



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Dani Morgado Costa

**AVALIAÇÃO TEÓRICA DO
COMPORTAMENTO TÉRMICO DE
SOLUÇÕES DE COBERTURAS VERDES**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia do Ambiente
orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e pela
Doutora Maria do Rosário Dinis Moreira Fino apresentada ao
Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra**

Setembro de 2023

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

Dani Morgado Costa

AVALIAÇÃO TEÓRICA DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE SOLUÇÕES DE COBERTURAS VERDES

Theoretical Assessment of the Thermal Behavior of Green Roof Solutions

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Cidades Sustentáveis,
orientada pelo Professor Doutor Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e pela Doutora Maria do Rosário Dinis Moreira Fino.

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 2023



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

No término de uma importante etapa do meu percurso académico dirijo-me às pessoas que o marcaram, mostrando o meu agradecimento.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Nuno Simões e à Doutora Maria do Rosário Fino, pelo apoio e todo conhecimento transmitido, disponibilidade e persistência ao longo deste processo.

Ao ITeCons e aos seus funcionários que através das suas instalações, ferramentas e pessoas, conseguiram apoiar e acompanhar este trabalho.

A todos os meus colegas de curso e de outros cursos que durante todo o percurso me apoiaram e vivenciaram os melhores e piores momentos.

Aos meus pais que suportaram toda a complexidade de ter um filho no ensino superior e a morar noutra cidade. A dureza e trabalho destes anos irão, com certeza, refletir-se no futuro.

O autor agradece o apoio dado no âmbito do projeto GREENFUTURE (POCI-01-0246-FEDER-181322) financiado pelo POCI do Portugal 2020, como suporte do European Regional Development Fund (FEDER).

RESUMO

Esta dissertação de mestrado centra-se na avaliação do comportamento térmico de sistemas de coberturas verdes no contexto do design de edifícios sustentáveis. O objetivo deste estudo é avaliar a influência de diferentes parâmetros, como a espessura do isolamento térmico, a espessura do substrato e as condições climáticas. A metodologia consistiu na realização de simulações utilizando software avançado de desempenho energético de edifícios, considerando múltiplos cenários e combinações de variáveis. Foram selecionados quatro locais em Portugal com condições climáticas distintas: Bragança, Coimbra, Évora e Lisboa. As simulações foram realizadas para vários períodos de tempo, incluindo diferentes estações e dias específicos de inverno e verão.

Os resultados das simulações fornecem informações importantes sobre o desempenho térmico das coberturas verdes. A análise dos resultados de diferentes espessuras de isolamento e de substrato permite identificar as configurações com um melhor comportamento em termos de eficiência de isolamento térmico. É possível entender como o impacto quando se fazem variar as espessuras, tanto de isolamento térmico como de substrato. Desta forma é possível entender qual a camada com mais influência, no comportamento e desempenho energético. No caso, as simulações permitiram concluir que as coberturas verdes têm um impacto muito favorável no comportamento da cobertura. Apesar da camada de isolamento ser aquela que mais influência tem no desempenho, verifica-se que a camada de substrato e vegetação têm uma influência favorável que não deve ser ignorada. Além disso, investigou-se a influência de variações climáticas em diferentes regiões de Portugal no comportamento térmico das coberturas verdes. Com estas informações é possível analisar o comportamento do balanço energético, assim como as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento, para as diferentes soluções e para os diferentes climas.

Os resultados deste estudo contribuem para o conhecimento e compreensão do desempenho térmico de sistemas de coberturas verdes. Estes fornecem informações importantes para arquitetos, engenheiros e pesquisadores envolvidos no design de edifícios sustentáveis e destacam o potencial das coberturas verdes como uma estratégia eficaz para a eficiência energética e melhoria do conforto térmico.

Palavras-chave: coberturas verdes, desempenho térmico, espessura do isolamento, espessura de substrato, regiões climáticas, design de edifícios sustentáveis.

ABSTRACT

This master's dissertation focuses on evaluating the thermal performance of green roof systems in the context of sustainable building design. The aim of this study is to assess the influence of different parameters, such as thermal insulation thickness, substrate thickness, and climatic conditions. The methodology involved conducting simulations using advanced building energy performance software, considering multiple scenarios and combinations of variables. Four locations in Portugal with distinct climatic conditions were selected: Bragança, Coimbra, Évora, and Lisbon. Simulations were carried out for various time periods, including different seasons and specific days in winter and summer.

The simulation results provide important insights into the thermal performance of green roofs. Analyzing different insulation and substrate thicknesses allows for the identification of configurations with better thermal insulation efficiency. It helps understand the impact when varying the thicknesses of both thermal insulation and substrate. This way, it is possible to determine which layer has the most influence on energy performance. In this case, the simulations led to the conclusion that green roofs have a highly favorable impact on roof performance. While the insulation layer has the most significant influence on performance, the substrate and vegetation layer also have a favorable impact that should not be overlooked.

Furthermore, the study investigated the influence of climatic variations in different regions of Portugal on the thermal behavior of green roofs. With this information, it is possible to analyze the energy balance and heating and cooling energy needs for different solutions and various climates.

The results of this study contribute to the knowledge and understanding of the thermal performance of green roof systems. They provide valuable insights for architects, engineers, and researchers involved in sustainable building design and highlight the potential of green roofs as an effective strategy for energy efficiency and improved thermal comfort..

Keywords: green roof systems, thermal performance, insulation thickness, substrate composition, climatic variations, sustainable building design.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos.....	5
2 MATERIAIS E MÉTODOS	6
2.1 CASO DE ESTUDO	6
2.1.1 Propriedades	7
2.1.2 Climas	8
2.2 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO	9
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
3.1 Temperaturas exteriores nas regiões estudadas	13
3.2 Balanço energético	14
3.3 Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento	22
4 CONCLUSÕES.....	27
4.1 Principais conclusões.....	27
4.2 Trabalhos futuros.....	28

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Características técnicas de uma cobertura verde com ICB	6
Figura 2.2- Classificação climática de Köppen Geiger para: a) 1950 – 1976; b) 1990 – 2019 [23].	9
Figura 2.3 - Modelo 3D do edifício em Design Builder (condições de fronteira adiabáticas). 10	
Figura 2.4 - Balanço energético para uma cobertura vegetal [24].....	11
Figura 2.5 - Temperaturas exteriores ao longo do ano nas regiões de Lisboa, Évora, Bragança e Coimbra	13
Figura 2.6 - Balanço energético na superfície exterior do edifício num dia de verão em: a) Bragança; b) Coimbra; c) Évora; d) Lisboa.....	15
Figura 2.7 – Balanço energético na superfície exterior do edifício num dia de inverno em: a) Bragança; b) Coimbra; c) Évora; d) Lisboa.....	17
Figura 2.8 - Balanço energético anual na superfície exterior do edifício nas quatro regiões para as soluções: a) ICB 8cm + Substrato 8cm; b) ICB 14cm + Substrato 8cm.	18
Figura 2.9 - Balanço energético anual na superfície exterior do edifício para as regiões de Bragança e Évora para soluções de ICB 8cm + Substrato 8cm e apenas laje em betão.	20
Figura 2.10 - Comparação do balanço energético anual na superfície exterior do edifício na região de Lisboa, por m ² , entre as soluções: ICB 8cm + Substrato 8cm; ICB 8cm + Substrato 14cm; ICB 10cm + Substrato 14cm; ICB 14cm + Substrato 14cm.	21
Figura 2.11 - Necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais em Lisboa, Évora, Bragança e Coimbra, por m ² , para cada uma das soluções: a) ICB 8cm + Substrato 8cm; b) ICB 8cm + Substrato 14cm; c) ICB 14cm + Substrato 8cm; d) ICB 14cm + Substrato 14cm.	23
Figura 2.12 - Necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais na região de Coimbra, por m ² , para as soluções: ICB 8 cm + Substrato 8cm; ICB 8cm + Substrato 14cm; ICB 14 cm + Substrato 8cm; ICB 14cm + Substrato 14cm.	24
Figura 2.13 - Necessidades totais de energia anuais em cada uma das regiões: Lisboa, Évora, Bragança e Coimbra, por m ² , para diferentes soluções: a) necessidades de aquecimento; b) necessidades de arrefecimento.....	25
Figura 2.14 - Comparação das necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais na região de Évora, por m ² , entre as soluções: ICB 8 cm + Substrato 8cm; ICB 14cm + Substrato 14cm; XPS 8 cm + Substrato 8cm; XPS 14cm + Substrato 14cm.	26

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades das diferentes camadas da cobertura verde (Laje de referência [24]; ICB [21]; XPS [24]; substrato [22]).	7
Tabela 2.2 - Propriedades da cobertura vegetal [25].	8

Nomenclatura

L_f - fluxo de calor latente da folhagem (W/m^2)

H_f - fluxo de calor sensível à folhagem (W/m^2)

Θ_f - cobertura vegetal fracionada

ϵ_g - emissividade da superfície do solo

$I_{i\gamma}^\downarrow$ - radiação total de ondas longas recebidas (W/m^2)

K_v - constante de von Karmen (0,4)

T_g - temperatura da superfície do solo (K)

α_g - albedo (refletividade de ondas curtas) do dossel

z - altura ou profundidade (m)

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

As alterações climáticas têm um impacto significativo nas cidades, afetando diversos aspetos sociais, económicos e ambientais. Espera-se que o aumento do nível do mar, a ocorrência mais frequente de chuvas intensas e ondas de calor tenham efeitos adversos nas áreas urbanas. Isso traduzir-se-á num aumento tanto na população das cidades como na expansão das suas áreas territoriais, ao mesmo tempo em que se aumenta o risco de inundações e danos associados a esses eventos climáticos extremos [1].

O aquecimento do ar nas áreas urbanas mais densamente povoadas é resultado da combinação de dois fatores principais: o crescimento constante das áreas construídas e a presença de extensas superfícies impermeáveis, como estradas, calçadas, edifícios e coberturas. O que acontece é que essas superfícies absorvem a radiação solar ao longo do dia e, à noite, libertam essa energia sob a forma de calor. Esse calor permanece na atmosfera urbana, resultando em temperaturas mais elevadas comparando com áreas circundantes. Essa característica é conhecida como a Ilha de Calor Urbano (ICU). Cria um ambiente mais quente nas cidades, tornando-as notavelmente mais quentes do que as áreas rurais circundantes, especialmente durante a noite. Esse fenómeno tem implicações significativas na qualidade do ar, consumo de energia, conforto humano e até mesmo nos padrões climáticos locais [2].

Dado que os centros urbanos estão sujeitos aos impactos ambientais mais graves, é de extrema importância encontrar soluções para minimizar esses problemas. Nesse contexto, os edifícios desempenham um papel central. Além do consumo de energia na fase de construção, é durante a sua utilização que têm o maior impacto ambiental, especialmente no que diz respeito à energia usada para a climatização. Portanto, é essencial implementar estratégias que melhorem a eficiência térmica dos edifícios como parte da abordagem para lidar com essa questão crítica. Além disso, outras preocupações prejudiciais relacionadas aos edifícios incluem o uso de materiais de construção pouco ecológicos, como materiais não renováveis, de vida útil curta e que consomem muita energia. [3].

No contexto do avanço das práticas energéticas em edifícios, várias soluções energéticas emergem como sendo de extrema importância. A transição para fontes de energia renovável, como energia solar, eólica, hidrelétrica e geotérmica, destaca-se como fundamental. Estas fontes, devido à sua sustentabilidade e baixo impacto ambiental, têm o potencial de reduzir significativamente a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a melhoria da eficiência energética, tanto em edifícios residenciais como em instalações industriais, é uma medida de grande relevância. A utilização responsável

e eficaz de energia, juntamente com tecnologias e práticas que visam minimizar o desperdício, desempenham um papel crucial na redução do consumo de energia, tornando-se, assim, essenciais na gestão energética [4].

É cada vez mais importante adotarem-se estratégias de forma a melhorar a qualidade de vida nas cidades, aliada a uma sustentabilidade energética. Uma das soluções inteligentes que tem vindo a ser utilizada são as coberturas verdes [5]. É um conceito que foi projetado e desenvolvido para promover o crescimento de várias formas de vegetação no topo de edifícios [6]. Estabelecem um papel fundamental na resolução de problemas ambientais a nível da construção e urbano, tanto no controlo escoamento de águas pluviais, mitigação dos picos de cheia, aumento de biodiversidade, redução da pegada de carbono e integração dos edifícios nas cidades [7]. As coberturas verdes são comumente divididas em duas categorias principais: extensivas e intensivas. As coberturas verdes extensivas apresentam uma camada fina de substrato com plantio de baixo perfil, geralmente *sedum* ou relva, sendo mais leves, têm a vantagem de serem menos exigentes em termos estruturais do que as intensivas. Por outro lado, as coberturas verdes intensivas apresentam uma camada de substrato mais profunda que permite o desenvolvimento de plantas de raízes mais profundas, como arbustos e árvores [8]. Estudos feitos em diversas áreas densamente povoadas têm vindo a comprovar os benefícios do seu desempenho em diferentes climas [9] [10].

No setor da construção, as coberturas verdes apresentam-se como uma alternativa atraente para reduzir o consumo de energia por constituírem uma proteção térmica adicional aos ganhos solares [11]. Durante o verão, as coberturas verdes têm grandes vantagens pois desempenham um papel regulador do fluxo de calor através da cobertura, que é responsável por grande parte da energia absorvida pelo edifício. Isso permite que o consumo de energia necessário associado ao arrefecimento seja mais reduzido. Além disso, as coberturas verdes protegem as membranas da cobertura contra temperaturas extremas durante dias quentes e flutuações de alta temperatura, reduzindo o stress térmico [12].

Na maior parte dos estudos, o foco é na análise do desempenho térmico da construção ou nos efeitos da solução no consumo de energia do edifício. Algumas pesquisas indicam que as coberturas verdes podem não proporcionar benefícios comprovados durante a estação de aquecimento, especialmente em áreas do clima mediterrâneo [13], mas apresentam ganhos indiscutíveis na estação de arrefecimento.

Nos últimos 30 anos, os países europeus têm sido considerados como um exemplo na aplicação de coberturas verdes, destacando-se também pelo número e qualidade de pesquisas relacionadas com a adoção dessa estratégia [14]. A Alemanha tem liderado a conceção, desenvolvimento e comercialização do conceito. Através da sua iniciativa pioneira, seguida pelos países vizinhos, a popularidade deste princípio estendeu-se pelo resto do mundo. Recentemente, a área abrangida de coberturas verdes só na Alemanha aumentou cerca de 13,5 milhões de metros quadrados por ano [15].

A expansão da implementação do conceito tem sido em grande parte limitada a regiões de clima temperado no hemisfério norte. Em regiões que ainda não estão familiarizadas com as coberturas verdes, ainda existem alguns entraves para uma adoção mais ampla dessa tecnologia. Entre as barreiras existentes, destacam-se a falta de padronização, os custos elevados, a escassez de exemplos práticos que possam servir de fonte de inspiração e confiança para os empreendedores que consideram adotar a tecnologia e a falta de pesquisas relevantes que possam atestar os benefícios ambientais e económicos desse tipo de cobertura [16].

De forma a ampliar o conhecimento acerca das coberturas verdes, têm sido realizados estudos, englobando tanto experimentações práticas como simulações por meio de *software* especializado. Esses esforços visam proporcionar uma compreensão mais abrangente sobre os benefícios e as melhores práticas relacionadas a coberturas verdes. Do ponto de vista experimental, com o propósito de aprimorar a compreensão do funcionamento do sistema de cobertura verde sob condições controladas, foi desenvolvido um dispositivo em laboratório capaz de reproduzir tanto as condições ambientais externas como internas do edifício, conseguindo simular luz solar, chuva, temperatura e humidade. Estes estudos são fundamentais para fazer uma avaliação do desempenho térmico do sistema de cobertura verde e deles extrair dados experimentais relevantes [17]. Com a utilização de *software*, e de forma a verificar impactos da adoção do sistema de coberturas verdes, nomeadamente na região do Catar, Andric *et al* realizou um estudo em que utilizou a ferramenta de simulação *DesignBuilder* [18], que exhibe os efeitos energéticos que resultam de pressupostos variados dos indicadores ambientais [19]. É perceptível a importância da densidade de folhagem, que no caso de climas quentes é menor, resultando num baixo sombreamento e menor contributo para a redução do efeito de ilha de calor [18].

As coberturas verdes oferecem opções que podem ser personalizadas de forma a melhorar o desempenho térmico de edifícios e contribuir para a sustentabilidade ambiental. Existem várias formas de personalizar essas soluções, sendo uma das suas principais vantagens a flexibilidade na escolha da sua constituição. É possível, por exemplo, variar o tipo de material que constitui o isolamento térmico como é o caso do aglomerado de cortiça expandida (ICB), poliestireno extrudido (XPS), lã mineral, entre outros. Cada material tem as suas próprias propriedades de isolamento e características quanto ao desempenho térmico.

A solução de cobertura verde utilizando isolamento térmico à base de cortiça expandida (ICB) foi já alvo de diversos estudos realizados pela Universidade de Coimbra. Num dos estudos foi implementado um modelo, como mostra a Figura 1.1, de forma a simular um sistema de cobertura verde inserido numa câmara climática e onde se analisou o impacto que o ICB e o substrato têm quando se encontram saturados, no que diz respeito aos fluxos de calor [20].

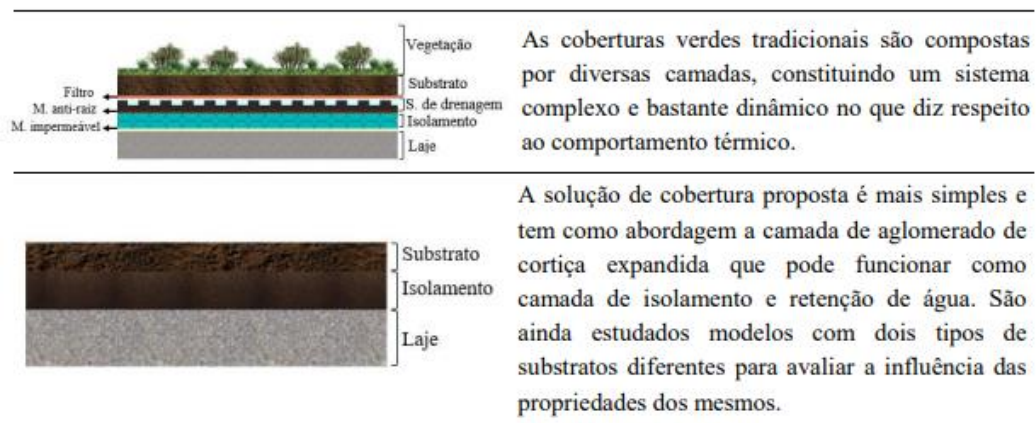


Figura 1.1 - Comparação de abordagem tradicional de coberturas verdes e a solução abordada no referido estudo [20].

Noutro estudo foi analisada de forma experimental a capacidade drenante do ICB, verificando-se o seu desempenho tanto na drenagem como na retenção de água proveniente da precipitação, utilizando placas de aglomerado de cortiça com diferentes espessuras e densidades [3]. Ainda noutro estudo foi analisado o comportamento do ICB em paredes exteriores sem revestimento, onde se realizaram testes em laboratório utilizando amostras do material e do sistema, e onde foi feita também modelação, utilizando soluções analíticas e modelos numéricos [21]. Na Figura 1.2 é ilustrado o modelo de uma dessas paredes que foi alvo de estudo.

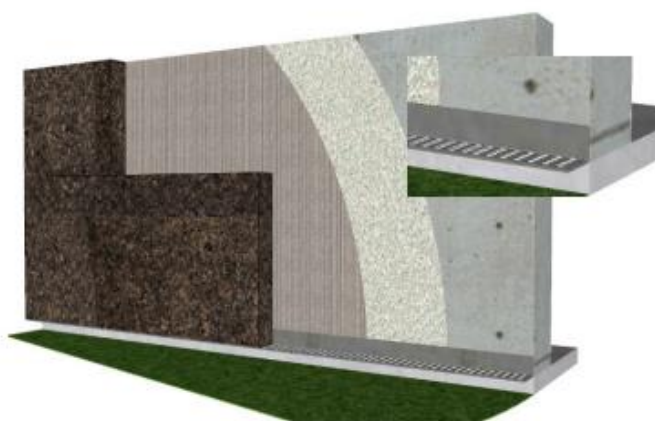


Figura 1.2 - Ilustração do perfil da parede no referido estudo [21].

Estes trabalhos demonstram a viabilidade técnica destas soluções, comprovando as vantagens do uso do ICB nos sistemas de coberturas verdes. Uma vez que existe essa viabilidade, interessa estudar os impactos que estas soluções têm nos edifícios, devendo-se procurar ferramentas que auxiliem esses estudos e levar a cabo simulações e estudos de sensibilidade.

1.2 Objetivos

Como foi dito, a solução de cobertura utilizando ICB como isolamento térmico, foi já alvo de diversos estudos, tendo sido vista como uma possibilidade na configuração deste sistema.

Neste trabalho, é utilizado o *software* de simulação *DesignBuilder*, para analisar a forma como diferentes configurações de coberturas verdes afetam o desempenho térmico de edifícios, com a finalidade de fornecer informações importantes para a construção de edifícios mais eficientes em termos energéticos. Ao longo deste estudo, analisa-se o impacto das camadas de isolamento e substrato nas necessidades de aquecimento e arrefecimento, bem como os balanços energéticos anuais em diversas regiões climáticas de Portugal. Com base em simulações feitas para diferentes soluções, são analisadas as variações de comportamento térmico em dias de verão e inverno. Além disso, utilizando as propriedades que constituem o isolamento térmico à base de aglomerado de cortiça expandida (ICB), do substrato e da cobertura vegetal, identifica-se o papel que estes desempenham na eficiência energética de coberturas verdes. Faz-se também uma comparação entre a utilização de ICB e de XPS (poliestireno extrudido) como opção de isolamento térmico.

Ao utilizar-se a ferramenta *DesignBuilder* para realizar este estudo, aproveita-se uma vantagem significativa, uma vez que este software é o tipo de ferramenta utilizado por profissionais para simulações de edifícios. Tem-se como objetivo uma análise mais aprofundada das estratégias eficazes para otimizar a eficiência energética e a sustentabilidade dos edifícios utilizando coberturas verdes como solução construtiva.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta secção apresenta a forma como foi realizado o estudo tendo por objetivo avaliar o comportamento térmico de um sistema de cobertura verde ao longo do ano, abrangendo diferentes estações e condições climáticas específicas de diversas regiões de Portugal. Essas simulações permitem uma análise detalhada das interações entre as camadas que constituem um sistema de cobertura verde e uma compreensão de como afetam o desempenho térmico geral do sistema. Além disso, as simulações permitem uma avaliação abrangente e comparativa dos resultados em diferentes regiões, fornecendo informações que possibilitam entender a influência que as diferentes camadas têm no comportamento térmico das coberturas verdes em cada região específica.

2.1 CASO DE ESTUDO

O sistema em análise trata-se de uma cobertura verde que apresenta múltiplas camadas, como se apresenta na

Figura 2.1. A estrutura é constituída por uma laje de betão armado, seguida por uma camada de isolamento térmico à base de aglomerado de cortiça expandida (ICB) de espessura variável, e sobre ela está o substrato, também com diferentes espessuras testadas. Por fim, a vegetação pré-desenvolvida completa o sistema.



Figura 2.1 - Características de uma cobertura verde com ICB

Com o objetivo de compreender a influência das diversas camadas, considerou-se a variação da espessura do ICB entre 8, 10 e 14 centímetros. Assim como espessuras de substrato a variar

entre 8, 10 e 14 centímetros. As espessuras utilizadas nestas simulações foram predefinidas tendo por base um projeto denominado *GreenFuture* desenvolvido pelo Itecons, que estabelece como objetivo agregar e difundir informações importantes sobre sistemas de coberturas verdes assim como de fachadas verdes [22]. A revisão bibliográfica desse projeto estabeleceu esses parâmetros. A espessura mínima de 8 cm está diretamente relacionada com requisitos regulamentares mínimos que devem ser cumpridos [23]. Esta abordagem permitiu analisar de forma detalhada a interação entre as camadas e o seu impacto no comportamento térmico do sistema de cobertura verde. Ao analisar diferentes combinações de espessura de ICB e de substrato, é possível informações importantes relacionadas com o desempenho térmico dos edifícios.

2.1.1 Propriedades

Nesta seção, discutem-se as propriedades fundamentais dos materiais e elementos que constituem os sistemas de cobertura verde estudados. Nessa análise, é possível compreender as características que desempenham um papel crucial no comportamento térmico e desempenho global dessas soluções. A investigação destas propriedades permitirá uma visão mais clara das interações entre os diferentes componentes, assim como a sua influência nas necessidades de aquecimento, arrefecimento e no balanço energético anual. Ao abordar as propriedades dos materiais, é possível identificar as melhores abordagens na criação de sistemas de coberturas verdes.

A Tabela 2.1 compila as propriedades essenciais que serviram como dados de entrada no software de simulação das diferentes camadas, como a laje em betão, os dois tipos de isolamento térmico que foram alvo de estudo, ICB (isolamento térmico à base de aglomerado de cortiça) e XPS (poliestireno extrudido), e também a camada de substrato.

Tabela 2.1 - Propriedades das diferentes camadas da cobertura verde (Laje de referência [24]; ICB [21]; XPS [24]; substrato [22]).

	Condutividade térmica (W/mK)	Espessura (m)	Massa volúmica (Kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)
Laje de referência	2.00	0.200	2350	1000
ICB	0.045	0.08-0.140	156	1530
XPS	0.037	0.08-0.140	34	1470
Substrato	0.246	0.08-0.140	675	1658

Além disso, foram estabelecidas as propriedades da vegetação com base noutros trabalhos e na informação disponibilizada pelo próprio *software*, que constam na Tabela 2.2. A definição destas propriedades é incontornável para que seja possível a realização de simulações do sistema de cobertura verde.

Tabela 2.2 - Propriedades da cobertura vegetal [25].

Propriedades Cobertura Vegetal	Valor
Altura das Plantas (m)	0.10
Índice Área Foliar	2.7
Refletividade da Folha	0.22
Emissividade da Folha	0.95
Resistência Estomática Mínima	180
Teor máximo de humidade volumétrica de saturação	0.5
Teor mínimo de humidade volumétrica residual	0.01
Teor de humidade volumétrica inicial	0.15

2.1.2 Climas

Na escolha dos locais, teve-se em consideração a classificação climática de Köppen e Geiger (KG). Esta utiliza a precipitação total mensal e anual assim como a temperatura mensal próxima à superfície para identificar o tipo de clima de uma determinada região. Divide o mundo em 5 zonas primárias: tropical, árida, temperada, boreal e polar [26]. Existem também 30 subclasses com base nos elementos de calor e aridez [27]. Dentro de cada tipo climático, é utilizado um código composto por letras maiúsculas e minúsculas, que representa as diferentes combinações de tipos e subtipos climáticos. No contexto de Portugal, e como apresentado na Figura 2.2, de acordo com a classificação de Köppen e Geiger, o clima predominante é maioritariamente do tipo C, com o subtipo Cs, que se refere a um clima temperado com verão seco. Além disso, existem variações como o clima Csa, que é caracterizado por um verão quente e seco, e o clima Csb, que apresenta um verão seco e suave, acrescentando maior especificidade às características climáticas do país [28]. Adicionalmente, foram utilizadas as zonas climáticas definidas no Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios que define três zonas para cada estação (I1, I2 e I3, para o inverno, e V1, V2 e V3, para o verão) [29].

Com o intuito de investigar e compreender a influência das distintas zonas climáticas no comportamento térmico dos sistemas de coberturas verdes, foram realizadas simulações em

quatro localizações distintas em Portugal: Bragança (Csb e I3V2), Coimbra (Csb e I2V2), Évora (Csa e I1V3) e Lisboa (Csa e I1V2). Essa abordagem permitiu obter uma visão mais abrangente dos efeitos climáticos, proporcionando uma análise aprofundada do desempenho térmico das coberturas verdes em diversos contextos climáticos. Ao considerar essas quatro localizações geográficas, é possível perceber as particularidades dos climas locais e identificar padrões e tendências relevantes para a aplicação e otimização de sistemas de cobertura verde em cada região.

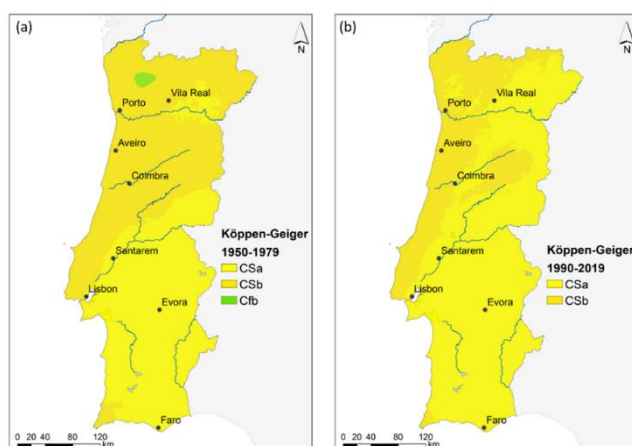


Figura 2.2- Classificação climática de Köppen Geiger para: a) 1950 – 1976; b) 1990 – 2019 [30].

2.2 FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

O estudo foi realizado para um edifício, com condições em que as paredes e laje de pavimento foram consideradas como adiabáticas e utilizando o software de simulação *Design Builder* como ferramenta principal. O *Design Builder* é uma interface gráfica do *Energy Plus*. É um programa de simulação numérica que permite avaliar o desempenho de edifícios em várias áreas, como a eficiência energética, conforto, sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC), iluminação natural, custo e otimização de projeto. Permite simular diferentes estratégias e configurações de projeto, sendo possível tomar decisões durante o processo de projeto. Dessa forma, podem-se explorar diversos cenários e selecionar as opções mais eficientes e sustentáveis.

Além das funcionalidades mencionadas, o *Design Builder* também oferece recursos específicos que podem auxiliar na avaliação e otimização de coberturas verdes. Ao analisar o desempenho de coberturas verdes, a ferramenta pode fornecer informações sobre o comportamento térmico, eficiência energética e conforto térmico do sistema. O *Design Builder* permite, por exemplo,

simular o impacto das camadas constituintes da cobertura verde, como o isolamento térmico e o substrato, em diferentes condições climáticas. Isto permite compreender como é que as variações nas espessuras destas camadas podem influenciar a eficiência energética do sistema e o conforto térmico dentro do edifício.

Com base nestas análises, é possível tomar decisões ponderadas sobre o design da cobertura verde, ajustando parâmetros como espessuras das camadas, tipos de isolamento térmico e vegetação escolhida. Desta forma, o *Design Builder* torna-se uma ferramenta valiosa para otimizar o desempenho térmico e energético de coberturas verdes, garantindo uma solução sustentável e eficiente para o edifício. A Figura 2.3 mostra o modelo 3D do edifício que foi utilizado nas simulações.

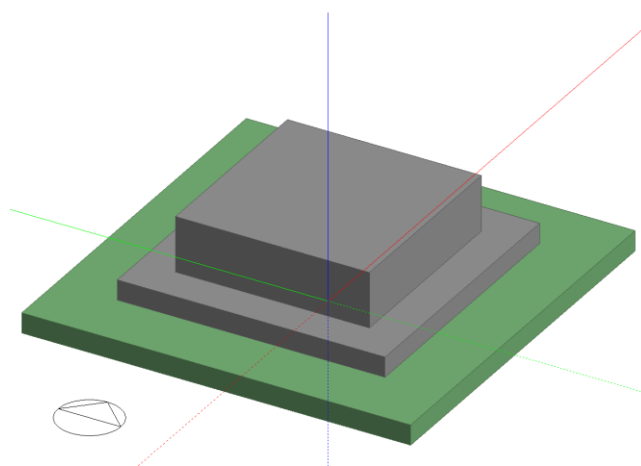


Figura 2.3 - Modelo 3D do edifício em Design Builder (condições de fronteira adiabáticas: paredes e laje de pavimento).

Após a implementação do modelo geográfico do edifício no *Design Builder*, foram incorporados no software os ficheiros climáticos de referência de cada uma das regiões analisadas. Esses ficheiros climáticos, obtidos na ferramenta “SCE-CLIMA (v1.0)” [31], disponibilizados pela Direção Geral de Energia e Geologia. Estes fornecem os dados de entrada necessários para a ferramenta de simulação, possibilitando a avaliação do comportamento térmico do sistema de cobertura verde em cada uma das regiões consideradas.

De uma forma mais pormenorizada, no *EnergyPlus*, foi incorporado um recurso chamado "Cobertura Verde" que possibilita criar coberturas verdes nas construções. Este processo é realizado através da utilização de um objeto denominado "Material:RoofVegetation". Esse objeto permite que se defina uma camada exterior de "Ecoroof" para a cobertura. Com o "Material:RoofVegetation", é possível especificar várias características relacionadas com a construção da cobertura verde. São incluídos parâmetros como a profundidade do solo para o crescimento das plantas, propriedades térmicas desse solo, densidade da vegetação no topo da

cobertura, altura das plantas, a capacidade das plantas liberarem humidade (conhecida como condutância estomática) e as condições de humidade do solo, inclusive se há irrigação envolvida [32].

Assim, como acontece numa cobertura convencional, a interação energética de uma cobertura verde é maioritariamente influenciada pela radiação solar. A energia proveniente do sol é equilibrada pela transferência de calor através da convecção sensível (fluxo de ar aquecido) e da evaporação (humidade evaporativa) das superfícies do solo e das plantas. Além disso, ocorre também a condução de calor em direção ao substrato do solo [32]. Esse processo de equilíbrio energético é visualizado na Figura 2.4.

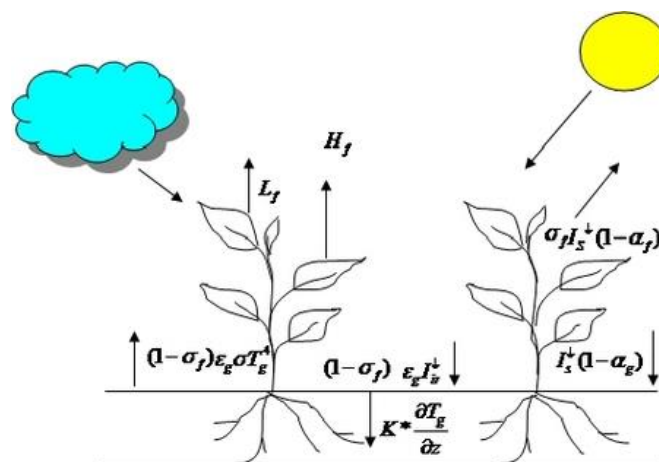


Figura 2.4 - Balanço energético para uma cobertura vegetal [32].

A Figura 2.4 apresenta um modelo de cobertura verde e o seu balanço energético, destacando os processos que influenciam o comportamento térmico do sistema. O balanço energético é uma representação das trocas de energia que ocorrem entre a cobertura verde e o ambiente envolvente. As principais variáveis e equações a que este modelo estão associadas incluem o calor sensível (convecção), o calor latente (evaporação), a radiação solar absorvida, a radiação refletida, a condução de calor no solo entre outras trocas de energia. Desta forma, é possível ter-se uma perceção da forma como a energia é transferida entre uma cobertura verde e o que a rodeia, incluindo também a folhagem das plantas e o solo.

O *EnergyPlus* utiliza equações de transferência de calor e correlações empíricas para fazer a modelação de coberturas verdes. O calor transfere-se através das camadas da cobertura verde principalmente por condução, que é calculada usando a Lei de Fourier. O programa também leva em conta a forma como o calor é transferido nas fronteiras entre as camadas, incluindo condução e radiação. Um aspeto importante das coberturas verdes é a evapotranspiração, que corresponde à perda de água por evaporação do solo e transpiração das plantas. Este processo ajuda a arrefecer a superfície da cobertura. O programa utiliza também informações como

radiação solar, temperatura do ar e humidade para calcular o efeito de arrefecimento. O ambiente externo, como a radiação solar e a temperatura, afeta a cobertura verde, assim como os ganhos internos de calor do edifício, como iluminação e equipamentos. O programa também considera a movimentação de humidade na cobertura verde, incluindo a infiltração de água da chuva e a evapotranspiração.

O *EnergyPlus* integra todas essas informações para calcular o balanço energético geral das coberturas verdes, incluindo os ganhos solares, as perdas de calor, os efeitos de arrefecimento por evapotranspiração entre outros processos de transferência de calor. Para fazer a modelação de uma cobertura verde com precisão são necessários os dados já mencionados sobre os materiais, clima, plantas e sistemas do edifício. Desta forma utiliza-se a documentação oficial do *EnergyPlus* para garantir que os resultados sejam interpretados corretamente [33].

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção são apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas para interpretar o comportamento energético dos sistemas de cobertura verde em diferentes regiões de Portugal. Como mencionado anteriormente, o objetivo principal deste estudo foi compreender a influência das diversas camadas que constituem uma cobertura verde e perceber a influência das diferentes regiões climáticas no desempenho energético desses sistemas.

3.1 Temperaturas exteriores nas regiões estudadas

De forma a compreender as variações térmicas nas quatro regiões estudadas, a Figura 3.1 mostra as flutuações das temperaturas ao longo do ano. É possível ter uma visão do comportamento climático em Bragança, Coimbra, Évora e Lisboa, permitindo uma análise comparativa das diferentes oscilações sazonais de temperatura que caracterizam essas localidades.

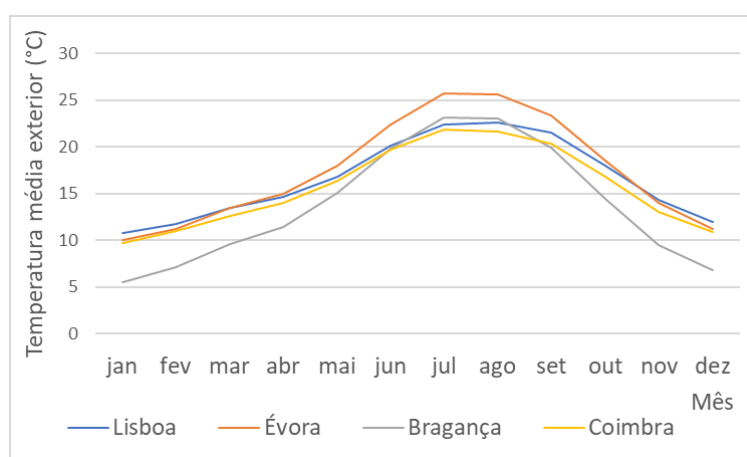


Figura 3.1 - Temperaturas médias exteriores ao longo do ano nas regiões de Lisboa, Évora, Bragança e Coimbra

Como seria de esperar, nos meses da estação verão é quando as temperaturas exteriores são mais significativas. Estas informações térmicas permitem interpretar os resultados relacionados com o desempenho térmico das soluções de cobertura verde nessas regiões, possibilitando uma melhor compreensão da forma como estes sistemas interagem com as condições climáticas específicas de cada local.

De forma a ter-se uma melhor perceção das temperaturas que são alcançadas nas regiões estudadas, tanto no verão como no inverno, na Figura 3.2, são apresentados os dias com a temperatura média mais alta e mais baixa para Coimbra, Lisboa, Évora e Bragança.

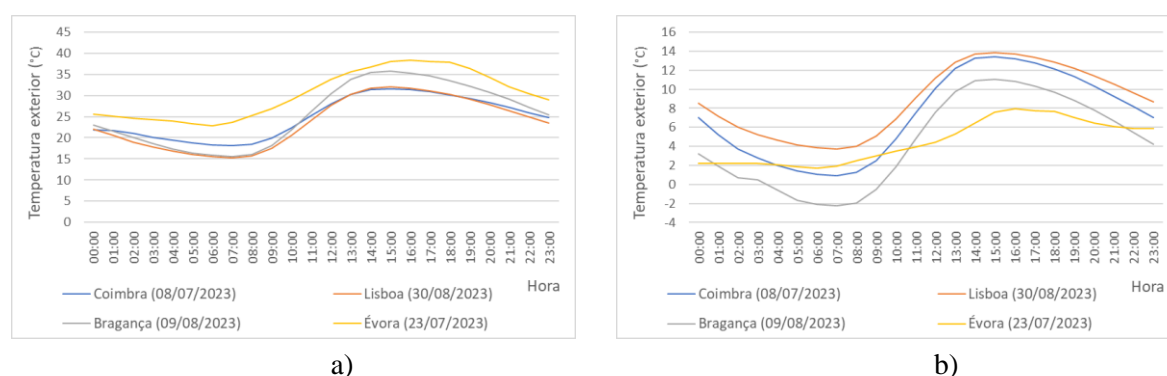


Figura 3.2 - Temperaturas exteriores ao longo do dia do ano a) com temperatura média mais alta b) com temperatura média mais baixa, na regiões de Coimbra, Lisboa, Bragança e Évora.

O comportamento das temperaturas exteriores ao longo do dia verifica, de um modo geral, ser semelhante, para as quatro regiões estudadas. Analisando o dia com a temperatura média mais alta de cada um dos locais, a região de Évora demonstra ter temperaturas exteriores mais elevadas ao longo do dia, com o pico de temperatura durante a tarde, atingindo praticamente os 40°C. Fazendo uma análise do dia com a temperatura média mais baixa para cada uma das regiões, Bragança é a que regista temperaturas inferiores, sendo estas na ordem dos -2°C. Desta forma é possível perceber qual o comportamento da temperatura exterior ao longo do dia nas regiões estudadas, verificando em que períodos existem maiores e menores temperaturas, assim como quais as épocas do ano que registam temperaturas mais e menos elevadas.

3.2 Balanço energético

Foram realizadas simulações para um dia de verão e um dia de inverno em cada uma das regiões portuguesas selecionadas: Bragança, Coimbra, Évora e Lisboa. Para cada região foi identificado do respetivo ficheiro climático o dia mais quente e o dia mais frio do ano. O objetivo foi analisar o comportamento do balanço energético na superfície exterior do edifício, comparando diferentes cenários.

No balanço energético na superfície exterior, valores negativos indicam perdas de energia para o ambiente exterior, enquanto valores positivos correspondem a ganhos de energia para o ambiente interior.

No exemplo de um dia de verão, como mostra a Figura 3.3, as simulações revelam diferenças significativas entre os três cenários analisados.

Observa-se, na referida figura, que o balanço energético na superfície exterior, quando há apenas uma laje de betão sem qualquer isolamento, apresenta um comportamento sinusoidal função da temperatura exterior, com variações acentuadas e atinge mesmo valores negativos durante o período noturno em três das regiões analisadas. Verifica-se um pico evidenciado ao final da tarde, resultado atribuído à intensa incidência solar durante esse período do dia. As regiões de Évora e Coimbra são aquelas que exibem os picos de balanço energético mais acentuados na superfície exterior do edifício, indicando variações significativas de ganho e perda de energia ao longo do dia. Em contraste, na região de Lisboa, a diferença entre perdas e ganhos energéticos é menor, graças à sua proximidade ao mar, onde as temperaturas são mais contantes. Isso leva a uma maior estabilidade no balanço energético ao longo do dia.

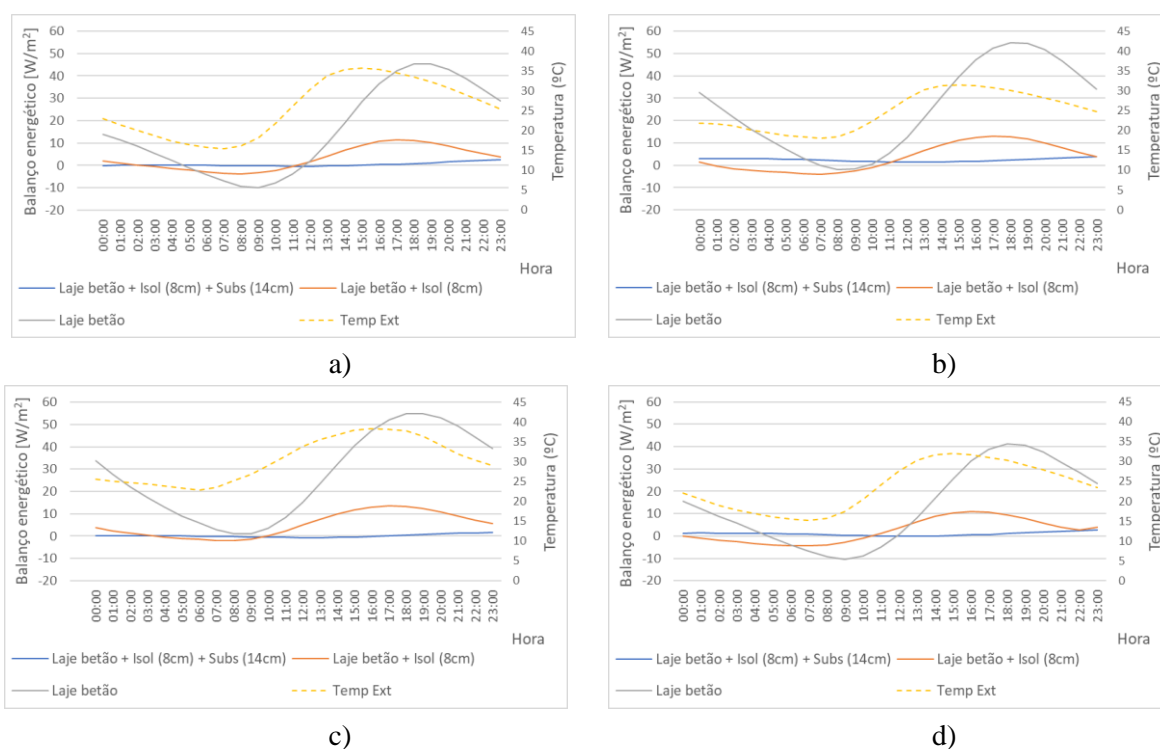


Figura 3.3 - Balanço energético na superfície exterior do edifício num dia de verão em: a) Bragança; b) Coimbra; c) Évora; d) Lisboa.

Por outro lado, quando a laje possui um isolamento térmico em ICB com 8 cm, o balanço energético, embora apresente ainda um comportamento sinusoidal, a amplitude é consideravelmente inferior. As perdas de calor durante a noite são reduzidas, resultando num balanço energético mais estável na superfície exterior. Além disso, o pico acentuado no balanço energético no final da tarde é atenuado, pois o isolamento térmico ajuda a limitar a transmissão de calor do ambiente externo para o interior do edifício.

No caso da solução de cobertura verde com 8 cm de ICB e substrato de 14 cm, em que se inclui a cobertura vegetal, será de destacar o balanço energético quase constante ao longo de todo o período em análise. O isolamento adicional proporcionado pelo substrato e pela cobertura vegetal contribui para uma redução significativa das perdas de calor durante a noite, garantindo balanço energético mais estável na superfície exterior do edifício. Adicionalmente, o substrato age como uma camada de amortecimento térmico, suavizando a incidência direta da radiação solar durante a tarde e, conseqüentemente, diminuindo os picos de ganhos de calor nesse período. Neste caso, nas quatro regiões estudadas, o balanço térmico é praticamente nulo durante todo o dia.

Observa-se a presença de um desfasamento temporal entre as variações de temperatura e as mudanças no balanço energético. Ou seja, as flutuações na temperatura não se traduzem numa variação instantânea nos ganhos ou perdas de energia. Isto ocorre pelo facto dos materiais possuírem inércia térmica, o que significa que levam algum tempo para absorver e libertar energia em resposta às variações de temperatura.

Em síntese, regista-se uma amplitude no balanço energético da laje de referência de cerca de 55 W/m^2 , que se reduz praticamente para $1/5$ quando se adicionam 8cm de isolamento térmico. Conforme referido, ao acrescentar-se ainda 14cm de substrato e a vegetação, consegue reduzir-se a amplitude de balanço praticamente a zero.

Conclui-se que a conjugação dos efeitos das camadas de isolamento, substrato e vegetação permite uma melhoria substancial do comportamento térmico. Conclui-se também que a capacidade isolante do isolamento térmico ditada pela baixa condutibilidade térmica do material, a capacidade térmica do conjunto, resultante da conjugação das propriedades condutibilidade térmica, calor específico e massa volúmica e as características da vegetação com impacto em fenómenos como a evapotranspiração, se conjugam de tal modo que o comportamento na estação de arrefecimento é muito favorável. A solução revela uma boa resposta às solicitações dinâmicas a que são sujeitas as coberturas.

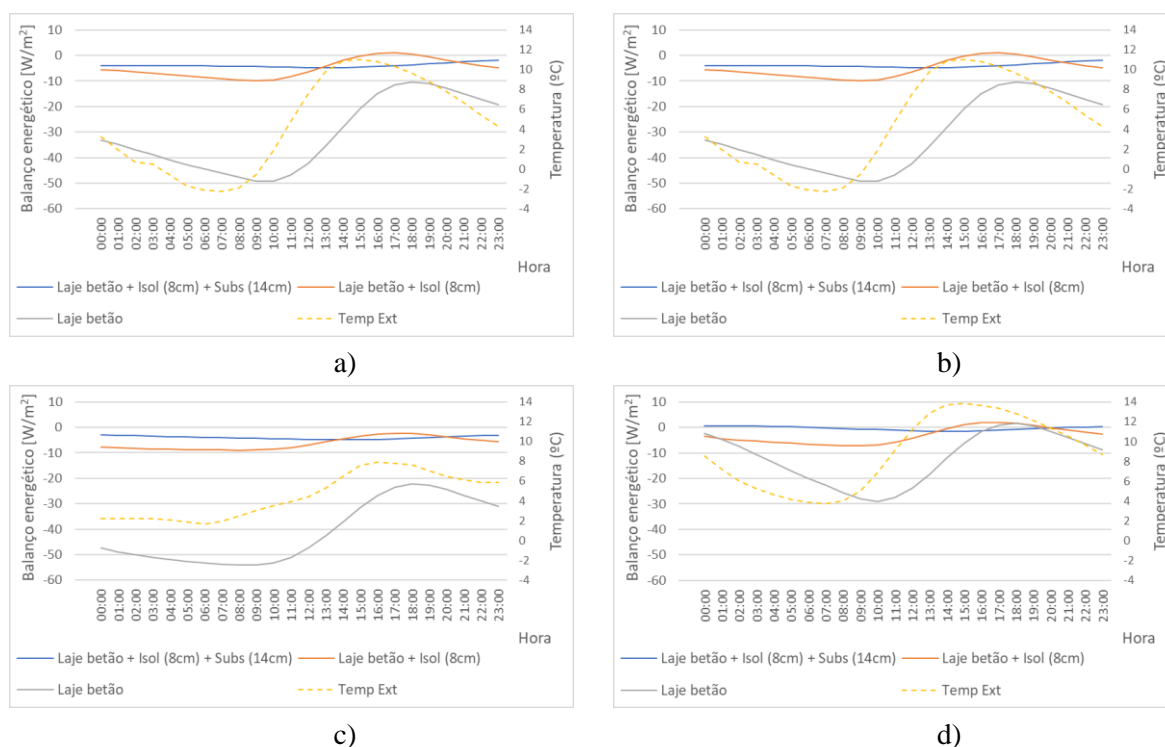


Figura 3.4 – Balanço energético na superfície exterior do edifício num dia de inverno em: a) Bragança; b) Coimbra; c) Évora; d) Lisboa.

A Figura 3.4, apresenta o caso de um dia de inverno onde também são evidentes as diferenças entre as três soluções analisadas. Durante esse período, as variações de balanço energético entre as soluções tornam-se mais perceptíveis, impactando diretamente no desempenho térmico do edifício.

Ao analisar-se a solução com apenas uma laje de betão, observa-se um comportamento sinusoidal do balanço energético, com significativas perdas de calor ao longo da noite e da madrugada. Durante o período diurno as perdas diminuem de forma significativa. Em Évora, Coimbra e Bragança não chegam a atingir valores positivos, ou seja, há sempre perdas de calor. No entanto, no caso de Évora, as perdas são significativamente mais elevadas. A laje desprovida de isolamento não é capaz de reter o calor interno do edifício, resultando num balanço mais negativo na superfície exterior durante o inverno. Em Lisboa, durante o período diurno, aproximadamente entre as 15h00 e as 19h00, verificam-se até mesmo ganhos energéticos.

Já na solução com isolamento térmico em ICB com 8 cm, observa-se uma notável melhoria no balanço energético durante um dia de inverno. A variação sinusoidal é de baixa amplitude, para todos os casos em análise, sendo, no entanto, de destacar a baixa amplitude registadas em Bragança e Évora. O ICB atua como uma barreira eficaz contra a perda de calor, reduzindo as

trocadas indesejadas de energia entre o interior e o exterior do edifício. Durante a madrugada, o isolamento contribui para reter o calor interno, resultando em menores perdas energéticas. Por outro lado, a incidência solar durante o dia provoca um aumento significativo no balanço energético na superfície exterior, mesmo com a presença do isolamento térmico.

A solução de cobertura verde com um substrato de 14 cm e cobertura vegetal destaca-se como a opção mais eficiente em termos de desempenho energético durante um dia de inverno. Nesta configuração, o substrato atua como uma camada adicional de isolamento térmico, contribuindo para a redução das perdas de calor durante a madrugada e controlar a temperatura durante o dia. A cobertura verde também oferece a vantagem de minimizar os picos de balanço energético causados pela incidência solar, mantendo a superfície exterior com um balanço energético mais equilibrado ao longo do dia. A variação, ao longo de um período de 24h, é muito reduzida. Este comportamento é semelhante nas quatro regiões estudadas.

Para compreender a importância da espessura do ICB, realizou-se uma comparação do balanço energético anual na superfície exterior da solução de ICB com 8cm de espessura e substrato de 8cm, com cobertura vegetal e da solução com 14cm de ICB e 8cm de substrato, com cobertura vegetal, para as quatro regiões estudadas, a qual se encontra ilustrada na Figura 3.5.

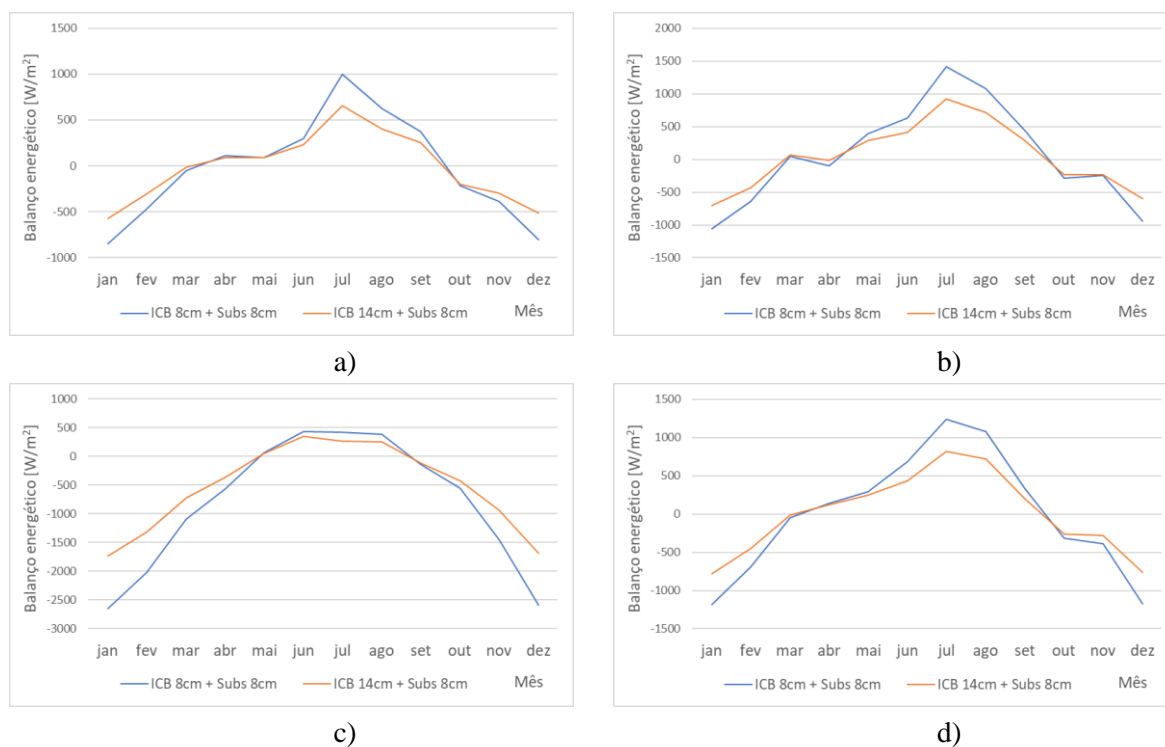


Figura 3.5 - Comparação do balanço energético anual na superfície exterior do edifício nas soluções de ICB 8cm + Substrato 8cm e ICB 14cm + Substrato 8cm, para as quatro regiões: a) Lisboa; b) Évora; c) Bragança; d) Coimbra.

Os resultados mostram que, como expectável, o comportamento do balanço energético na superfície exterior apresenta variações significativas ao longo do ano em todas as regiões estudadas. Será de destacar a região de Bragança, em que se observa, para as 2 soluções em análise, um balanço energético mais desfavorável, com maiores perdas de energia ao longo do ano, especialmente nos meses de inverno. Como resultado, o balanço energético nessa região permanece negativo durante praticamente todo o ano.

Em contrapartida, na região de Lisboa, para ambas as soluções, é notório um balanço energético mais equilibrado. A presença de isolamento térmico contribui para reter eficientemente o calor interno do edifício, minimizando as perdas de energia nos meses de inverno. Embora a incidência solar dos meses de verão cause flutuações no balanço energético, o resultado geral é menos pronunciado do que nas regiões mais frias.

As regiões de Coimbra e Évora, que apresentam um comportamento semelhante entre si ao longo de todo o ano, verificam os maiores ganhos durante o período de Verão. Durante esse período específico, os picos no balanço energético são mais pronunciados nessas duas regiões, evidenciando a influência significativa da incidência solar intensa e das altas temperaturas durante o verão nessas áreas específicas.

Estes resultados indicam que o desempenho energético das soluções é fortemente influenciado pelo clima específico de cada região. Nas regiões mais frias, o isolamento térmico é crucial para minimizar as perdas de calor e melhorar o balanço energético anual. Por outro lado, em regiões mais quentes, a presença do isolamento também desempenha um papel importante, garantindo uma maior estabilidade energética ao longo do ano.

Por outro lado, as diferenças entre as duas soluções demonstram como a espessura de ICB impacta diretamente no comportamento energético da cobertura verde. A solução com ICB de 14 cm mostra ter um balanço mais equilibrado, demonstrando contribuir para um melhor conforto térmico e uma maior eficiência energética do edifício. Nos meses de inverno, a redução de perdas energéticas chega a valores de 65% comparando a solução com ICB de 8 cm e a solução que contém 14 cm de ICB. Assim como nos meses de verão, a redução de ganhos energéticos anda também na ordem dos 65%.

O balanço energético anual na superfície exterior do edifício foi analisado para duas diferentes soluções construtivas nas regiões de Bragança e Évora, como demonstra a Figura 3.6.

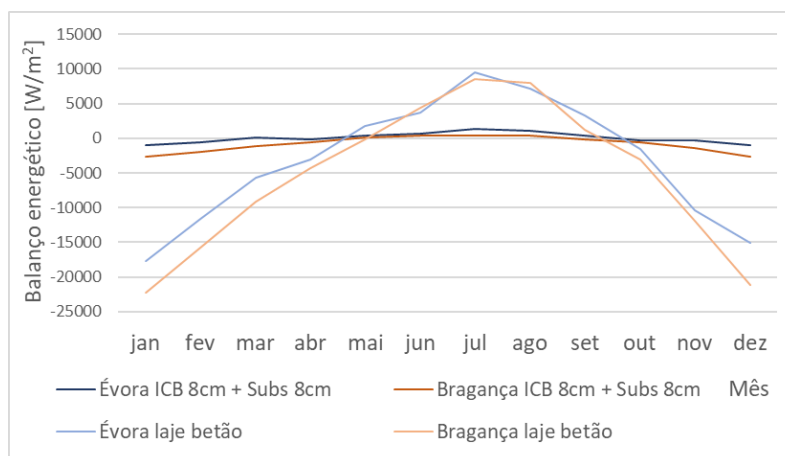


Figura 3.6 - Balanço energético anual na superfície exterior do edifício para as regiões de Bragança e Évora para soluções de ICB 8cm + Substrato 8cm e apenas laje em betão.

As soluções estudadas foram a de ICB com 8 cm de espessura, combinado com substrato de 8 cm de espessura e cobertura vegetal, e a que apresenta apenas a laje em betão sem nenhum isolamento adicional. Ao comparar essas duas soluções, observa-se que o balanço energético ao longo de todo o ano apresenta variações significativas, de 1 ordem de grandeza, entre as duas soluções.

Na região de Bragança, caracterizada por um clima mais frio, a solução com ICB e substrato mostrou um balanço energético mais equilibrado ao longo do ano, comparativamente com a opção de existir apenas uma laje em betão. Esse isolamento térmico adicional ajudou a reter o calor interno do edifício, reduzindo as perdas energéticas para o ambiente externo, especialmente durante os meses mais frios. Consequentemente, o edifício manteve temperaturas mais estáveis ao longo das estações.

Por outro lado, na região de Évora, onde o clima é mais quente e com verões intensos, a solução com ICB e substrato também revelou vantagens significativas, tendo por comparação a existência apenas de uma laje em betão. O isolamento térmico proporcionou uma melhor regulação das trocas de energia, evitando picos tão acentuados no balanço energético durante os meses de verão, quando a incidência solar é mais intensa. Dessa forma, o edifício conseguiu manter-se mais fresco e confortável, contribuindo para um ambiente interno mais agradável.

A solução tem uma importância maior do que o clima, em particular na estação de arrefecimento, ou seja, quando a solução se trata de uma cobertura verde completa, tem resultados muitos semelhantes para os diferentes climas analisados.

Na Figura 3.7 é efetuada uma comparação do balanço energético anual na superfície exterior do edifício na região de Lisboa para diferentes soluções de cobertura verde. Foram comparadas algumas soluções, ICB 8 cm + Substrato 8 cm; ICB 8 cm + Substrato 14 cm; ICB 10 cm +

Substrato 14 cm; ICB 14 cm + Substrato 14 cm, a que acresce a cobertura vegetal, onde se observam variações significativas nos valores do balanço energético ao longo do ano.

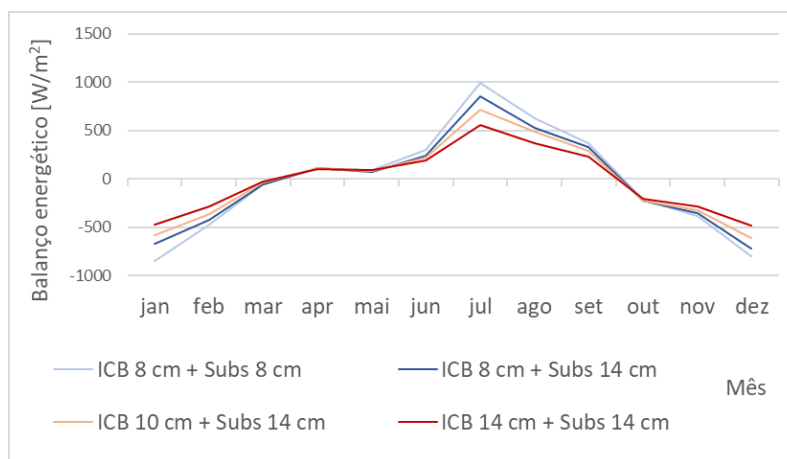


Figura 3.7 - Comparação do balanço energético anual na superfície exterior do edifício na região de Lisboa, por m^2 , entre as soluções: ICB 8cm + Substrato 8cm; ICB 8cm + Substrato 14cm; ICB 10cm + Substrato 14cm; ICB 14cm + Substrato 14cm.

A integração de substratos com mais espessura, tende a resultar em valores de balanço energético de menor amplitude. Isso indica, mais uma vez, que essas configurações oferecem um melhor isolamento térmico. Também é evidente o contributo positivo do isolamento térmico, pois a solução com ICB de 10 cm e substrato de 14 cm, com cobertura vegetal, tem um impacto mais positivo do que a solução com ICB de 8 cm e substrato de 14 cm, com cobertura vegetal. É possível, desta forma, verificar que o isolamento térmico tem um impacto mais positivo em relação ao substrato. Verifica-se também que é nos meses de verão e nos de inverno que estas camadas demonstram maior eficácia. Nas estações intermédias as perdas/ganhos são muito semelhantes entre si para as 4 soluções em análise. É demonstrado, novamente, que a solução com melhor desempenho térmico é constituída por ICB de 14 cm e substrato de 14 cm. Esta combinação, entre as que foram estudadas, otimiza a eficiência energética do edifício, reduzindo assim o consumo de energia.

3.3 Necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento

Como apresentado na Figura 3.8, foram analisadas as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento do edifício em cada uma das quatro regiões climáticas, juntamente com a avaliação das diferentes soluções de cobertura verde, mencionadas anteriormente. Neste contexto, realizaram-se estudos detalhados para compreender como as variações climáticas afetam as necessidades energéticas do edifício, considerando também o impacto das diferentes configurações de cobertura verde. Ao examinar os dados das simulações, é possível obter uma visão abrangente sobre como as diferentes soluções de cobertura verde podem influenciar as necessidades de aquecimento e arrefecimento ao longo do ano, oferecendo oportunidades significativas para otimizar a eficiência energética dos edifícios em diferentes contextos climáticos.

As necessidades de aquecimento representam a quantidade de energia necessária para manter o edifício aquecido durante a estação de inverno, enquanto as necessidades de arrefecimento indicam a quantidade de energia necessária para manter o edifício arrefecido durante a estação de verão. As temperaturas de conforto definidas foram de 18°C para a estação de aquecimento e de 25°C para a estação de arrefecimento, como estabelecido no Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios [29].

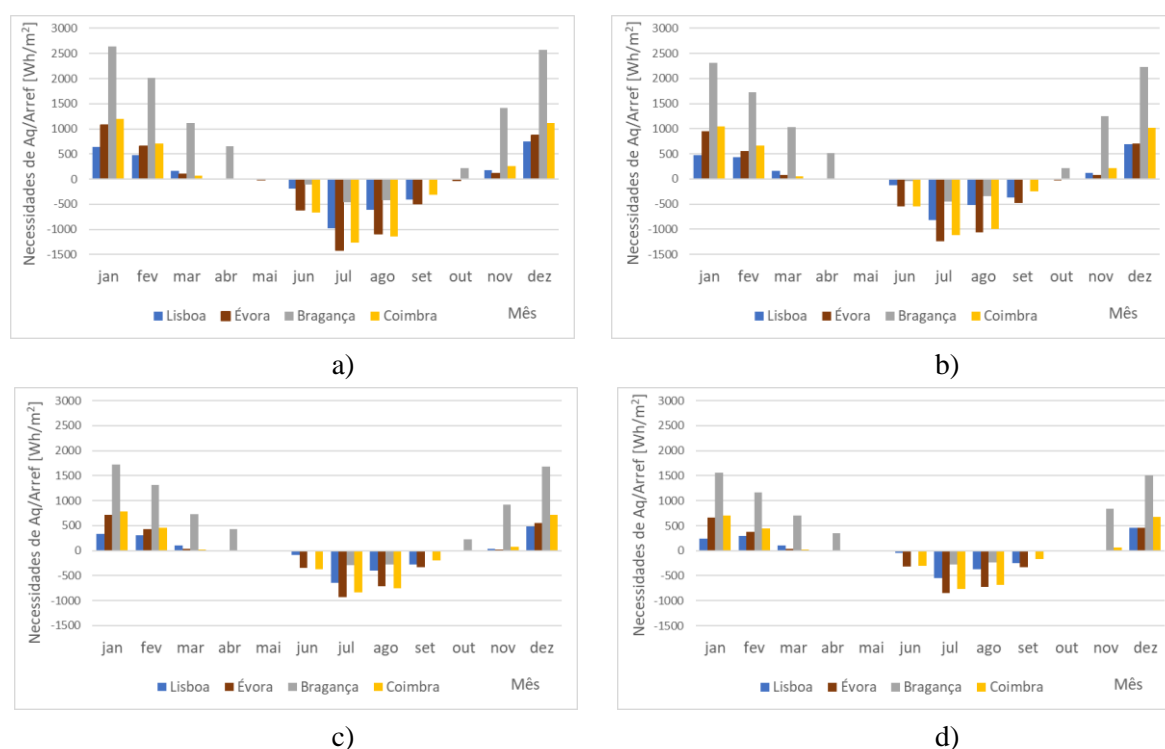


Figura 3.8 - Necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais em Lisboa, Évora, Bragança e Coimbra, por m^2 , para cada uma das soluções: a) ICB 8cm + Substrato 8cm; b) ICB 8cm + Substrato 14cm; c) ICB 14cm + Substrato 8cm; d) ICB 14cm + Substrato 14cm.

É possível identificar padrões distintos de necessidades energéticas em cada região e para cada solução de cobertura verde. No caso de regiões com climas mais frios, como Bragança, é de destacar as elevadas necessidades de aquecimento durante os meses de inverno, enquanto que em regiões com climas mais quentes, como Évora, as necessidades de arrefecimento são elevadas durante os meses de verão.

Comparando o impacto das diferentes soluções de cobertura verde em cada região, será de realçar, como expectável, que as soluções de cobertura verde com maior espessura de ICB e substrato apresentam menores necessidades de aquecimento e arrefecimento ao longo do ano, em comparação com as soluções que possuem menor espessura desses materiais. Esse padrão indica que um aumento da espessura das camadas contribui significativamente para a eficiência térmica dos edifícios.

Ao comparar as soluções com diferentes combinações de ICB e substrato (ICB 8 cm + substrato 14 cm e ICB 14 cm + substrato 8 cm, a que acresce a cobertura vegetal em ambas as soluções), observa-se que a solução com ICB de 14 cm e substrato de 8 cm apresenta menores necessidades de aquecimento e arrefecimento. Isto sugere que o isolamento térmico fornecido

pelo ICB tem maior impacto na eficiência energética do que o substrato, o que será o expectável, uma vez que a condutibilidade térmica do ICB é consideravelmente inferior à condutibilidade térmica do substrato.

De forma a entender melhor a relevância que as camadas de ICB e de substrato têm numa cobertura verde, foram analisadas as necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais de 4 soluções diferentes para a região de Coimbra (ICB 8 cm + Substrato 8cm; ICB 8cm + Substrato 14cm; ICB 14 cm + Substrato 8cm; ICB 14cm + Substrato 14cm), como apresentado na Figura 3.9.

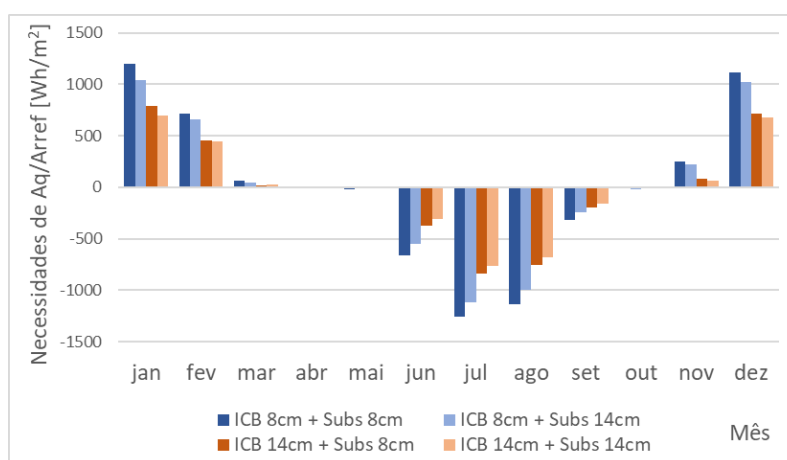


Figura 3.9 - Necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais na região de Coimbra, por m^2 , para as soluções: ICB 8 cm + Substrato 8cm; ICB 8cm + Substrato 14cm; ICB 14 cm + Substrato 8cm; ICB 14cm + Substrato 14cm.

Observa-se que a solução com maior espessura com ICB de 14 cm combinado com um substrato de 14 cm, a que acresce a cobertura vegetal, apresenta, como expectável, as menores necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais. Por outro lado, a solução com ICB de 8 cm e substrato de 8 cm mostrou necessidades de aquecimento e arrefecimento mais elevadas. Isso indica que o isolamento térmico com menor espessura é menos eficiente na proteção contra as variações climáticas externas, resultando em maiores necessidades energéticas para manter o conforto térmico.

Mais uma vez, percebe-se que o isolamento térmico fornecido pelo ICB tem uma influência mais significativa na eficiência energética do que o substrato. Essa observação pode ser explicada pela capacidade de isolamento térmico do ICB em comparação ao substrato. Conforme se referiu atrás, o ICB, sendo um material com propriedades isolantes, tem a capacidade de reter o calor interno do edifício durante o inverno, evitando perdas de calor para o ambiente externo. Além disso, também ajuda a evitar que o calor externo seja transferido para o interior durante o verão, reduzindo a necessidade de arrefecimento. Por outro lado, o

substrato, apesar de também contribuir para o isolamento térmico, possui propriedades diferentes do ICB. É responsável por outros benefícios, como o suporte para o crescimento da vegetação e a retenção de água. Embora tenha alguma influência no equilíbrio térmico do edifício, as suas características não têm o mesmo impacto direto na redução das necessidades de aquecimento e arrefecimento como o ICB.

Com o intuito de avaliar o desempenho energético das diferentes opções em contextos climáticos distintos, foram comparadas as necessidades de aquecimento e arrefecimento totais anuais, para cada uma das regiões – Lisboa, Évora, Bragança e Coimbra – com diferentes soluções de cobertura verde, como consta na Figura 3.10.

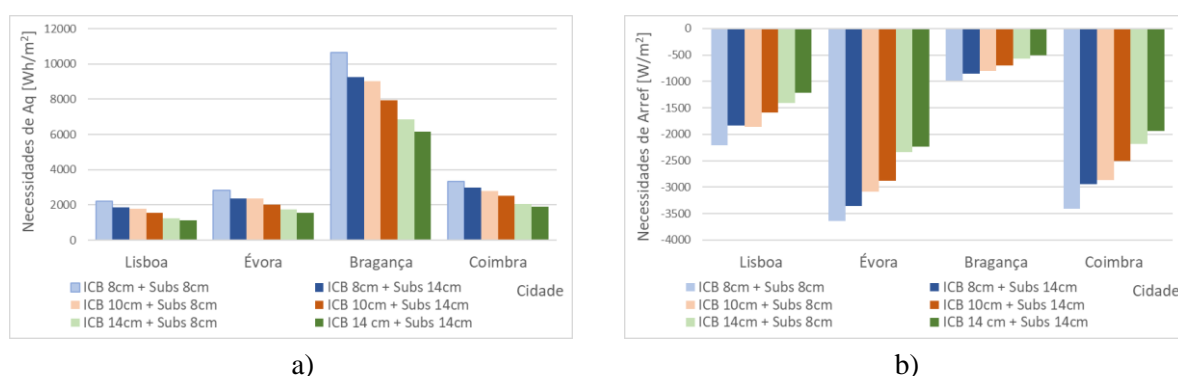


Figura 3.10 - Necessidades totais de energia anuais em cada uma das regiões: Lisboa, Évora, Bragança e Coimbra, por m^2 , para diferentes soluções: a) necessidades de aquecimento; b) necessidades de arrefecimento.

Da análise da mesma figura, destaca-se Bragança, onde as necessidades de aquecimento para todas as soluções estudadas são claramente mais elevadas, por se tratar de uma região com um clima mais frio. Já no que respeita às necessidades de arrefecimento, Évora e Coimbra salientam-se como aquelas que apresentam maior esforço energético para arrefecer o edifício, resultado dos seus verões mais intensos e temperaturas mais elevadas durante essa estação.

Mais uma vez, pode-se observar que as soluções com ICB de 14 cm e substrato de 14 cm apresentam as menores necessidades de aquecimento em relação às outras opções. O estudo das necessidades de aquecimento e arrefecimento mostra a relevância do isolamento térmico adequado para garantir o conforto térmico dos ocupantes e reduzir o consumo de energia em edifícios.

Para se entender melhor o impacto do tipo de material que se escolhe como solução de isolamento, foi efetuada uma comparação entre a utilização de isolamento térmico à base de ICB e poliestireno extrudido (XPS) para diferentes soluções de cobertura verde ((ICB 8 cm + Substrato 8 cm, ICB 14 cm + Substrato 14 cm, XPS 8 cm + Substrato 8 cm e XPS 14 cm + Substrato 14 cm).

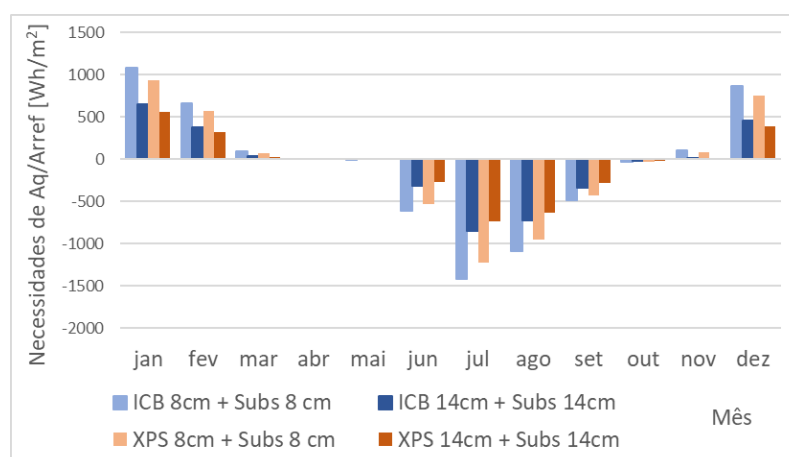


Figura 3.11 - Comparação das necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais na região de Évora, por m^2 , entre as soluções: ICB 8 cm + Substrato 8cm; ICB 14cm + Substrato 14cm; XPS 8 cm + Substrato 8cm; XPS 14cm + Substrato 14cm.

A Figura 3.11 mostra a comparação das necessidades de aquecimento e arrefecimento anuais no exemplo da região de Évora. Ao analisar os resultados dessa comparação observa-se que as soluções com ICB (ICB 8 cm + Substrato 8 cm e ICB 14 cm + Substrato 14 cm) apresentam necessidades de aquecimento e arrefecimento mais elevadas, comparativamente às soluções com XPS (XPS 8 cm + Substrato 8 cm e XPS 14 cm + Substrato 14 cm). Isso sugere que o XPS atua como uma barreira térmica mais eficaz. No entanto, é importante perceber as correspondências percentuais entre as necessidades energéticas e as resistências térmicas de cada um dos materiais. A condutibilidade térmica do XPS é menor, comparativamente à do ICB, ou seja, a resistência térmica do XPS para as espessuras usadas é maior, correspondendo o ICB a cerca de 85% da resistência térmica do XPS. Analisando as necessidades de aquecimento e de arrefecimento também é perceptível que a diferença entre as duas soluções é de cerca de 85%. Desta forma conclui-se que as diferenças de comportamento se explicam em grande parte devido a esta diferença de resistência térmica.

É também necessário ter em conta a constituição de cada um dos materiais. O XPS embora possa ter um melhor desempenho térmico é um material termoplástico, enquanto que o ICB se trata de um material natural. Esta questão tem implicações no contexto de avaliação da sustentabilidade, por ter impactos ambientais diferentes.

Esta análise destaca a importância de selecionar o isolamento térmico adequado para cada situação e região climática.

4 CONCLUSÕES

4.1 Principais conclusões

Foi estudado o comportamento térmico de coberturas verdes, realizando simulações que proporcionaram uma compreensão mais aprofundada do comportamento térmico dinâmico dos diferentes sistemas alvo em estudo, em diferentes regiões de Portugal, considerando a influência das camadas constituintes e as variáveis climáticas.

O objetivo principal deste estudo consistiu em perceber como o impacto das várias configurações de coberturas verdes impactam o desempenho térmico de edifícios, fornecendo dados que permitem uma melhor abordagem na construção utilizando este tipo de solução. Ao analisar detalhadamente os balanços energéticos anuais, bem como as necessidades de aquecimento e arrefecimento nas diferentes soluções, foi possível tirar conclusões importantes. Os gráficos que analisam as temperaturas ao longo do ano e nas quatro regiões demonstram o comportamento da temperatura nas diferentes estações, sendo evidente que o verão seria a estação com maiores temperaturas e o inverno com menores. Nos meses de verão, Évora demonstra ser o local onde as temperaturas exteriores são mais elevadas ao longo do dia, já no caso de Bragança é a que regista menores temperaturas, durante a estação de inverno.

Para o exemplo de um dia de inverno e um dia de verão, o desfasamento temporal entre as mudanças de temperatura e o balanço energético destacou a inércia térmica dos materiais que constituem esta solução.

As variações climáticas entre as regiões de Bragança, Coimbra, Évora e Lisboa proporcionaram um cenário diversificado para a análise, permitindo compreender como os sistemas de coberturas verdes respondem a diferentes contextos climáticos. A influência significativa das temperaturas extremas nas regiões de Évora no verão e de Bragança no inverno, foi evidente nos picos das flutuações dos balanços energéticos ao longo do dia, enquanto em Lisboa, a influência mitigadora do clima marítimo mostrou-se fundamental na estabilidade das trocas energéticas.

Ao compararem-se diferentes combinações de isolamento térmico e substrato, demonstrou-se que a espessura e o tipo de isolamento são fatores fundamentais na eficiência energética das coberturas verdes. As soluções que incorporaram uma camada mais espessa de isolamento revelaram-se mais eficientes na retenção de energia durante o inverno, bem como na redução das perdas de energia durante a noite. Além disso, identificou-se que o isolamento térmico ICB desempenhou um papel preponderante na melhoria do desempenho térmico em comparação com o substrato, enfatizando a sua importância no contexto de otimização energética.

Ao fazer uma análise das necessidades energéticas nas diferentes soluções e regiões estudadas, torna-se evidente que a escolha do sistema de cobertura verde desempenha um papel importante no comportamento térmico e energético de edifícios. Também assim, foi possível observar como as variáveis climáticas, as espessuras de isolamento e substrato, assim como os tipos de materiais utilizados, têm impacto direto nas necessidades de aquecimento e arrefecimento.

Nas regiões mais frias, como Bragança, observa-se que a utilização de isolamento térmico com maiores espessuras, como o ICB de 14 cm em conjunto com substrato de 14 cm e cobertura vegetal, contribui para reduzir substancialmente as perdas de calor, minimizando a necessidade de aquecimento. Por outro lado, nas regiões mais quentes, como Évora e Coimbra, o foco recai sobre a capacidade de manter o edifício mais fresco durante os meses de verão, chegando-se à conclusão de que também a configuração de 14 cm de ICB com 14 cm de substrato e cobertura vegetal é a mais eficiente.

Também em termos de necessidades energéticas, a comparação entre diferentes espessuras de isolamento e substrato revelou que o isolamento térmico tem uma influência mais significativa do que o substrato. Em várias configurações, a adição de isolamento levou a reduções substanciais nas necessidades de aquecimento e arrefecimento. As soluções de cobertura verde com isolamento térmico mais eficiente, especialmente aquelas que incorporaram camadas de isolamento mais espessas, apresentaram um desempenho superior ao equilibrar as necessidades de aquecimento e arrefecimento. Isso demonstra a importância do isolamento térmico como uma estratégia fundamental para otimizar o desempenho energético em edifícios.

No que diz respeito à comparação entre a utilização de ICB ou XPS como isolamento térmico é preciso considerar diferentes fatores. Da análise do estudo que foi feito, é possível perceber que o XPS desempenha uma melhor função como isolamento térmico comparativamente ao ICB. No entanto, esta diferença é diretamente proporcional às resistências térmicas de cada um dos materiais. É importante referir que o XPS é fabricado a partir de derivados de petróleo e, portanto, pode ter um maior impacto ambiental. Por outro lado, o ICB é obtido a partir de cortiça, um material natural e renovável, contribuindo potencialmente para um menor impacto ambiental. Portanto, ao considerar entre a utilização de XPS e ICB como isolamento térmico, é importante ponderar não apenas o desempenho térmico, mas também os aspetos ambientais e de sustentabilidade. Essa consideração ajuda a garantir que as escolhas de materiais se alinhem com os objetivos de eficiência energética e responsabilidade ambiental na construção.

4.2 Trabalhos futuros

De forma a entender melhor como é que a utilização do ICB como isolamento térmico se comporta, é necessário a realização de mais estudos, nomeadamente a médio e longo prazo, para assim se ter uma perceção de como o material se comporta ao longo do tempo e assim tirar conclusões ainda mais precisas.

As sugestões para trabalhos futuros passam por estudar o impacto das práticas de manutenção da cobertura verde, nomeadamente da cobertura vegetal. Com a poda de plantas, irrigação e remoção de resíduos, prevê-se que estes influenciem o desempenho térmico a longo prazo, daí poder ser necessário um estudo a esse nível.

Um outro estudo que se sugere é a avaliação do desempenho destas soluções a diferentes escalas. Além do estudo de edifícios individuais, como foi o caso, estudar também o desempenho térmico do sistema de coberturas verdes em escalas maiores, como bairros, ou até mesmo áreas urbanas inteiras, de forma a entender como é que estas podem afetar os microclimas locais.

É importante, também, fazer uma monitorização de edifícios onde estas soluções já tenham sido aplicadas e fazer simulações para esses mesmos edifícios. Desta forma é necessário validar modelos e fazer mais simulações. De uma forma geral, é necessário fazer simulações em edifícios reais de forma a estudar de forma efetiva o impacto destas soluções.

REFERÊNCIAS

- [1] H. Bressers, “Total Environment Research Themes Enhancing the resilience of midsize cities to climate extremes : A tool for practitioners to assess their governance context,” vol. 8, no. July, 2023, doi: 10.1016/j.totert.2023.100080.
- [2] A. Badugu, K. S. Arunab, A. Mathew, and P. Sarwesh, “Spatial and temporal analysis of urban heat island effect over Tiruchirappalli city using geospatial techniques,” *Geod. Geodyn.*, vol. 14, no. 3, pp. 275–291, 2023, doi: 10.1016/j.geog.2022.10.004.
- [3] F. Carvalho, “Coberturas verdes : estudo experimental da capacidade de drenagem de água no aglomerado de cortiça expandida Fábio José Xavier Carvalho Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões (UC) Professor Doutor António José Barreto Tadeu (UC),” 2017.
- [4] L. Zhang, J. Yuan, and C. S. Kim, “Application of energy-saving building’s designing methods in marine cities,” *Energy Reports*, vol. 9, pp. 98–110, 2023, doi: 10.1016/j.egy.2023.04.333.
- [5] Q. Zhang *et al.*, “The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution,” *Landsc. Urban Plan.*, vol. 144, pp. 142–150, 2015, doi: 10.1016/j.landurbplan.2015.08.017.
- [6] K. Vijayaraghavan, “Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 740–752, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.119.
- [7] I. Jaffal, S. E. Ouldboukhite, and R. Belarbi, “A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance,” *Renew. Energy*, vol. 43, pp. 157–164, Jul. 2012, doi: 10.1016/J.RENENE.2011.12.004.
- [8] H. F. Castleton, V. Stovin, S. B. M. Beck, and J. B. Davison, “Green roofs; Building energy savings and the potential for retrofit,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 10, pp. 1582–1591, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.004.
- [9] W. Nyuk Hien, T. Puay Yok, and C. Yu, “Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 1, pp. 25–54, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.030.
- [10] N. H. Wong, Y. Chen, C. L. Ong, and A. Sia, “Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment,” *Build. Environ.*, vol. 38, no. 2, pp. 261–270, 2003, doi: 10.1016/S0360-1323(02)00066-5.
- [11] O. Saadatian *et al.*, “A review of energy aspects of green roofs,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 155–168, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.02.022.
- [12] S. E. Ouldboukhite, R. Belarbi, and R. Djedjig, “Characterization of green roof components: Measurements of thermal and hydrological properties,” *Build. Environ.*, vol. 56, pp. 78–85, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2012.02.024.
- [13] P. Ferrante, M. La Gennusa, G. Peri, G. Rizzo, and G. Scaccianoce, “Vegetation growth parameters and leaf temperature: Experimental results from a six plots green roofs’ system,” *Energy*, vol. 115, pp. 1723–1732, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.07.085.
- [14] B. Dvorak and A. Volder, “Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review,” *Landsc. Urban Plan.*, vol. 96, no. 4, pp. 197–213, 2010, doi: 10.1016/j.landurbplan.2010.04.009.
- [15] E. Oberndorfer *et al.*, “Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures,

- functions, and services,” *Bioscience*, vol. 57, no. 10, pp. 823–833, 2007, doi: 10.1641/B571005.
- [16] N. S. G. Williams, J. P. Rayner, and K. J. Raynor, “Green roofs for a wide brown land: Opportunities and barriers for rooftop greening in Australia,” *Urban For. Urban Green.*, vol. 9, no. 3, pp. 245–251, 2010, doi: 10.1016/j.ufug.2010.01.005.
- [17] R. Almeida, N. Simões, A. Tadeu, P. Palha, and J. Almeida, “Thermal behaviour of a green roof containing insulation cork board. An experimental characterization using a bioclimatic chamber,” *Build. Environ.*, vol. 160, no. June, p. 106179, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106179.
- [18] I. Andric, A. Kamal, and S. G. Al-Ghamdi, “Efficiency of green roofs and green walls as climate change mitigation measures in extremely hot and dry climate: Case study of Qatar,” *Energy Reports*, vol. 6, pp. 2476–2489, 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.09.006.
- [19] G. Peri, G. Rizzo, G. Scaccianoce, M. La Gennusa, and P. Jones, “Vegetation and soil – related parameters for computing solar radiation exchanges within green roofs: Are the available values adequate for an easy modeling of their thermal behavior?,” *Energy Build.*, vol. 129, pp. 535–548, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.08.018.
- [20] S. dos S. Capelas, “Implementação de um modelo para simular o comportamento térmico de coberturas instaladas em câmara climática,” 2017.
- [21] M. do R. D. M. Fino, “The application of ICB as an external thermal insulating composite system - an experimental and numerical study,” no. March, 2018.
- [22] Itecons, “GreenFuture,” 2023. <https://greenfuture.itecons.pt/> (accessed Sep. 25, 2023).
- [23] ADENE, “Isolamento de Coberturas,” *10 Soluções Eficiência Energética*, p. 8, 2016.
- [24] L. N. de E. Civil, *ITE54*.
- [25] E. M. Khotbehsara, A. B. Daemei, and F. A. Malekjahan, “Simulation study of the eco green roof in order to reduce heat transfer in four different climatic zones,” *Results Eng.*, vol. 2, no. March, p. 100010, 2019, doi: 10.1016/j.rineng.2019.100010.
- [26] S. Hobbi *et al.*, “Detailed investigation of discrepancies in Köppen-Geiger climate classification using seven global gridded products,” *J. Hydrol.*, vol. 612, no. PB, p. 128121, 2022, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.128121.
- [27] M. M. Hamed *et al.*, “Future Köppen-Geiger climate zones over Southeast Asia using CMIP6 Multimodel Ensemble,” *Atmos. Res.*, vol. 283, no. November 2021, p. 106560, 2023, doi: 10.1016/j.atmosres.2022.106560.
- [28] C. Andrade and J. Contente, “Projeções de alterações climáticas para Portugal O que é o clima ? O que são as alterações,” pp. 1–18, 2020.
- [29] DGEG, “Manual Técnico para a Avaliação do Desempenho Energético dos Edifícios,” *Adene*, p. 252, 2021, [Online]. Available: <https://www.sce.pt/wp-content/uploads/2021/07/Manual-SCE.pdf>
- [30] S. J. Andrade C, Fonseca A, “Are Land Use Options in Viticulture and Oliviculture in Agreement with Bioclimatic Shifts in Portugal?,” *Land*. <https://doi.org/10.3390/land10080869>
- [31] Direção Geral de Energia e Geologia, “SCE.clima,” *SCE.CLIMA (v1.0)*. <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/sce-er/> (accessed Sep. 26, 2023).
- [32] T. B. of T. of the U. of I. and the R. of the U. of C. through the E. O. L. B. N. Laboratory, “Green Roof Model (EcoRoof),” *bigladdersoftware*, 2014. <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/engineering-reference/page-029.html>

- (accessed Aug. 29, 2023).
- [33] DesignBuilder, “GreenRoof,” *Greenroofdata*.
<https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/GreenRoof.htm> (accessed Aug. 14, 2023).