicial sobre coberturas verdes na Europa teve lugar na Alemanha, Suíça e Escandinávia. A partir desta vasta experiência, foram redigidas orientações baseadas na investigação académica, desenvolvimento de produtos/componentes, e observações de campo. Estas diretrizes, são conhecidas por FLL, abreviatura para *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau*. Os membros da FLL começaram a desenvolver as Diretrizes em 1975, foram publicadas em alemão em 1982 e em inglês em 2002. As diretrizes FLL baseiam-se na investigação alemã sobre coberturas verdes, sendo as mais respeitadas sobre o assunto. Formalmente, são conhecidas como Diretrizes para o Planeamento, Instalação e Manutenção de Coberturas Verdes, e são utilizadas para a conceção, especificação, manutenção e testes de coberturas verdes (Dvorak e Volder, 2010).

Devido ao uso (ainda) reduzido de coberturas verdes em Portugal, a sua construção e utilização ainda não estão abrangidas por lei. No entanto, o governo português está focado na melhoria da eficiência energética, através da Estratégia Nacional de Energia 2020, presente na Resolução do Conselho de Ministros n.º 29 de 2010, a qual tem previsto propostas de medidas para aumentar a aposta em edifícios sustentáveis com intenção de melhorar o conforto térmico das habitações.

A Associação Nacional de Coberturas Verdes (ANCV), com o intuito de suprimir a escassez de guias técnicos adaptados ao clima português, criou o primeiro documento orientador português adequado à implementação de coberturas verdes em Portugal. Este guia foi lançado no início de 2020, apoiado pela Ordem dos Engenheiros, estando atualmente a ser adotado na vertente de engenharia, arquitetura e gabinetes municipais. Foi criado com base nas FLL e no documento espanhol de orientações para coberturas verdes (ANCV, 2020) e contou com o envolvimento de vários peritos nacionais.

A Associação Nacional de Coberturas Verdes, existente desde 2015, é uma organização sem fins lucrativos, que visa promover infraestruturas verdes nas cidades. Um dos principais focos são as infraestruturas que podem ser instaladas em edifícios (novos ou pré-existentes), assim como a fomentação e criação de territórios urbanos saudáveis, sustentáveis, bio diversificados e resilientes (*Portugal | EFB, 2022*). Esta associação desenvolve um conjunto de ações de consciencialização, como por exemplo: promoção de coberturas verdes, junto ao Governo e Municípios, como parte integrante das estratégias ambientais e energéticas; promoção e divulgação de estudos científicos que demonstrem os diversos serviços e benefícios que as coberturas verdes proporcionam; estabelecimento de relações e desenvolvimento de trabalho com associações semelhantes a nível europeu, com especial enfoque naquelas que partilham as

condições climáticas típicas mediterrânicas; criação de uma base de dados global de incentivos às coberturas verdes; organização e promoção de eventos de formação e divulgação; edições de especificações técnicas que promovem bons projetos e boas obras; divulgação de estudos, normas e guias técnicos nacionais e internacionais; participação na conceção e revisão da regulamentação e legislação nacional do setor.

Os hábitos e práticas atuais de construção e a falta de informação quantitativa sobre o desempenho ambiental justificam a baixa quota de mercado. Para preencher esta lacuna, a União Europeia está a promover a utilização de esquemas comuns para a rotulagem ecológica de materiais de construção, incluindo a Declaração Ambiental de Produto (DPA) entre outras possibilidades. Algumas das empresas envolvidas na produção de materiais para coberturas verdes já desenvolveram e publicaram DPA's, como forma de comunicar com os consumidores e mostrar o desempenho ambiental dos seus produtos (Tártaro et al., 2017).

2.7.2 Incentivos às coberturas verdes

Estratégias e políticas que incentivem a implementação de coberturas verdes devem ser adotadas para facilitar a rápida expansão desse mercado. Geralmente, estas são colocadas em prática por meio de:

- a) incentivos financeiros diretos,
- b) reduções de impostos sobre a gestão de águas pluviais,
- c) estratégias relacionadas com a proteção do meio ambiente,
- d) medidas regulatórias para planeamento/ordenamento urbano e construção de edifícios.

A Alemanha está a apoiar a construção de 13,5 milhões de m² de coberturas verdes por ano. Por exemplo, em Esslingen, 50% do custo das coberturas verdes é reembolsado, enquanto em Darmstadt, os utilizadores podem receber um máximo de 5000 euros por uma cobertura verde. Nas cidades de Bona, Colónia e Mannheim, as taxas de águas pluviais atribuídas são consideravelmente reduzidas para os cidadãos que possuam coberturas verdes (Berardi et al., 2014).

Em Portugal, os incentivos às coberturas verdes surgiram a nível municipal. O concelho do Barreiro foi a primeira cidade da Península Ibérica a apoiar a implementação de coberturas verdes graças à aprovação da integração de incentivos no atual Regulamento Municipal de Concessão de Incentivos ao Investimento (Câmara Municipal de Barreiro, 2019). Apesar da evolução positiva na última década, Portugal continua a ser um dos países em que o número de indivíduos que declaram não ter capacidade financeira para manter a sua casa adequadamente aquecida é maior: 18,9% da população em 2019, quando a média dos países da União Europeia é de 7%. (Living Architecture Monitor, 2021). As soluções baseadas na natureza resultam em

vários benefícios ambientais, económicos e sociais que podem ajudar na transição para a sustentabilidade urbana.

Atualmente vários municípios, não só na Europa, mas em todo o mundo, estão a desenvolver políticas para encorajar a implementação de soluções baseadas na natureza e infraestruturas verdes no contexto urbano, incluindo incentivos à instalação de coberturas verdes.

A estratégia da União Europeia para a biodiversidade 2030, como parte do Acordo Verde Europeu, visa evitar a perda de biodiversidade e de serviços ambientais no meio urbano através da integração de infraestruturas verdes. Em Portugal, foi lançado um novo incentivo monetário para promover o investimento privado em soluções baseadas na natureza, como coberturas verdes e paredes verdes, de forma a minimizar o impacto da crise económica resultante da pandemia da COVID-19 (Manso et al., 2021). Em 2020, o governo português divulgou o Fundo Ambiental, que promove a requalificação dos edifícios, para que estes sejam mais eficientes em termos energéticos:

- Para habitações anteriores a 2006, pode ser utilizado o programa de apoio do Fundo Ambiental "Edifícios mais sustentáveis" para melhorar a eficiência energética das habitações.
- Este incentivo público promove uma quota de 70% até ao valor de 3.000 euros para edifícios que incluem a incorporação de coberturas ou fachadas verdes.
- A instalação destas coberturas verdes deve seguir as diretrizes do guia técnico de conceção, construção e manutenção de coberturas verdes, da ANCV.
- O programa visa financiar medidas que promovam a reabilitação, descarbonização, eficiência energética e eficiência hídrica em edifícios residenciais existentes.

O Programa de Apoio a Edifícios Mais Sustentáveis, reativado em junho de 2021 com uma 2ª fase de candidaturas, foi reforçado em 15 milhões de euros (passando para uma dotação global de 75 milhões de euros). Este programa teve como objetivo o financiamento de medidas que promovam a reabilitação, a descarbonização, a eficiência energética, a eficiência hídrica e a economia circular, contribuindo para a melhoria do desempenho energético e ambiental dos edifícios (*Despacho n.º 2798/2022 | DRE, 2022*).

O Programa de Apoio a Edifícios Mais Sustentáveis, insere-se na tipologia 6, versão 4 (Fachadas e coberturas verdes e soluções de arquitetura bioclimática): “São elegíveis no âmbito desta tipologia soluções de arquitetura bioclimática que envolvam a instalação ou adaptação de elementos fixos no edifício, designadamente sombreamentos, estufas e coberturas ou fachadas verdes, privilegiando soluções de base natural. Para este efeito consideram-se elegíveis intervenções que envolvam a aplicação de um ou mais dos conceitos de arquitetura

bioclimática, descritos e justificados em memória descritiva (com o respetivo mapa de trabalhos), designadamente instalação ou adaptação de elementos fixos no edifício, como, por exemplo, palas para sombreamento de vãos envidraçados, espaços estufa e coberturas ou fachadas verdes e incluir a percentagem de redução estimada de consumo de energia primária do imóvel proporcionada pela solução instalada. Neste sentido sugere-se a elaboração de um estudo de comportamento térmico por forma a suportar o percentual indicado” (Fundo Ambiental, 2021).

Para além deste programa de incentivos importa realçar a importância que as coberturas verdes podem ter em sistemas de certificação ambiental. O sistema voluntário português denominado LIDERA, acrónimo de Liderar pelo Ambiente para a Construção Sustentável, valoriza a conceção de soluções sustentáveis e certifica construções que tenham um desempenho ambiental comprovado. O sistema destina-se a: (1) apoiar o desenvolvimento de programas e projetos que procurem a sustentabilidade, (2) avaliar e posicionar o seu desempenho nas fases de conceção, construção e operação em busca da sustentabilidade, (3) apoiar a gestão das fases de construção e operação, (4) verificado por meio de avaliação independente, concedido certificação por meio de marcas registradas e (5) servir como instrumento de mercado distintivo para empresas e clientes que valorizam o desenvolvimento sustentável (*LiderA4all / Sustentabilidade / Lisboa*, 2019).

O Projeto Quinto Alçado do Porto (PQAP), da responsabilidade do Eng.º Paulo Palha (que já foi Presidente da Associação Nacional de Coberturas Verdes), é um projeto entre a ANCV e a Câmara Municipal do Porto. O seu objetivo foi definir a melhor forma de incluir as coberturas verdes na estratégia ambiental e urbana da cidade do Porto. PQAP representa um passo importante na história do movimento das coberturas verdes em Portugal, pois é a primeira vez que uma Câmara Municipal manifesta a sua vontade de incluir as coberturas verdes nos documentos de planeamento urbano da cidade (Living Architecture Monitor, 2021). Um exemplo de uma cobertura verde que se tornou numa referência, nesta área científica, é a cobertura verde situada na Praça de Lisboa, Porto. Esta cobertura está ilustrada na Figura 2.3.



Figura 2.3 - Cobertura verde localizado na Praça de Lisboa, Porto, no contexto do edifício e da integração da cidade. Fonte: (Calheiros e Stefanakis, 2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Âmbito

Este trabalho consiste principalmente na realização de uma campanha de monitorização de uma cobertura verde instalada em contexto real. Adicionalmente levaram-se a cabo alguns cálculos com objetivo de melhor compreender os dados recolhidos.

Deste modo, no presente capítulo descrever-se-á o caso de estudo, em particular a constituição da cobertura verde e as suas características principais. De seguida, apresenta-se o sistema de monitorização, pontos de medição e localização de sensores. Na parte final descrevem-se os métodos de simulação utilizados.

3.2 Descrição do caso de estudo

A cobertura verde encontra-se localizada na Maia, Porto. A vista superior da cobertura está representada na Figura 3.1. Tendo em conta as condições climáticas do local e a sua interação com o clima, foram definidas estratégias de adaptação do edifício ao clima e uma das opções foi instalar a cobertura verde. Trata-se de um edifício de uso comercial.

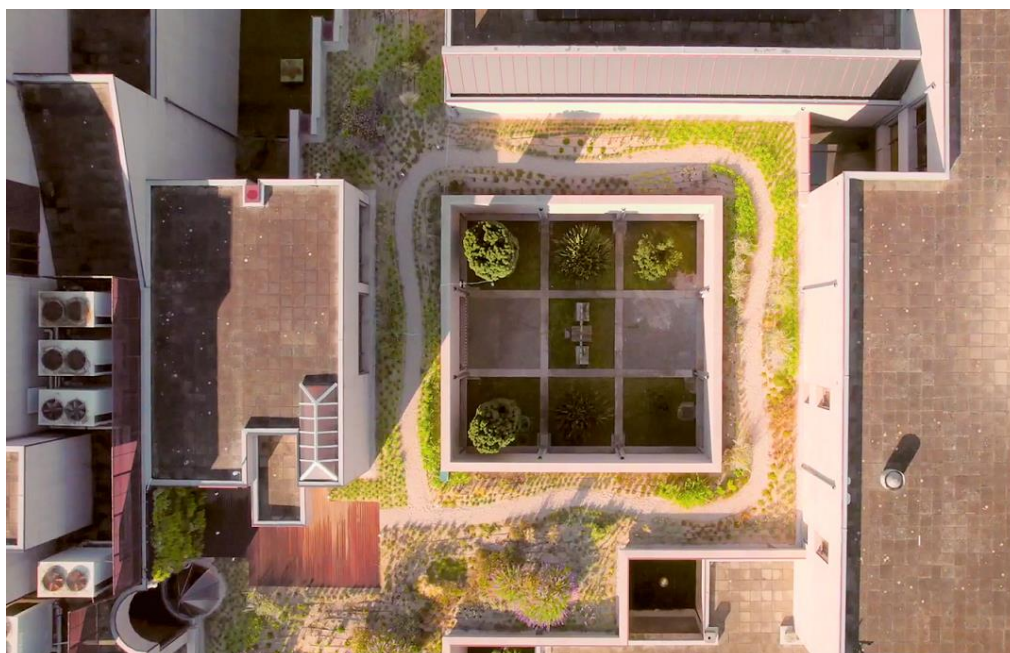


Figura 3.1 - Vista superior da cobertura verde. Fonte: (Neoturf, 2018).

A zona climática, de acordo com as definidas no regulamento relativo ao desempenho energético de edifícios (*Decreto-Lei n.º 101-D/2020 / DRE, 2020*) é apresentada abaixo, assim como são descritas as estratégias bioclimáticas aplicáveis a esta zona, de acordo com (Gonçalves e Graça, 2004):

- “Zona I2/V1, Litoral Norte e Centro: A influência marítima ameniza o verão, sendo o inverno mais exigente que o verão, o que deverá motivar uma maior capacidade do edifício para captar os ganhos solares. Os graus dias de aquecimento variam entre 2090 (Penalva do Castelo) e 1530 (Cadaval). No verão, devido à preponderância da influência estabilizadora marítima, verificam-se junto à costa menores amplitudes térmicas diárias relativamente a regiões interiores de maior influência continental.
- Estratégias Bioclimáticas: Inverno – restringir as perdas de calor por condução; promover os ganhos solares. Verão – restringir os ganhos de calor por condução; restringir ganhos solares; promover ventilação. Deverá haver especial cuidado na promoção dos ganhos solares a sul (inverno), porém sem esquecer a proteção dos envidraçados de modo a restringir ganhos solares de verão.”

O quadro que é composto pelas estratégias bioclimáticas aplicáveis a esta zona encontra-se no Anexo A.

Segundo a Classificação climática de *Köppen-Geiger*, o clima que representa o caso de estudo é o "clima mediterrânico de verão fresco" (classificado como Csb). Neste sistema climático a primeira letra indica o grupo climático (neste caso temperado). Climas temperados ou zonas "C" têm temperaturas médias acima de 0°C (ou -3°C), mas abaixo de 18°C nos meses mais frios. A segunda letra indica o padrão de precipitação ("s", que representa verão seco). *Köppen* define um verão seco como um mês com menos de 30 mm de precipitação e menos de um terço da precipitação do mês de inverno mais húmido. A terceira letra indica o grau de calor no verão: "b" representa a temperatura média do mês mais quente abaixo de 22°C.

3.3 Cobertura verde instalada

O conceito escolhido para esta cobertura verde consiste na modelação do terreno e na composição da vegetação. A modelação do terreno foi concretizada com a variação gradual da altura do substrato, tendo havido a preocupação de respeitar as cotas de soleira. A vegetação utilizada caracteriza-se por ser essencialmente autóctones e espécies particularmente eficazes na promoção da biodiversidade, de baixa manutenção e com necessidades hídricas reduzidas. Foram plantadas espécies nativas altamente adaptadas ao clima da região, tais como: *Thymus serpyllum*, *Verbena bonariensis* e *Corynephorus canescens*. Estas espécies estão ilustradas na

Figura 3.2. As duas principais camadas de vegetação variam entre as espécies mais rasteiras, com cerca de 20 cm, e as espécies intermédias, com cerca de 1 m de altura.



Figura 3.2 - Espécies nativas utilizadas na cobertura verde. Fonte: (Landlab, 2019).

A cobertura verde instalada é inovadora na medida em que aplicou a solução desenvolvida no projeto *Green Urban Living* (Amorim Cork Insulation, 2018; Itecons, 2018; Neoturf, 2018). Trata-se de um sistema multifuncional baseado na utilização de aglomerado de cortiça expandida, que cumpre em simultâneo a função de isolamento térmico e de capacidade de retenção, sem comprometer a necessária capacidade de drenagem. Este sistema apresenta uma performance ambiental e energética superior ao das soluções convencionais, uma elevada capacidade de personalização arquitetónica com recurso a maquinação com controlo numérico computadorizado, assegurando as já referidas capacidade de drenagem e retenção autónoma de água. O modelo da cobertura verde estudada está representado na Figura 3.3.



Figura 3.3 - Composição da cobertura verde estudada (sem escala). Adaptado de (Itecons, 2018).

A selecção de um material sustentável deve ter em conta parâmetros como a durabilidade, o facto de que deve provir de uma produção que use poucos recursos, apresente custos razoáveis, garanta valor económico acrescido no mercado, não possua contaminantes, consuma pouca energia na fase de produção, tenha valor cultural ou importância na economia local, seja reciclável e, se puder, incorporar material reciclado. Esta selecção é feita a fim de visar projetos que reduzam os impactos ambientais e aumentem os benefícios sociais dentro dos limites da viabilidade económica. Não existe um único material isolante ou solução capaz de cumprir

todos os requisitos no que diz respeito às propriedades mais relevantes, como a condutividade térmica, facilidade de aplicação, resistência mecânica, protecção contra risco de incêndio, robustez, durabilidade ao envelhecimento climático, resistência aos ciclos de gelo/degelo, resistência à água, custos e impacto ambiental (Jelle, 2011).

O aglomerado de cortiça expandida (ICB) é um material que reúne as características resumidas acima e que é promissor para integrar os sistemas de cobertura verde. Responde à preocupação descrita por (Gil, 2013), que enfatiza a importância de se escolherem materiais que garantam um impacto ambiental reduzido e que satisfaçam também as exigências durante a fase de uso e que garantam a reciclabilidade no fim de vida.

3.4 Sistema de aquisição de dados

As variáveis climáticas existentes no local são de extrema importância para entender o comportamento térmico do edifício, e as necessidades de climatização de modo a assegurar as condições de conforto térmico. O conhecimento da temperatura do ar exterior ao longo do ano, a sua amplitude térmica e a radiação solar são extremamente importantes para se compreenderem os fluxos energéticos: perdas e ganhos térmicos.

O sistema de aquisição instalado foi concebido para medir em simultâneo temperaturas e fluxos de calor em vários pontos, assim como monitorizar radiação solar, precipitação, velocidade do ar, entre outros parâmetros.

O programa utilizado para monitorizar os vários parâmetros relativos à cobertura verde, foi produzido pelo Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade (Itecons). Este permite ao utilizador obter leituras em tempo real de cada sonda e seleccionar o intervalo de dados a serem guardados. As leituras foram registadas pelo sistema de aquisição de dados a cada 15 minutos. Assim, nos subcapítulos seguintes serão apresentados os parâmetros analisados neste estudo.

3.4.1 Temperatura

Em termos de temperatura optou-se por instalar sondas para recolher dados do ambiente, da superfície e em profundidade. As temperaturas de ambiente foram obtidas recorrendo a uma estação meteorológica instalada no local. Os valores de temperatura na superfície e em profundidade foram adquiridos através de sensores de temperatura simples, denominados termopares. Estes dispositivos são resistentes e com uma vasta utilização em diversos procedimentos de medição de temperatura. Um termopar é formado por dois metais distintos unidos numa das extremidades. Havendo uma diferença de temperatura entre a extremidade unida e as extremidades livres, ocorre uma diferença potencial. Com um voltímetro, pode ser

medida essa diferença. Dependendo do tipo de termopares, existem curvas distintas de diferença potencial em relação à temperatura. Ao longo do estudo, a unidade utilizada para medir a temperatura foi graus celsius [°C].

3.4.2 Radiação Solar

A radiação solar está a ser obtida na estação meteorológica instalada no local através de um piranómetro. Os dados foram coletados em watts por metro quadrado [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$].

3.4.3 Fluxo de Calor

A instalação dos sensores para determinar o fluxo de calor na cobertura verde, foi feita em profundidade, mais concretamente na interface entre o substrato e a camada do ICB, e na cobertura convencional sob a lajeta, embebido no isolamento térmico. Os termofluxímetros são transdutores que emitem sinais elétricos, proporcionalmente aos fluxos de calor impostos à sua superfície. O fluxo de calor é uma medida da taxa de transferência de calor através de um material por unidade de área, ou seja, medido em [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$]. Um baixo fluxo de calor significa que menos calor se propaga através de uma determinada camada. O fluxo de calor varia com o gradiente de temperaturas, os materiais que compõem a solução construtiva, respetivas espessuras e condutividades térmicas.

3.5 Zonas de monitorização

Foram considerados cinco pontos de medição, sendo quatro deles na cobertura verde e um na cobertura de acesso, conforme representado na Figura 3.4. Em cada ponto de medição da cobertura verde utilizaram-se três termopares. Nos pontos 1 e 5 foram instalados termofluxímetros sob a camada de ICB. No ponto 4, que se encontra na cobertura de acesso, foi apenas instalado um termopar e um termofluxímetro.



Figura 3.4 - Cobertura verde com a representação dos pontos estudados. Adaptado de (Itecons).

Os termopares da cobertura verde foram instalados respeitando a seguinte configuração, um sob a camada de ICB (Figura 3.5 I), o segundo a meia altura do substrato, com recurso a um tubo para que cada termopar fique à altura requerida (Figura 3.5 II), e o terceiro na superfície do substrato (Figura 3.5 III). Nos pontos 1 e 5 foram instalados termofluxímetros sob a camada ICB, como está ilustrado na (Figura 3.5 IV). No ponto 4, que se situa na cobertura de acesso, foi instalado um termofluxímetro e um termopar sob a lajeta, embebido no isolamento térmico (Figura 3.5 V). Foi instalada uma estação meteorológica na cobertura, num dos pontos mais altos (Figura 3.5 VI), capaz de medir radiação solar, pressão atmosférica, pressão de vapor, velocidade e direção do vento, velocidade da rajada de vento, trovões, precipitação, humidade relativa e temperatura (temperatura da sonda da humidade relativa). A estação meteorológica utilizada foi a ATMOS 41, da empresa *Meter Group*. Esta estação contém todos os sensores capazes de registar as variáveis meteorológicas referidas atrás. Os dados meteorológicos são transmitidos através de um único fio. Este dispositivo utiliza assim, apenas uma porta do registador de dados para medições meteorológicas. O DT85 foi o registador de dados usado.

Este registador de dados é caracterizado por ser robusto, autónomo e de baixo consumo de energia, suporta memória USB, resolução de 18 bits, amplos recursos de comunicação e um display embutido. O conceito de canal duplo do DataTaker DT85 permite o uso de até 32 entradas analógicas isoladas ou 48 entradas analógicas de uso geral referenciadas em várias combinações. Os modelos DataTaker podem incluir portas Ethernet, modems para acesso remoto e alertas SMS, WiFi, entre outros, para configuração e visualização/download de dados.

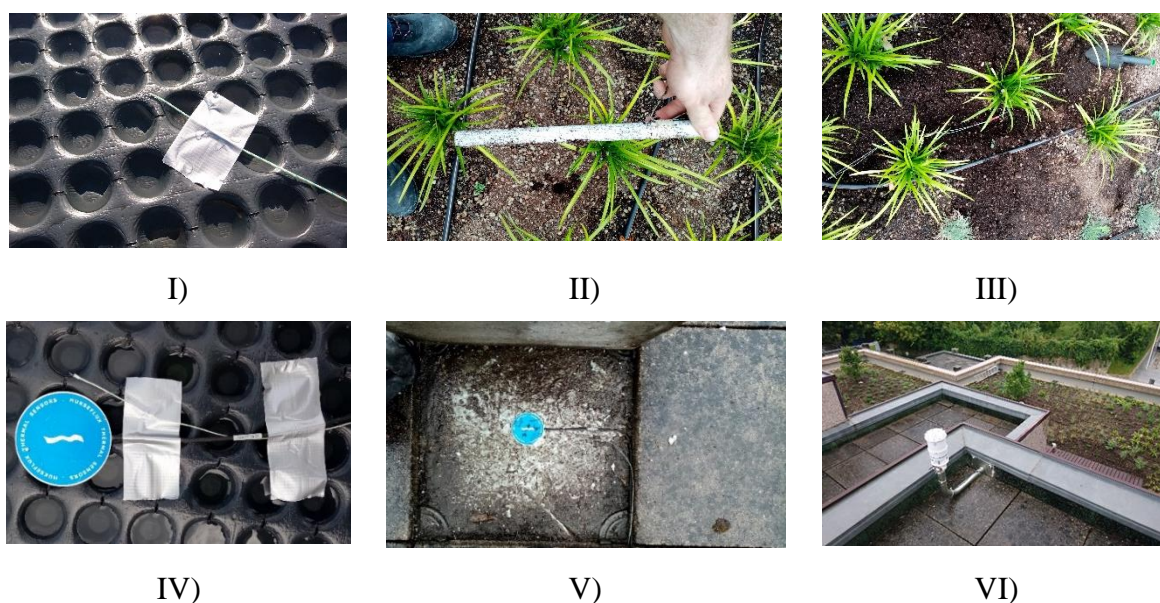


Figura 3.5 - Instalação dos termopares em diferentes localizações e instalação de uma estação meteorológica.
Fonte: (Itecons).

Os termopares aplicados foram do Tipo K (Cromel/Alumel). Este tipo de termopares, de uso genérico, possuem um baixo custo. Estes dispositivos têm uma sensibilidade de aproximadamente $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

A relação das referências dos termopares com a sua localização e posição vertical encontra-se no seguinte quadro:

Quadro 3.1 - Altura máxima do substrato e relação dos termopares instalados em cada ponto de medição.

Posição vertical	Pontos (Altura máxima de substrato [m])				
	1 (0.3)	2 (0.45)	3 (0.15)	4	5 (0.45)
Sob a camada de ICB	TC1	TC4	TC3		TC6
Meia altura do substrato	TC14	TC17	TC10		TC11
Superfície do substrato	TC13	TC16	TC15		TC12
Embebido no isolamento				TC20	

O HFP03, da *Hukseflux*, foi o tipo de termofluxímetro aplicado possui alta sensibilidade, capaz de medir fluxos de calor no substrato ou em qualquer elemento construtivo. A resistência térmica geral é reduzida ao mínimo, devido à utilização de corpos feitos de cerâmica e plásticos compostos. Este aparelho mede o fluxo de calor em $[W/m^2]$ através do objeto, no qual é montado. O sensor no HFP03 é um sensor passivo, não necessitando de energia. O fluxo de calor em $[W/m^2]$ é calculado dividindo os dados de saída do HFP03 (em voltagem) pela sensibilidade. As características dos termofluxímetros utilizados apresentam-se no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 - Características e localização dos termofluxímetros.

Termofluxímetros	Pontos	Características
TF ₁	Ponto 1	58.4 $\mu V/Wm^{-2}$
TF ₂	Ponto 5	62.81 $\mu V/Wm^{-2}$
TF ₃	Ponto 4	62.25 $\mu V/Wm^{-2}$

3.6 Simulação

De forma a simular os fluxos de calor nas componentes de edifício estudados, utilizou-se primeiro um software capaz de calcular transferência bidimensional de calor, em regime permanente. A análise inclui a transferência de calor por condução, convecção e radiação, baseada no método dos elementos finitos. Esta ferramenta de cálculo é designada por *Therm* e foi concebida pelo *Lawrence Berkeley National Laboratory*. Neste software foram desenhadas as zonas de cobertura que contêm termofluxímetros (pontos 1, 4 e 5). Estudou-se as zonas de cobertura (três pontos) em regime permanente, com recurso ao software *Therm*, e com a finalidade de melhor compreender o comportamento térmico da cobertura verde.

Posteriormente foram utilizados os softwares da *Physibel*, o *Bisco* como alternativa ao *Therm* na análise em regime permanente e, o *Bistra* para uma análise realizada em regime transiente. Considerou-se o mesmo ponto de medição (ponto 5) das simulações em regime permanente, para efeitos de obtenção das temperaturas. Utilizou-se o software *Bisco* para validar os resultados obtidos na ferramenta de cálculo *Therm*, e de seguida procedeu-se para a simulação no software *Bistra*. Para melhor entendimento do impacto da radiação solar, nas zonas de cobertura verde, fez-se a distinção entre a análise sem radiação solar e a análise com radiação solar.

As simulações foram efetuadas considerando as seguintes propriedades térmicas dos materiais (Quadro 3.3).

Quadro 3.3 - Propriedades dos materiais que constituem as camadas dos três pontos de estudo. Adaptado do (Itecons, 2018).

Tipos de Camadas	Condutibilidades Térmicas (λ)
Reboco	1,3 W/(m.°C)
Laje	2 W/(m.°C)
Betonilha	0,8 W/(m.°C)
XPS	0,034 W/(m.°C)
ICB _{seco}	0,0417 W/(m.°C)
ICB _{saturado}	0,0646 W/(m.°C)
ICB _{húmido}	0,051 W/(m.°C)
Substrato _{seco}	0,0594 W/(m.°C)
Substrato _{saturado}	0,242 W/(m.°C)
Substrato _{húmido}	0,134 W/(m.°C)

As propriedades dos substratos e do aglomerado de cortiça expandida foram obtidas com base nos resultados do projeto *Green Urban Living* (Itecons, 2018). Este projeto partilhou as propriedades para diferentes teores em água, u , podendo as condutibilidades térmicas, λ [W/m.°C], serem determinadas utilizando as seguintes expressões:

Substrato selecionado:

$$\lambda(u) = 0,0917u + 0,0594 \text{ [W/m. } ^\circ\text{C]} \quad (1)$$

ICB de média densidade:

$$\lambda (u) = 0,0429u + 0,0417[W/m.^\circ C] \quad (2)$$

Teores em água no substrato e no ICB para a condição de saturado:

$$u_{subs} = 1,987 \text{ kg/kg}$$

$$u_{ICB} = 0,533 \text{ kg/kg}$$

Para o estado seco da camada de substrato e da camada de ICB, considerou-se que os teores em água eram nulos e assim através das fórmulas (1) (2) obteve-se os valores das condutibilidades térmicas indicados no Quadro 3.3. Na condição de saturado utilizou-se os teores em água no substrato e no ICB descritos anteriormente, e calculou-se as respetivas condutibilidades térmicas. No estado húmido considerou-se os valores médios da sonda de humidade (41%), para o período estabelecido, e através da fórmula mencionada previamente, foi possível calcular os teores em água no substrato e no ICB e posteriormente as condutibilidades térmicas.

4 RESULTADOS

4.1 Introdução

Após a análise dos dados relativos à cobertura verde recolhidos com recurso ao programa de monitorização do Itecons, optou-se pela seleção de duas semanas de meses diferentes, de forma a facilitar a visualização do comportamento do sistema. Por essa razão e por motivos de comparação, analisou-se uma semana (1 a 7) no mês de novembro de 2021 e uma semana (14 a 20) no mês de março de 2022. Na Figura 4.1 encontra-se ilustrado o perfil da cobertura verde assim como a relação dos termopares instalados em cada ponto de medição. Esta figura tornar-se-á importante ao longo da análise dos resultados, pois ajudará a demonstrar qual é o impacto de diferentes alturas de substrato, assim como diferentes localizações.

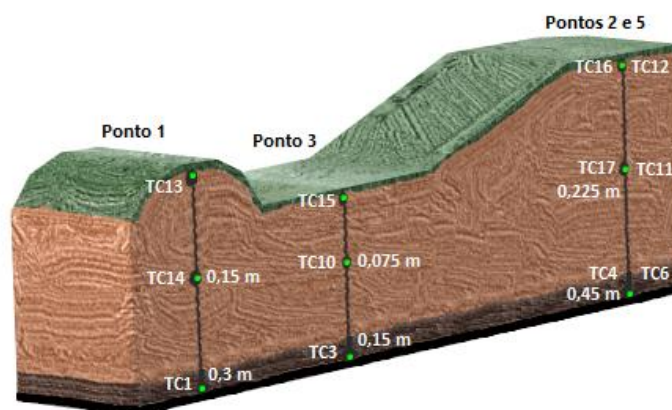


Figura 4.1 - Perfil da cobertura verde, com a indicação da profundidade dos pontos de medição, representados a verde (sem escala).

Começou-se por analisarem as temperaturas, na superfície do substrato, na cobertura de controlo, em simultâneo com a radiação e temperatura do ar. Iniciou-se por estes gráficos, para compreender a diferença de comportamento nos diferentes pontos da cobertura verde e convencional. De seguida, analisou-se a influência do substrato na proteção térmica da camada de isolamento, através das medições de temperaturas sob a camada do ICB. Posteriormente efetuou-se uma análise isolada de um ponto, com intenção de estudar o impacto da profundidade do substrato, através da análise dos vários termopares distribuídos verticalmente nesse ponto. Também se observou a implicação das diferentes localizações e posições dos termopares, no comportamento térmico, porém, com a mesma altura de substrato. Depois, analisaram-se os fluxos de calor, de diferentes pontos de medição. Finalmente, estimaram-se os coeficientes de transmissão térmica, das diferentes zonas de cobertura.

4.2 Monitorização

4.2.1 Medições à superfície

Nos gráficos (Gráfico 4.1 e Gráfico 4.2) apresentam-se os valores obtidos pelos termopares que se encontram à superfície da cobertura verde (TC₁₆, TC₁₂, TC₁₅ e TC₁₃), na semana de novembro (1 a 7) e na semana de março (14 a 20). Para melhor compreender os resultados da monitorização analisaram-se também os dados de temperatura do ponto 4 (TC₂₀), assim como os parâmetros de radiação solar e a temperatura do ar.

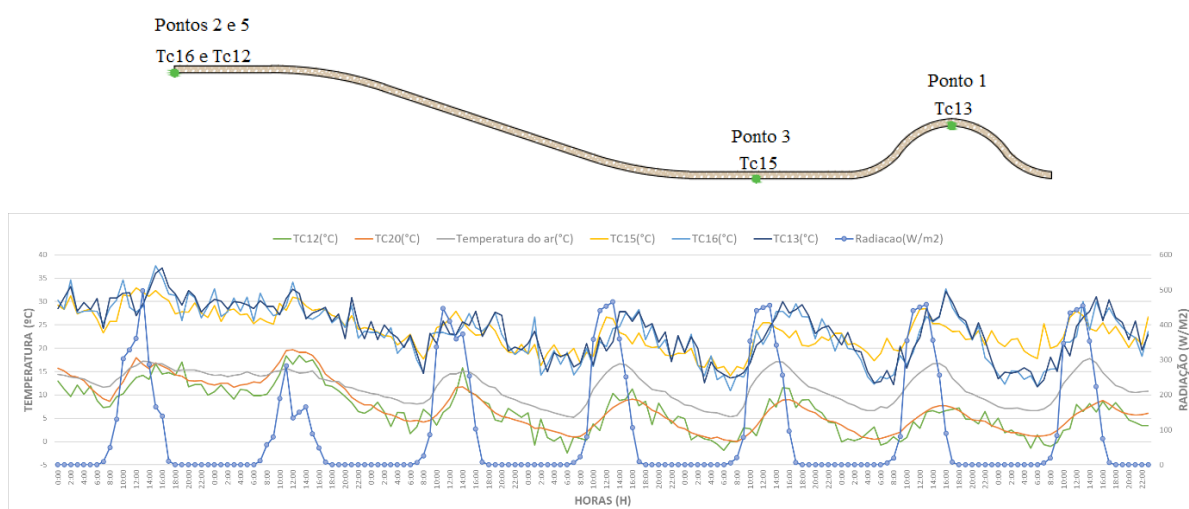


Gráfico 4.1 - Temperaturas dos termopares da superfície do substrato, correspondentes à semana de 1 a 7 de novembro, assim como a temperatura do ar e radiação.

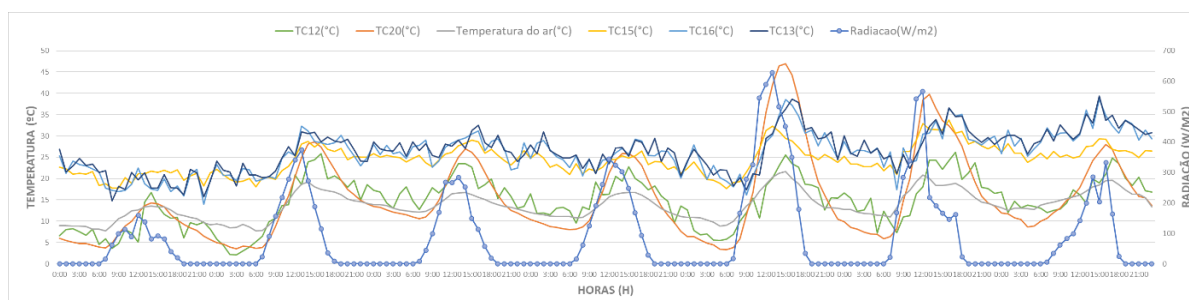


Gráfico 4.2 - Temperaturas dos termopares da superfície do substrato, correspondentes à semana de 14 a 20 de março, assim como a temperatura do ar e radiação.

Em ambos os gráficos as temperaturas mais altas foram registadas nos pontos 1, 2 e 3 (TC₁₃, TC₁₆ e TC₁₅), zonas da cobertura verde mais exposta. Estes pontos apresentam temperaturas superiores à temperatura do ar, revelando o impacto de se ter o substrato exposto à radiação (zonas de medição ainda com plantas pouco densas). O ponto 5 (TC₁₂) e a cobertura convencional, ponto 4 (TC₂₀), apresentam temperaturas mais baixas do que o ambiente, o primeiro por estar numa zona sombreada, o outro pelo facto do termopar estar sob a lajeta. Na semana de março, o ponto 5 (TC₁₂) já apresenta valores um pouco superiores à temperatura do ar. Os valores superiores de radiação solar nessa semana, resultam numa maior acumulação de calor por parte desse ponto. No Gráfico 4.2 destaca-se uma variação sinusoidal das temperaturas no ponto 4 (TC₂₀), demonstrando muita sensibilidade à variação da radiação solar. Ainda nesta semana, este ponto apresenta grandes amplitudes. No dia 18 de março, pode-se observar o pico da radiação solar (628,25 W/m²) às 13:00 horas, que conduziu a uma temperatura máxima de 47°C na cobertura de referência, mas que ocorreu duas horas mais tarde, às 15:00 horas devido ao atraso térmico associado ao aquecimento gradual das lajetas. Este ponto 4 (TC₂₀), da cobertura de controlo, é o mais influenciado pela radiação.

4.2.2 Medições sob a camada do ICB

Posteriormente, analisaram-se os dados obtidos pelos termopares sob a camada ICB (TC₄, TC₆, TC₃ e TC₁), na semana (1 a 7) de de novembro e na semana (14 a 20) de março. De forma a facilitar a interpretação dos resultados, apresentam-se também os valores de temperatura na cobertura de controlo (TC₂₀) e a temperatura do ar. Através destes gráficos (Gráfico 4.3 e Gráfico 4.4) é possível fazer uma comparação do comportamento térmico entre as duas coberturas, a cobertura verde e a cobertura de controlo, assim como avaliar o impacto do substrato e da camada ICB na proteção térmica da laje de suporte.

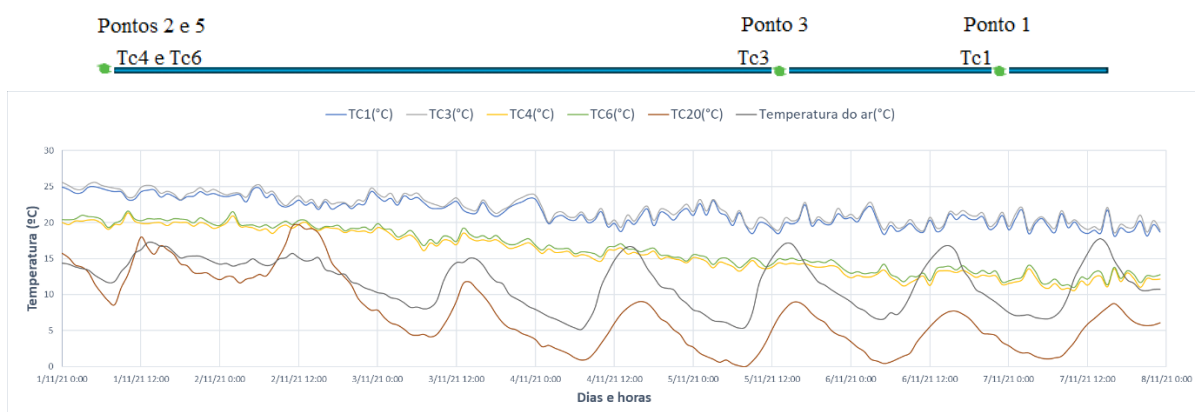


Gráfico 4.3 - Temperaturas dos termopares sob a camada ICB, correspondentes à semana de 1 a 7 de novembro, assim como a respetiva temperatura do ar.

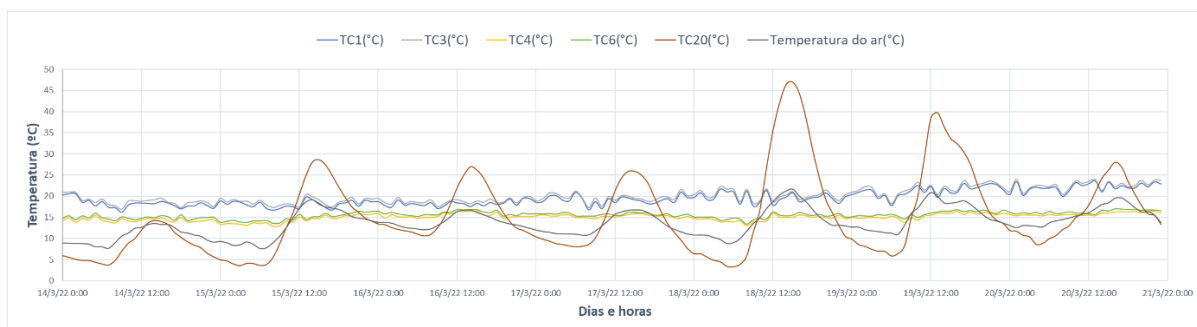


Gráfico 4.4 - Temperaturas dos termopares sob a camada ICB, correspondentes à semana de 14 a 20 de março, assim como a respetiva temperatura do ar.

É perceptível que o substrato e a camada ICB fazem uma significativa proteção térmica à laje de suporte. Pode-se observar ainda que, os termopares que possuem alturas de substrato similares, exibem também valores muito semelhantes, mesmo estando em localizações diferentes, como é o caso do ponto 2 e 5 (TC₄ e TC₆) e do ponto 1 e 3 (TC₁ e TC₃). Os pontos com baixa e alta altura de substrato apresentam valores de temperatura distintos. Verifica-se que os pontos a menor profundidade (TC₁ e TC₃) apresentam temperaturas mais elevadas que os pontos a maior profundidade (TC₄ e TC₆). Esta diferença de temperaturas é mais reduzida na semana de março, como se pode observar no Gráfico 4.4, e isto dever-se-á em parte ao aumento da temperatura do ar nesse mês. A temperatura do ar do ponto 4 (TC₂₀) apresenta uma evolução próxima da temperatura do ar exterior, ao longo da semana de novembro, em virtude das baixas quantidades de radiação solar. Na semana de março, este ponto revela variações maiores em função dos picos de radiação solar sentidos. Os diferentes pontos da cobertura verde (TC₄, TC₆, TC₃ e TC₁) apresentam um comportamento semelhante, com menos variações e amplitudes reduzidas, comparativamente, à cobertura de controlo (TC₂₀) e ao ar. Estes dados de temperatura obtidos pelos termopares sob a camada ICB, devido à sua proximidade à laje de suporte, são interessantes para ilustrar a melhoria do desempenho energético do edifício, já que fica evidente a proteção térmica garantida pela cobertura verde

4.2.3 Medições relativas ao ponto 5

Os gráficos seguintes (Gráfico 4.5 e Gráfico 4.6) apresentam os valores obtidos nos termopares do ponto 5 (TC₁₂, TC₁₁ e TC₆), com o objetivo de avaliar as diferenças de temperatura em profundidade, ou seja, através da observação da evolução das temperatura nos termopares que se distribuem verticalmente neste ponto. Para melhor se compreenderem os resultados da monitorização apresentam-se também os dados de temperatura do ponto 4 (TC₂₀), assim como a radiação solar e a temperatura do ar. Selecionou-se o ponto 5 por ser um dos pontos estudados com maior altura de substrato (0,45 m).

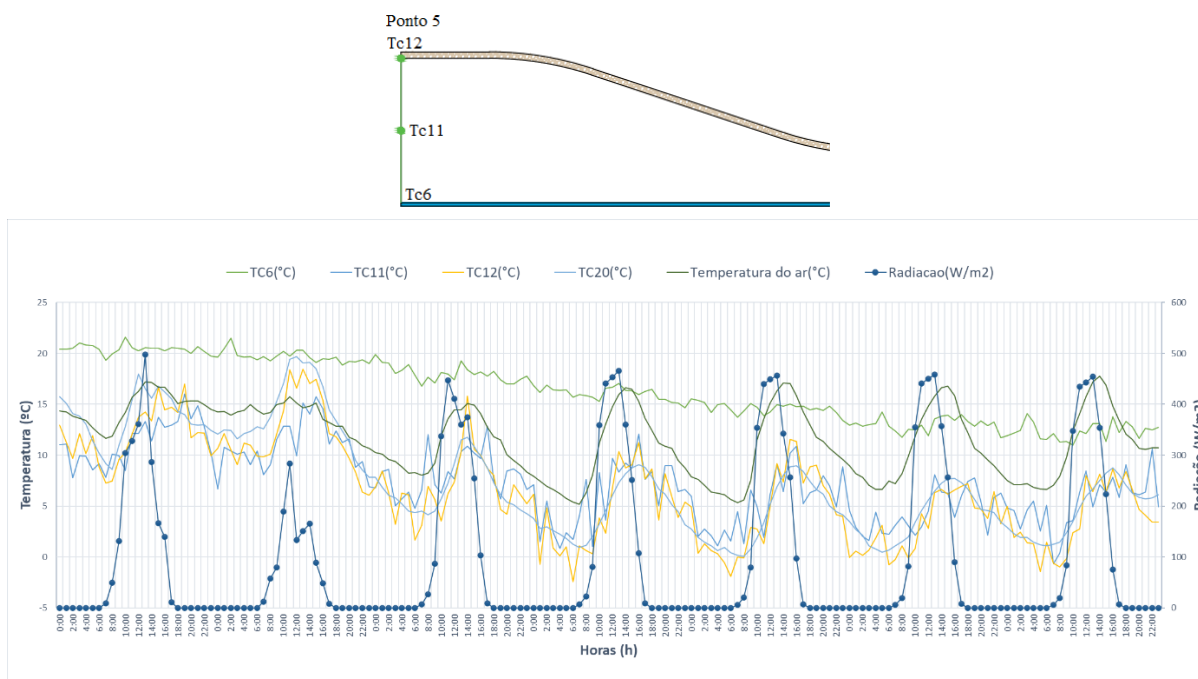


Gráfico 4.5 - Temperaturas dos termopares, radiação solar e temperatura do ar, para a semana de 1 a 7 de novembro, no ponto 5.

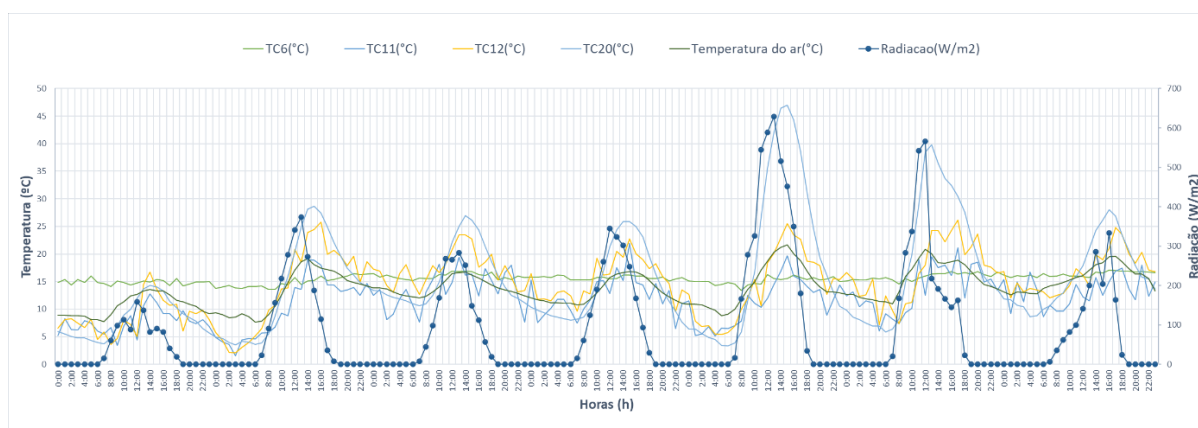


Gráfico 4.6 - Temperaturas dos termopares, radiação solar e temperatura do ar, para a semana de 14 a 20 de março, no ponto 5.

O dispositivo de medição situado sob a camada do ICB (TC₆) apresenta valores mais estáveis, menos oscilações e baixas amplitudes, em ambos os gráficos. Os restantes termopares revelam sofrer influência das variações da radiação solar e da temperatura do ar. A proteção térmica dada pelo substrato e camada de ICB a este termopar (TC₆), justifica os resultados obtidos. Ao longo da semana de novembro regista-se um gradual decréscimo de temperatura (no TC₆), porque ao longo da semana, a temperatura média foi-se reduzindo. O termopar situado na superfície (TC₁₂) e o termopar localizado no meio do substrato (TC₁₁) apresentam

comportamentos muito semelhantes entre si. Estes termopares (TC₁₂ e TC₁₁), na semana de novembro, apresentam temperaturas abaixo da temperatura do ar, que pode estar associado à capacidade térmica do substrato. Como é um ponto sombreado não consegue acumular muito calor ao longo do dia.

Na semana de março, verifica-se que os dois termopares situados mais próximos da superfície, da cobertura verde (TC₁₂ e TC₁₁), acompanham a variação da temperatura do ar. Neste período do ano já estão mais expostos à radiação solar, que também tem alguma influência neste comportamento. Como se pode observar no Gráfico 4.6 e era de esperar, os termopares (TC₁₂ e TC₁₁), atingem temperaturas superiores ao termopar sob a camada do ICB (TC₆).

Pode-se ainda constatar que a temperatura mais alta atingida foi na cobertura de controlo (TC₂₀), aproximadamente 47°C, no dia 18 de março às 15:00 horas. Enquanto que nessa hora, à superfície do substrato (TC₁₂), a temperatura era aproximadamente de 25°C, e sob a camada ICB (TC₆) era de 15°C. A diferença de temperaturas entre a cobertura de controlo e a superfície do substrato, nesse intervalo de tempo é de 22°C, se for feita a subtração de temperaturas entre a cobertura de controlo e sob a camada ICB, já aumenta para os 32°C, evidenciando a proteção térmica produzida pela camada do substrato e o ICB.

De seguida, compilaram-se em dois quadros (Quadro 4.1 e Quadro 4.2) as temperaturas dos termopares do ponto 5 (TC₁₂, TC₁₁ e TC₆), do ponto 4 (TC₂₀) e temperatura do ar, em intervalos de 12 horas. Apresenta-se, assim as temperaturas ao meio-dia e à meia-noite.

Quadro 4.1 - Temperaturas dos termopares do ponto 5 para o meio-dia e meia-noite, da cobertura de controlo e temperatura do ar, ao longo da semana de novembro.

Dia/Horas	Temperatura do ar (°C)	TC₂₀ (°C)	TC₁₂ (°C)	TC₁₁ (°C)	TC₆ (°C)
01/00:00	14,4	15,7	13,0	11,0	20,4
01/12:00	16,3	18,0	13,7	12,1	20,3
02/00:00	14,2	12,1	10,7	6,7	19,6
02/12:00	15,1	19,7	16,6	9,9	20,3
03/00:00	10,3	7,9	6,9	6,8	19,9
03/12:00	14,5	9,2	7,4	7,7	17,4
04/00:00	8,0	3,8	6,2	7,1	16,9
04/12:00	14,8	6,1	6,8	9,7	16,7
05/00:00	7,9	2,7	4,9	6,0	15,6
05/12:00	15,1	5,2	5,0	6,2	14,2
06/00:00	9,0	3,5	-0,1	4,6	13,0
06/12:00	14,8	5,6	2,8	4,5	11,9
07/00:00	7,5	2,9	5,0	4,8	11,9
07/12:00	15,8	6,0	8,0	8,5	12,2

Quadro 4.2 - Temperaturas dos termopares do ponto 5 para o meio-dia e meia-noite, da cobertura de controlo e temperatura do ar, ao longo da semana de março.

Dia/Horas	Temperatura do ar (°C)	TC₂₀ (°C)	TC₁₂ (°C)	TC₁₁ (°C)	TC₆ (°C)
14/00:00	9,0	6,0	6,6	5,3	14,8
14/12:00	12,7	12,0	5,1	4,5	14,8
15/00:00	9,4	5,0	5,8	4,9	13,8
15/12:00	17,1	20,5	20,8	13,9	15,8
16/00:00	13,8	13,5	17,3	12,6	16,5
16/12:00	16,4	22,1	20,8	14,9	16,9
17/00:00	12,0	10,4	16,5	15,3	15,9
17/12:00	15,7	21,3	16,4	12,8	15,5
18/00:00	10,9	6,4	12,7	11,5	15,1
18/12:00	18,7	35,6	18,4	12,0	16,3
19/00:00	12,7	9,9	16,6	12,4	15,1
19/12:00	20,9	38,5	18,0	12,5	16,0
20/00:00	13,1	11,9	16,8	15,4	16,2
20/12:00	16,1	17,9	16,2	12,2	15,9

Em ambos os quadros, verifica-se que as temperaturas da cobertura de controlo (TC₂₀) variam muito do meio-dia para a meia-noite, de altas para baixas temperaturas, respetivamente. Este termopar (TC₂₀) está por isso muito dependente da temperatura do ar e da radiação solar. As temperaturas dos termopares, na superfície (TC₁₂) e a meio do substrato (TC₁₁), nas duas semanas, apresentam uma diferença menor de temperaturas, entre as duas fases do dia, comparativamente à temperatura do ar e à cobertura convencional (TC₂₀). Este acontecimento deve-se à regulação de calor que o substrato e a vegetação asseguram. Em relação ao termopar sob a camada ICB (TC₆), este apresenta valores muito idênticos entre as duas alturas do dia.

A temperatura mais baixa é atingida à superfície do substrato (TC₁₂), à meia-noite de dia 6 de novembro, devido a este termopar estar muito descoberto. No

Quadro 4.2 pode-se observar as temperaturas elevadíssimas que a cobertura de controlo (TC₂₀) atinge ao meio-dia do dia 18 e 19 verificando-se uma grande diferença de temperaturas comparativamente às restantes. Este acontecimento deve-se ao sobreaquecimento da laje, associado ao pico de maior calor.

4.2.4 Avaliação do impacto da altura do substrato

Os gráficos representados abaixo (Gráfico 4.7 e Gráfico 4.8) permitem analisar os pontos com a mesma altura de substrato. Usaram-se os termopares distribuídos a diferentes alturas em cada ponto. Considerou-se assim, o termopar sob a camada ICB do ponto 3 (TC₃) e o termopar a meio do substrato do ponto 1 (TC₁₄). E para comparar o comportamento térmico destes dois

pontos, representou-se ainda a temperatura do ar, a temperatura da cobertura convencional (TC₂₀) e a radiação solar.

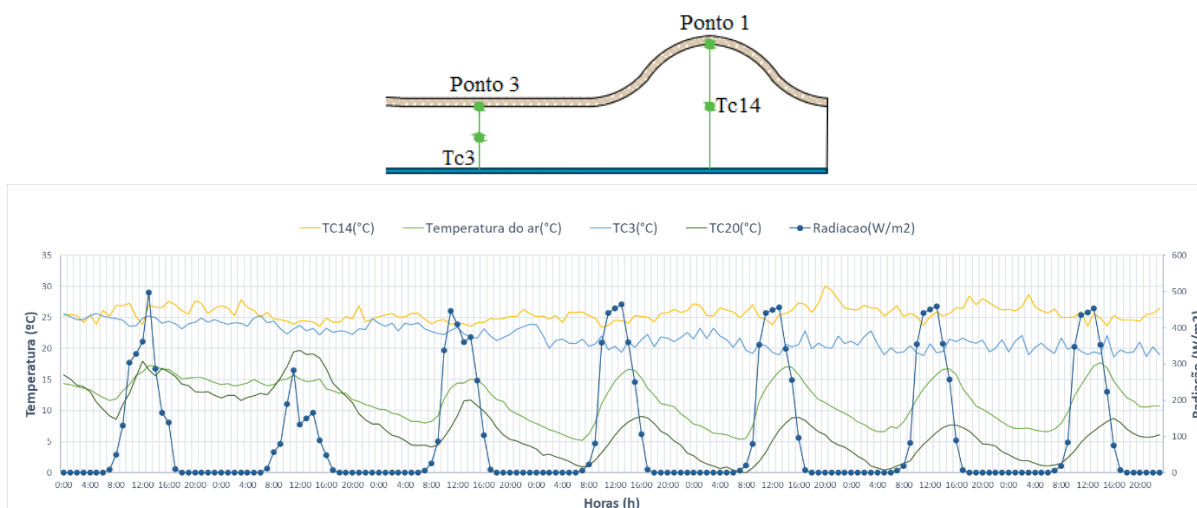


Gráfico 4.7 - Efeito da altura do substrato, na semana de 1 a 7 de novembro.

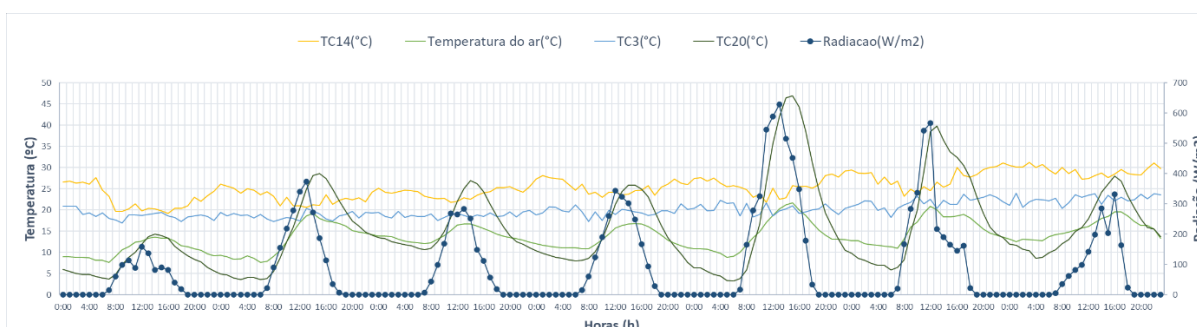


Gráfico 4.8 - Efeito da altura do substrato, na semana de 14 a 20 de março.

Após analisar os gráficos (Gráfico 4.7 e Gráfico 4.8), pode-se deduzir que os termopares (TC₃ e TC₁₄) apresentam valores relativamente estáveis de temperatura e possuem amplitudes reduzidas. Porém, o termopar do ponto 1 (TC₁₄) apresenta temperaturas mais elevadas que o termopar do ponto 3 (TC₃). O termopar do ponto 1 (TC₁₄) encontra-se a meia altura do substrato, enquanto o termopar do ponto 3 (TC₃) se encontra sob a camada ICB. Este termopar (TC₃), possui assim uma camada extra, de isolamento (ICB), a fazer proteção térmica. Tendo em conta as posições dos termopares, verifica-se que na semana de novembro (Gráfico 4.7), o termopar sob a camada do ICB (TC₃) é o mais influenciado pelas baixas temperaturas do ar exterior, notando-se um decréscimo de temperatura. Enquanto que, na semana de março (Gráfico 4.8), o termopar a meia altura do substrato (TC₁₄), é o mais afetado pelas grandes quantidades de radiação solar, revelando um acréscimo de temperatura.

4.2.5 Análise dos fluxos de calor

A análise de dados médios da temperatura semanal facilitou a visualização de tendências, mas simplificou excessivamente alguns dos dados. Por esse motivo traçou-se a média de 72 horas dos valores de fluxo para compreender como o calor se transfere através das coberturas e ao longo do tempo. As medições de fluxo de calor nos diferentes pontos de medição permitem a comparação entre a cobertura verde (TF₂ e TF₁) e a cobertura convencional (TF₃). Nos seguintes gráficos (Gráfico 4.9 e Gráfico 4.10) são apresentados os dados dos fluxos de calor obtidos pelos termofluxímetros situados, sob a camada ICB (TF₂ e TF₁), e sob a lajeta (TF₃), assim como o parâmetro da radiação solar. Nos Gráfico 4.11 e Gráfico 4.12, estão representados os valores dos fluxos de calor (TF₂, TF₁ e TF₃), bem como a temperatura do ar.

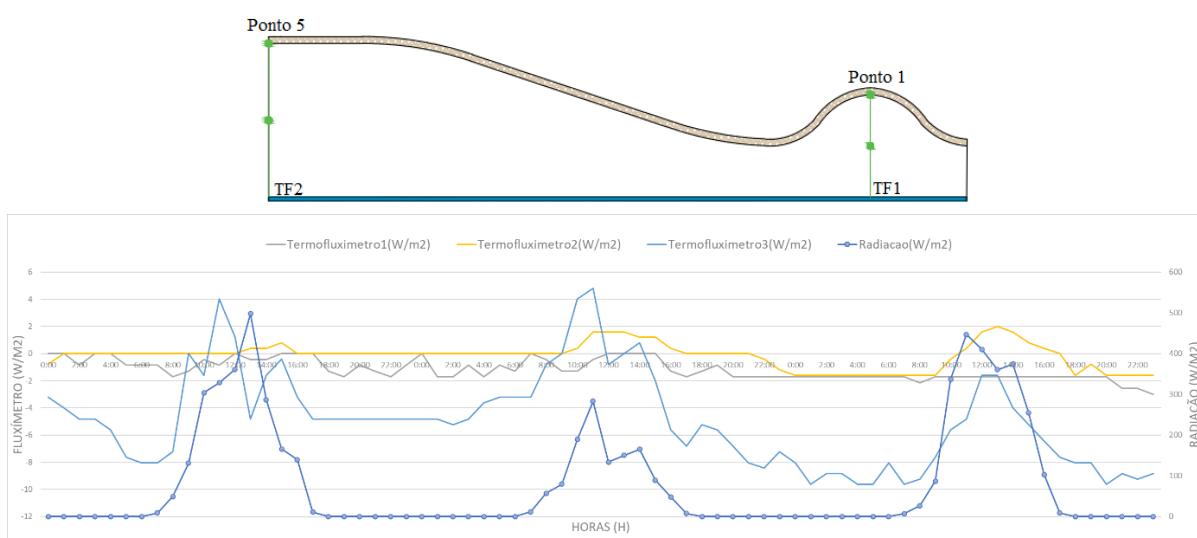


Gráfico 4.9 - Fluxos de calor, respetivos a 72h (1, 2, 3 de novembro), com a radiação representada.

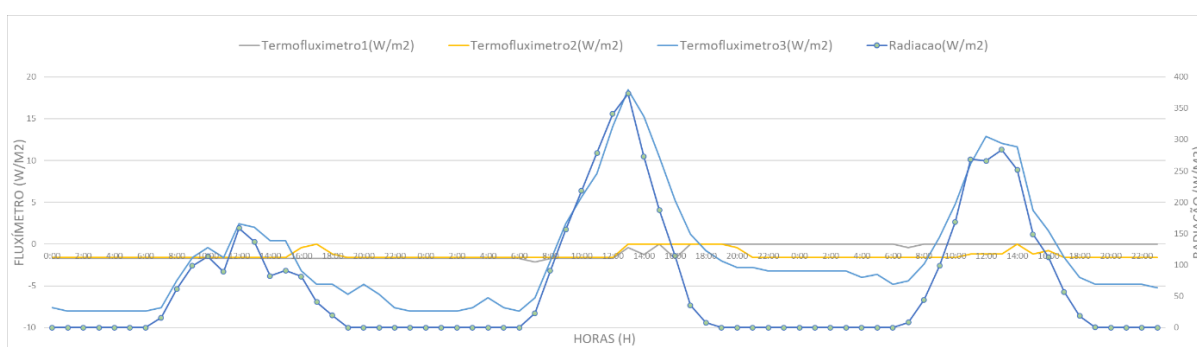


Gráfico 4.10 - Fluxos de calor, respetivos a 72h (14, 15, 16 de março), com a radiação representada.

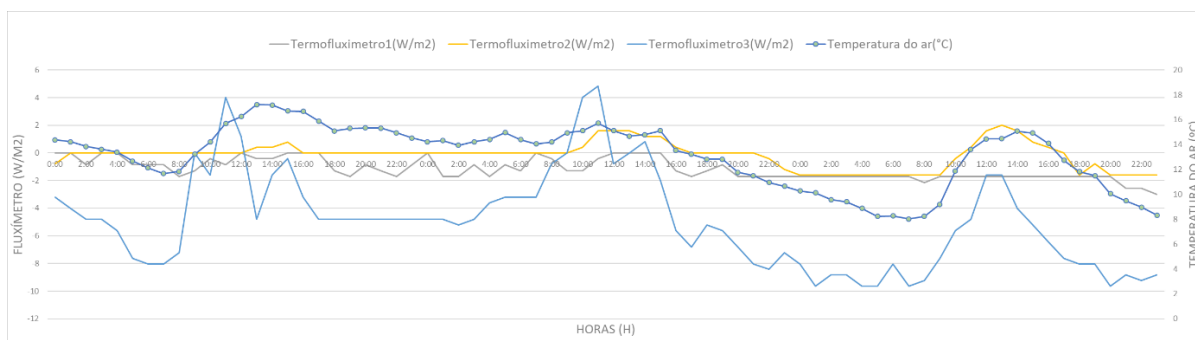


Gráfico 4.11 - Fluxos de calor, respetivos a 72h (1, 2, 3 de novembro), com a temperatura do ar representada.

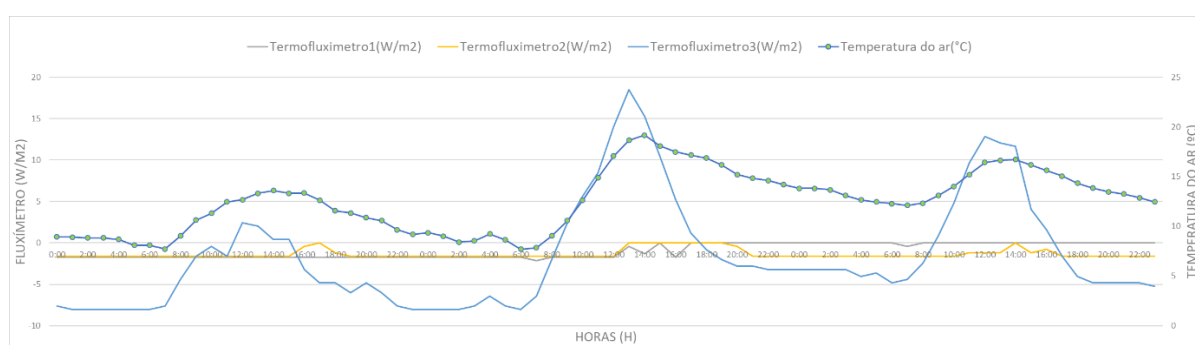


Gráfico 4.12 - Fluxos de calor, respetivos a 72h (14, 15, 16 de março), com a temperatura do ar representada.

À semelhança da análise feita aos termopares, verifica-se que o ponto de medição, que varia mais com as variações da radiação solar e da temperatura, é o termofluxímetro da cobertura convencional (TF₃). Destaca-se, assim, a variação sinusoidal deste termofluxímetro (TF₃), revelando um fluxo sensível à variação da radiação solar, promovendo grandes perdas/ganhos de calor. Constata-se uma diferença significativa, entre os valores dos termofluxímetros da cobertura verde e da cobertura convencional, em ambos os gráficos. Verifica-se baixa variabilidade e baixa transferência de calor, por parte dos termofluxímetros situados na cobertura verde (TF₂ e TF₁), registando-se períodos em que o valor é aproximadamente nulo. O substrato e a camada do ICB garantem a capacidade da cobertura verde para reduzir as cargas de arrefecimento e aquecimento do invólucro do edifício. Os fluxos de calor da cobertura verde (TF₁ e TF₂) são semelhantes entre si, com variações de fluxo para diferentes conjuntos variando de -2 a 2 W/m², como mostrado nos gráficos 4.9 a 4.12. Estes termofluxímetros (TF₂ e TF₁) são influenciados ligeiramente pelas baixas temperaturas do ar, em novembro. No dia 3 de novembro, à 1 hora da manhã, observa-se o menor fluxo de calor negativo (-9,6 W/m²), sentido na cobertura convencional (TF₃). Ocorrendo assim perdas de calor, pois o calor é transferido de dentro do edifício para o exterior. Na semana de março, às 13 horas do dia 15, verifica-se o maior fluxo de calor positivo (18,5 W/m²), também sentido na cobertura convencional, ou seja, houve ganhos de calor.

4.2.6 Estimativa do coeficiente de transmissão térmica

Com base na ISO 9869:1994 foi possível estimar os coeficientes de transmissão térmica das coberturas estudadas (cobertura verde e cobertura de acesso), a equação utilizada está representada em (3):

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{ij} - T_{ej})} [W/(m^2 \cdot ^\circ C)] \quad (3)$$

Considerou-se um intervalo de tempo, em novembro, os dias 1, 2, 3 (72 horas) do ano 2021. Com o intervalo de tempo escolhido, foi possível calcular os coeficientes de transmissão térmica para os dois termofluxímetros já mencionados (TF₁ e TF₃). Para o ponto 1 situado na cobertura verde (TF₁), considerou-se a temperatura de superfície (TC₁₃). No ponto 4, localizado sob a lajeta da cobertura convencional (TF₃), utilizou-se a temperatura registada pela estação meteorológica (T_e). Os quadros seguintes apresentam os valores utilizados, assim como os valores obtidos:

Quadro 4.3 - Valores utilizados para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (1, 2 e 3 de novembro).

T _e °C	T _{c13} °C	T _i °C	TF ₁ (W/m ²)	TF ₃ (W/m ²)
13,12	27,32	20	-1,78	-5,13

Quadro 4.4 - Valores obtidos do cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (1, 2 e 3 de novembro).

U _{cobertura verde monitorização} [W/(m ² ·°C)]	U _{cobertura convencional monitorização} [W/(m ² ·°C)]
0,244	0,746

Posteriormente, calculou-se o coeficiente de transmissão térmica teórico, para motivos de comparação. Sendo que para o coeficiente de transmissão teórico, calculou-se através das equações (4) (5):

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum R_j + R_{si}} [W/(m^2 \cdot ^\circ C)] \quad (4)$$

$$R_j = \frac{e}{\lambda} [m^2 \cdot ^\circ C/W] \quad (5)$$

Os valores teóricos foram obtidos tendo em conta valores tabelados para as soluções da laje e valores medidos em laboratório para o ICB e substrato. Apresentam-se no Quadro 4.5 os parâmetros utilizados:

Quadro 4.5 – Valores tabelados e valores medidos em laboratório. Adaptado do (Itecons).

Material	Espessura, e (m)	Condutibilidade térmica, λ (W/m.$^\circ$C)
Substrato húmido	0,3	0,134
ICB húmido	0,05	0,051
XPS	0,04	0,034
Betonilha	0,08	0,8
Laje	0,25	2
Reboco	0,025	1,3

Segundo Informação Técnica de Edifícios, foi possível obter os valores da resistência térmica superficial interior e exterior ($R_{si} = 0,10 m^2 \cdot ^\circ C/W$, $R_{se} = 0,04 m^2 \cdot ^\circ C/W$), considerando o sentido do fluxo de calor vertical ascendente. Com base nesses dados, obtiveram-se os seguintes valores dos coeficientes de transmissão térmica teóricos:

$$U_{cobertura\ verde\ teórico} = 0,278 [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$$

$$U_{cobertura\ convencional\ teórico} = 0,641 [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$$

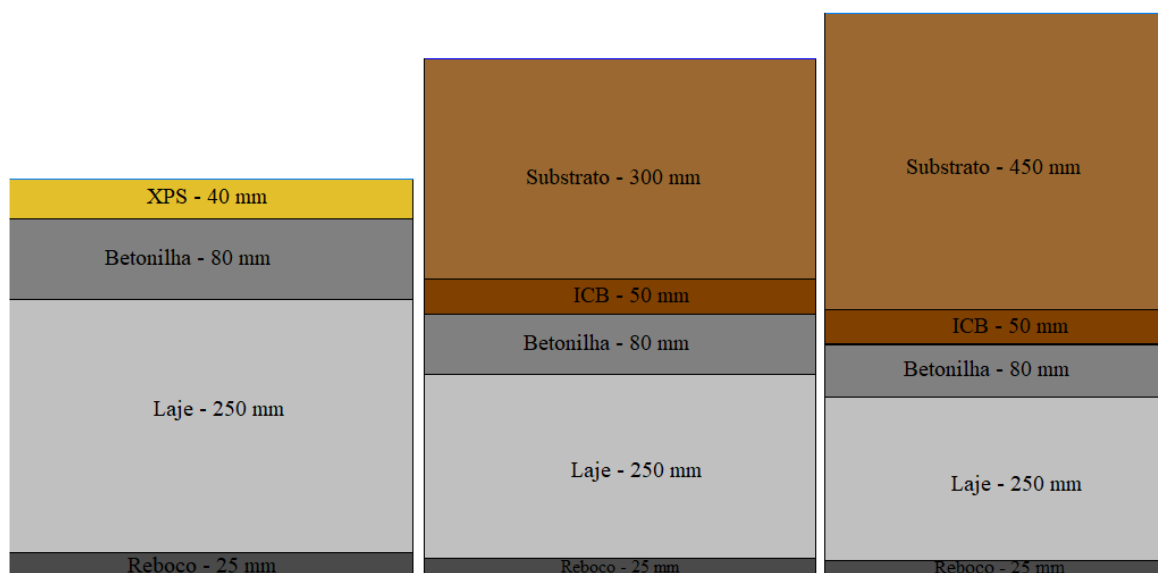
Analisando os valores obtidos, à priori é possível afirmar que a cobertura convencional, apresenta o valor mais alto dos coeficientes de transmissão térmica, o que comprova um melhor comportamento térmico da cobertura verde. Os valores teóricos obtidos dos coeficientes de transmissão térmica assemelham-se muito aos coeficientes de transmissão térmica medidos na

etapa de monitorização. Por fim efetuou-se um cálculo em regime permanente, sobre a madrugada de dia 6 de novembro. Onde se obteve o valor do termofluxímetro (TF_2) de $-1,59 \text{ W/m}^2$, situado no ponto 5, e um coeficiente de transmissão térmica de $0,164 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (U_2). Este cálculo foi realizado com o intuito de justificar o baixo valor obtido no cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U_2), para o ponto 5, para o período estabelecido de novembro (1, 2 e 3). O valor de U_2 é relativamente baixo devido às variações de fluxo que ocorrem nesses dias, tendo fluxos de calor negativos durante o período da madrugada, e fluxos de calor positivos durante o período de maior calor, e estes são muito semelhantes entre si

4.3 Simulação: Regime Permanente

4.3.1 Cálculo do coeficiente de transmissão térmica, U

Para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U), utilizou-se o software *Therm*. Nesta fase do estudo procedeu-se à comparação entre o coeficiente de transmissão térmico teórico (obtido pelo *Therm*) e o coeficiente de transmissão calculado com base na monitorização, considerando um período de medição de 72 horas (1, 2 e 3 de novembro, de 2021). Para a cobertura convencional (ponto 4) foram considerados as seguintes alturas e camadas dos materiais, representados na Figura 4.2 I). Na Figura 4.2 II) é retratado o ponto 1, com os respetivos materiais aplicados, assim como as suas alturas. O ponto 5 é ilustrado na Figura 4.2 III) exibindo os materiais e as alturas que o caracterizam.



I), II) e III)

Figura 4.2 - Coberturas desenhadas no software *Therm*, com a descrição dos materiais e das alturas utilizadas (sem escala).

A implementação de um modelo de simulação de forma a alcançar resultados mais precisos, envolve a criação de condições de fronteira que representem o mais rigorosamente possível as condições a que estão submetidas as soluções. Para a temperatura interior considerou-se uma temperatura ambiente padrão (20°C), em função disso a resistência térmica superficial utilizada é a normalizada, para todos os pontos.

De seguida, calcularam-se os valores de condutância térmica superficial, de acordo com a seguinte fórmula (4).

$$h_s = 1/R_s [W/(m^2 \cdot ^\circ C)] \quad (4)$$

$$h_{si} = 10 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$$

$$h_{se} = 25 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$$

Devido à ferramenta de cálculo utilizada, impuseram-se fronteiras adiabáticas nas superfícies verticais das coberturas estudadas, de tal modo considerou-se que o fluxo de calor é unidirecional, sendo as condições limite apenas impostas nas superfícies horizontais. Utilizaram-se os valores de condutância térmica superficial mencionados anteriormente, para as condições de fronteira. Nesta fase decidiu-se além de calcular os coeficientes de transmissão térmica, analisar a distribuição de temperaturas nas soluções.

A opção de visualização dos gradientes de temperatura no software *Therm*, com recurso a um diagrama de cores, permite analisar diferentes temperaturas, das zonas de cobertura desenhadas, assim como a direção e sentido dos fluxos de calor. Para as zonas de coberturas representadas, nesta ferramenta de cálculo, foram consideradas as propriedades padrão do software, em que a emissividade (ϵ) estabelecida é 0,9. Na Figura 4.3 apresentam-se ilustradas as zonas de coberturas, dos pontos 1 e 5 da cobertura verde, assim como o ponto 4 da cobertura convencional, mediante o gradiente de temperatura ao longo dos materiais da solução construtiva opaca.

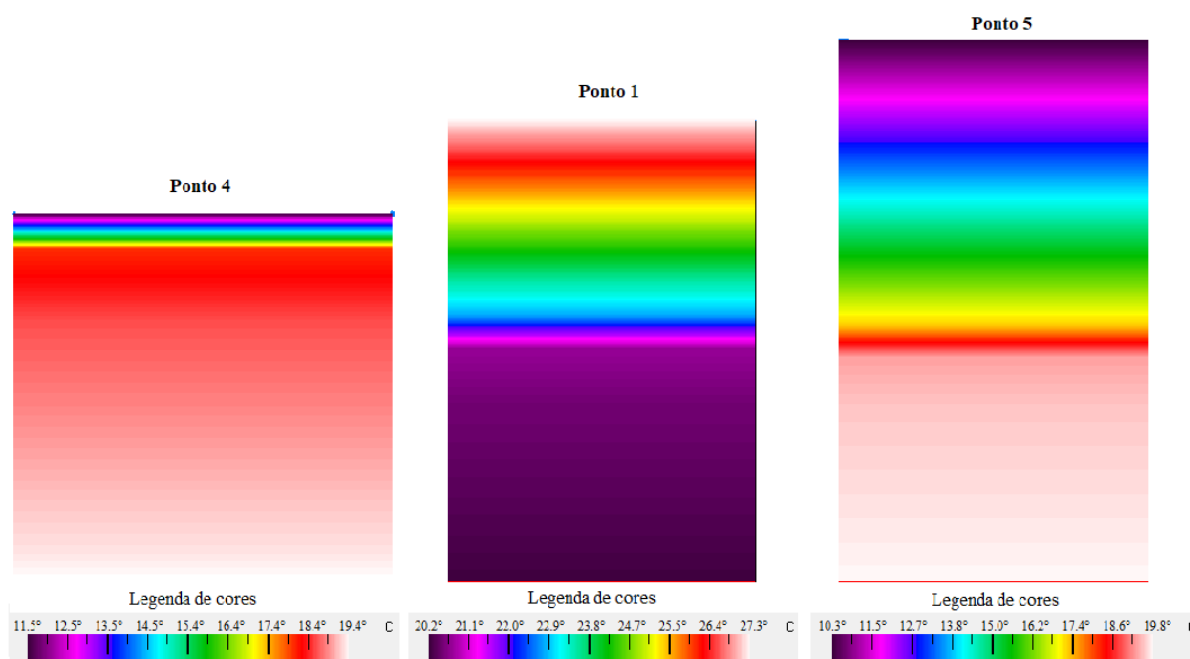


Figura 4.3 – Zonas de coberturas (pontos 1, 4 e 5) representadas no software *Therm*, através da opção de visualização termografia por infravermelhos (sem escala).

Como se pode observar na Figura 4.3, a cobertura convencional (ponto 4) apresenta grandes perdas de energia através das suas camadas constituintes. Nos pontos da cobertura verde (pontos 1 e 5) verifica-se à priori que existe uma diferença no sentido dos fluxos de calor, isto deve-se às temperaturas superiores e inferiores registadas. Contrariamente à cobertura convencional, as perdas de energia nas camadas constituintes dos pontos da cobertura verde são moderadas.

De modo a sintetizar a informação que foi usada no software, em relação às coberturas, que variam conforme os pontos analisados, procedeu-se à elaboração de dois quadros sínteses. No primeiro quadro é caracterizado o ponto 4 referente à cobertura convencional.

Quadro 4.6 - Condições consideradas para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (Ponto 4).

Ponto	Temperatura exterior (°C)	Termofluxímetro (W/m ²)	U _{monitorização} (W/m ² .°C)	U _{obtido pelo software} (W/m ² .°C)
4	13,1	-5,13	0,746	0,641

No Quadro 4.7 estão representados os pontos 1 e 5, nestes pontos analisaram-se três estados do substrato e do ICB, com o intuito de analisar o impacto dos teores em água no substrato e na camada ICB, e compreender qual estado que representa melhor a realidade do caso de estudo.

Quadro 4.7 - Condições consideradas para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (Ponto 1 e 5).

Ponto	Temperatura de superfície exterior (°C)	Termofluxímetro (W/m ²)	U _{monitorização} (W/m ² .°C)	U _{obtido pelo software} (W/m ² .°C)
1	27,3	-1,78	0,244	0,152 - 0,424 (seco) - (saturado)
5	10,3	-1,59	0,164	0,110 - 0,336 (seco) - (saturado)

Após a visualização dos quadros (Quadro 4.6 e Quadro 4.7), pode-se constatar que os coeficientes de transmissão térmica dificilmente serão iguais, devido a todas as incertezas associadas aos parâmetros e aos teores em água da cobertura e ao facto do regime real ser não estacionário. Existe, todavia, uma grande similaridade de valores dos coeficientes de transmissão térmica obtidos pelo software, comparativamente com os coeficientes de transmissão térmica determinados a partir das medições realizadas *in-situ*. É possível verificar através das simulações no software que, quando se aumenta o teor em água, também aumenta o valor de U. Também as condições de fronteira têm um impacto significativo no cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (ponto 1, 4 e 5). O estado que melhor representa o ponto 1 é o estado húmido, com base nos valores dos U's, sendo a diferença de ambos na ordem dos centésimos (0,037 W/m².°C). O cálculo isolado realizado no ponto 5, em regime permanente sobre a madrugada de dia 6 de novembro, também se assemelha ao estado húmido, com base nos valores de U's, (diferença de 0,050 W/m².°C). Visto que o ponto 5 apresenta maior quantidade de substrato e se encontra distante do ponto 1, é natural que o teor de água seja distinto e consequentemente o estado do substrato e do ICB.

4.3.2 Análise de sensibilidade

Com o objetivo de perceber a influência de algumas variáveis e características do modelo, efetuou-se uma análise de sensibilidade. Nesta análise selecionou-se o ponto 1 da cobertura verde e estudou-se o impacto dessa mesma cobertura em dois casos diferentes:

- No primeiro caso (1.1) analisou-se a cobertura sem substrato;
- No segundo caso (1.2) considerou-se que a camada ICB teria o dobro da espessura (100 milímetros).

No quadro seguinte (Quadro 4.8) apresentam-se os resultados destes dois casos.

Quadro 4.8 - Condições consideradas para o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica (Caso 1.1 e 1.2).

Caso	Estado	Temperatura de superfície exterior (°C)	U_{obtido pelo software} (W/m².°C)
1.1	húmido	27,3	0,755
1.2	húmido	27,3	0,220

Como se pode observar no Quadro 4.8, o caso 1.1 apresenta um valor de coeficiente de transmissão térmica muito elevado (0,755 W/m².°C), em virtude da remoção da camada de substrato. No caso 1.2 verifica-se que, com o aumento da espessura da camada ICB, o coeficiente de transmissão térmica decresce significativamente (0,220 W/m².°C). Após a análise deste quadro salienta-se a importância da camada de substrato e da camada ICB no comportamento térmico.

4.4 Simulação: Regime Transiente

Por intermédio do software *Bistra*, realizaram-se simulações em regime transiente, com o propósito de obter a variação de temperaturas ao longo do tempo. Neste caso, especificamente, durante um período de 48 horas (1 e 2 de novembro de 2021) e ao longo da zona de cobertura verde (ponto 5). Nesta parte do estudo avaliou-se o impacto da alteração das condições de fronteira, por exemplo com e sem radiação solar e com ajustes da temperatura do ambiente interior (que não foi possível monitorizar).

4.4.1 Análise sem radiação solar

Começou-se por efetuar uma análise sem radiação solar. No Gráfico 4.13, apresentam-se a distribuição de temperaturas ao longo do ponto 5, com base nos valores obtidos na fase de monitorização (T6, T11, T12) e na simulação em regime transiente (Tx6, Tx11, Tx12). Registe-se que esta simulação foi efetuada impondo uma temperatura interior de 25°C.

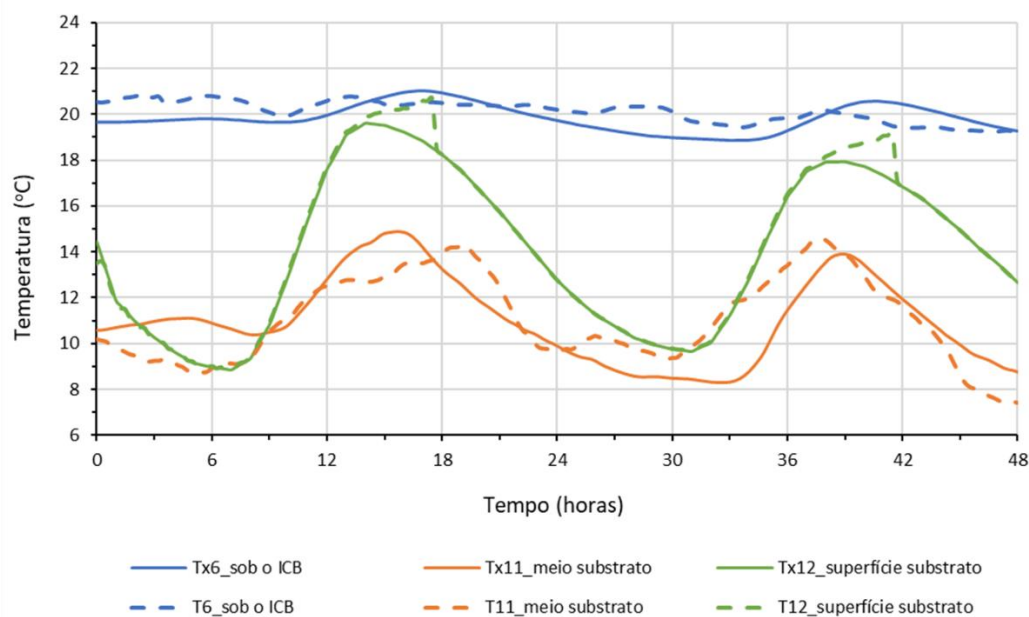


Gráfico 4.13 - Simulação em regime transiente sem radiação solar ($T_i = 25^\circ\text{C}$), do ponto 5, com recurso ao *Bistra*. Adaptado do (Itecons).

Após a análise do Gráfico 4.13, verifica-se mais uma vez que, os valores de monitorização assemelham-se muito aos valores de simulação. Os três termopares possuem comportamentos próximos aos obtidos na simulação, mas denota-se que o conjunto de valores à superfície do substrato (T12 e Tx12) são os mais aproximados. Apesar das incertezas dos parâmetros e das condições de fronteira, os resultados revelam que as ferramentas de simulação são um bom auxiliar para estimar o comportamento das soluções.

4.4.2 Análise com radiação solar

Numa segunda fase utilizou-se o parâmetro da radiação solar nas simulações. Nos gráficos seguintes (Gráfico 4.14 e Gráfico 4.15), encontram-se ilustrados as distribuições de temperaturas ao longo do ponto 5, com base nos dados de monitorização (T6, T11, T12) e de simulação (Tx6, Tx11, Tx12). No Gráfico 4.14 a simulação foi efetuada impondo uma temperatura interior de 25°C . No Gráfico 4.15 ajustou-se a temperatura do ambiente interior, estabelecendo-se a temperatura interior de 22°C .

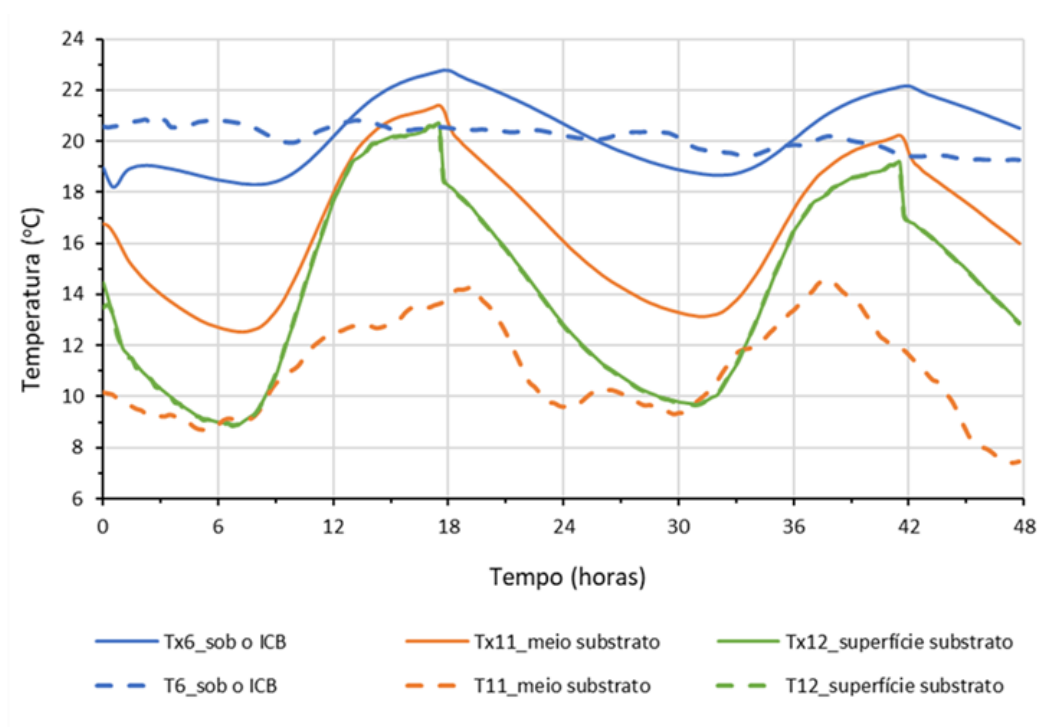


Gráfico 4.14 - Simulação em regime transiente com radiação solar ($T_i = 25.0^{\circ}\text{C}$), do ponto 5, com recurso ao *Bistra*. Adaptado do (Itecons).

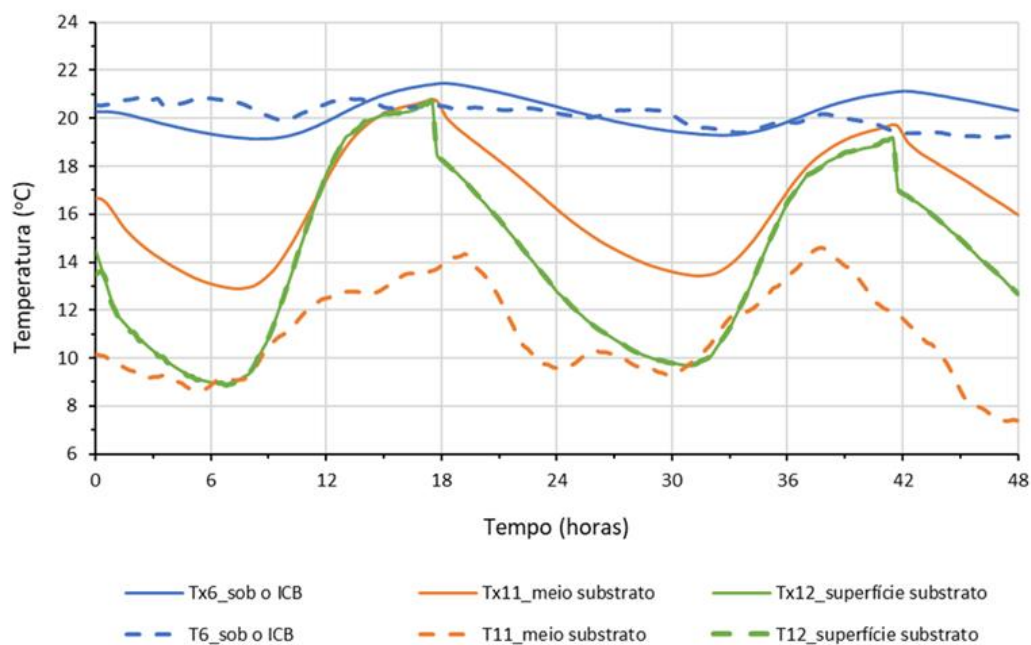


Gráfico 4.15 - Simulação em regime transiente com radiação solar ($T_i = 22.0^{\circ}\text{C}$), do ponto 5, com recurso ao *Bistra*. Adaptado do (Itecons).

Nos gráficos acima representados (Gráfico 4.14 e Gráfico 4.15), constata-se que os valores da temperatura da simulação aumentaram, devido à incorporação da radiação solar. Verifica-se ainda que o conjunto de valores à superfície do substrato (T12 e Tx12) são os mais semelhantes entre si, os restantes conjuntos de valores (T6 e Tx6, T12 e Tx12) já estão mais afastados entre si. Isto acontece devido a não se fazer sentir a radiação solar em profundidade, pelo facto da vegetação e do substrato fazerem proteção térmica ao ponto 5 e por este ser um ponto sombreado. Com o ajuste da temperatura do ambiente interior, verifica-se uma melhoria nos resultados, e percebe-se a importância da monitorização deste parâmetro. Conclui-se que a simulação que mais se aproxima a este ponto é sem a radiação, sobretudo por ser um ponto que está na maior parte do tempo sombreado.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Considerações finais

A presente dissertação teve como objetivo avaliar o comportamento de uma cobertura verde real. A solução retratada possui uma altura variável de substrato.

Procedeu-se à monitorização de temperaturas e fluxos de calor em vários pontos. Com base nessas medições levou-se a cabo uma análise com o objetivo de avaliar o impacto da altura do substrato e também da presença de isolamento térmico. Como se instalaram sensores de temperatura a diferentes profundidades discutiu-se a evolução de temperatura nessas diferentes posições.

Para melhor compreender os resultados também se monitorizou a solução de cobertura convencional localizada na proximidade da cobertura verde (solução similar à existente antes da reabilitação).

A cobertura convencional é muito influenciada pela radiação solar, atingindo temperaturas muito superiores à da cobertura verde. As temperaturas dessa cobertura apresentam oscilações muito acentuadas, sendo muito dependentes da temperatura do ar.

Relativamente às medições sob a camada do ICB, verificou-se que o substrato e o ICB, comportam-se como um elemento de proteção térmica à camada de isolamento. Os pontos situados sob a camada do ICB apresentam assim, menos variabilidade e valores mais estáveis, em contraste à cobertura de referência e à temperatura do ar. As zonas com alturas de substrato semelhantes possuem temperaturas muito similares. Os pontos a baixa e alta profundidade de substrato apresentam valores de temperatura distintos. Verifica-se que, os pontos a menor profundidade estão mais suscetíveis às alterações de temperatura e radiação. Apesar disso o impacto é menor do que naquele que se verifica na cobertura convencional.

Quanto à análise dos fluxos de calor, observou-se uma variação sinusoidal do termofluxímetro da camada convencional, revelando um fluxo sensível à variação da radiação solar, oscilando entre perdas/ganhos de calor. Os termofluxímetros que apresentam baixa variabilidade e baixa transferência de calor, pertencem à cobertura verde.

Através da estimativa do coeficiente de transmissão térmica, registou-se que a camada de cobertura convencional, apresenta os valores mais altos, o que indica que possui pior capacidade isolante comparativamente às camadas de cobertura verde.

Neste estudo, na fase de simulação, concluiu-se que existe uma grande proximidade dos valores dos coeficientes de transmissão térmica, entre os de simulação e os de monitorização. O aumento do teor em água faz aumentar proporcionalmente o valor do coeficiente de transmissão térmica. Na análise de sensibilidade feita, foi possível estabelecer que, o valor de coeficiente de transmissão térmico aumenta em virtude da remoção da camada de substrato, e com o acréscimo da espessura da camada do ICB, o coeficiente de transmissão será tanto menor. A simulação dinâmica permitiu perceber que este tipo de ferramenta pode ser muito importante para estimar o comportamento na fase de projeto e melhor perceber o impacto de algumas opções, nomeadamente espessura de isolamento e espessura de substrato.

5.2 Propostas de trabalhos futuros

Ao longo da realização desta dissertação, foram surgindo algumas sugestões para futuros trabalhos, no sentido de melhor compreender o comportamento térmico das coberturas verdes:

- A escolha de outro período de dados, nomeadamente durante o período de verão.
- A análise de outros parâmetros relevantes, para a avaliação do comportamento térmico da cobertura verde (*i.e.* precipitação, humidade relativa do ar, velocidade do vento, direção do vento ...).
- Avaliação do comportamento térmico da vegetação, situada na cobertura verde e análise da sua influência na proteção térmica.
- Aprofundar o estudo em regime variável, nomeadamente com modelos de cálculo mais complexos, que simulem todos os fenómenos envolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abenojar, J., Barbosa, A. Q., Ballesteros, Y., Del Real, J. C., Da Silva, L. F. M., and Martínez, M. A. (2014). Effect of surface treatments on natural cork: Surface energy, adhesion, and acoustic insulation. *Wood Science and Technology*, 48(1), 207–224. <https://doi.org/10.1007/S00226-013-0599-7/FIGURES/11>
- Agência para a Energia - ADENE, Agência Portuguesa do Ambiente, e Grupo Águas de Portugal - EPAL. (2018). Ficha 6.a - Intervenções na envolvente opaca do edifício. *Casa Eficiente 2020 / Catálogo de Soluções Técnicas*. <https://casaeficiente2020.pt/media/1202/6a.pdf>
- Alexandri, E., and Jones, P. (2007). Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. *Building and Environment*, 42(8), 2835–2849. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2006.07.004>
- Allione, C., De Giorgi, C., Lerma, B., and Petruccelli, L. (2012). From ecodesign products guidelines to materials guidelines for a sustainable product. Qualitative and quantitative multicriteria environmental profile of a material. *Energy*, 39(1), 90–99. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2011.08.055>
- Almeida, R., Simões, N., Tadeu, A., Palha, P., and Almeida, J. (2019). Thermal behaviour of a green roof containing insulation cork board. An experimental characterization using a bioclimatic chamber. *Building and Environment*, 160(May), 106179. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106179>
- Almusaed, A. (2011). Biophilic and Bioclimatic Architecture. In *Biophilic and Bioclimatic Architecture*. <https://doi.org/10.1007/978-1-84996-534-7>
- Amorim Cork Insulation@ (2018). *Amorim cork insulation*. <https://www.amorimcorkinsulation.com/i-and-d/GREENURBANLIVING/520/>. (Consultado a 2022/08/28).
- ANCV. (2020). *Coberturas Verdes: Guia Técnico para projeto, construção e manutenção*. (ANCV). ANCV-Associação Nacional de Coberturas Verdes.
- Andenæs, E., Kvande, T., Muthanna, T. M., and Lohne, J. (2018). Performance of Blue-Green Roofs in Cold Climates: A Scoping Review. *Buildings 2018, Vol. 8, Page 55*, 8(4), 55. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS8040055>
- Anjos, O., Rodrigues, C., Morais, J., and Pereira, H. (2014). Effect of density on the compression behaviour of cork. *Materials & Design*, 53, 1089–1096. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2013.07.038>

-
- Antrop, M. (2004). Landscape change and the urbanization process in Europe. *Landscape and Urban Planning*, 67(1–4), 9–26. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(03\)00026-4](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(03)00026-4)
- Ayata, T., Tabares-Velasco, P. C., and Srebric, J. (2011). An investigation of sensible heat fluxes at a green roof in a laboratory setup. *Building and Environment*, 46(9), 1851–1861. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.03.006>
- Barreca, F., and Fichera, C. R. (2016). Thermal insulation performance assessment of agglomerated cork boards. *Wood and Fiber Science*, 48(2), 96–103. https://www.researchgate.net/publication/303737155_Thermal_insulation_performance_assessment_of_agglomerated_cork_boards
- Câmara Municipal de Barreiro@ (2019). *Barreiro pioneiro em incentivos às coberturas e paredes verdes em Portugal | Barreiro*. <https://www.cm-barreiro.pt/viver/noticia/barreiro-pioneiro-em-incentivos-as-coberturas-e-paredes-verdes-em-portugal>. (Consultado a 2022/03/29).
- Baumann, N. (2006). Ground-Nesting Birds on Green Roofs in Switzerland: Preliminary Observations. *Urban Habitats*, 4(1), 37–50. https://www.researchgate.net/publication/230887927_Ground-Nesting_Birds_on_Green_Roofs_in_Switzerland_Preliminary_Observations
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. H., and GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411–428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Bevilacqua, P. (2021). The effectiveness of green roofs in reducing building energy consumptions across different climates. A summary of literature results. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111523. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111523>
- Bianchini, F., and Hewage, K. (2012). How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, 48(1), 57–65. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2011.08.019>
- Brudermann, T., and Sangkakool, T. (2017). Green roofs in temperate climate cities in Europe – An analysis of key decision factors. *Urban Forestry and Urban Greening*, 21, 224–234. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.12.008>
- Calheiros, C. S. C., and Stefanakis, A. I. (2021). Green Roofs Towards Circular and Resilient Cities. *Circular Economy and Sustainability*, 1(1), 395–411. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00033-0>
- Carbone, M., Garofalo, G., Nigro, G., and Piro, P. (2014). A conceptual model for predicting hydraulic behaviour of a green roof. *Procedia Engineering*, 70, 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.030>
-

- Chemisana, D., and Lamnatou, C. (2014). Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. *Applied Energy*, 119, 246–256. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.12.027>
- Chen, C. F. (2013). Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: A review. In *Ecological Engineering* (Vol. 52, pp. 51–58). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.083>
- Connelly, M., and Hodgson, M. (2015). Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs. *Building and Environment*, 92, 335–346. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.023>
- Connelly, M. R., Submitted, A. T., Partial, I. N., Of, F., Requirements, T. H. E., The, F. O. R., Of, D., and Philosophy, D. O. F. (2011). *Acoustical characteristics of vegetated roofs - contributions to the ecological performance of buildings and the urban soundscape. October*. <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0072314>
- Czemieli Berndtsson, J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- Decreto-Lei n.º 101-D/2020 | DRE. (2020). <https://dre.pt/dre/detalhe/decreto-lei/101-d-2020-150570704>
- DEPI. (2014). *A Guide to Green Roofs, Walls And Facades*. https://202020vision.com.au/media/41918/growing_green_guide_ebook_130214.pdf
- Despacho n.º 2798/2022 | DRE. (2022). <https://dre.pt/dre/detalhe/despacho/2798-2022-179971905>
- Dvorak, B., and Volder, A. (2010). Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review. In *Landscape and Urban Planning* (Vol. 96, Issue 4, pp. 197–213). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.04.009>
- Emilsson, T. (2008). Vegetation development on extensive vegetated green roofs: Influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecological Engineering*, 33(3–4), 265–277. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2008.05.005>
- Fundo Ambiental@ (2021). *2ª Fase do Programa de Apoio*. 2–7. <https://www.fundoambiental.pt/>. (Consultado a 2022/04/18)
- Gil, L. (2013). Insulation corkboard for sustainable energy and environmental protection. *Ciencia e Tecnologia Dos Materiais*, 25(1), 38–41. <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2013.12.008>
- Gonçalves, H., and Graça, J. M. (2004). *Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal*.

<http://hdl.handle.net/10400.9/1323>

- Grant, G. (2002). Extensive Green Roofs in London. *URBAN HABITATS*, 4(1), 15. https://www.researchgate.net/publication/242707878_Extensive_Green_Roofs_in_London
- GSA (General Services Administration). (2011). *A Report of the United States General Services Administration The Benefits and Challenges of Green Roofs on Public and Commercial Buildings*. May, 152. http://www.gsa.gov/portal/mediaId/158783/fileName/The_Benefits_and_Challenges_of_Green_Roofs_on_Public_and_Commercial_Buildings.action
- Hashemi, S. S. G., Mahmud, H. Bin, and Ashraf, M. A. (2015). Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 669–679. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.163>
- Itecons@ (2018). *greenURBANLIVING – Sistemas multifuncionais baseados em aglomerado de cortiça expandida para a construção de coberturas verdes e fachadas vivas*. Itecons. <https://www.itecons.uc.pt/projectos/greenurbanliving/index.php?module=sec&id=546&f=1>. (Consultado a 2022/08/28).
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S. E., and Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, 157–164. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2011.12.004>
- Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities. In *Energy and Buildings* (Vol. 43, Issue 10, pp. 2549–2563). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>
- Jim, C. Y., and Tsang, S. W. (2011). Ecological energetics of tropical intensive green roof. *Energy and Buildings*, 43(10), 2696–2704. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2011.06.018>
- Kim, J., Hong, T., and Koo, C. W. (2012). Economic and environmental evaluation model for selecting the optimum design of green roof systems in elementary schools. *Environmental Science and Technology*, 46(15), 8475–8483. https://doi.org/10.1021/ES2043855/SUPPL_FILE/ES2043855_SI_001.PDF
- Lagorce-Tachon, A., Karbowski, T., Champion, D., Gougeon, R. D., and Bellat, J. P. (2015). Mechanical properties of cork: Effect of hydration. *Materials and Design*, 82, 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.034>
- Landlab@ (2019). *GUL - Green urban living*. <https://www.landlab.pt/>. (Consultado a 2022/04/23).

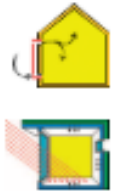







- Lepczyk, C. A., Aronson, M. F. J., Evans, K. L., Goddard, M. A., Lerman, S. B., and Macivor, J. S. (2017). Biodiversity in the City: Fundamental Questions for Understanding the Ecology of Urban Green Spaces for Biodiversity Conservation. *BioScience*, 67(9), 799–807. <https://doi.org/10.1093/BIOSCI/BIX079>
- Lequin, S., Chassagne, D., Karbowski, T., Simon, J. M., Paulin, C., and Bellat, J. P. (2012). Diffusion of oxygen in cork. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(13), 3348–3356. https://doi.org/10.1021/JF204655C/ASSET/IMAGES/JF204655C.SOCIAL.JPEG_V03
- LiderA4all | Sustentabilidade | Lisboa@ (2019). <https://www.lidera4all.com/>. (Consultado a 2022/04/25).
- Liu, K. Y., and Baskaran, A. (2005). Using Garden Roof Systems to Achieve Sustainable Building Envelopes. *Institute for Research in Construction*, 65, 6. <https://publications-cnrc.canada.ca/eng/view/object/?id=c95f042f-c32c-44b1-9e11-6055eadff533>
- Liu, W., Wei, W., Chen, W., Deo, R. C., Si, J., Xi, H., Li, B., and Feng, Q. (2019). The impacts of substrate and vegetation on stormwater runoff quality from extensive green roofs. *Journal of Hydrology*, 576(May), 575–582. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.061>
- Living Architecture Monitor@ (2021). *A Historic Square Revitalized with an Olive Grove Green Roof in Porto, Portugal*. <https://livingarchitecturemonitor.com/articles/a-historic-square-revitalized-with-an-olive-grove-green-roof-in-porto-portugal-su21>. (Consultado a 2022/03/30).
- Mahdiyar, A., Tabatabaee, S., Sadeghifam, A. N., Mohandes, S. R., Abdullah, A., and Meynagh, M. M. (2016). Probabilistic private cost-benefit analysis for green roof installation: A Monte Carlo simulation approach. *Urban Forestry and Urban Greening*, 20, 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.10.001>
- Mano, J. F., Correia, N. T., Moura Ramos, J. J., and Saramago, B. (1995). The molecular relaxation mechanisms in cork as studied by thermally stimulated discharge currents. *Journal of Materials Science*, 30(8), 2035–2041. <https://doi.org/10.1007/BF00353030>
- Manso, M., Sousa, V., Silva, C. M., and Cruz, C. O. (2021). The role of green roofs in post COVID-19 confinement: An analysis of willingness to pay. *Journal of Building Engineering*, 44(June), 103388. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103388>
- Molineux, C. J., Fentiman, C. H., and Gange, A. C. (2009). Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K. *Ecological Engineering*, 35(10), 1507–1513. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2009.06.010>
- Nagase, A., and Dunnett, N. (2013). Establishment of an annual meadow on extensive green roofs in the UK. *Landscape and Urban Planning*, 112(1), 50–62. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2012.12.007>

-
- Neoturf@ (2017). *coberturas verdes ou ajardinadas*. <https://www.neoturf.pt/pt/servico/coberturas-verdes>. (Consultado a 2022/04/14).
- Neoturf@ (2018). *Greenurbanliving*. <https://www.neoturf.pt/pt/investigacao/projecto-greenurbanliving>. (Consultado a 2022/08/28).
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., and Rowe, B. (2007). *Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services*. 57(10), 823–833. https://www.researchgate.net/publication/232694304_Green_Roofs_As_Urban_Ecosystems_Ecological_Structures_Functions_And_Services
- Peck, S. W., Callaghan, C., Kuhn, M. E., and Bass, B. (1999). Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion. *Environment, March*, 78. <https://publications.gc.ca/site/eng/9.569977/publication.html>
- Pereira, H. (2007). *Cork: biology, production and uses*. https://www.researchgate.net/publication/316589037_Cork_Biology_Production_and_Uses
- Pereira, H., and Tomé, M. (2004). NON-WOOD PRODUCTS | Cork Oak. *Encyclopedia of Forest Sciences*, 613–620. <https://doi.org/10.1016/B0-12-145160-7/00278-7>
- Portugal | EFB@ (2022). <https://efb-greenroof.eu/members-2/portugal/>. (Consultado a 2022/03/30).
- Raji, B., Tenpierik, M. J., and Van Den Dobbelsteen, A. (2015). The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 610–623. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.011>
- Rowe, D. B. (2011). Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 159(8–9), 2100–2110. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2010.10.029>
- Rowe, D. B., Getter, K. L., and Durhman, A. K. (2012). Effect of green roof media depth on Crassulacean plant succession over seven years. *Landscape and Urban Planning*, 104(3–4), 310–319. <https://doi.org/10.1016/J.LANDURBPLAN.2011.11.010>
- Saadatian, O., Sopian, K., Salleh, E., Lim, C. H., Riffat, S., Saadatian, E., Toudeshki, A., and Sulaiman, M. Y. (2013). A review of energy aspects of green roofs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 155–168. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.022>
- Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8), 1466–1478. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2008.02.001>
- Sempergreen@ (2021). *Benefits of a green roof*. Sempergreen.
-

- <https://www.sempergreen.com/en/solutions/green-roofs/green-roof-benefits>. (Consultado a 2022/04/13).
- Şen, A., Van Den Bulcke, J., Defoirdt, N., Van Acker, J., and Pereira, H. (2014). Thermal behaviour of cork and cork components. *Thermochimica Acta*, 582, 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.03.007>
- Shafique, M., Kim, R., and Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(April), 757–773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
- Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., Dias, A. C., and Gabarrell, X. (2016). Environmental implications of the use of agglomerated cork as thermal insulation in buildings. *Journal of Cleaner Production*, 126, 97–107. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.146>
- Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., and Gabarrell, X. (2015). Production and trade analysis in the Iberian cork sector: Economic characterization of a forest industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 98, 55–66. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2015.02.011>
- Stella, P., and Personne, E. (2021). Effects of conventional, extensive and semi-intensive green roofs on building conductive heat fluxes and surface temperatures in winter in Paris. *Building and Environment*, 205(April), 108202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108202>
- Sun, T., Bou-Zeid, E., Wang, Z. H., Zerba, E., and Ni, G. H. (2013). Hydrometeorological determinants of green roof performance via a vertically-resolved model for heat and water transport. *Building and Environment*, 60, 211–224. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2012.10.018>
- Tártaro, A. S., Mata, T. M., Martins, A. A., and Esteves da Silva, J. C. G. (2017). Carbon footprint of the insulation cork board. *Journal of Cleaner Production*, 143, 925–932. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.028>
- Teotónio, I., Silva, C. M., and Cruz, C. O. (2021). Economics of green roofs and green walls: A literature review. *Sustainable Cities and Society*, 69(February). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102781>
- Theodosiou, T. G. (2003). Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings*, 35(9), 909–917. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00023-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00023-9)
- UNO. (2018). World Urbanization Prospects. In *Demographic Research* (Vol. 12). <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>
- Van Renterghem, T., and Botteldooren, D. (2008). Numerical evaluation of sound propagating

- over green roofs. *Journal of Sound and Vibration*, 317(3–5), 781–799. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.03.025>
- Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740–752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
- Vijayaraghavan, K., and Joshi, U. M. (2014). Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. *Environmental Pollution*, 194, 121–129. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2014.07.021>
- Vijayaraghavan, K., Reddy, D. H. K., and Yun, Y. S. (2019). Improving the quality of runoff from green roofs through synergistic biosorption and phytoremediation techniques: A review. In *Sustainable Cities and Society* (Vol. 46, p. 101381). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.12.009>
- Wallach, A. D., Lundgren, E., Batavia, C., Nelson, M. P., Yanco, E., Linklater, W. L., Carroll, S. P., Celermajer, D., Brandis, K. J., Steer, J., and Ramp, D. (2020). When all life counts in conservation. *Conservation Biology*, 34(4), 997–1007. <https://doi.org/10.1111/cobi.13447>
- William, R., Goodwell, A., Richardson, M., Le, P. V. V., Kumar, P., and Stillwell, A. S. (2016). An environmental cost-benefit analysis of alternative green roofing strategies. *Ecological Engineering*, 95, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.06.091>
- Wong, N. H., Cheong, D. K. W., Yan, H., Soh, J., Ong, C. L., and Sia, A. (2003). The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*, 35(4), 353–364. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00108-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00108-1)
- Wooster, E. I. F., Fleck, R., Torpy, F., Ramp, D., and Irga, P. J. (2022). Urban green roofs promote metropolitan biodiversity: A comparative case study. *Building and Environment*, 207(PA), 108458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108458>
- Yang, J., Yu, Q., and Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, 42(31), 7266–7273. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2008.07.003>
- Zheng, X., Yang, Z., Yang, J., Tang, M., and Feng, C. (2022). An experimental study on the thermal and energy performance of self-sustaining green roofs under severe drought conditions in summer. *Energy and Buildings*, 261, 111953. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111953>
- ZinCo. (2019). *Planning Guide - Green Roof Basics*. 32. https://zinco-greenroof.com/sites/default/files/2020-04/ZinCo_Green Roof Basics.pdf

ANEXO A – ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS, CLIMA I2/V1. FONTE: (GONÇALVES E GRAÇA, 2004)

Estação	Estratégias Bioclimáticas	Sistemas Passivos	
Inverno – Estação de Aquecimento	Promover Ganhos Solares	Todos os sistemas de ganho são adequados para os tipos de edifícios mais convenientes	
	Restringir Perdas por Condução	Isolar Envolvente	
	Promover Inércia Forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior	
Verão – Estação de Aquecimento	Restringir Ganhos Solares	Sombrear Envidraçados	
	Restringir Ganhos por Condução	Isolar Envolvente	
	Ventilação	Ventilação transversal (nocturna)	
		Tubos enterrados	
Promover Inércia Forte	Paredes pesadas com isolamento pelo exterior		

ANEXO B - LOCALIZAÇÃO EM PLANTA DOS PONTOS DE MEDIÇÃO (ADAPTADO DO ITECONS)

