U.PORTO

FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS VERDES E TRADICIONAIS

CÉLIA DE FÁTIMA MARQUES DA SILVA ASSUNÇÃO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Vasco Peixoto de Freitas

Responsável: Eng.º Paulo de Almeida S. Pacheco Palha

JANEIRO DE 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

http://www.fe.up.pt

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais e aos meus irmãos

"Eu tentei 99 vezes e falhei, mas na centésima tentativa eu consegui. Nunca desista dos seus objetivos mesmo que esses pareçam impossíveis, a próxima tentativa pode ser a vitoriosa"

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação não seria possível sem o apoio, dedicação e contribuição de algumas pessoas, às quais expresso aqui o meu mais sincero e profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Doutor Vasco Peixoto de Freitas por toda a disponibilidade, acompanhamento e orientação imprescindíveis neste trabalho.

Ao Engenheiro Paulo Palha, à Arquiteta Sandra Bastos e à Arquiteta Ana Mesquita, por toda a disponibilidade para esclarecer as minhas dúvidas e prontidão no fornecimento de material que foi indispensável na realização desta dissertação, o meu muito obrigada.

À Engenheira Cláudia Ferreira, pela paciência e prontidão em me ajudar com o software WUFI.

À Engenheira Cristina Calheiros, pela disponibilidade, amabilidade e conhecimentos transmitidos que se tornaram essenciais para finalizar este trabalho.

Aos meus pais, por todo o esforço e dedicação que sempre tiveram para comigo, por todos os valores transmitidos e por nunca deixarem de acreditar em mim, o meu mais profundo agradecimento.

Aos meus irmãos, cunhadas e sobrinhos, por todo o apoio incondicional, pelos momentos de descontração tão necessários e sobretudo pela união.

Ao André, pela paciência, compreensão, apoio e carinho que me demonstra todos os dias, o meu obrigada.

Aos melhores companheiros desta viagem que foi a FEUP, Gonçalo Fleming, Rodrigo Praça, Tiago Teixeira, Francisco Félix, Mafalda Ferreira, Bárbara Meireles, Rui Ramos, Ana Cabo, Inês Martins, André Teixeira e Aida Castro, entres muitos outros, pelo companheirismo, entreajuda e sobretudo pelo carinho imenso, muito obrigada.

Aos melhores amigos de uma vida, Beatriz Sousa, João Santos, Cláudia Moreira, Diana Costa, Catarina Pinheiro, Diogo Ribeiro, Francisco Fernandes e Tiago Azevedo, por partilharemos os bons momentos e nos apoiaremos nos maus, mas sobretudo por serem a família que eu escolhi.

RESUMO

Esta dissertação pretende desenvolver um estudo acerca do desempenho térmico das coberturas verdes comparativamente com as coberturas tradicionais. As coberturas verdes são um conceito, uma solução inovadora que possibilita um desenvolvimento sustentável das cidades, permitindo a colocação de vegetação no edificado, ou seja, as zonas urbanas estão cada vez mais impermeabilizadas, consequência também do aumento da população, e as coberturas verdes são a melhor forma de criar zonas de vegetação nas cidades totalmente construídas. Para além dos benefícios ambientais, as coberturas verdes também apresentam inúmeros benefícios sociais e económicos. O conforto térmico tem que ser uma prioridade tanto em edifícios habitacionais, como em edifícios de escritórios e locais de trabalho, dependendo das soluções construtivas e equipamentos utilizados, por vezes, é necessário adotar soluções menos convencionais, mas mais adequadas.

A constituição das coberturas verdes revela uma maior capacidade isolante do que uma cobertura tradicional, devido à camada de substrato. Assim numa primeira fase, quantifica-se a espessura de isolamento térmico para determinadas alturas de substrato, para uma cobertura verde, e a espessura de isolamento térmico equivalente numa cobertura tradicional de maneira a cumprir o requisito $U_{máx}$=0,40 W/m^2.ºC, isto para quatro cenários distintos: cobertura tradicional com isolamento térmico em XPS, cobertura tradicional com isolamento térmico em ICB, cobertura verde com isolamento térmico em XPS e cobertura verde com isolamento térmico em ICB. Posteriormente, calcula-se o fluxo de calor para o regime permanente. Posto isto, conclui-se que as coberturas verdes necessitam de espessuras de isolamento menores do que as coberturas tradicionais, sendo que esta espessura aumenta com o teor de humidade presente no substrato.

Numa segunda fase determina-se o fluxo de calor e o teor de humidade, nos mesmos quatro cenários anteriores, para o regime variável, concluindo-se que, as variações do fluxo de calor são maiores na cobertura tradicional, crescendo de forma semelhante nos dois tipos de isolamento térmico. Quando se insere a precipitação, constata-se que a influência desta é mais notória na cobertura tradicional do que na cobertura verde, muito possivelmente pela capacidade absorvente do substrato. Procede-se posteriormente à comparação e análise de dados.

Por fim, descreve-se um caso de estudo onde foram aplicados três tipos distintos de coberturas verdes, que serão posteriormente monitorizadas.

PALAVRAS-CHAVE: cobertura verde, cobertura tradicional, regime permanente, regime variável, fluxo de calor, teor de humidade, XPS, ICB

ABSTRACT

This dissertation aims to develop a study on the thermal performance of green roofs compared to traditional roofs. Green roofs are an innovate concept that enables sustainable development of cities by allowing vegetation on the building environment. Urban areas are becoming increasingly dense as a result of the population growth, and green roofs are the best way to create vegetated areas in fully built cities. In addition to environmental benefits, green roofs also have numerous social and economic benefits. Thermal comfort is a priority in both residential and office buildings, and depending on the constructive solutions and equipment used, unconventional but more appropriate solutions may be necessary.

The constitution of green roofs reveals a greater insulating capacity than a traditional one, due to the substrate layer. In the first place, the thermal insulation thickness for certain substrate heights for a green roof is quantified, and the equivalent thermal insulation thickness for traditional roof in order to meet the requirement Umáx=0,40 W/m2.ºC, for four distinct scenarios: traditional roof with thermal insulation in XPS, traditional roof with thermal insulation in ICB, green roof with thermal insulation in XPS and green roof with thermal insulation in ICB. Then, the heat flow for the permanent regime is calculated. From this, it is concluded that green roofs require thinner insulation than traditional roofs, with this thickness increasing with the moisture content present in the substrate.

In the second phase, the heat flow and moisture content in the same four scenarios is determined for the variable regime, concluding that the heat flow variations are greater in the traditional roof, growing similarly in both types of thermal insulation. When precipitation is introduced, it is found that's its influence is more notable in the traditional roof than in the green roof, possibly due to the substrate´s absorbent capacity. The data is then compared and analyzed.

Finally, a case study is described where three different types of green roofs were applied and will be subsequently monitored.

KEYWORDS: Green roof, tradicional roof, permanent regime, variable regime, heat flux, humidity content, XPS, ICB

ÍNDICE GERAL

Agradecimentos i
Resumo iii
Abstract v
1. Introdução 1
1.1. ENQUADRAMENTO 1
1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA DE TRABALHO 2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 2
2. Estado da Arte 3
2.1. COBERTURAS VERDES 3
2.1.1. NO MUNDO 3
2.1.2. EM PORTUGAL 7
2.2. VANTAGENS DAS COBERTURAS VERDES 8
2.2.1. VANTAGENS AMBIENTAIS 8
2.2.1.1. Melhoria da qualidade do ar 8
2.2.1.2. Aumento da biodiversidade 9
2.2.1.3. Gestão das águas pluviais 9
2.2.1.4. Aumento da proteção contra o ruído 9
2.2.1.5. Redução do efeito da ilha de calor 9
2.2.2. VANTAGENS ECONÓMICAS 10
2.2.2.1. Proteção da impermeabilização da cobertura 10
2.2.2.2. Eficiência energética 10
2.2.2.3. Valorização Imobiliária 10
2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS EM COBERTURAS VERDES 10
2.3.1. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO SUBSTRATO DE UMA COBERTURA VERDE EM FUNÇÃO DO SEU TEOR DE ÁGUA 10
2.3.2. COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA COBERTURA VERDE 13
2.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO 22
3. Quantificação da espessura de isolamento térmico regulamentar em regime permanente para coberturas verdes e tradicionais 25
3.1. EXIGÊNCIAS REGULAMENTARES 25
3.2. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA (U) REGULAMENTAR 25
3.3. DESCRIÇÃO DA COBERTURA TRADICIONAL E DA COBERTURA VERDE ESTUDADA 26

3.3.1. COBERTURA TRADICIONAL 26
3.3.2. COBERTURA VERDE 27
3.4. CÁLCULO DA ESPESSURA DE ISOLAMENTO TÉRMICO REGULAMENTAR 27
3.4.1. COBERTURA TRADICIONAL EM TERRAÇO 27
3.4.2. COBERTURA VERDE COM SUBSTRATO DE TERRA SECA 28
3.4.3. COBERTURA VERDE COM SUBSTRATO DE TERRA SATURADA 28
3.4.4. COBERTURA VERDE COM SUBSTRATO TÉCNICO SECO 29
3.4.5. COBERTURA VERDE COM SUBSTRATO TÉCNICO SATURADO 30
3.4.6. INFLUÊNCIA DA HUMIDADE NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA COBERTURA VERDE EM REGIME PERMANENTE 30
3.5. CÁLCULO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR DE UMA COBERTURA E DOS FLUXOS DE CALOR EM REGIME PERMANENTE 31
3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO 32
4. Simulação numérica do Fluxo de Calor em regime variável para coberturas verdes e tradicionais 35
4.1. IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO EM REGIME VARIÁVEL 35
4.2. MODELO NUMÉRICO UTILIZADO - WUFI® PRO 5.3 35
4.2.1. CONDIÇÕES FRONTEIRA EXTERIORES E INTERIORES 36
4.2.1.1. Coeficiente de Transferência à Superfície 36
4.2.1.2. Condições Iniciais 37
4.2.1.3. Condições climáticas exteriores e interiores 37
4.2.2. PROPRIEDADES DO ELEMENTO CONSTRUTIVO 39
4.3. CENÁRIOS SIMULADOS 40
4.3.1. COBERTURA TRADICIONAL COM ISOLAMENTO TÉRMICO EM XPS 41
4.3.2. COBERTURA TRADICIONAL COM ISOLAMENTO TÉRMICO EM ICB 42
4.3.3. COBERTURA VERDE COM ISOLAMENTO TÉRMICO EM XPS 43
4.3.4. COBERTURA VERDE COM ISOLAMENTO EM ICB 45
4.3.5. ANÁLISE COMPARATIVA 46
4.4. QUANTIFICAÇÃO DO FLUXO DE CALOR EM REGIME VARIÁVEL 46
4.5. COMPARAÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR EM REGIME VARIÁVEL E EM REGIME PERMANENTE 47
4.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO 49
5. Caso de estudo 51
5.1. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO 51
5.2. OBJETIVOS 52
5.3. PLANO DE INTERVENÇÃO 52
5.3.1. COBERTURA VERDE EXTENSIVA COM O SISTEMA GUL 52
5.3.2. COBERTURA VERDE COM PAINÉIS SOLARES – BIOSOLAR ROOF 54

5.3.3. COBERTURA VERDE EXTENSIVA INCLINADA 55
5.3.4. SUBSTRATO TÉCNICO 56
5.4. DESAFIOS NA INTERVENÇÃO 56
5.4.1. PROBLEMAS LOGÍSTICOS E CLIMÁTICOS 56
5.4.2. OBSTÁCULOS DO PROJETO INICIAL 57
5.5. PLANO DE MONITORIZAÇÃO 57
5.5.1. IMPORTÂNCIA DA MONITORIZAÇÃO 57
5.5.2. OBJETIVOS DA MONITORIZAÇÃO 58
5.5.3. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS SENSORES DE MONITORIZAÇÃO 58
5.5.4. MELHORIAS E FUTURAS MONITORIZAÇÕES EM COBERTURAS VERDES 59
5.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO 60
6. Conclusão 61
6.1. CONCLUSÕES FINAIS 61
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS 62
Referências Bibliográficas 65

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 – Simulação 3D do Zigurate de Ur (Mozaik Education, 2022) 3
Fig. 2 – Jardins Suspensos da Babilónia (Funchal Notícias, 2016) 4
Fig. 3 – Desenho da *Villa Dei Misteri* (à esquerda); Imagem da *Villa* após escavações (à direita) (Costa, 2010) 4
Fig. 4 – Sod Roofs, Islândia 4
Fig. 5 – Torre Guinigi, na cidade de Lucca, Itália (Guia de Florença, 2018) 5
Fig. 6 – Palácio Kremlin, Moscovo (à esquerda); Palácio de Inverno, São Petersburgo (à direita) (Wikiwand, 2022) 5
Fig. 7– Casa da Cascata do arquiteto Frank Wright (à esquerda); Villa Savoye do arquiteto Le Corbusier (à direita) (ArchDaily, 2012) 6
Fig. 8 – Mapa de incentivos e políticas acerca de coberturas verdes a nível mundial (ANCV, 2022); .. 7
Fig. 9 – Praça de Lisboa, Porto (ANCV, 2017) 8
Fig. 10 – Efeito da Ilha de Calor (Iberdrola, 2022) 10
Fig. 11 – Condutibilidade térmica de uma amostra de substrato em função da temperatura média para as condições de seco, 23ºC 50%HR, 23ºC 80%HR e saturado (Albino, 2020) 11
Fig. 12 – Variação da condutibilidade térmica dos solos em função do seu teor de água (adaptado de ThermoConcept, 2022) 12
Fig. 13 – Localização dos sensores na cobertura verde modular (A) e na cobertura verde convencional (B) (Coelho, 2019) 13
Fig. 14 – Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (Coelho, 2019) 14
Fig. 15 – Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_B) e sobre o XPS (TF2_B), (adaptado de Coelho, 2019) 14
Fig. 16 – Temperaturas medidas na zona B ao longo das 72 horas com períodos de chuva, à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (Coelho, 2019) 15
Fig. 17 – Fluxos de calor medidos na superfície do XPS (TF2_B), com simulação de chuva, à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (adaptado de Coelho, 2019) 15
Fig. 18 – Temperaturas medidas na zona B ao longo de 72 horas, à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (Coelho, 2019) 16
Fig. 19 – Fluxos de calor medidos na superfície do XPS (TF2_B), à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (adaptado de Coelho, 2019) 16
Fig. 20 – Temperaturas medidas na zona B ao longo das 72 horas com períodos de chuva, à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (Coelho, 2019) 17
Fig. 21 – Fluxos de calor medidos na superfície do XPS (TF2_B), com simulação de chuva, à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (adaptado de Coelho, 2019) 17
Fig. 22 – Comparação das perdas de calor da cobertura tradicional e da cobertura verde (adaptado de Tang e Qu, 2016) 18
Fig. 23 – Comparação da temperatura na superfície exterior do isolamento na cobertura verde e na cobertura tradicional (Tang e Qu, 2016) 18
Fig. 24 – Temperatura e fluxo de calor em clima quente (adaptado de Tang e Qu, 2016) 19
Fig. 25 – Temperatura e fluxo de calor em clima frio (adaptado de Tang e Qu, 2016) 19
Fig. 26 – Composição das coberturas: (a) verde e (b) tradicional (Freitas et al, 2016) 20
Fig. 27 – Posições dos sensores de monitorização (Freitas et al, 2016) 20
Fig. 28 – Impacto da irrigação (6,3 L/m^2) no fluxo de calor medido 4,5 cm abaixo da camada de vegetação (Freitas et al, 2016) 20
Fig. 29 – Impacto da irrigação (2,5 L/m^2) no fluxo de calor medido 4,5 cm abaixo da camada de vegetação (Freitas et al, 2016) 21
Fig. 30 – Medição dos dados meteorologicos na cobertura verde: temperatura do ar a 1,5 m e radiação solar (Freitas et al, 2016) 21
Fig. 31 – Impacto da irrigação no fluxo de calor (Freitas et al, 2016) 21

Fig. 32 – Temperatura superficial – cobertura verde e cobertura tradicional: (a) 2 dias de verão com irrigação e (b) 2 dias de verão sem irrigação (Freitas et al, 2016) 22
Fig. 33 – Cobertura tradicional com isolamento térmico em ICB (à esquerda) e em XPS (à direita) .. 26
Fig. 34 – Cobertura verde com isolamento térmico em ICB (à esquerda) e em XPS (à direita) 27
Fig. 35 - Comparação da espessura de isolamento térmico (ICB à esquerda e XPS à direita) para o substrato de terra seca e terra saturada 31
Fig. 36 - Comparação da espessura de isolamento térmico (ICB à esquerda e XPS à direita) para o substrato técnico seco e substrato técnico saturado 31
Fig. 37 – Regime Variável (Simões, I. et al, 2012)..... 35
Fig. 38 – Coeficientes de transferência à superfície para uma cobertura tradicional (WUFI® Pro 5.3)36
Fig. 39 – Coeficientes de transferência à superfície para uma cobertura verde (WUFI® Pro 5.3) 37
Fig. 40 – Dados climáticos exteriores do Porto (WUFI® Pro 5.3)..... 38
Fig. 41 – Medição das temperaturas na superfície exterior e interior nos meses de outubro a março (WUFI® Pro 5.3)..... 38
Fig. 42 - Dados de precipitação dos meses de outubro a março (WUFI® Pro 5.3) 39
Fig. 43 – Dados climáticos interiores para um cenário de 22ºC (WUFI® Pro 5.3) 39
Fig. 44 - Configuração da cobertura tradicional com isolamento em XPS (WUFI® Pro 5.3) 41
Fig. 45 – Fluxos de calor medidos na superfície exterior e interior sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3) 42
Fig. 46 – Teor de humidade total do elemento construtivo sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)..... 42
Fig. 47 - Configuração da cobertura tradicional com isolamento em ICB (WUFI® Pro 5.3)..... 42
Fig. 48 - Fluxos de calor medidos na superfície exterior e interior sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3) 43
Fig. 49 - Teor de humidade total do elemento construtivo sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)..... 43
Fig. 50 - Configuração da cobertura verde com isolamento em XPS (WUFI® Pro 5.3)..... 44
Fig. 51 - Fluxos de calor medidos na superfície exterior e interior sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3) 44
Fig. 52 - Teor de humidade total do elemento construtivo sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)..... 44
Fig. 53 - Configuração da cobertura verde com isolamento em ICB (WUFI® Pro 5.3)..... 45
Fig. 54 - Fluxos de calor medidos na superfície exterior e interior sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3) 45
Fig. 55 - Teor de humidade total do elemento construtivo sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)..... 45
Fig. 56 – Fotografia aérea da Escola Básica de 1º CEB/JI do Falcão (Google Earth)..... 51
Fig. 57 – Planta com proposta de intervenção (Projeto ANCV)..... 52
Fig. 58 – Informação disponível acerca do funcionamento do GUL (Neoturf)..... 53
Fig. 59 – Pormenorização do isolamento térmico utilizado - GUL..... 54
Fig. 60 – Pormenorização de uma cobertura verde com GUL (ANCV)..... 54
Fig. 61 – Pormenorização de uma cobertura verde com aplicação de tapete pré-cultivado de sedum (Landlab) 55
Fig. 62 – Pormenorização da aplicação de painéis solares na cobertura verde (ANCV)..... 55
Fig. 63 – Pormenorização de uma cobertura verde inclinada (ANCV)..... 56
Fig. 64 – Vigas salientes na cobertura verde com sistema de GUL..... 57
Fig. 65 - Localização dos sensores (Projeto ANCV)..... 58
Fig. 66 – Mecanismo de funcionamento dos painéis fotovoltaicos sem e com cobertura verde (M. Shafique et al, 2020) 59

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Resultados da condutibilidade térmica obtidos para a temperatura de 10ºC na amostra de substrato (adaptado de Albino, 2020) 11
Quadro 2 – Resultados da condutibilidade térmica dos solos nas condições seco, 10% de teor de humidade e saturado (ThermoConcept, 2022) 12
Quadro 3 – Valores da condutibilidade térmica do substrato técnico nas condições de seco e saturado para as temperaturas de 10ºC, 25ºC e 40ºC (Landlab, 2020) 12
Quadro 4 – Tabela resumo dos valores da condutibilidade térmica nos diferentes substratos 23
Quadro 5 – $U_{máx}$ ($W/m^2.ºC$) admissíveis de elementos opacos horizontais consoante a zona climática (Portaria nº 138-I/2021, 2021) 25
Quadro 6 – Resistências térmicas superficiais (ITE50, 2006) 26
Quadro 7 – Cálculo da espessura de isolamento para uma cobertura tradicional em terraço 27
Quadro 8 – Cálculo da espessura do isolamento térmico consoante a altura do substrato de terra seca 28
Quadro 9 – Cálculo da espessura do isolamento térmico consoante a altura do substrato de terra saturada 29
Quadro 10 – Cálculo da espessura do isolamento térmico consoante a altura de substrato técnico seco 29
Quadro 11 – Cálculo da espessura do isolamento térmico consoante a altura de substrato técnico saturado 30
Quadro 12 – Variação da temperatura 31
Quadro 13 – Cálculo da temperatura superficial interior 32
Quadro 14 – Cálculo do fluxo de calor para as diferentes variações de temperatura 32
Quadro 15 – Propriedades dos materiais constituintes das coberturas em estudo 40
Quadro 16 – Fluxo de calor na cobertura tradicional e na cobertura verde 46
Quadro 17 – Dados para o cálculo dos graus-dias 48
Quadro 18 – Comparação do fluxo de calor em regime variável e em regime permanente 48
Quadro 19 – Redução da espessura de isolamento térmico na cobertura verde em relação à cobertura tradicional 61

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

α - Parâmetro para cálculo da velocidade média do vento

ΔT - Variação da temperatura

θ_e - Temperatura exterior

θ_i - Temperatura interior

θ_{si} - Temperatura superficial interior

ξ - Porosidade

λ - Condutibilidade térmica

ρ - Densidade aparente

Φ - Fluxo de calor

μ – Fator de resistência à difusão de vapor de água

ANCV – Associação Nacional de Coberturas Verdes

c – Calor Específico

CT - Cobertura tradicional

CV - Cobertura Verde

e - Espessura do material

GD - Número de graus-dias na estação de aquecimento, na base de 18ºC

h - Altura

h_{si} - Condutância térmica superficial interior

ICB - Aglomerado de cortiça expandida

HR - Humidade Relativa

M_{REF} - Duração da estação de aquecimento, valor de referência

R_i - Resistência térmica por camada

R_{se} - Resistência térmica superficial exterior

R_{si} - Resistência térmica superficial interior

R_t - Resistência térmica

$R_{t,min}$ - Resistência térmica mínima

$R_{t,total}$ - Resistência térmica total

U - Coeficiente de transmissão térmica

XPS - poliestireno expandido extrudido

z - Altitude

1. INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

O crescimento exponencial da população mundial e a consequente migração dos habitantes para zonas urbanas tem levado ao aumento dos níveis de urbanização. Concluiu-se, no relatório da ONU Habitat, que o impacto das cidades tem vindo a aumentar e o futuro da humanidade será, sem dúvida, urbano (United Nations, 2022). Tendo em conta esta realidade, as áreas verdes foram sendo substituídas por áreas impermeáveis como edifícios e estradas, de maneira a dar resposta às necessidades da população. A implementação das áreas impermeáveis contribui negativamente para o risco de cheias e para o aumento do efeito da ilha de calor. Por isso, os municípios necessitam de aumentar os estímulos para a adoção de estratégias que contribuam na redução do impacto das áreas construídas e na promoção da sustentabilidade das suas cidades.

A execução de coberturas verdes poderá ser uma boa estratégia para amenizar o impacto negativo da crescente urbanização e das alterações climáticas, sendo uma tecnologia mais ecoeficiente do que as coberturas convencionais.

As coberturas verdes são uma solução de construção sustentável que ajuda no combate ao aquecimento global, possuindo um significativo número de vantagens a seguir referidas (Neoturf, 2022):

- Aumento da eficiência energética e redução dos custos de energia;
- Aumento da atividade fotossintética que implica: aumento na produção de oxigénio; maior reciclagem de dióxido de carbono; diminuição do efeito de estufa;
- Redução do efeito da ilha de calor;
- Aumenta a proteção contra o ruído;
- Aumento da biodiversidade e nichos ecológicos;
- Aumento significativo da área verde em contexto urbano e diminuição do impacto negativo da massificação das estruturas construídas em meio urbano;
- Absorção/Filtragem de gases poluentes e partículas em suspensão da atmosfera;
- Diminui o risco de inundações: 50-80% da água da chuva é maioritariamente absorvida pelas plantas, outra é evaporada e a restante é conduzida para os coletores;

Este trabalho irá centrar-se no desempenho higrotérmico das coberturas verdes.

Já existe um conjunto de países com incentivos à construção de coberturas verdes, inclusive, Portugal.

1.2. OBJETIVOS E METODOLOGIA DE TRABALHO

Os principais objetivos desta dissertação são caracterizar tecnologicamente uma cobertura verde e simular numericamente o desempenho higrotérmico para regime permanente e regime variável, com diferentes espessuras de substrato e de isolamento térmico, avaliando o comportamento de dois tipos de isolamento térmico, XPS e aglomerado de cortiça expandida (ICB).

A metodologia deste trabalho assentará no estudo de quatro cenários: uma cobertura tradicional com isolamento térmico em XPS, uma cobertura tradicional com isolamento térmico em ICB, uma cobertura verde com isolamento térmico em XPS e uma cobertura verde com isolamento térmico em ICB, sendo submetidos às condições de inverno em regime permanente e em regime variável, de forma a se determinar os fluxos de calor. Comparando, por fim, todos os cenários analisando o seu desempenho térmico nestas condições anteriormente descritas. Será também descrito um caso de estudo que acompanhei em colaboração com a empresa Neoturf, da aplicação de três coberturas verdes, sendo elas, uma cobertura verde com aplicação do sistema GUL, uma cobertura verde extensiva inclinada e uma cobertura verde com aplicação de painéis fotovoltaicos.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação é composta por 6 capítulos encadeados da seguinte maneira.

O presente capítulo introdutório faz um enquadramento geral do tema coberturas verdes, define os objetivos e a metodologia a seguir durante o trabalho, assim como, a estruturação do mesmo.

O segundo capítulo, começa por expor a evolução histórica até à atualidade das coberturas verdes, tanto a nível mundial como também em Portugal, seguindo-se de uma análise dos benefícios ambientais e económicos destas coberturas. São analisados, também, os incentivos financeiros à construção de coberturas verdes por parte dos países, tendo em conta o desenvolvimento económico e o clima. Por fim, apresenta o modelo de aplicação de incentivos para a construção de coberturas verdes em Portugal.

O terceiro capítulo, focar-se-á na quantificação da espessura de dois tipos de isolamento térmico, numa cobertura verde e numa cobertura tradicional de maneira a cumprir o parâmetro $U_{máx}$=0,40 W/m^2.ºC. Seguindo-se do cálculo do fluxo de calor, para a situação de inverno, em regime permanente.

O quarto capítulo, destinar-se-á ao cálculo do fluxo de calor e à determinação do teor de humidade, em regime variável nos mesmos cenários do capítulo anterior. Seguindo-se uma comparação e análise de resultados.

O quinto capítulo, apresentará a descrição de um caso de estudo.

O sexto capítulo, será a síntese do trabalho, contendo as conclusões retiradas, análise de resultados e propostas de desenvolvimentos futuros.

2.
ESTADO DA ARTE

2.1. COBERTURAS VERDES

2.1.1. NO MUNDO

As primeiras referências históricas acerca de coberturas verdes remetem à civilização antiga do vale do rio Tigre e Eufrates, na antiga Mesopotâmia, atual Iraque. Remontando ao ano de 2250 a.C., temos o Zigurate de Ur (Fig. 1), o maior monumento sobrevivente da Suméria construído em honra à deusa da lua, Nanna (Costa, 2010; Leal, 2019).

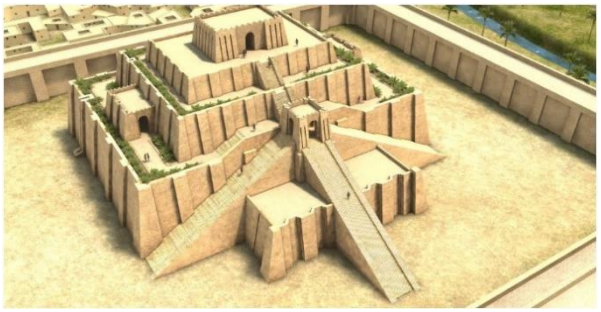


Fig. 1 – Simulação 3D do Zigurate de Ur (Mozaik Education, 2022)

Os mais conhecidos jardins em cobertura, serão, muito provavelmente, os Jardins Suspensos da Babilónia (Fig. 2). Durante muitos anos, os historiadores acreditaram que os jardins teriam sido mandados construir pelo rei Nabucodonosor II, no século VI a.C., com o objetivo de agradar a sua esposa Amitis, que sentia saudades da natureza da sua terra natal. Já em 2013, Stephanie Dalley, investigadora da Universidade de Oxford, divulgou que os famosos jardins teriam sido construídos pelo rei Senaqueribe, líder dos povos assírios, na antiga cidade de Nínive, um século antes do que os historiadores pensavam anteriormente. Os Jardins Suspensos da Babilónia são considerados uma das sete maravilhas do mundo antigo, mas também um verdadeiro mistério porque não há vestígios arqueológicos desta construção monumental (Leal, 2019; History, 2022).

Fig. 2 – Jardins Suspensos da Babilónia (Funchal Notícias, 2016)

Os jardins na cobertura aparecem também durante a era do Império Romano. Na cidade de Pompeia, em Itália, devido à erupção do Monte Vesúvio, em 79 d.C., a cidade ficou parcialmente soterrada, mais tarde, durante as escavações foram encontradas 3 luxuosas villas. A *Villa Dei Misteri* (Fig. 3), é uma delas, onde durante as escavações foram encontrados vestígios de raízes de plantas na zona de cobertura do terraço (Costa, 2010).

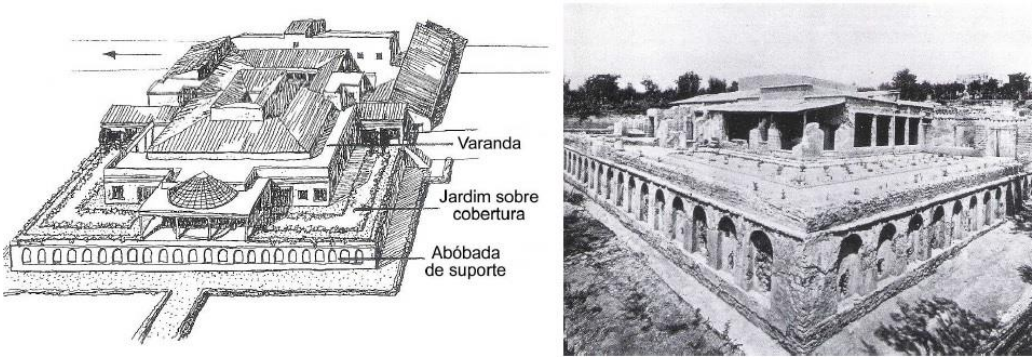


Fig. 3 – Desenho da *Villa Dei Misteri* (à esquerda); Imagem da *Villa* após escavações (à direita) (Costa, 2010)

No norte da Europa, onde as temperaturas são mais baixas como na Islândia e na Escandinávia, por exemplo, as coberturas verdes ajudam a reter o calor dentro da habitação. Os Vikings, como era denominado o povo medieval que vivia a norte, cobriam os telhados das suas casas com relva ou algas marinhas de forma a protegerem e isolarem as suas habitações. Estas habitações são denominadas de "Sod Roofs" (telhado de relva) (Fig. 4) e ganharam maior parte da sua popularidade no século XIX (Leal, 2019; Valente, 2019).

Fig. 4 – Sod Roofs, Islândia

No período Renascentista, os jardins sobre a cobertura surgiram em edifícios monumentais associados a famílias ricas ou personalidades importantes, sendo que era necessário possuir recursos para a sua construção e manutenção. A Torre Guinigi (Fig. 5) foi construída na segunda metade do século XIV por uma família abastada, os Guinigi, sendo um símbolo da época renascentista em Lucca, cidade Italiana. Esta torre, formalmente conhecida por Torre Benettoni, com 45m de altura contem um pequeno jardim na sua cobertura com 7 carvalho de grande porte plantados, regados através de um sistema de rega subterrâneo. Outros exemplos de coberturas ajardinadas desta época são: o Palácio Piccolomini, na cidade de Pienza, em Itália; e o Mosteiro do Mont Saint Michel, na costa noroeste de França (Costa, 2010; Albino, 2020; Leal, 2019).

Fig. 5 – Torre Guinigi, na cidade de Lucca, Itália (Guia de Florença, 2018)

Durante o período Barroco, deu-se maior ênfase ao aspeto estético de ligação do jardim à paisagem. Na Rússia Czarista, no século XVII, os jardins sobre as coberturas não eram acessíveis a todos por serem considerados de luxo, assim a nobreza russa aproveitava a sua utilização como forma de ostentação de riqueza. A cobertura verde do Palácio Kremlin (Fig. 6), em Moscovo, é um exemplo desta época, possuindo um jardim de 4 hectares ao nível dos quartos da mansão e ainda mais dois terraços localizados a um nível inferior, perto do rio Moscou. A impermeabilização destes jardins foi executada com chapas de chumbo, sendo necessárias 10,24 toneladas para impermeabilizar o terraço do nível superior. Essa solução de impermeabilização obrigou a um reforço estrutural com vigas de ferro. Infelizmente, tanto os jardins como o palácio original foram demolidos em 1773 para que fosse construído o novo palácio (Costa 2010; Coelho 2014; Leal 2019).

Ainda durante o período Barroco, quando se tornou imperatriz, em 1764, Catarina II mandou construir o edifício *Hermitage* para guardar as suas coleções de arte, contíguo ao Palácio de Inverno (Fig. 6), em São Petersburgo. É neste palácio que Catarina II, encomenda ao arquiteto italiano Bartolomeo Francesco Rastrelli, a criação de um jardim formal com algumas árvores embelezado com estátuas de figuras da mitologia clássica (Costa 2010; Coelho 2014).

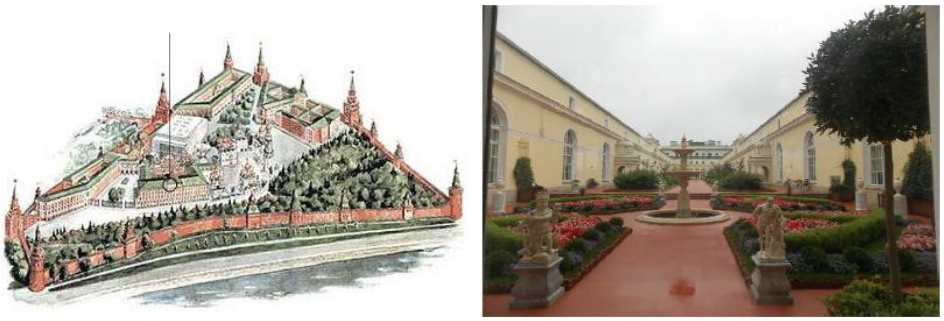


Fig. 6 – Palácio Kremlin, Moscovo (à esquerda); Palácio de Inverno, São Petersburgo (à direita) (Wikiwand, 2022)

Decorria o século XVIII, quando se iniciou a Revolução Industrial e com ela o aumento da expansão industrial sem quaisquer preocupações ambientais, com a poluição a deixar a sua marca, criando condições precárias de salubridade e saúde pública. Já na segunda metade do século XIX, com a aparecimento dos primeiros problemas ambientais a população tomou consciência que era necessário definir medidas para inverter o rumo negativo devido à revolução (Dias, 2014).

O Modernismo surge no início do século XX, marcado pelo aparecimento do betão como material estrutural, de baixo custo e ótimo desempenho. Este material veio revolucionar o mercado da construção permitindo a construção em altura com maior capacidade de cargas e os telhados planos. Estas coberturas, cujo sistema construtivo permitia melhores condições de impermeabilização, possibilitaram a expansão e o desenvolvimento das coberturas verdes (Costa, 2010).

Frank Lloyd Wright e Le Corbusier, foram os dois arquitetos mais influentes do século XX, com filosofias arquitetónicas radicalmente diferentes implementaram as coberturas verdes como espaços funcionais nos edifícios.

Wright incorporou as coberturas verdes como extensão dos espaços interiores, nos seus projetos. O Midway Garden em Chicago, construído em 1914 e demolido em 1929 devido a graves problemas financeiros, é uma das obras mais reconhecidas do arquiteto Wright. Neste projeto, o arquiteto atribuiu uma funcionalidade à cobertura construindo uma esplanada rodeada por sebes. Analogamente, tem outras obras reconhecidas, como por exemplo, a casa Hollyhock em Los Angeles, a casa da cascata na Pensilvânia (Fig. 7), Hillside Home School em Iowa, edifício Larkin em Nova Iorque e o Hotel Imperial em Tóquio, as últimas duas obras já demolidas.

Le Corbusier começou a projetar de forma sistemática áreas verdes nas coberturas de habitações de famílias mais abastadas (Leal, 2019), a partir de 1920, como é o caso da casa Savoye (Fig. 7), em Paris. Este projeto incluí no terraço uma pequena plantação de vegetação perene sobre canteiros sobrelevados. Tendo, o arquiteto, outras obras reconhecidas, como por exemplo, um edifício governamental, o Palácio do Secretariado de Chandigardh e a Villa Roche. Não bastando a sua aplicação, Le Corbusier, no ano de 1926, publicou os cinco elementos fundamentais da arquitetura moderna, onde são contemplados os espaços verdes em coberturas (Coelho, 2014).

Fig. 7– Casa da Cascata do arquiteto Frank Wright (à esquerda); Villa Savoye do arquiteto Le Corbusier (à direita) (ArchDaily, 2012)

Nas décadas de 60 e 70, iniciou-se a preocupação com a qualidade ambiental e com a rápida perda das áreas verdes para as áreas construídas. Países como a Alemanha e a Suíça, desenvolveram investigações sobre novas tecnologias e novos materiais para a execução de coberturas verdes e os benefícios da implantação destas nas zonas urbanas (Coelho, 2014).

Nos anos 80, com o desenrolar do movimento ambientalista, a população reconheceu a importância das áreas verdes para o ambiente, mas também para o equilíbrio psicofisiológico dos habitantes. Tendo em conta o elevado custo do solo urbano, a implementação das coberturas verdes se tornou um interesse público (Costa, 2010).

Vários países já consciencializados para a problemática ambiental, introduziram as coberturas verdes como solução. Na Alemanha houve um visível interesse nas investigações e uso das coberturas verdes, tendo sido criada a Associação FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau), em 1975, a qual desenvolveu uma diretiva de apoio ao planeamento, execução e manutenção das coberturas verdes na Alemanha (Leal, 2019). Esta diretiva sofreu algumas alterações, sendo a última em 2008. Porém, a implementação deste sistema encontrou como obstáculo o custo de execução e manutenção. Como resolução a este problema, o governo alemão atribuiu incentivos à sua realização.

Assim, tendo como exemplo a Alemanha, muitos outros países começaram a oferecer incentivos e a publicar diretrizes de maneira a promover a implementação de coberturas verdes (Fig. 8).

Fig. 8 – Mapa de incentivos e políticas acerca de coberturas verdes a nível mundial (ANCV, 2022);

2.1.2. Em Portugal

Em Portugal, o aparecimento das coberturas verdes foi mais tardio, sendo as mais antigas do século XVIII, seguindo as características do período Barroco. É o caso do jardim da Quinta Real de Caxias, junto à cascata, assim como do jardim Pênsil do Palácio de Queluz, que se encontram construídos na cobertura de reservatórios de água. Nesta época as coberturas verdes funcionavam meramente como enquadramento estético e paisagístico (Coelho, 2014).

Já no século XX, a primeira cobertura verde a ser construída foi no Hotel Ritz, em Lisboa, pelos arquitetos paisagistas António Viana Barreto e Álvaro Dentinho, com o objetivo de proporcionar uma área de lazer com vista sobre a cidade. Embora não tenha sido a primeira a ser construída, a mais conhecida localiza-se na Fundação Calouste Gulbenkian, inaugurada em 1969. Projeto dos arquitetos paisagistas Gonçalo Ribeiro Telles e António Viana Barreto, com o propósito de integrar a obra na paisagem natural envolvente (Coelho, 2014).

Nos anos 80, a cobertura verde do edifício Portugal Telecom, em Picoas, projetada pelo arquiteto paisagista Manuel Sousa da Câmara, introduz um melhoramento no sistema de drenagem e reduz o impacto visual causado pelos seus 2000 m^2 de área de cobertura (Costa, 2010; Coelho, 2014).

Posteriormente, em 1993, foi construído o jardim das Oliveiras sobre o parque de estacionamento do Centro Cultural de Belém, da autoria do arquiteto paisagista Francisco Caldeira Cabral. Esta solução, com vista para o rio Tejo, permitiu a criação de um espaço para usufruto dos clientes. No final dos anos 90, ocorreu em Lisboa a Expo98, que impulsionou a área da construção com técnicas inovadoras que permitiram construir edifícios energeticamente eficientes (Dias, 2014). Como exemplo de aplicação destas novas técnicas temos a Torre Verde da arquiteta Livia Tirone, pioneira da construção sustentável na Europa (Costa, 2010).

Chegando ao século XXI, as coberturas verdes tornaram-se uma solução construtiva com mais relevância, sendo aplicadas em edifícios com diversas funções, estéticas ou funcionais. Alguns exemplos deste século são a cobertura da estação do metro da Trindade, em 2003, o estádio Municipal de Braga, em 2003, a ETAR de Alcântara, em 2011, a Praça de Lisboa (Fig. 9), em 2013, o Hospital da Amarante, em 2014.

Fundada em 2015, a ANCV (Associação Nacional de Coberturas Verdes) tem como objetivo a promoção das infraestruturas verdes nas cidades, como as coberturas verdes, destacando a sua relevância para uma construção mais sustentável, elaborando um guia técnico de coberturas verdes de maneira a apoiar a sua execução. Com o Projeto Quinto Alçado do Porto (PQAP), a Câmara Municipal do Porto dá um passo importante na evolução das coberturas verdes em Portugal. O PQAP teve início em agosto de 2016, com o objetivo de definir um modelo de integração das coberturas verdes como estratégia ambiental e urbanística da cidade.

Fig. 9 – Praça de Lisboa, Porto (ANCV, 2017)

2.2. VANTAGENS DAS COBERTURAS VERDES

A consciencialização ambiental conduz cada vez mais à adoção de estratégias para o melhoramento do ecossistema. A implementação das coberturas verdes é uma destas estratégias tendo benefícios ambientais, sociais e económicos.

2.2.1. VANTAGENS AMBIENTAIS

Diversas investigações mostram que as coberturas verdes têm como uma das suas principais funções a mitigação das alterações climáticas.

2.2.1.1. Melhoria da qualidade do ar

Geralmente, nas áreas urbanas há uma maior concentração de poluentes no ar devido ao tráfego intenso e às emissões industriais. De maneira a controlar o aumento da poluição ambiental, podem ser adotas soluções inovadoras, como é o caso das coberturas verdes que ajudam a combater a má qualidade do ar,

transformando os edifícios em construções mais eficientes com menos emissões poluentes, reduzindo a temperatura absorvida pela cobertura e absorvendo os gases poluentes através da vegetação. As melhorias da qualidade do ar refletem-se também na população, diminuindo o risco de doença respiratória e alérgica (Tolderlund, 2010; Neoturf, 2022).

2.2.1.2. Aumento da biodiversidade

A expansão urbana contribui para uma diminuição da biodiversidade e as coberturas verdes podem ser uma ótima alternativa aos habitats destruídos. Dependendo das espécies de plantas utilizadas e das características do substrato, podemos ter uma fauna mais ou menos enriquecida. Embora, nos climas continentais o substrato possa congelar no inverno impossibilitando a vida aos pássaros e insetos nessa estação do ano, durante a estação de aquecimento, as coberturas verdes oferecem ilhas ecológicas onde os pássaros e os insetos se podem alimentar e reproduzir (Neoturf, 2022).

2.2.1.3. Gestão das águas pluviais

O escoamento de águas pluviais é um problema crescente nas áreas urbanas devido ao aumento das superfícies impermeáveis. Por consequência, as águas da chuva são diretamente drenadas para condutas de águas pluviais. Quando há uma chuvada intensa e estas condutas são sobrecarregadas, eleva o risco de inundação principalmente em zonas de cotas mais baixas (Manso et al, 2021). As coberturas verdes ajudam a reter a água da chuva através do substrato, libertando parte dela lentamente e aproveitando a outra parte para a vegetação presente nesta camada. Esta solução reduz o volume de água perdida superficialmente, mas também contribui para o melhoramento da qualidade da mesma, pois o substrato absorve parte dos poluentes nela presentes (Neoturf, 2022). As coberturas verdes extensivas reduzem o escoamento das águas pluviais em 57%, já as coberturas verdes intensivas têm uma retenção de 79% (Manso et al, 2021).

2.2.1.4. Aumento da proteção contra o ruído

As coberturas verdes contribuem para amenizar o ruído urbano, funcionando com isolamento acústico. A camada de terra vegetal isola das baixas frequências e a vegetação das frequências altas. Segundo um estudo do Instituto Superior Técnico de Lisboa, estas coberturas atenuam o ruído urbano em média 5,5 dB, podendo variar entre os 0 e os 10 dB (Manso et al, 2021).

2.2.1.5. Redução do efeito da ilha de calor

O efeito da ilha de calor é o reflexo da expansão urbana, o aumento da construção de edifícios, estradas de asfalto, que absorvem mais radiação solar, somado ao calor devido à poluição industrial e ao trânsito nas cidades. Por consequência, aumenta a temperatura nas áreas urbanas comparativamente a zonas circundantes. A temperatura média anual do ar numa área urbana com cerca de um milhão de habitantes, pode ser 1ºC a 3ºC mais elevada ao longo do dia do que numa área circundante, podendo esta variação chegar aos 10ºC durante a noite (Iberdrola, 2022).

De forma a contrariar este efeito, é necessário promover o arrefecimento superficial dos edifícios. As coberturas verdes têm um papel importante neste arrefecimento, pois as plantas possuem a capacidade de absorver a radiação solar para proceder às suas funções biológicas, como a fotossíntese, a transpiração, a evaporação e a respiração, criando assim um microclima ameno (Manso et al, 2021). A correta colocação da vegetação numa cobertura verde pode baixar a temperatura do ar de 2ºC a 8ºC, regulando a temperatura nos centros urbanos (Valente, 2019).

Fig. 10 – Efeito da Ilha de Calor (Iberdrola, 2022)

2.2.2. VANTAGENS ECONÓMICAS

2.2.2.1. Proteção da impermeabilização da cobertura

As coberturas tradicionais atuais possuem uma membrana de impermeabilização com uma vida útil de 10 a 20 anos, enquanto nas coberturas verdes essa membrana pode garantir uma vida útil de 50 anos ou mais (Manso et al, 2021). A correta aplicação de uma cobertura verde prolongará a vida útil dos materiais isolantes, protegendo-os da exposição direta à radiação solar, diminuindo a temperatura e, por consequência, reduzindo a amplitude térmica (Neoturf, 2022).

2.2.2.2. Eficiência energética

Uma das principais vantagens da aplicação de coberturas verdes é o aumento da eficiência energética dos edifícios. Na estação de arrefecimento, esta solução é capaz de reduzir a temperatura ambiente através da evapotranspiração e da absorção da radiação solar pelas plantas, permitindo a diminuição da temperatura na cobertura. Na estação de aquecimento, dificulta as perdas de calor pela camada de substrato, reduzindo os custos de aquecimento nos edifícios. A eficácia desta solução depende muito da espessura de substrato utilizada na execução da cobertura (Novo, 2016).

2.2.2.3. Valorização Imobiliária

A implementação de coberturas verdes num edifício agrega-lhe valor imobiliário. Segundo um estudo do Instituto Superior Técnico de Lisboa que analisa dados de vários investigadores, o valor imobiliário de um edifício aumenta em média 8,24% e o seu valor de aluguer aumenta em 16,2%, com a aplicação desta solução (Manso et al, 2021).

2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS UTILIZADOS EM COBERTURAS VERDES

2.3.1. CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO SUBSTRATO DE UMA COBERTURA VERDE EM FUNÇÃO DO SEU TEOR DE HUMIDADE

A condutibilidade térmica (λ) depende diretamente do teor de humidade presente no substrato, ou seja, o valor de λ é tanto maior quanto o teor de humidade e consequentemente um mau isolante térmico.

Tendo isto em conta, vários investigadores avaliam o comportamento de diversos tipos de substratos para o valor de λ em função do teor de humidade.

Um estudo da Universidade de Coimbra, permitiu submeter diferentes tipos de substrato a quatros ensaios com as seguintes condições: seco, 23ºC e 50% de humidade relativa, 23ºC e 80% de humidade relativa e saturado. Com a finalidade de obter o coeficiente de condutibilidade térmica a três temperaturas: 10ºC, 25ºC e 40ºC. Obtendo-se o seguinte resultado (Albino, 2020):

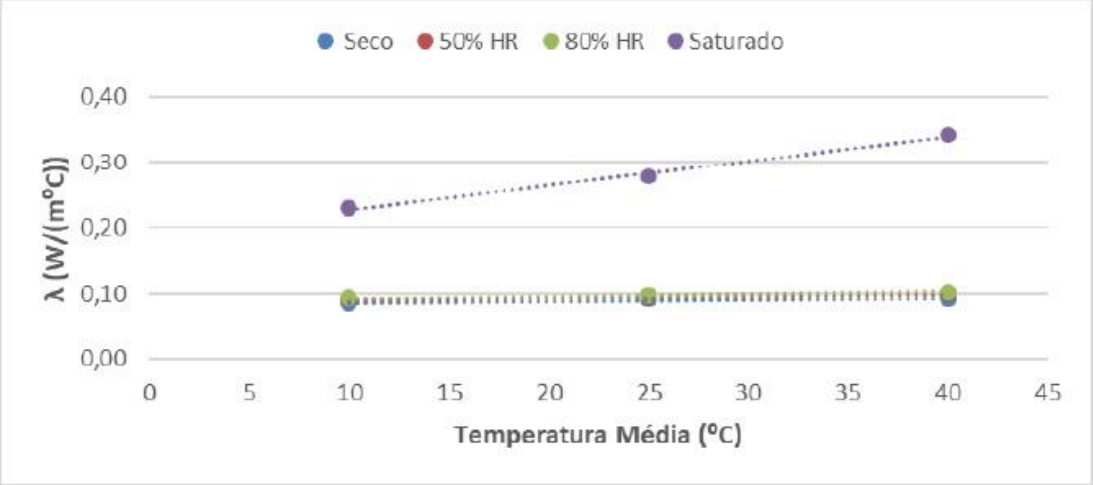


Fig. 11 – Condutibilidade térmica de uma amostra de substrato em função da temperatura média para as condições de seco, 23ºC 50%HR, 23ºC 80%HR e saturado (Albino, 2020)

Quadro 1 – Resultados da condutibilidade térmica obtidos para a temperatura de 10ºC na amostra de substrato (adaptado de Albino, 2020)

	Seco	23ºC 50% HR	23ºC 80% HR	Saturado
	λ_{10^o}	λ_{10^o}	λ_{10^o}	λ_{10^o}
Amostra de substrato	0,085	0,091	0,093	0,230

Na Fig. 11 e no Quadro 1, pode-se observar a variação da condutibilidade térmica da amostra de substrato em função da temperatura. Nas condições seco, 50% e 80% de humidade relativa, a variação da condutibilidade térmica (λ) é bastante discreta entre as diferentes temperaturas (Albino, 2020).

A empresa ThermoConcept dedica-se ao estudo térmico dos materiais, observando a condutibilidade térmica e a resistência térmica do solo, propriedades que são inversamente proporcionais. O estudo realizado por esta empresa revelou os seguintes resultados:

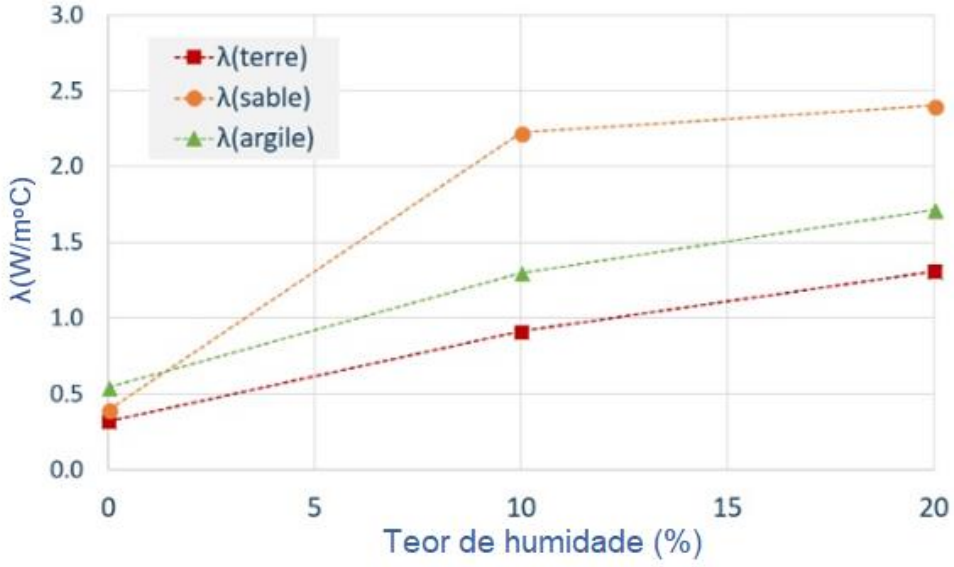


Fig. 12 – Variação da condutibilidade térmica dos solos em função do seu teor de água (adaptado de ThermoConcept, 2022)

Quadro 2 – Resultados da condutibilidade térmica dos solos nas condições seco, 10% de teor de humidade e saturado (ThermoConcept, 2022)

Tipo de solo	Condutibilidade Térmica para solo seco	Condutibilidade Térmica para solo com 10% de teor de humidade	Condutibilidade Térmica para solo saturado
Terra	0,321	0,912	1,307
Areia	0,396	2,224	2,402
Argila	0,543	1,298	1,715

A empresa portuguesa Landlab comercializadora de produtos ligados à construção sustentável dispõe de um substrato técnico, constituído por componentes especiais diversificados, com base mineral e orgânica de alta qualidade (Landlab, 2022). Este substrato foi desenvolvido por especialistas alemães com a colaboração de engenheiros agrónomos portugueses e tem as seguintes características:

Quadro 3 – Valores da condutibilidade térmica do substrato técnico nas condições de seco e saturado para as temperaturas de 10ºC, 25ºC e 40ºC (Landlab, 2020)

	Condutibilidade Térmica em estado seco (W/mºC)			Condutibilidade Térmica em estado saturado (W/mºC)		
Substrato Técnico	10ºC	25ºC	40ºC	10ºC	25ºC	40ºC
	0,085	0,091	0,092	0,230	0,279	0,342

Em síntese, como já foi dito anteriormente e se pode comprovar pelos estudos acima apresentados, o valor da condutibilidade térmica (λ) aumenta tanto quanto o teor de água presente no substrato, significa

isto que os substratos saturados têm um elevado coeficiente de transmissão térmica (U) e uma resistência térmica fraca (R).

2.3.2. COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UMA COBERTURA VERDE

Numa campanha experimental da Universidade de Coimbra, realizada pela estudante Katya Coelho, dedicada ao comportamento térmico realizou-se um estudo de uma cobertura verde em câmara bioclimática, para as situações de inverno e verão, regime permanente e variável, com e sem precipitação (Coelho, 2019). Estudaram-se dois tipos de cobertura verde: cobertura verde modular (A) e cobertura verde convencional (B).

A Fig. 13 representa a localização e alinhamento dos sensores colocados nas duas coberturas.

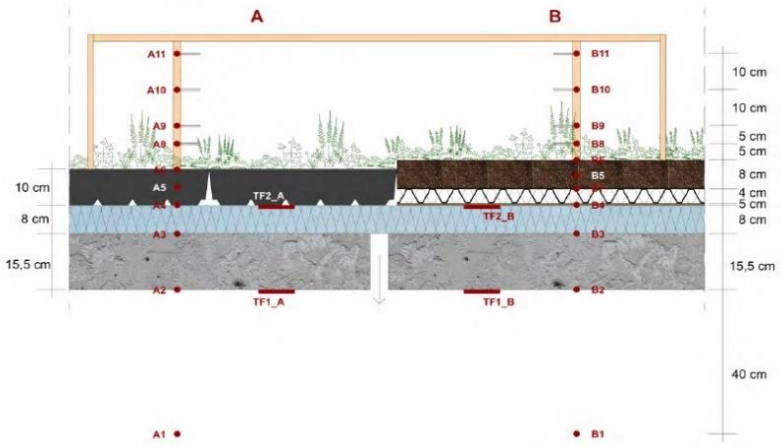


Fig. 13 – Localização dos sensores na cobertura verde modular (A) e na cobertura verde convencional (B) (Coelho, 2019)

Primeiramente, observamos os resultados deste estudo para o regime permanente, tanto na situação de inverno onde a temperatura exterior se mantem constante nos 5ºC e a temperatura ambiente interior foi programada para os 20ºC, como na situação de verão onde a temperatura exterior se mantem constante nos 30ºC e a temperatura ambiente interior permanece nos 20ºC. De maneira a que não ser demasiado extensivo, destacam-se apenas os resultados da cobertura verde convencional (B).

A Fig. 14 apresenta os resultados obtidos para a situação de inverno em regime permanente seco. Como o comportamento da cobertura verde convencional é semelhante na situação de verão optou-se por não colocar os gráficos.

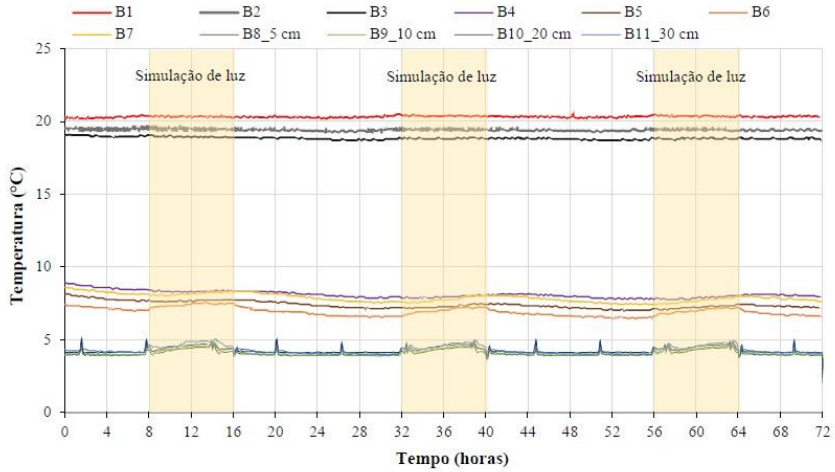


Fig. 14 – Temperaturas medidas na zona B (cobertura verde convencional) ao longo de 72 horas (Coelho, 2019)

Conclui-se que a diferença de temperaturas entre a superfície do substrato (B6) e o ambiente exterior corresponde a cerca de 3ºC, revelando que a vegetação possui uma resistência térmica significativa. Também o gradiente de temperatura entre a superfície superior da laje de betão (B3) e o ambiente exterior, cerca de 15ºC, comprova a elevada proteção térmica do sistema de cobertura verde, isto é, do conjunto substrato e isolamento térmico. (Coelho, 2019).

A Fig. 15 apresenta os resultados do fluxo de calor obtido na cobertura verde convencional, zona B, durante as 72 horas de estudo. Como o comportamento da cobertura verde convencional é semelhante na situação de verão optou-se por não colocar os gráficos.

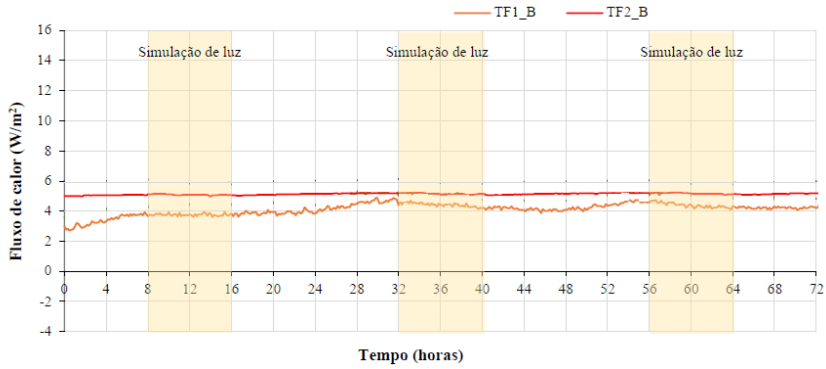


Fig. 15 – Fluxos de calor medidos na superfície inferior da laje (TF1_B) e sobre o XPS (TF2_B), (adaptado de Coelho, 2019)

Observando os fluxos de calor na camada de XPS (TF2_B) e as diferentes temperaturas entre ambientes, concluiu-se que o coeficiente de transmissão térmica na zona B ronda os 0,35 W/(m^2.ºC) (Coelho, 2019).

Seguindo com as mesmas temperaturas nos ambientes interior e exterior, mas inserindo a simulação de chuva, obtiveram-se os seguintes resultados na zona B:

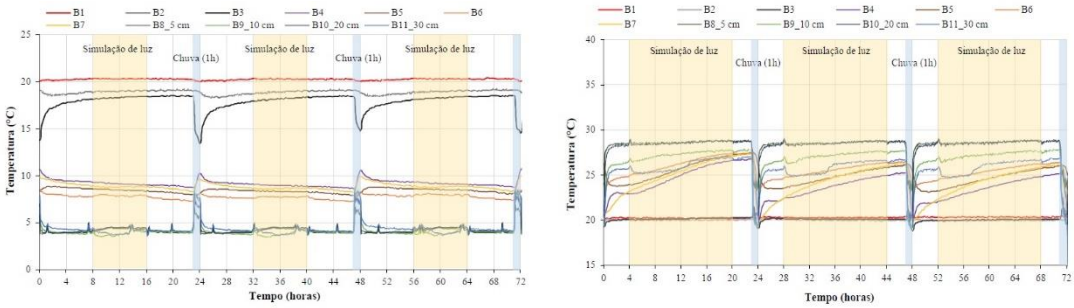


Fig. 16 – Temperaturas medidas na zona B ao longo das 72 horas com períodos de chuva, à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (Coelho, 2019)

Com a introdução de simulação de chuva, na situação de inverno, verificou-se um aumento das temperaturas exteriores (B8 a B11), podendo este aumento ter sido influenciado pela água acima dos 12ºC de temperatura, consequentemente houve um aumento da temperatura na superfície do substrato (B6). (Coelho, 2019).

Por outro lado, na situação de verão, as temperaturas do ambiente exterior (B8 a B11) e no sistema de cobertura diminuíram durante o período de chuva. Comparativamente com a situação de inverno, a temperatura na superfície da laje (B3) e do ambiente interior (B1) são semelhantes, comprovando uma vez mais a resistência térmica oferecida pela cobertura verde (Coelho, 2019).

A Fig. 17 apresenta os resultados obtidos para os fluxos de calor na superfície do XPS (TF2_B) com ocorrência de chuva, na solução de cobertura verde convencional.

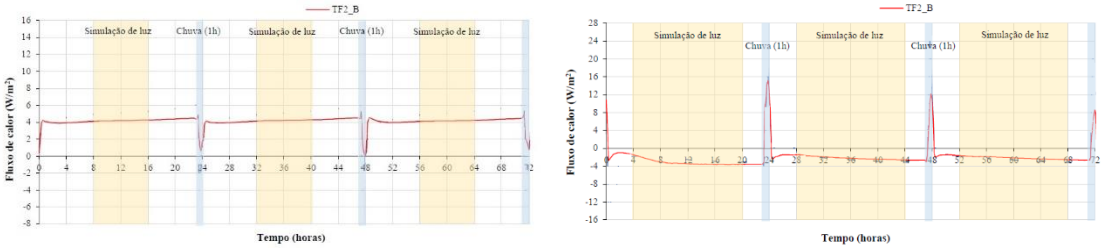


Fig. 17 – Fluxos de calor medidos na superfície do XPS (TF2_B), com simulação de chuva, à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (adaptado de Coelho, 2019)

Na situação de inverno, verifica-se que com a ocorrência de chuva há uma variação nos fluxos de calor, devido às temperaturas da superfície exterior da laje e do substrato serem bastante próximas; ainda assim, os fluxos tendem a estabilizar-se rapidamente. No período de chuva, os fluxos de calor diminuem devido ao aumento da temperatura no sistema, independentemente do humedecimento do substrato e, por consequência, aumento da condutibilidade térmica. Tendo em conta o momento imediatamente antes da simulação de chuva, estima-se que o coeficiente de transmissão térmica na zona B ronde os 0,28 W/(m^2.ºC) (Coelho, 2019).

Na situação de verão, verifica-se que os fluxos de calor estabilizam rapidamente após o período de chuva, aproximando-se os valores no regime permanente seco. Observando os fluxos de calor na camada de XPS (TF2_B) e as diferentes temperaturas entre ambientes, concluiu-se que o coeficiente de transmissão térmica na zona B ronda os 0,36 W/(m^2.ºC) (Coelho, 2019).

Seguidamente, observamos os resultados deste estudo para o regime variável, tanto na situação de inverno onde a temperatura exterior varia entre os 0ºC e 15ºC e a temperatura ambiente interior

permanece nos 20ºC, como na situação de verão onde a temperatura exterior varia entre os 10ºC e 35ºC e a temperatura ambiente interior permanece nos 20ºC. De maneira a que não ser demasiado extensivo, destacam-se apenas os resultados da cobertura verde convencional (B).

A Fig. 18 apresenta os resultados da temperatura medida na zona B ao longo do tempo para o regime variável, sendo este obtido com recurso à variação da temperatura exterior.

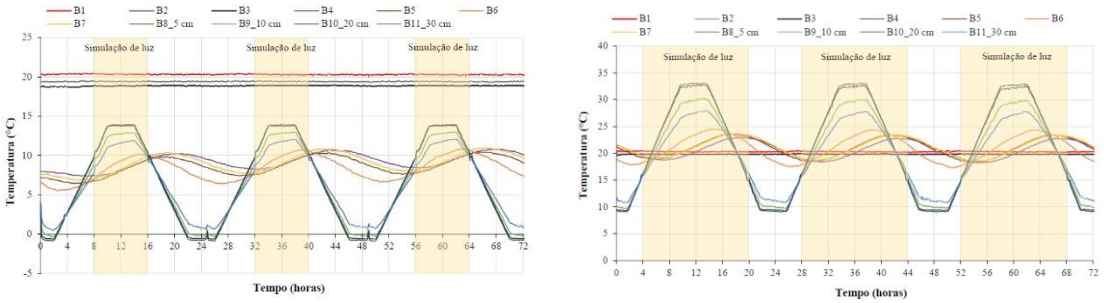


Fig. 18 – Temperaturas medidas na zona B ao longo de 72 horas, à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (Coelho, 2019)

Na situação de inverno, verifica-se que a variação de temperatura abaixo do XPS (B3) é praticamente nula independentemente da variação de temperatura no exterior, significa isto que o conjunto XPS e cobertura verde concede proteção térmica. Analisando a diferença temporal entre o momento em que se atinge a temperatura máxima no ambiente exterior e o momento em que se atinge a temperatura máxima abaixo do substrato (B4), constata-se que há um atraso térmico de aproximadamente 11 horas na zona B (cobertura verde convencional) devido à camada de substrato e vegetação (Coelho, 2019).

Na situação de verão, observamos uma grande semelhança com o comportamento térmico da cobertura verde na situação de inverno. A variação da temperatura do ambiente exterior não influência a variação das temperaturas abaixo do XPS (B3), que se verificam praticamente constantes, fenómeno este que não ocorre em coberturas tradicionais. Constata-se um atraso térmico de aproximadamente 9 horas na zona B, devido à camada de substrato (Coelho, 2019).

A Fig. 19 apresenta os resultados obtidos para os fluxos de calor na superfície do XPS (TF2_B) na solução de cobertura verde convencional.

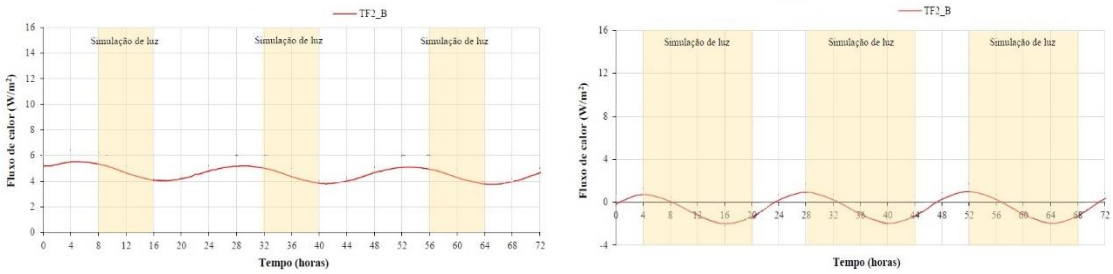


Fig. 19 – Fluxos de calor medidos na superfície do XPS (TF2_B), à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (adaptado de Coelho, 2019)

Tanto na situação de inverno como na situação de verão, a variação do fluxo de calor tem um comportamento sinusoidal. Na situação de inverno, a variação do fluxo de calor tem uma amplitude de 1 W/m^2 e na situação de verão uma amplitude de 4 W/m^2 (Coelho, 2019).

Seguindo com as mesmas temperaturas nos ambientes interior e exterior, mas inserindo a simulação de chuva, obtiveram-se os seguintes resultados na zona B:

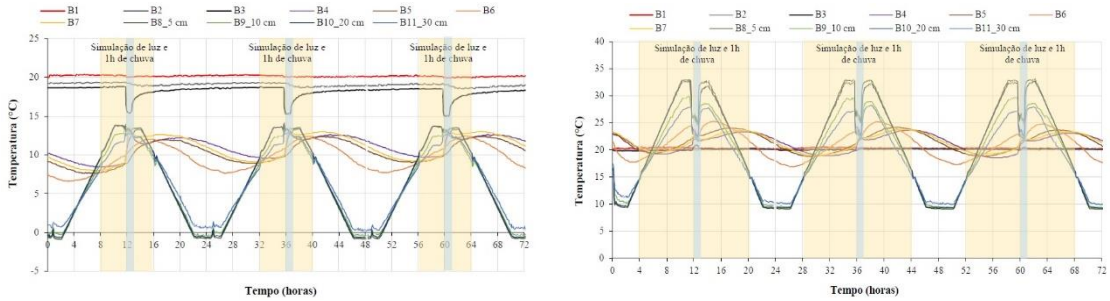


Fig. 20 – Temperaturas medidas na zona B ao longo das 72 horas com períodos de chuva, à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (Coelho, 2019)

Nas duas situações pode-se verificar que a perturbação das temperaturas ocorre aquando os períodos de chuvas, tendo uma rápida recuperação (Coelho, 2019).

A Fig. 21 apresenta os resultados obtidos para os fluxos de calor na superfície do XPS (TF2_B) com ocorrência de chuva, na solução de cobertura verde convencional.

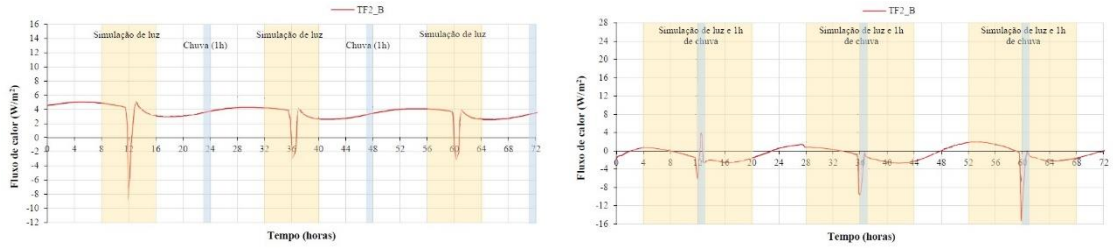


Fig. 21 – Fluxos de calor medidos na superfície do XPS (TF2_B), com simulação de chuva, à esquerda na situação de inverno e à direita na situação de verão (adaptado de Coelho, 2019)

Na situação de inverno, há uma variação do fluxo de calor devido à proximidade da temperatura da superfície exterior da laje e do substrato, contudo, os fluxos tendem a estabilizar-se rapidamente. Na situação de verão, verificam-se amplitudes de fluxo de calor com pouca relevância, sendo evidente que as perturbações do fluxo coincidem com os períodos de simulação de chuva (Coelho, 2019).

Numa investigação da Universidade de Purdue, no Indiana, analisou-se o desempenho térmico das coberturas verdes em climas frios, usando como caso de estudo a cobertura verde inserida na cobertura de Schelman Hall no próprio campus universitário.

Com este estudo chegaram à conclusão que, o fluxo de calor na cobertura verde é muito menor do que numa cobertura tradicional, indicando que as coberturas verdes reduzem significativamente as perdas de calor através da cobertura quando comparadas com as coberturas tradicionais. O fluxo de calor medido na cobertura tradicional foi de 15,77 W/m^2 e na cobertura verde de 11,86 W/m^2, é relevante dizer que o artigo não dispõe de informação suficiente acerca do coeficiente de transmissão térmica (U), ou seja, não se sabe se os elementos construtivos em estudo possuem o mesmo valor de U. Contudo, perante temperaturas exteriores muito baixas a cobertura verde tem um melhor desempenho térmico, pois tem uma capacidade de armazenamento térmico extra através da camada de substrato (Tang e Qu, 2016).

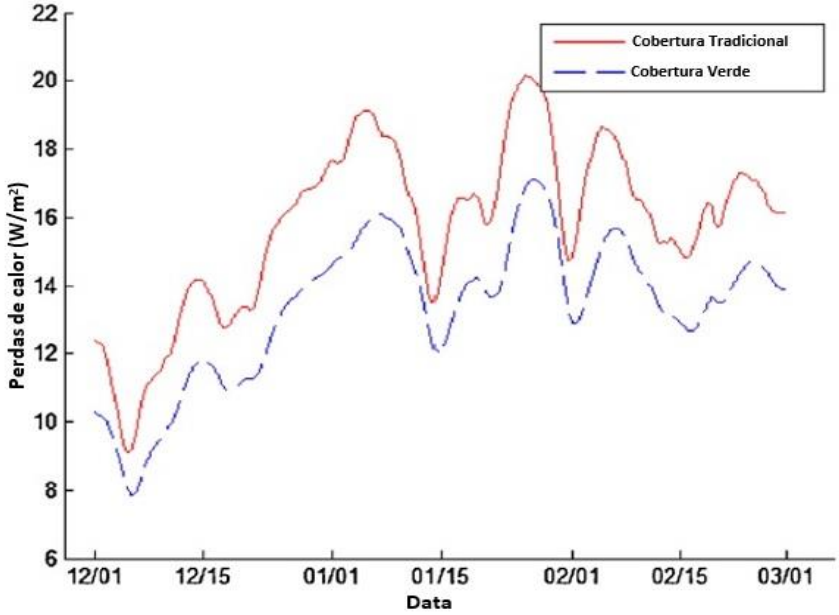


Fig. 22 – Comparação das perdas de calor da cobertura tradicional e da cobertura verde (adaptado de Tang e Qu, 2016)

As variações de temperatura na superfície exterior da camada de isolamento são significativamente menores na cobertura verde do que na cobertura tradicional. No período de análise, a temperatura na superfície exterior do isolamento da cobertura verde variou entre os 0,03ºC e os 19,02ºC, enquanto na cobertura tradicional a temperatura variou entre -12,13ºC e 19,89ºC (Tang e Qu, 2016).

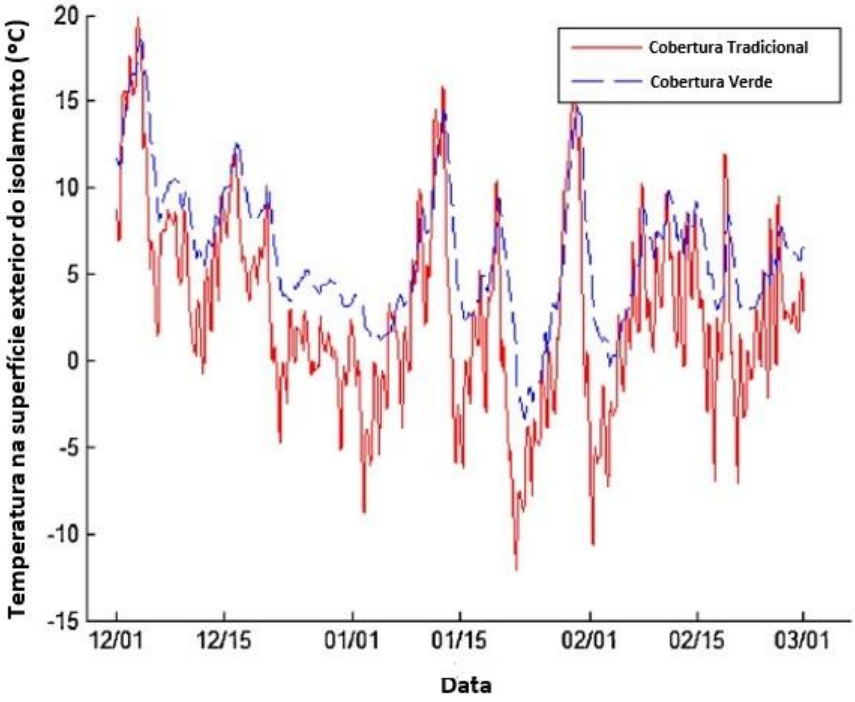


Fig. 23 – Comparação da temperatura na superfície exterior do isolamento na cobertura verde e na cobertura tradicional (Tang e Qu, 2016)

Por fim, estudou-se a temperatura da cobertura e o seu fluxo de calor para três condições climatéricas: clima quente, clima intermédio e clima frio; concluindo-se que as variações de temperatura são mais

notórias na cobertura tradicional do que na cobertura verde. Em muitos casos, a temperatura da cobertura tradicional é mais baixa do que na cobertura verde, em dias frios. Comparando o fluxo de calor nos dois tipos de cobertura, verifica-se que o fluxo na cobertura verde é significativamente menor do que cobertura tradicional.

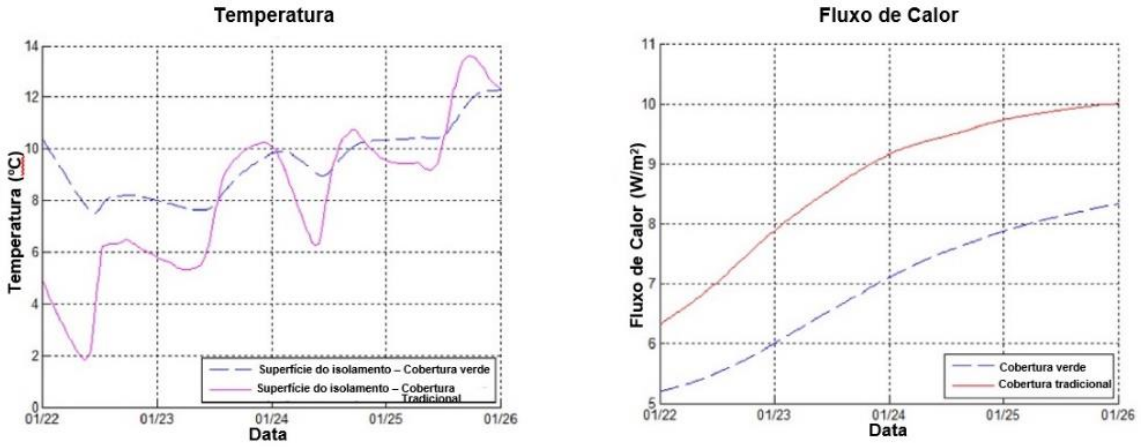


Fig. 24 – Temperatura e fluxo de calor em clima quente (adaptado de Tang e Qu, 2016)

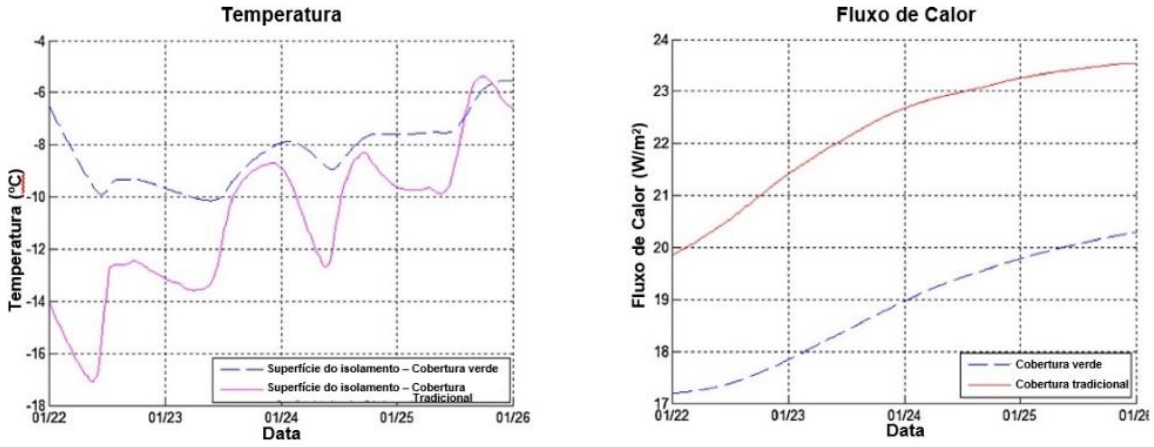


Fig. 25 – Temperatura e fluxo de calor em clima frio (adaptado de Tang e Qu, 2016)

Num estudo elaborado por três investigadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em conjunto com dois investigadores alemães, que pretende analisar a influência da irrigação das coberturas verde em situação de verão, monitorizaram-se duas coberturas com soluções de isolamento térmico idênticas, uma cobertura verde e outra cobertura tradicional como está esquematizado nas Figs. 26 e 27 (Freitas et al, 2016).

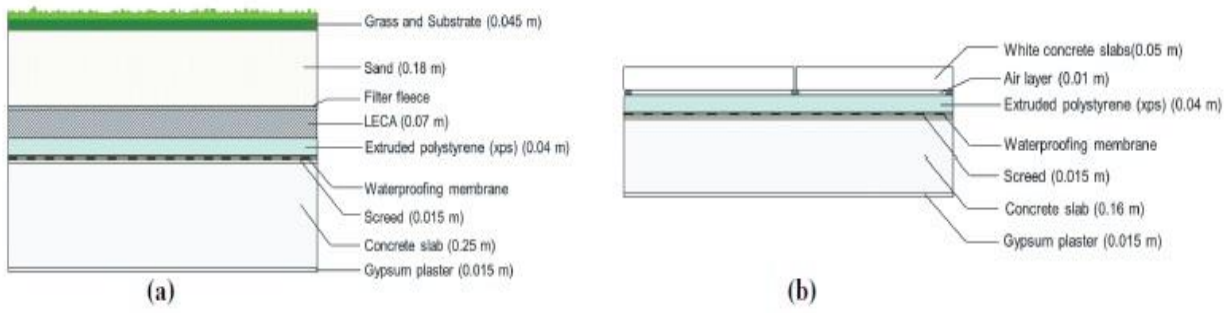


Fig. 26 – Composição das coberturas: (a) verde e (b) tradicional (Freitas et al, 2016)

Na cobertura verde foi instalado um aspersor de irrigação para garantir a rega em períodos quentes e secos. Foram instalados sensores para monitorização da temperatura superficial exterior na cobertura verde e na tradicional, do teor de humidade na cobertura verde e os fluxos de calor. Adicionalmente, os dados meteorológicos, como a temperatura do ar exterior, a precipitação e a radiação solar, também foram medidos no local de estudo. A análise experimental concentrou-se no desempenho térmico da cobertura verde com ou sem irrigação, nos fluxos de calor, na temperatura superficial exterior ou perto da superfície e no teor de humidade em comparação com a cobertura tradicional.

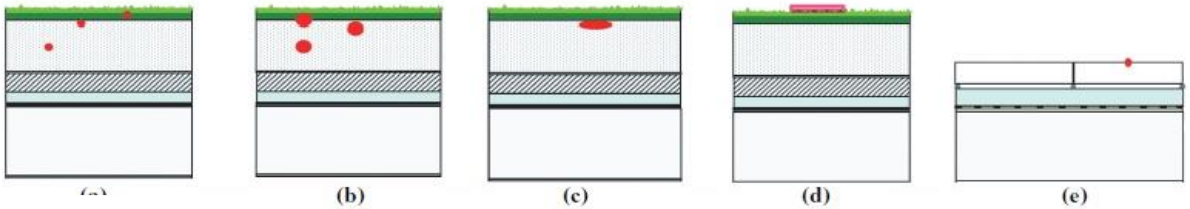
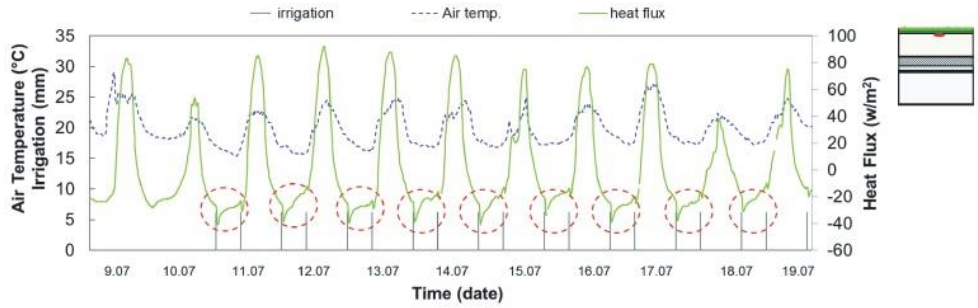


Figure 3 *Monitoring positions: (a) vegetative roof temperature profile at 0.02, 0.045, and 0.135 m below the surface; (b) vegetative roof water content profile at 0.045 m (WC0), 0.09 m (WC1), and 0.135 m (WC2) below the surface; (c) vegetative roof heat flux sensor at the beginning of the sand layer (0.045 m below the surface); (d) vegetative roof infrared surface temperature sensor, placed at 0.6 m above the surface; and (e) traditional roof surface temperature.*

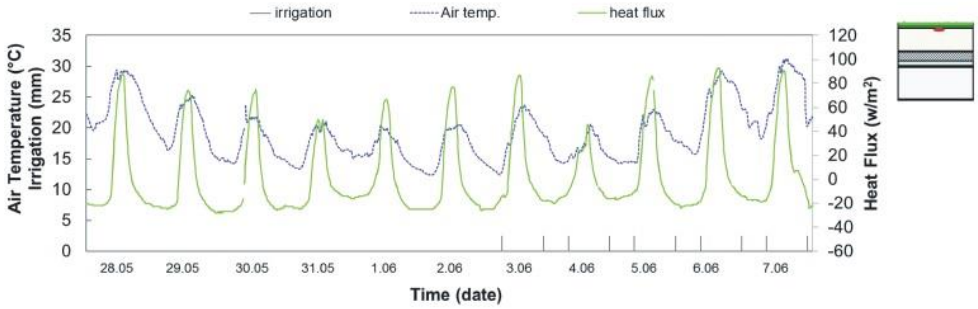
Fig. 27 – Posições dos sensores de monitorização (Freitas et al, 2016)

Analisando as figuras abaixo, percebe-se que a irrigação funciona como um refrigerador passivo devido à evapotranspiração, biomecanismo efetuado pelas plantas. É possível observar uma mudança do sentido do fluxo de calor devido á irrigação correspondente a 6,3 L/m^2 aplicada entre as 8h e as 23h, por outro lado quando há uma irrigação de 2,5 L/m^2 não cria impacto no fluxo de calor da cobertura.



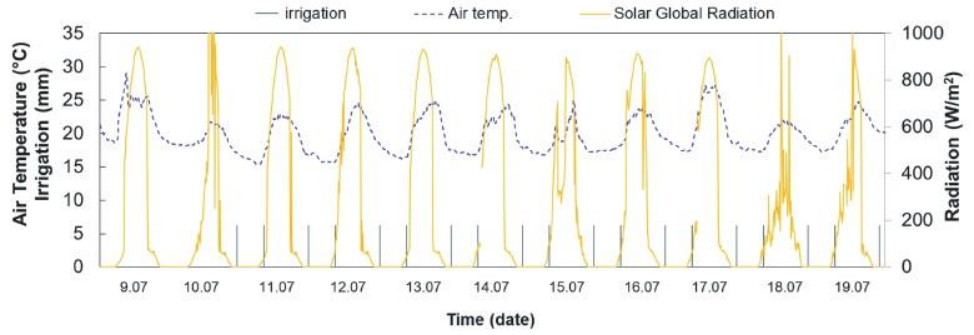
Impact of the irrigation (6.3 L/m^2) on the heat flux measured at 4.5 cm below the vegetative roof surface from July 9 to 19, 2015 (10-min data), marked with the red circles.

Fig. 28 – Impacto da irrigação (6,3 L/m^2) no fluxo de calor medido 4,5 cm abaixo da camada de vegetação (Freitas et al, 2016)



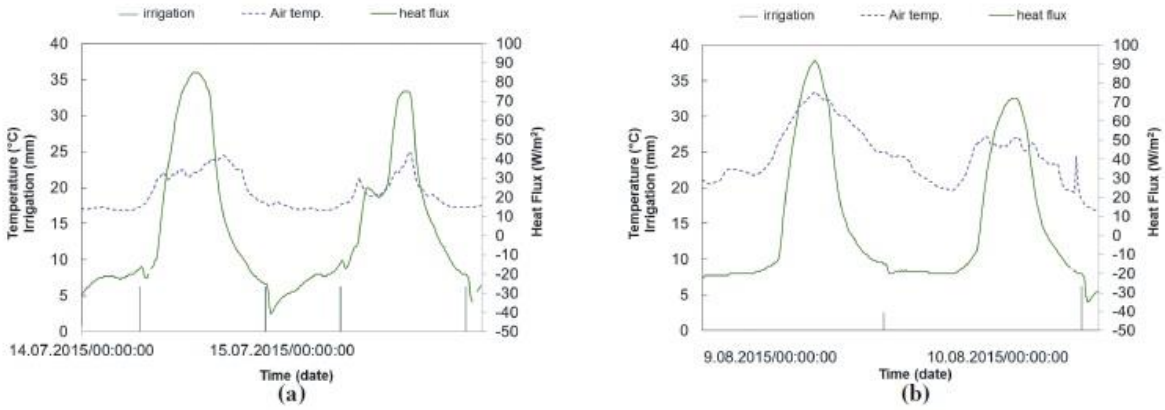
Impact of the irrigation (2.5 L/m²) on the heat flux measured at 4.5 cm below the vegetative roof surface from May 28 to June 7, 2015 (period from May 13 to June 2 without irrigation) (10-min data).

Fig. 29 – Impacto da irrigação (2,5 L/m²) no fluxo de calor medido 4,5 cm abaixo da camada de vegetação (Freitas et al, 2016)



Measured weather parameters on the vegetative roof: air temperature at 1.5 m and solar global radiation from July 9 to 19, 2015 (10-min data).

Fig. 30 – Medição dos dados meteorologicos na cobertura verde: temperatura do ar a 1,5 m e radiação solar (Freitas et al, 2016)

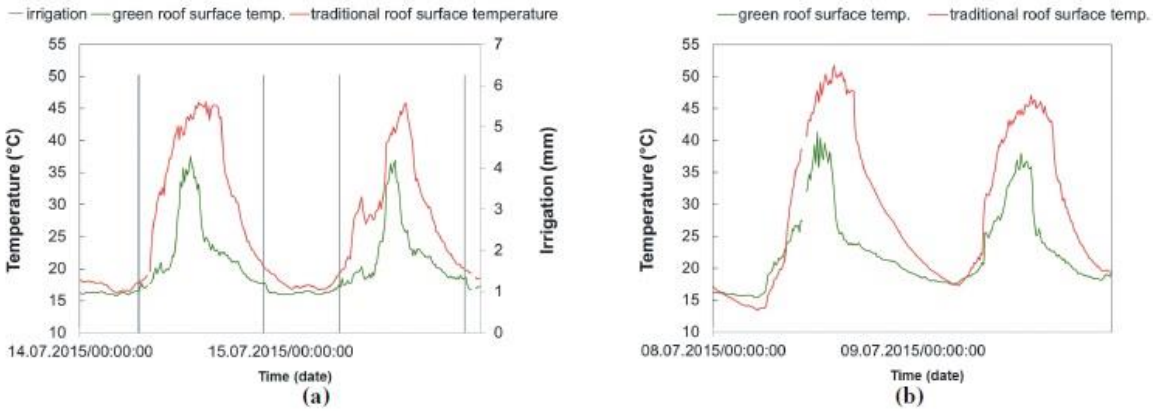


Irrigation impact in terms of heat fluxes: (a) July 14 and 15, 2015, and (b) August 9 and 10, 2015 (10-min data).

Fig. 31 – Impacto da irrigação no fluxo de calor (Freitas et al, 2016)

Analisando a cobertura verde comparativamente com a cobertura tradicional, conclui-se que as potencialidades de redução da temperatura da cobertura verde foram demonstradas para a situação de verão. No verão, a vegetação absorve maior parte da radiação solar usando-a nos seus mecanismos biológicos, como a evapotranspiração e a fotossíntese, diminuindo assim a temperatura da cobertura.

A Fig. 32 mostra os resultados obtidos para as duas coberturas com período com e sem irrigação. Podemos verificar que as temperaturas são mais elevadas na cobertura tradicional, tanto de dia como de noite, se houver irrigação. Por outro lado, se não houver irrigação, nos períodos noturnos, pode haver um desempenho térmico ligeiramente melhor na cobertura tradicional.



Surface temperature—vegetative roof and traditional roof: (a) two summer days with irrigation (July 14 and 15), and (b) two summer days without irrigation (July 8 and 9).

Fig. 32 – Temperatura superficial – cobertura verde e cobertura tradicional: (a) 2 dias de verão com irrigação e (b) 2 dias de verão sem irrigação (Freitas et al, 2016)

2.4. SÍNTESE DO CAPÍTULO

A análise efetuada permite:

- Conhecer a evolução das coberturas verdes no mundo desde a antiga Mesopotâmia até ao século XX;
- Descrever a evolução das coberturas verdes em Portugal desde o seu aparecimento na Quinta Real de Caxias até ao atual projeto da Câmara Municipal do Porto, Projeto Quinto Alçado do Porto;
- Caracterizar as vantagens da aplicação de coberturas verdes, enumerando os aspetos mais relevantes dos seus benefícios ambientais e económicos, sendo estes os seguintes: melhoria da qualidade do ar, aumento da biodiversidade, gestão de águas pluviais, aumento da proteção contra o ruído, redução do efeito da ilha de calor, proteção da impermeabilização da cobertura, eficiência energética e valorização imobiliária;
- Analisar três estudos sobre a condutibilidade térmica de diferentes substratos em estado seco e em estado saturado, concluindo que alguns valores são demasiado otimistas. Na minha dissertação irei utilizar o valor mais baixo e o valor mais elevado, de forma a averiguar o melhor e o pior cenário. Segue-se uma tabela resumo dos valores encontrados:

Quadro 4 – Tabela resumo dos valores da condutibilidade térmica nos diferentes substratos

Condutibilidade Térmica	Estudo da Universidade de Coimbra	ThermoConcept			Landlab
	Substrato	Terra	Areia	Argila	Substrato Técnico
λ_{seco}	0,085	0,321	0,396	0,543	0,085
$\lambda_{saturado}$	0,230	1,307	2,402	1,715	0,230

- Analisar alguns estudos do comportamento térmico de uma cobertura verde, um deles da Universidade de Coimbra em que se mediram as temperaturas das diversas camadas que compõem a cobertura verde e o fluxo de calor na superfície interior da laje, apenas medido para a situação de inverno em regime permanente, e na superfície do XPS medido para a situação de inverno e de verão, em regime permanente e variável. De onde conclui que, a vegetação confere uma elevada resistência térmica à cobertura e o conjunto vegetação e substrato permitem um elevado atraso térmico. Verifiquei também que a ocorrência de chuva influência os fluxos de calor, mas estes recuperam rapidamente.

  Num outro estudo realizado numa universidade norte americana, comparou-se a temperatura na superfície exterior do isolamento numa cobertura verde e numa cobertura tradicional e os respetivos fluxos de calor, em clima quente e frio. Verificando-se que as variações de temperatura e de fluxo de calor são menores na cobertura verde, indicando que as coberturas verdes reduzem significativamente as perdas de calor. Esta solução construtiva apresenta um melhor desempenho térmico, porque tem uma capacidade de armazenamento térmico através do substrato.

  No último estudo apresentado, com a marca FEUP, pretende-se analisar a influência da irrigação das coberturas verdes no desempenho térmico das mesmas, na estação de arrefecimento. Concluindo-se que quanto mais intensa for a irrigação, há uma mudança do sentido do fluxo de calor, colocando a irrigação a funcionar como refrigerador passivo.

3. QUANTIFICAÇÃO DA ESPESSURA DE ISOLAMENTO TÉRMICO REGULAMENTAR EM REGIME PERMANENTE PARA COBERTURAS VERDES E TRADICIONAIS

3.1. EXIGÊNCIAS REGULAMENTARES

Os edifícios são classificados de acordo com a sua zona climática de inverno (I1, I2 e I3) e verão (V1, V2 e V3), estas são necessárias na verificação dos indicadores de conforto térmico e no cumprimento dos requisitos de qualidade térmica da envolvente.

Com base na Portaria nº 138-I/2021, os valores máximos do coeficiente de transmissão térmica superficial aplicáveis a novos edifícios ou intervenções em edifícios existentes, consoante a zona climática são:

Quadro 5 – $U_{máx}$ (W/m².ºC) admissíveis de elementos opacos horizontais consoante a zona climática (Portaria nº 138-I/2021, 2021)

	Zona climática		
Elementos opacos horizontais	I1	I2	I3
	0,40	0,35	0,30

Tendo em conta a zona climática do Porto (I1), o coeficiente de transmissão térmica máximo imposto é de 0,40 W/m².ºC e, por consequência, tem que ser cumprida uma resistência térmica mínima de 2,50 m².ºC/W.

3.2. COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA (U) REGULAMENTAR

O regime permanente é caracterizado pelo fluxo de calor constante no tempo, devido às condições fronteira constantes. O regime permanente pode ser compreendido da seguinte forma: temos uma solução construtiva que separa o exterior do interior e o fluxo de calor desloca-se o local de temperatura superior para o local temperatura inferior. Assim, podemos concluir que, geralmente, no inverno o fluxo de calor desloca-se de dentro para fora e no verão desloca-se de fora para dentro.

A longevidade do regime permanente encontra algumas dificuldades pois estas circunstâncias não se verificam durante todo o dia, mês e ainda menos durante todo o ano, decorre apenas durante instantes ou períodos de tempo.

Neste capítulo será quantificado o desempenho térmico de uma cobertura verde e de uma cobertura tradicional, em regime permanente na situação de inverno, onde as temperaturas médias interiores variam entre os 16ºC e os 22ºC e as temperaturas exteriores variam entre os 4ºC e os 14ºC.

A capacidade que uma solução construtiva tem em conduzir o fluxo de calor do interior para o exterior da construção denomina-se coeficiente de transmissão térmica (U). Note-se que quanto menor for o valor do coeficiente de transmissão térmica, melhor será o desempenho energético da solução construtiva. Este parâmetro U é o inverso da resistência térmica (R_t):

$$U = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_{si} + \sum R_i + R_{se}} \ [W/m^2ºC] \quad (3.1)$$

As resistências térmicas de soluções construtivas constituídas por camadas de materiais heterogéneos podem ser consultadas no ITE50, ou por vezes, são disponibilizadas pelos fornecedores. No caso de os materiais serem homogéneos, a resistência térmica é calculada através do quociente entre a espessura da camada e o respetivo valor da condutibilidade térmica (λ).

$$R_t = \frac{e}{\lambda} \ [m^2ºC/W] \quad (3.2)$$

No cálculo do coeficiente de transmissão térmica adotamos os valores das resistências térmicas superficiais (R_{si} e R_{se}) presentes no ITE50. Como neste trabalho estamos a analisar o desempenho térmico de coberturas, o fluxo de calor segue um sentido vertical.

Quadro 6 – Resistências térmicas superficiais (ITE50, 2006)

Sentido do fluxo de calor		Resistência térmica superficial $[m^2ºC/W]$	
		R_{se}	R_{si}
Vertical	ascendente	0,04	0,10
	descendente	0,04	0,17

3.3. DESCRIÇÃO DA COBERTURA TRADICIONAL E DA COBERTURA VERDE ESTUDADA

3.3.1. COBERTURA TRADICIONAL

A cobertura tradicional em estudo constituída por um acabamento pelo interior em reboco (e=1,5 cm; λ=1,3 W/m.ºC), uma laje aligeirada em blocos de betão normal como estrutura de suporte (e=25 cm; R=0,20 m².ºC/W), uma camada de isolamento térmico (e=x; $\lambda_{cortiça}$=0,045 W/m.ºC ou λ_{XPS}=0,037 W/m.ºC), um sistema de impermeabilização e um geotêxtil termicamente desprezáveis e um acabamento exterior em betonilha (e=8 cm; λ=1,3 W/m.ºC).

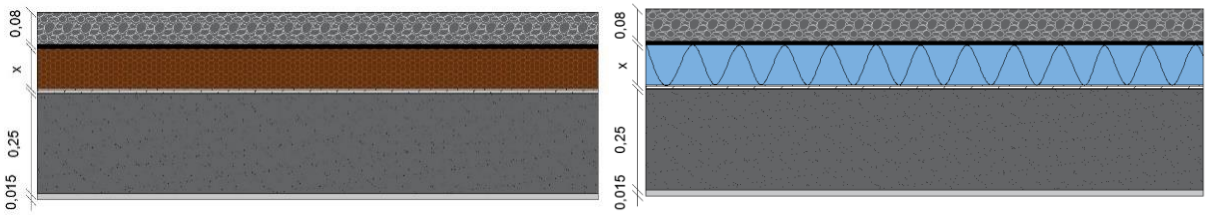


Fig. 33 – Cobertura tradicional com isolamento térmico em ICB (à esquerda) e em XPS (à direita)

3.3.2. COBERTURA VERDE

A cobertura verde constituída por um acabamento pelo interior em reboco (e=1,5 cm; λ=1,3 W/m.ºC), uma laje aligeirada em blocos de betão como estrutura de suporte (e=25 cm; R=0,20 m^2.ºC/W), uma camada de forma e uma camada de impermeabilização termicamente desprezáveis, uma camada de isolamento térmico (e=x; $\lambda_{cortiça}$=0,045 W/m.ºC ou λ_{XPS}=0,037 W/m.ºC), uma camada de filtragem e uma camada drenante desprezáveis termicamente, uma camada de substrato (e=y; $\lambda_{terra\ seca}$ = 0,321 W/m.ºC ou $\lambda_{terra\ saturada}$=1,307 W/m.ºC) ou (e=y; $\lambda_{sub.técnico\ seco}$=0,085 W/m.ºC ou $\lambda_{sub.técnico\ saturado}$=0,230 W/m.ºC) e uma camada de vegetação.

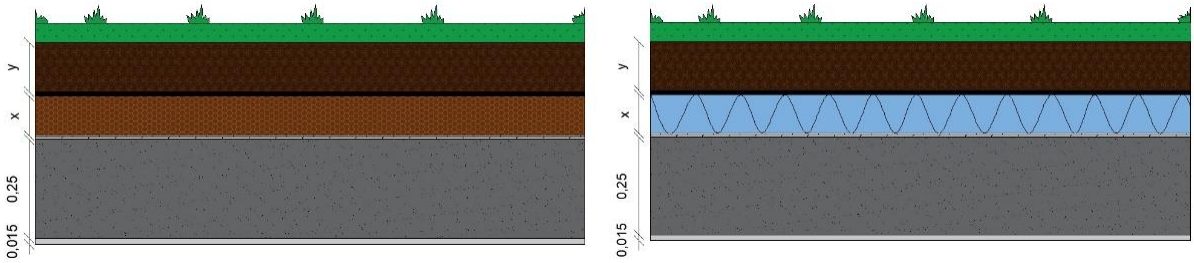


Fig. 34 – Cobertura verde com isolamento térmico em ICB (à esquerda) e em XPS (à direita)

3.4. CÁLCULO DA ESPESSURA DE ISOLAMENTO TÉRMICO REGULAMENTAR

Neste subcapítulo irei analisar a variação da espessura dois tipos de isolamento térmico, cortiça e poliestireno expandido extrudido (XPS), consoante a espessura de dois tipos de substrato, terra e substrato técnico, tendo em conta dois cenários, quando o substrato em estudo está seco ou saturado, de maneira a cumprir as exigências regulamentares. Também irá ser calculada a espessura dos dois isolamentos térmicos na cobertura tradicional em terraço, como modelo de comparação com as espessuras na cobertura verde.

3.4.1. COBERTURA TRADICIONAL EM TERRAÇO

O cálculo da espessura de isolamento térmico na cobertura tradicional em terraço de forma a satisfazer as exigências regulamentares serve de comparação com as espessuras de isolamento calculadas para a cobertura verde. Este cálculo tem que cumprir os seguintes parâmetros: $U_{máx}$=0,40 W/m^2.ºC ($R_{t,min}$=2,50 m^2.ºC/W).

Considerando a situação de inverno, o fluxo de calor é ascendente e assim os valores das resistências térmicas superficiais são R_{se}=0,04 m^2.ºC/W e R_{si}=0,10 m^2.ºC/W. O somatório da resistência térmica de todas as camadas constituintes, exceto do isolamento, é de 0,27 m^2.ºC/W e, consequentemente, a resistência térmica total é de 0,41 m^2.ºC/W. Assim, de maneira a cumprir o requisito da resistência térmica mínima, é necessário que o isolamento térmico tenha uma resistência térmica de 2,09 m^2.ºC/W. Multiplicando este valor pela condutibilidade térmica dos diferentes tipos de isolamento, obtém-se a espessura de aproximadamente 9 cm para a cortiça (ICB) e de aproximadamente 8 cm para o XPS.

Quadro 7 – Cálculo da espessura de isolamento para uma cobertura tradicional em terraço

$\sum R_i$ [m^2.ºC/W]	$R_{t,total}$ [m^2.ºC/W]	$R_{t,min}$ [m^2.ºC/W]	$\Delta R = R_{t,min} - R_{t,total}$ [m^2.ºC/W]	$e_{isolamento}$ [cm]	
				Cortiça (ICB)	XPS
0,27	0,41	2,50	2,09	9,41	7,75

3.4.2. COBERTURA VERDE COM SUBSTRATO DE TERRA SECA

Como já foi dito anteriormente, a condutibilidade térmica varia consoante o teor de água presente no material, concluindo-se que quando o material está seco a condutibilidade térmica é mais baixa comparativamente com o material saturado. Assim, calculou-se a espessura de isolamento térmico para diferentes alturas de substrato de terra seca com uma condutibilidade térmica de 0,321 W/m.ºC. No Quadro 8 apresenta o cálculo da espessura de dois tipos de isolamento térmico: cortiça (ICB) e XPS.

Quadro 8 – Cálculo da espessura do isolamento térmico consoante a altura do substrato de terra seca

$h_{substrato}$ [m]	R_i	$R_{i,substrato}$	$R_{t,total}$	$R_{t,min}$	ΔR	$e_{isolamento}$ [cm]		$\Delta e_{isolamento}$	
						ICB	XPS	ICB	XPS
0,08	0,35	0,25	0,60	2,50	1,90	8,55	7,03	-0,86	-0,72
0,10	0,35	0,31	0,66	2,50	1,84	8,27	6,80	-1,14	-0,95
0,15	0,35	0,47	0,82	2,50	1,68	7,57	6,23	-1,84	-1,52
0,20	0,35	0,62	0,97	2,50	1,53	6,87	5,65	-2,54	-2,10
0,40	0,35	1,25	1,60	2,50	0,90	4,07	3,34	-5,34	-4,41
0,60	0,35	1,87	2,22	2,50	0,28	1,26	1,04	-8,15	-6,71
0,80	0,35	2,49	2,84	2,50	-0,34	0,00	0,00	-9,41	-7,75
1,00	0,35	3,12	3,47	2,50	-0,97	0,00	0,00	-9,41	-7,75

Podemos observar que a espessura de isolamento é menor na cobertura verde quando comparada com a cobertura tradicional, com exceção da cobertura verde com altura de substrato igual ou superior a 0,80 m. Quando as alturas de substrato são iguais ou superiores a 0,80 m torna-se desnecessária a colocação de isolamento térmico, porque a resistência térmica mínima é atingida apenas com a camada de suporte e de substrato.

Observando a variação de isolamento térmico, isto é, a diferença entre a espessura de isolamento térmico na cobertura tradicional e na cobertura verde, constatamos que para alturas de substrato entre os 0,20 m e 0,60 m há uma redução da espessura de isolamento térmico de aproximadamente 2,50 a 8 cm quando se utiliza ICB e de aproximadamente 2 a 6,50 cm quando se utiliza XPS.

Comparando agora os tipos de isolamento, é necessário uma maior espessura de cortiça (ICB) do que de XPS de maneira a cumprir o parâmetro $R_{t,min}$=2,50 m^2.ºC/W.

3.4.3. COBERTURA VERDE COM SUBSTRATO DE TERRA SATURADA

O Quadro 9 apresenta o cálculo da espessura de isolamento térmico para o substrato de terra saturada com uma condutibilidade térmica de 1,307 W/m.ºC, verificando-se um significativo aumento na espessura de isolamento térmico, tanto de ICB como de XPS, comparativamente com o Quadro 8.

Quadro 9 – Cálculo da espessura do isolamento térmico consoante a altura do substrato de terra saturada

$h_{substrato}$ [m]	R_i	$R_{i,substrato}$	$R_{t,total}$	$R_{t,min}$	ΔR	$e_{isolamento}$ [cm]		$\Delta e_{isolamento}$	
						ICB	XPS	ICB	XPS
0,08	0,21	0,06	0,41	2,50	2,09	9,40	7,73	-0,01	-0,02
0,10	0,21	0,08	0,43	2,50	2,07	9,33	7,67	-0,08	-0,08
0,15	0,21	0,11	0,46	2,50	2,04	9,16	7,53	-0,25	-0,22
0,20	0,21	0,15	0,50	2,50	2,00	8,99	7,39	-0,42	-0,36
0,40	0,21	0,31	0,66	2,50	1,84	8,30	6,82	-1,11	-0,93
0,60	0,21	0,46	0,81	2,50	1,69	7,61	6,26	-1,80	-1,49
0,80	0,21	0,61	0,96	2,50	1,54	6,92	5,69	-2,49	-2,06
1,00	0,21	0,77	1,12	2,50	1,38	6,23	5,12	-3,18	-2,63

Observando a variação de isolamento térmico, isto é, a diferença entre a espessura de isolamento térmico na cobertura tradicional e na cobertura verde, constatamos que para alturas de substrato entre os 0,40 m e 0,60 m há uma redução da espessura de isolamento térmico de aproximadamente 1 a 2 cm quando se utiliza ICB e de aproximadamente 1 a 1,50 cm quando se utiliza XPS.

3.4.4. COBERTURA VERDE COM SUBSTRATO TÉCNICO SECO

O substrato técnico é usado como alternativa ao substrato de terra por ser mais leve e reduzir as cargas sobre a cobertura. Com isto, o Quadro 10 apresenta o cálculo da espessura de isolamento térmico para diferentes alturas de substrato técnico seco com uma condutibilidade térmica de 0,085 W/m.ºC.

Em comparação com a cobertura tradicional, esta cobertura verde necessita de uma menor espessura de isolamento térmico para cumprir o requisito $R_{t,min}$=2,50 m².ºC/W, com exceção das espessuras associadas à altura do substrato igual ou superior 0,20 m. Submetendo todas as alturas de substrato às mesmas condições, quando $h_{substrato} \geq 0{,}20$ m torna-se desnecessária a colocação de isolamento térmico, porque a resistência térmica mínima é atingida apenas com a camada de suporte e de substrato.

Quadro 10 – Cálculo da espessura do isolamento térmico consoante a altura de substrato técnico seco

$h_{substrato}$ [m]	R_i	$R_{i,substrato}$	$R_{t,total}$	$R_{t,min}$	ΔR	$e_{isolamento}$ [cm]		$\Delta e_{isolamento}$	
						ICB	XPS	ICB	XPS
0,08	0,21	0,94	1,29	2,50	1,21	5,44	4,47	-3,97	-3,28
0,10	0,21	1,18	1,53	2,50	0,97	4,38	3,60	-5,03	-4,15
0,15	0,21	1,76	2,11	2,50	0,39	1,73	1,43	-7,68	-6,32
0,20	0,21	2,35	2,70	2,50	-0,20	0,00	0,00	-9,41	-7,75
0,40	0,21	4,71	5,06	2,50	-2,56	0,00	0,00	-9,41	-7,75
0,60	0,21	7,06	7,41	2,50	-4,91	0,00	0,00	-9,41	-7,75

0,80	0,21	9,41	9,76	2,50	-7,26	0,00	0,00	-9,41	-7,75
1,00	0,21	11,76	12,11	2,50	-9,61	0,00	0,00	-9,41	-7,75

3.4.5. COBERTURA VERDE COM SUBSTRATO TÉCNICO SATURADO

O Quadro 11 apresenta o cálculo da espessura de isolamento térmico para o substrato técnico saturado com uma condutibilidade térmica de 0,230 W/m.ºC, verificando-se um significativo aumento na espessura de isolamento térmico, tanto de ICB como de XPS, comparativamente com o Quadro 10. Submetendo todas as alturas de substrato às mesmas condições, quando $h_{substrato} \geq 0{,}60$ m torna-se desnecessária a colocação de isolamento térmico, porque a resistência térmica mínima é atingida apenas com a camada de suporte e de substrato.

Quadro 11 – Cálculo da espessura do isolamento térmico consoante a altura de substrato técnico saturado

$h_{substrato}$ [m]	R_i	$R_{i,substrato}$	$R_{t,total}$	$R_{t,min}$	ΔR	$e_{isolamento}$ [cm]		$\Delta e_{isolamento}$	
						ICB	XPS	ICB	XPS
0,08	0,21	0,35	0,70	2,50	1,80	8,11	6,67	-1,30	-1,08
0,10	0,21	0,43	0,78	2,50	1,72	7,72	6,35	-1,69	-1,40
0,15	0,21	0,65	1,00	2,50	1,50	6,74	5,54	-2,67	-2,21
0,20	0,21	0,87	1,22	2,50	1,28	5,76	4,74	-3,65	-3,01
0,40	0,21	1,74	2,09	2,50	0,41	1,85	1,52	-7,56	-6,23
0,60	0,21	2,61	2,96	2,50	-0,46	0,00	0,00	-9,41	-7,75
0,80	0,21	3,48	3,83	2,50	-1,33	0,00	0,00	-9,41	-7,75
1,00	0,21	4,35	4,70	2,50	-2,20	0,00	0,00	-9,41	-7,75

Observando a variação de isolamento térmico, isto é, a diferença entre a espessura de isolamento térmico na cobertura tradicional e na cobertura verde, constatamos que para alturas de substrato entre os 0,20 m e 0,40 m há uma redução da espessura de isolamento térmico de aproximadamente 3,50 a 7,50 cm quando se utiliza ICB e de aproximadamente 3 a 6 cm quando se utiliza XPS.

3.4.6. INFLUÊNCIA DA HUMIDADE NO DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA COBERTURA VERDE EM REGIME PERMANENTE

Pela observação dos quadros acima verificamos que, tanto no caso do ICB como no XPS é necessário espessuras maiores na cobertura tradicional do que na cobertura verde, independentemente do substrato utilizado. Tendo em conta os dois substratos estudados, a variação da espessura de isolamento térmico é mais significativa quando estamos perante um substrato técnico. Quando em causa está o teor de água presente no substrato, o substrato seco necessita de espessuras de isolamento térmico menores do que o substrato saturado.

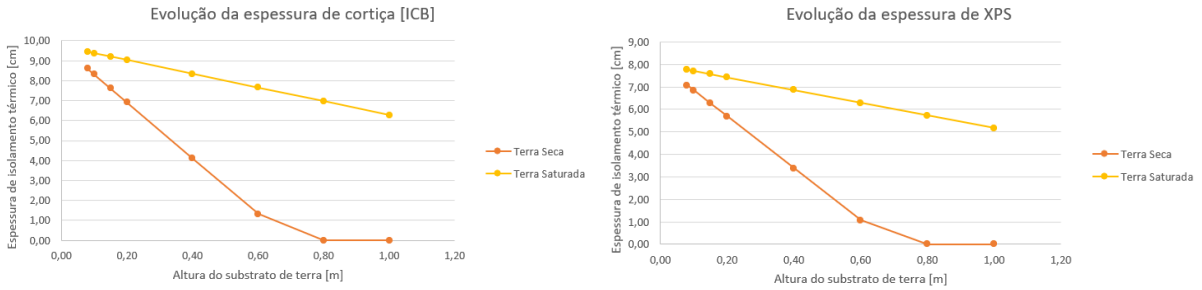


Fig. 35 - Comparação da espessura de isolamento térmico (ICB à esquerda e XPS à direita) para o substrato de terra seca e terra saturada

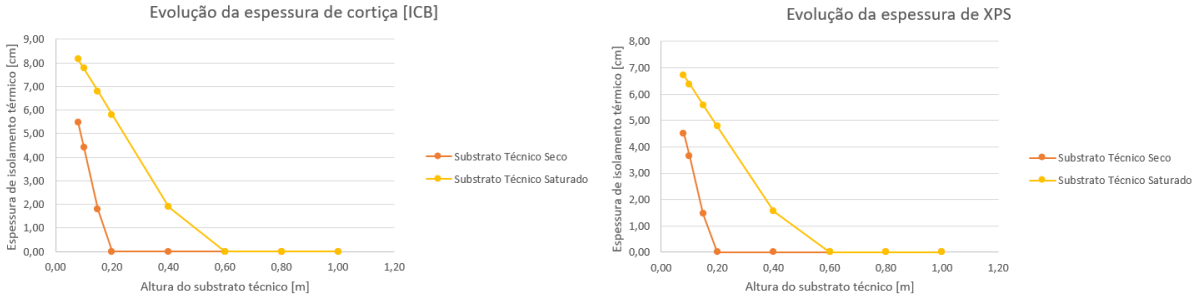


Fig. 36 - Comparação da espessura de isolamento térmico (ICB à esquerda e XPS à direita) para o substrato técnico seco e substrato técnico saturado

3.5. CÁLCULO DA TEMPERATURA SUPERFICIAL INTERIOR DE UMA COBERTURA E DOS FLUXOS DE CALOR EM REGIME PERMANENTE

Na presença de uma cobertura temos um fluxo de calor vertical e sendo que este foi calculado para a situação de inverno, temos um fluxo vertical ascendente pois a transmissão de calor é feita da zona de temperatura mais elevada para a zona de temperatura mais baixa. Assim, a solução de cobertura possui as seguintes características: R_{si}=0,10 m².ºC/W, h_{si}=10 W/m².ºC e $U_{máx}$=0,40 W/m².ºC.

Inicialmente foi calculada a variação de temperatura, com a temperatura média interior a variar entre os 16ºC e os 22ºC e a temperatura média exterior a variar entre os 4ºC e os 14ºC.

Quadro 12 – Variação da temperatura

ΔT	4ºC	6ºC	8ºC	10ºC	12ºC	14ºC
16ºC	12ºC	10ºC	8ºC	6ºC	4ºC	2ºC
18ºC	14ºC	12ºC	10ºC	8ºC	6ºC	4ºC
20ºC	16ºC	14ºC	12ºC	10ºC	8ºC	6ºC
22ºC	18ºC	16ºC	14ºC	12ºC	10ºC	8ºC

Em seguida, calculou-se a temperatura superficial interior da cobertura para as diferentes variações de temperatura estudadas.

$$\theta_{si} = -\frac{U(\theta_i - \theta_e)}{h_{si}} + \theta_i = -\frac{\Phi}{h_{si}} + \theta_i \qquad (3.3)$$

Quadro 13 – Cálculo da temperatura superficial interior

θ_{si}	4ºC	6ºC	8ºC	10ºC	12ºC	14ºC
16ºC	15,52	15,60	15,68	15,76	15,84	15,92
18ºC	17,44	17,52	17,60	17,68	17,76	17,84
20ºC	19,36	19,44	19,52	19,60	19,68	19,76
22ºC	21,28	21,36	21,44	21,52	21,60	21,68

Por fim, calculou-se o fluxo de calor através da equação seguinte:

$$\Phi = \Delta T * U \tag{3.4}$$

Quadro 14 – Cálculo do fluxo de calor para as diferentes variações de temperatura

Fluxo de calor [W/m^2]						
	4ºC	6ºC	8ºC	10ºC	12ºC	14ºC
16ºC	4,8	4,0	3,2	2,4	1,6	0,8
18ºC	5,6	4,8	4,0	3,2	2,4	1,6
20ºC	6,4	5,6	4,8	4,0	3,2	2,4
22ºC	7,2	6,4	5,6	4,8	4,0	3,2

3.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO

A análise efetuada permite:

- Descrever as duas coberturas em estudo: cobertura tradicional e cobertura verde;
- Calcular detalhadamente a espessura de dois tipos de isolamento térmico, ICB e XPS, para a cobertura tradicional em terraço, de maneira a servir de modelo de comparação para a espessura de isolamento térmico na cobertura verde;
- Calcular detalhadamente a espessura de ICB e XPS na cobertura verde com substrato de terra seca e saturada, para diferentes alturas de substrato, concluindo que em relação à cobertura tradicional esta cobertura necessita de alturas de isolamento térmico menores, sendo esta diferença mais notória quando o substrato se encontra seco. É possível verificar também que quando o substrato de terra está seco e atinge uma altura igual ou superior a 0,80 m deixa de ser necessária a utilização de isolamento térmico para que a cobertura verde cumpra os requisitos de resistência térmica mínima, por outro lado verificamos que quando o substrato de terra se encontra saturado, há sempre necessidade de colocar isolamento térmico, para as alturas de substrato estudadas, devido ao aumento significativo da sua condutibilidade térmica.

  Esta análise também permite constatar que, para alturas de substrato de terra seca de 0,20 m a 0,60 m há uma redução da espessura de isolamento térmico de 2,5 a 8 cm quando se utiliza ICB e de 2 a 6,5 cm quando se utiliza XPS. Para alturas de substrato de terra saturada de 0,40 m a 0,60 m há uma redução da espessura de ICB de 1 a 2 cm e de XPS de 1 a 1,5 cm.

- Calcular detalhadamente a espessura de ICB e XPS na cobertura verde com substrato técnico seco e saturado, para diferentes alturas de substrato, constatando-se que em relação à cobertura tradicional esta cobertura apresenta espessuras de isolamento menores sendo esta diferença mais significativa quando o substrato técnico se encontra seco. Podemos observar também que quando o substrato técnico está seco e atinge uma altura igual ou superior a 0,20 m, não há necessidade de colocação de isolamento térmico, por outro lado, quando o substrato técnico se encontra saturado, de forma a que não seja necessária a utilização de isolamento térmico o substrato tem que atingir uma altura de, pelo menos, 0,60 m.

  Esta análise permite verificar que, para alturas de substrato técnico saturado entre 0,20 e 0,40 m há uma redução da espessura de isolamento térmico de 3,5 a 7,5 cm quando se coloca ICB e de 3 a 6 cm quando se coloca XPS.

- Quantificar a temperatura superficial interior e os fluxos de calor em regime permanente da cobertura para um $U_{máx}$=0,40 W/m^2.ºC;

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO FLUXO DE CALOR EM REGIME VARIÁVEL PARA COBERTURAS VERDES E TRADICIONAIS

4.1. IMPORTÂNCIA DA SIMULAÇÃO EM REGIME VARIÁVEL

O regime variável ou dinâmico mostra-nos um cenário mais próximo da realidade, isto é, o fluxo de calor varia o seu sentido ao longo do tempo. As oscilações da temperatura ao longo do dia assemelham-se a ondas sinusoidais, como sugere a Fig. 37.

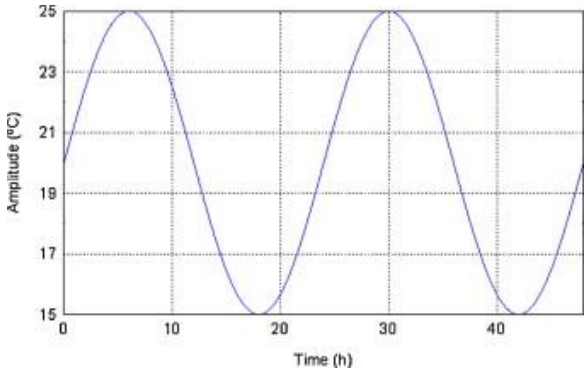


Fig. 37 – Regime Variável (Simões, I. et al, 2012)

4.2. MODELO NUMÉRICO UTILIZADO - WUFI® PRO 5.3

O cálculo do fluxo de calor em regime variável será executado através do software WUFI® Pro 5.3. Uma vez que os ensaios experimentais são dispendiosos e muitas das vezes confidenciais, há uma necessidade de utilização destas ferramentas de forma a simular, o mais próximo da realidade possível, as transmissões de calor através de elementos construtivos.

O programa WUFI® Pro 5.3, produzido na Alemanha pelo Fraunhofer Institut fur Bauphysik, tem como objetivo simular numericamente em regime variável para um fluxo unidirecional (1D) e calcular a transferência de calor e humidade das várias camadas de um elemento construtivo.

É de realçar que foi desenvolvido um protocolo entre o LFC/FEUP e o Fraunhofer Institut fur Bauphysik para utilização e comercialização do WUFI® Pro 5.3.

4.2.1. CONDIÇÕES FRONTEIRA EXTERIORES E INTERIORES

4.2.1.1. Coeficiente de Transferência à Superfície

Estes coeficientes pretendem definir as condições ambientes que influenciam o comportamento do elemento construtivo. Para a superfície exterior é necessário indicar o valor da resistência térmica, possíveis revestimentos do elemento construtivo, o coeficiente de absorção solar e emissão da superfície, o coeficiente de refletividade do solo e o fator de redução de chuva incidente. Para a superfície interior é apenas necessário indicar o valor da resistência térmica e os possíveis revestimentos do elemento.

Para todas as simulações realizadas durante este estudo, utilizou-se os valores das resistências térmicas superficiais, exterior e interior, que estão mencionadas no ITE50, 0,04 m^2K/W e 0,10 m^2K/W, respetivamente. Não foram adicionados quaisquer revestimentos ao elemento para o cálculo do valor de sd. Para o valor de absorção solar assumiu-se que quando estamos perante uma cobertura tradicional esta não absorve nem emite radiação solar, por outro lado, quando se trata de uma cobertura verde assumiu-se um coeficiente de 0,3 pré-definido pelo WUFI para um modelo genérico de cobertura verde. O fator de redução da chuva incidente assumiu o valor de 1,0 definido pelo programa consoante a inclinação do elemento construtivo, que neste caso possui uma inclinação de 0º por se tratar de uma cobertura. Podemos observar os dados acima indicados, para a cobertura tradicional na Fig. 38 e para a cobertura verde na Fig. 39.

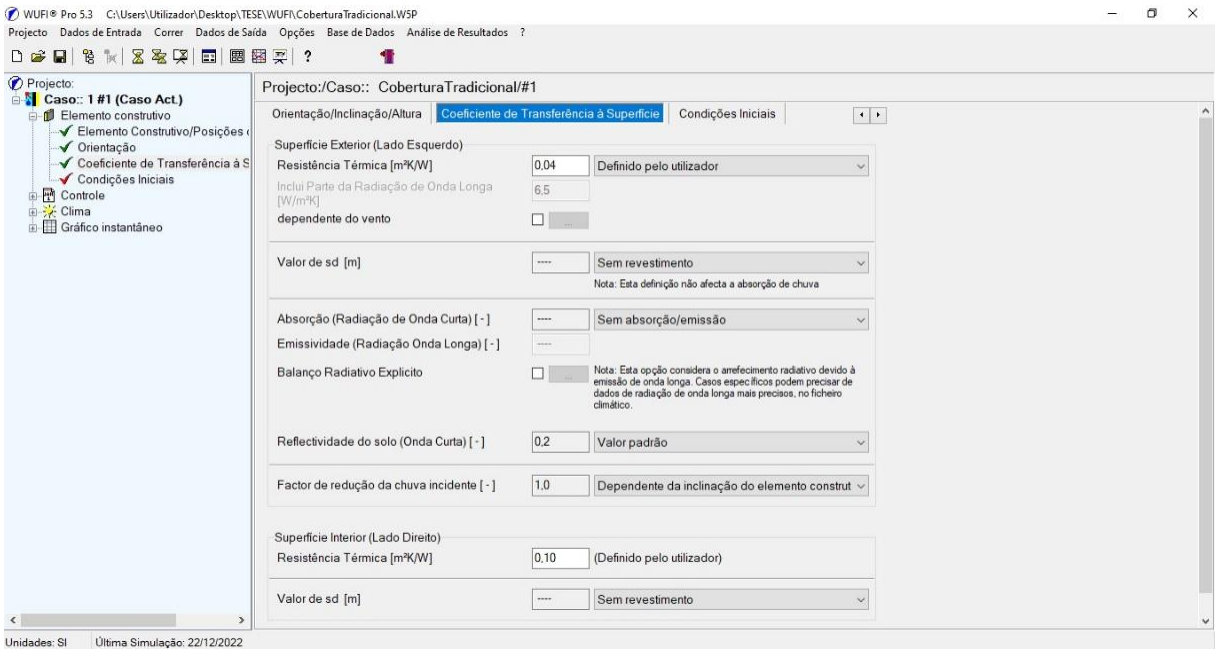


Fig. 38 – Coeficientes de transferência à superfície para uma cobertura tradicional (WUFI® Pro 5.3)

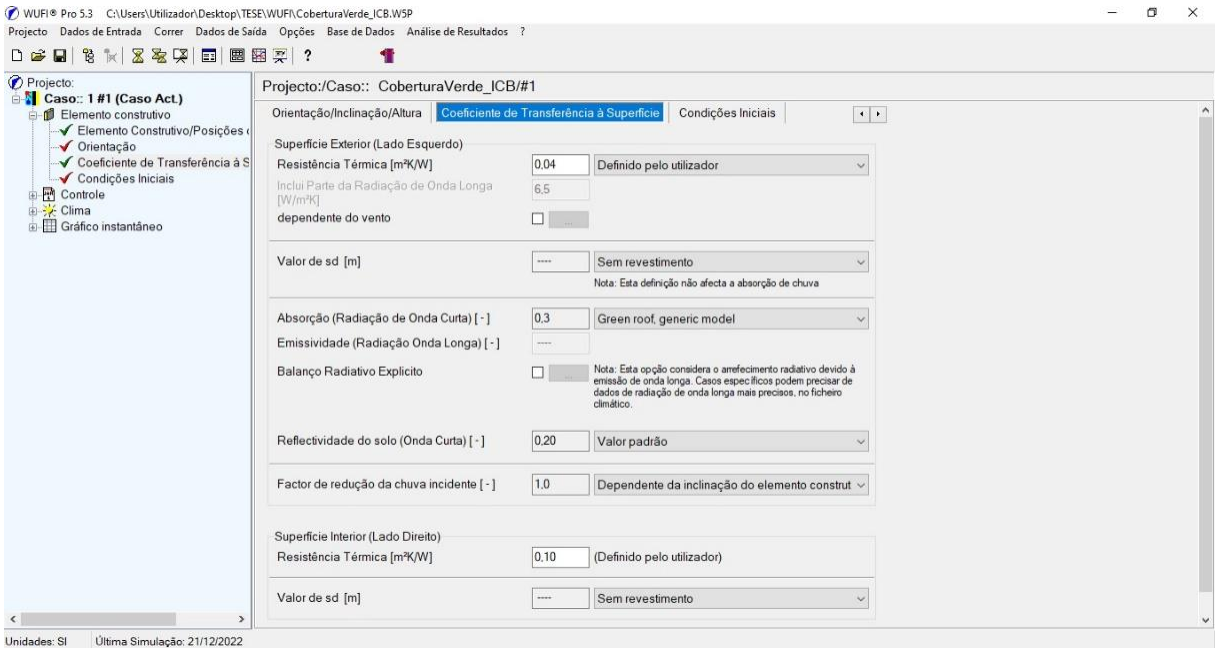


Fig. 39 – Coeficientes de transferência à superfície para uma cobertura verde (WUFI® Pro 5.3)

4.2.1.2. Condições Iniciais

Nas condições iniciais é definida a temperatura e a humidade inicial no elemento construtivo. A humidade inicial pode ser constante através do elemento construtivo, variar conforme a camada ou pode ser definida a partir de um ficheiro. A temperatura inicial pode ser constante em todo o elemento construtivo ou definida através de um ficheiro de dados.

Nesta simulação definiu-se uma humidade inicial de 80% e uma temperatura inicial de 20ºC, independentemente do tipo de cobertura em estudo.

4.2.1.3. Condições climáticas exteriores e interiores

O comportamento higrotérmico das coberturas é influenciado pelas condições climáticas exteriores e interiores, pelo que é necessário definir, para o clima exterior, a temperatura, a humidade relativa, dados de precipitação, radiação e velocidade do vento. Para o clima interior é apenas necessário definir o valor da temperatura e da humidade relativa.

Na base de dados do WUFI constam dados climáticos de algumas localizações. Relativamente a Portugal, são apenas apresentados os ficheiros climáticos de Lisboa, deste modo foi necessário submeter o ficheiro de dados climáticos do Porto, representados na Fig. 40, fornecido pelo Laboratório de Física das Construções da FEUP.

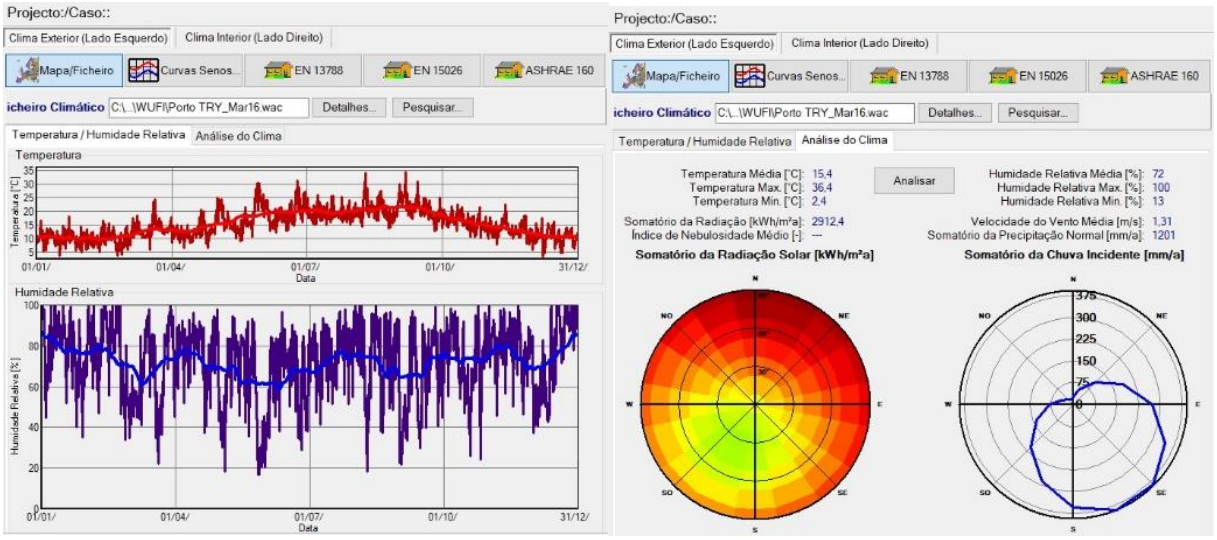


Fig. 40 – Dados climáticos exteriores do Porto (WUFI® Pro 5.3)

A partir da Fig. 41, podemos concluir que a máxima temperatura exterior, para o período em estudo meses de outubro a março do terceiro ano simulado, atingida foi de aproximadamente 24ºC e a mínima de 4ºC, correspondendo a uma amplitude de 20ºC.

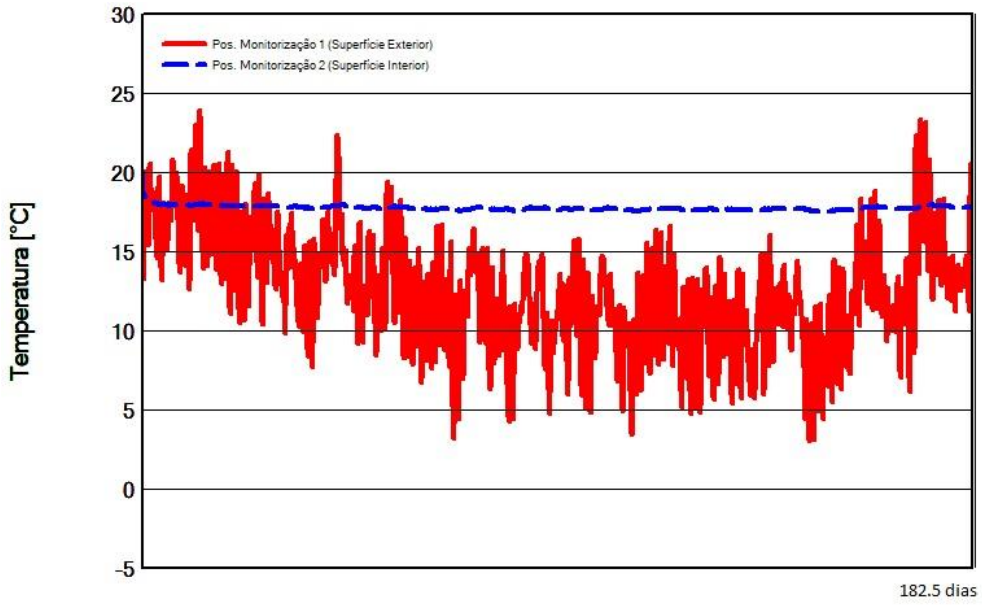


Fig. 41 – Medição das temperaturas na superfície exterior e interior nos meses de outubro a março (WUFI® Pro 5.3)

O ficheiro de dados climáticos do Porto disponibiliza também os dados de precipitação, representados na Fig. 42, que serão bastante úteis para perceber qual a sua influência no comportamento higrotérmico das coberturas em estudo. Contudo, estes dados de precipitação revelam um ano atípico com meses de inverno com reduzidos períodos de chuva, influenciando os resultados finais.

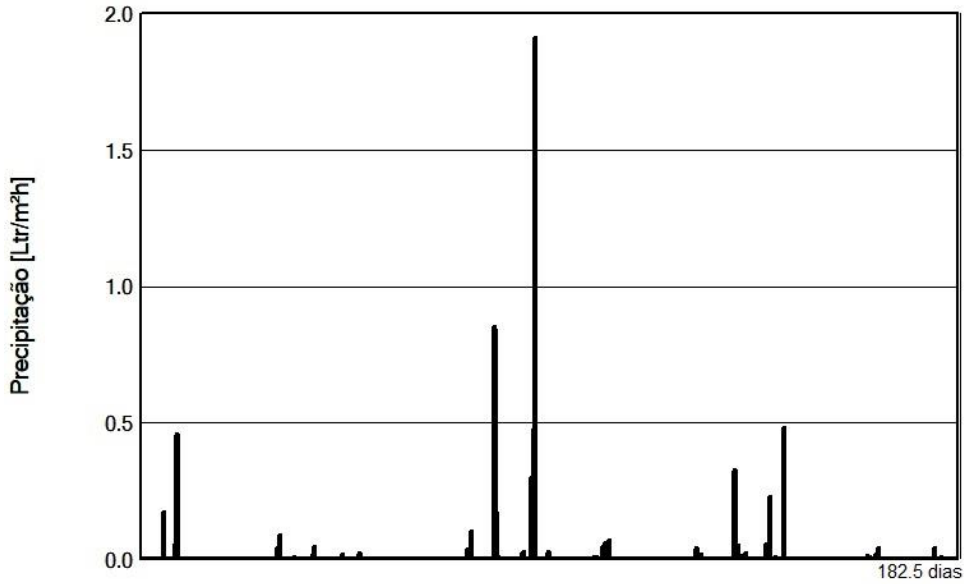


Fig. 42 - Dados de precipitação dos meses de outubro a março (WUFI® Pro 5.3)

No que diz respeito aos dados climáticos interiores, que podem ser observados na Fig. 43, a humidade relativa manter-se-á igual para todos os cenários simulados, por outro lado, a temperatura interior irá se manter constante ao longo do tempo, mas em quatro cenários distintos, 16ºC, 18ºC, 20ºC e 22ºC.

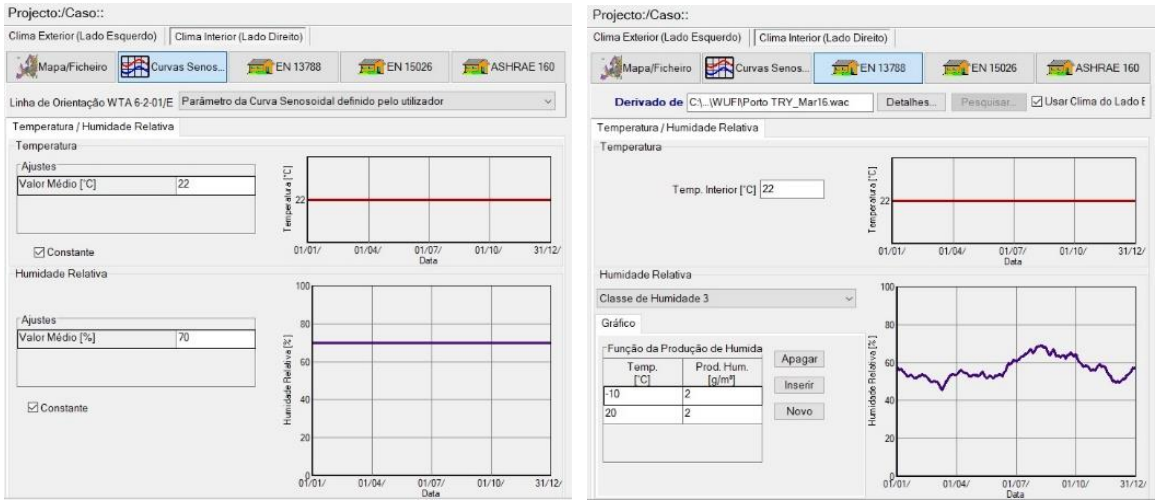


Fig. 43 – Dados climáticos interiores para um cenário de 22ºC (WUFI® Pro 5.3)

4.2.2. PROPRIEDADES DO ELEMENTO CONSTRUTIVO

Na configuração do elemento construtivo é necessário definir as camadas que o constituem atribuindo-lhes espessura e material. A base de dados do WUFI tem uma vasta lista de opções de materiais, mas também podem ser inseridos materiais novos pelo utilizador. Neste estudo foram utilizados quatro elementos construtivos diferentes, onde as características das camadas de XPS, de aglomerado de cortiça expandida (ICB), de substrato técnico e a laje de betão foram inseridas pelo utilizador, neste caso por mim, tendo como consulta dados fornecidos pela empresa Neoturf e dissertações FEUP. De maneira a que esta caracterização ficasse mais completa foram inseridos dados como a condutibilidade térmica em função da temperatura e a condutibilidade térmica em função do teor de humidade. Os restantes materiais utilizados foram atribuídos a partir da base de dados disponível.

Todos os elementos construtivos utilizados foram definidos para um coeficiente de transmissão térmica (U) de 0,40 W/m^{2}K.

No Quadro 15 são apresentadas as propriedades dos materiais constituintes de cada camada dos elementos construtivos utilizados durante as simulações realizadas.

Quadro 15 – Propriedades dos materiais constituintes das coberturas em estudo

Tipo de cobertura	Material	e (cm)	ρ (kg/m3)	ξ (m3/m3)	c (J/kg·K)	λ (W/m·K)	μ (-)	Fonte
Cobertura Tradicional	Betonilha de CaSO4	8,0	1960,00	0,23	850,0	1,6	18,0	WUFI
	XPS	7,8	40,00	0,95	1500,0	0,037	100,0	ITE50
	ICB	9,4	161,45	0,90	1530,0	0,045	20,5	Neoturf
	Membrana PA	0,1	65,00	0,001	2300,0	2,9	4380,0	WUFI
	Betão	25	2322,00	0,14	850,0	1,7	192,0	FEUP
	Reboco interior (gesso)	1,5	850,00	0,65	850,0	0,2	8,3	WUFI
Cobertura Verde	Vegetação tipo sedum	1	1500,00	0,5	1000,0	0,2	5,0	WUFI
	Substrato Técnico	10	910,00	0,67	1000,0	0,085	4,0	Landlab
	XPS	6,38	40,00	0,95	1500,0	0,037	100,0	ITE50
	ICB	7,76	161,45	0,90	1530,0	0,045	20,5	Neoturf
	Manta de proteção	0,1	83,00	0,95	840,0	0,035	1,0	WUFI
	Betão	25	2322,00	0,14	850,0	1,7	192,0	FEUP
	Reboco interior (gesso)	1,5	850,00	0,65	850,0	0,2	8,3	WUFI

4.3. CENÁRIOS SIMULADOS

O presente capítulo tem como objetivo avaliar o desempenho higrotérmico de uma cobertura verde comparativamente com uma cobertura tradicional, quando estamos perante um regime variável em situação de inverno. Assim, para obtermos uma comparação mais fidedigna utilizaram-se as espessuras de isolamento térmico, XPS e ICB, e de substrato técnico calculadas anteriormente no capítulo 3.

A simulação ocorreu para um período de 3 anos, sendo analisado apenas o inverno do terceiro ano de simulação, ou seja, os meses de outubro a março. Analisou-se também a influência da precipitação no comportamento higrotérmico de todos os elementos estudados neste capítulo.

O estudo foi feito para quatro cenários distintos: uma cobertura tradicional com isolamento térmico em XPS (Fig. 44), uma cobertura tradicional com isolamento térmico em ICB (Fig. 47), uma cobertura verde com isolamento térmico em XPS (Fig. 50) e uma cobertura verde com isolamento térmico em ICB (Fig. 53).

Todos os elementos construtivos utilizados nas simulações têm um valor de U= 0,40 W/m^{2}K, o mesmo já acontecia no capítulo anterior. Cada uma das coberturas apresentadas foi submetida a quatro temperaturas interiores distintas: 16ºC, 18ºC, 20ºC e 22ºC. Sendo o ambiente exterior definido pelo ficheiro de dados climáticos do Porto é possível ter acesso a vários dados de saída, como por exemplo, a temperatura do ar e a humidade relativa das superfícies exterior e interior, o fluxo de calor e o fluxo de humidade na superfície interior e exterior, o teor de humidade presente em cada camada e o teor de humidade total no elemento construtivo.

4.3.1. COBERTURA TRADICIONAL COM ISOLAMENTO TÉRMICO EM XPS

Neste primeiro cenário temos uma cobertura tradicional constituída por uma camada exterior em betonilha com uma espessura de 8 cm, uma camada de isolamento em XPS com espessura de 7,8 cm (espessura calculada no capítulo 3), uma membrana, uma laje em betão com 25 cm de espessura finalizada pelo interior com reboco.

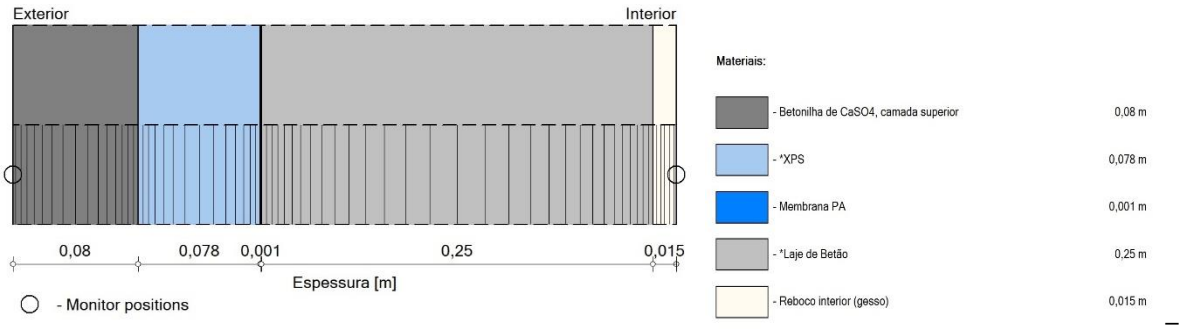


Fig. 44 - Configuração da cobertura tradicional com isolamento em XPS (WUFI® Pro 5.3)

De maneira a não ter uma exposição de resultados demasiado extensiva, serão colocados apenas os resultados para a temperatura interior de 18ºC.

É importante referir que a precipitação incidente influência o fluxo de calor, sendo a variação deste mais elevada quando a cobertura se encontra molhada o que seria de prever porque a condutibilidade térmica aumenta com o teor de humidade presente nos materiais. Os valores máximos do fluxo de calor na superfície exterior coincidem com os picos de máxima precipitação (Fig. 45). É de notar que a variação do fluxo na superfície interior permanece praticamente constante ao longo do tempo, porque a temperatura interior também se mantem aproximadamente constante com uma amplitude de apenas 2ºC. Note-se, também, que os gráficos abaixo apresentados são resultado da simulação realizada no software WUFI.

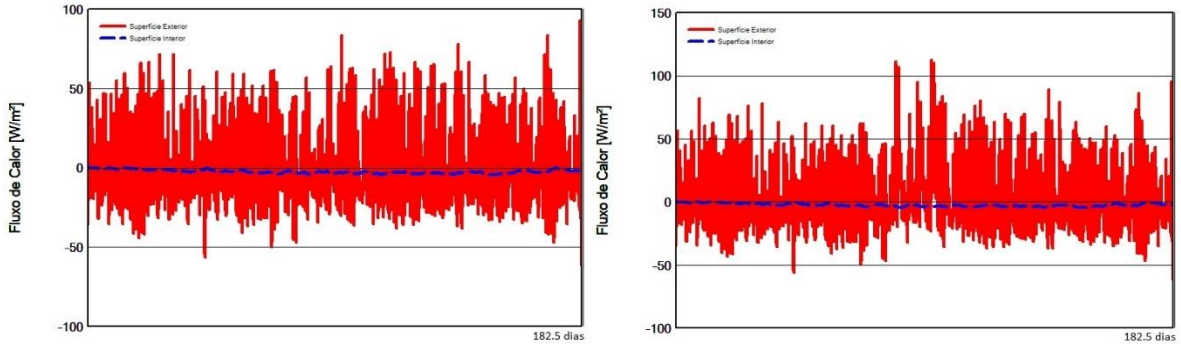


Fig. 45 – Fluxos de calor medidos na superfície exterior e interior sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)

Podemos constatar pela Fig. 46 que o teor de humidade total no elemento construtivo também se acentua significativamente com a existência de precipitação.

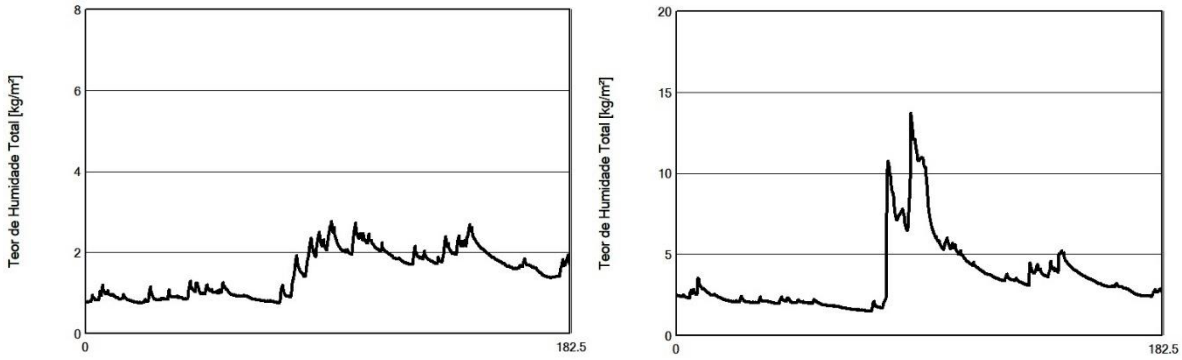


Fig. 46 – Teor de humidade total do elemento construtivo sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)

4.3.2. COBERTURA TRADICIONAL COM ISOLAMENTO TÉRMICO EM ICB

Num segundo cenário temos uma cobertura tradicional constituída por uma camada exterior em betonilha com uma espessura de 8 cm, uma camada de isolamento em ICB com espessura de 9,4 cm (espessura calculada no capítulo 3), uma membrana, uma laje em betão com 25 cm de espessura finalizada pelo interior com reboco.

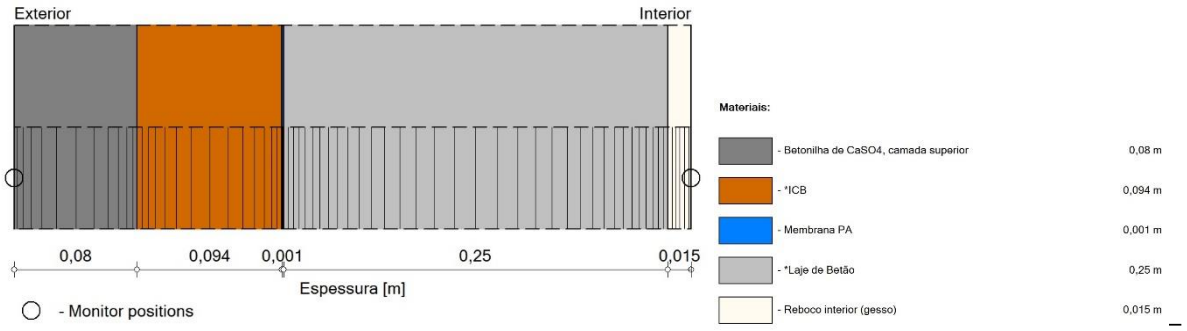


Fig. 47 - Configuração da cobertura tradicional com isolamento em ICB (WUFI® Pro 5.3)

Como os dados climáticos utilizados foram iguais para todos os cenários, as temperaturas máximas e mínimas exteriores (Fig. 41), as temperaturas interiores bem como os dados de precipitação (Fig. 42) serão sempre os mesmos.

Como já foi referido anteriormente a precipitação incidente influência o desempenho térmico da cobertura. Em semelhança ao que acontece no primeiro cenário, a variação do fluxo de calor na superfície exterior é mais elevada quando a cobertura se encontra molhada (Fig. 48). É de notar que a variação do fluxo na superfície interior permanece praticamente constante ao longo do tempo.

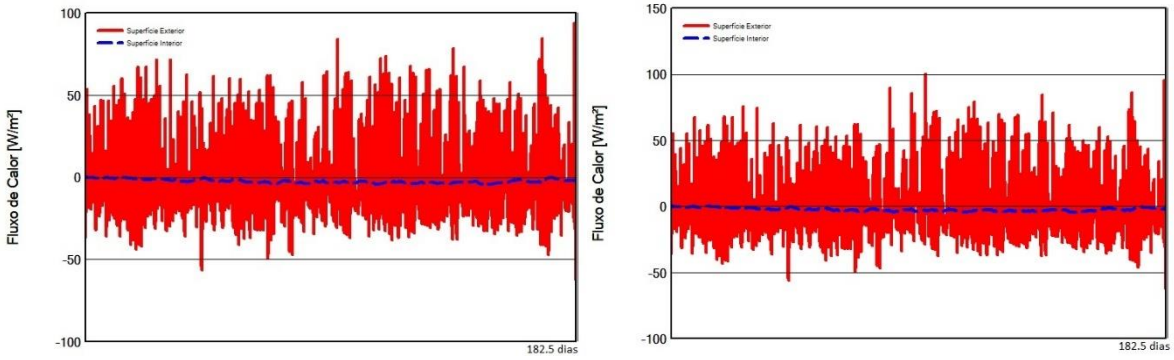


Fig. 48 - Fluxos de calor medidos na superfície exterior e interior sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)

O teor de humidade total no elemento construtivo aumenta significativamente nos picos de precipitação (Fig. 49). Constata-se que quando temos isolamento térmico em aglomerado de cortiça expandida (ICB) o aumento do teor de humidade é menor quando comparado com o XPS.

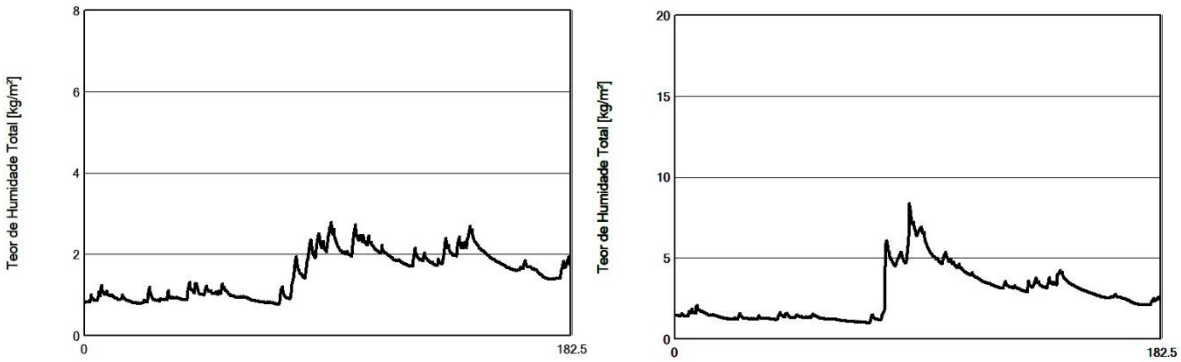


Fig. 49 - Teor de humidade total do elemento construtivo sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)

Por fim, podemos concluir que na cobertura tradicional o isolamento térmico XPS tem valores máximos de fluxo de calor mais elevados do que no isolamento térmico ICB. Relativamente ao teor de humidade total no elemento construtivo, este aumenta com a incidência de precipitação, podendo se verificar que os seus valores máximos, tanto no primeiro como no segundo cenário, coincidem com os picos de chuva. Podemos verificar que após um período de chuva o teor de humidade total no elemento construtivo com isolamento térmico em XPS é de aproximadamente 14 kg/m^2, por outro lado quando o isolamento térmico é em aglomerado de cortiça expandida (ICB) o teor de humidade total apresenta um valor mais baixo, de aproximadamente 8 kg/m^2. Com isto, constata-se que a cobertura tradicional com isolamento térmico em ICB possui um melhor desempenho higrotérmico.

4.3.3. COBERTURA VERDE COM ISOLAMENTO TÉRMICO EM XPS

No terceiro cenário temos uma cobertura verde constituída por uma primeira camada de vegetação, uma camada de substrato com espessura de 10 cm, uma camada de isolamento térmico em XPS com espessura de 6,4 cm (espessura calculada no capítulo 3), uma manta de proteção, uma laje em betão com 25 cm de espessura finalizada pelo interior com reboco.

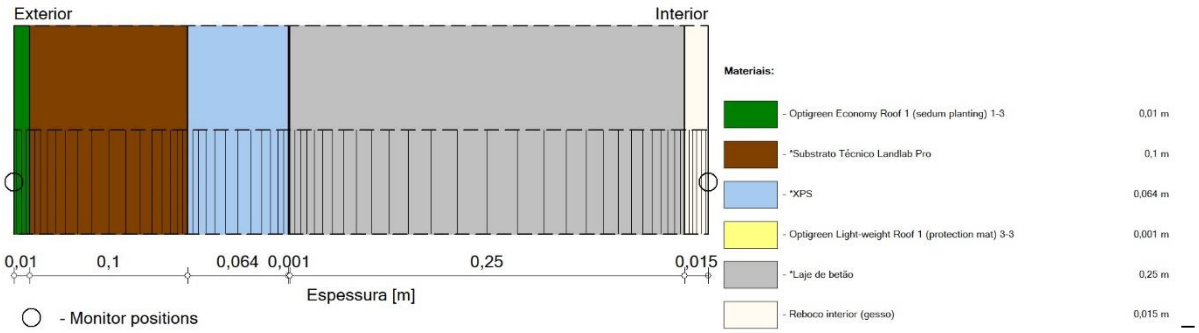


Fig. 50 - Configuração da cobertura verde com isolamento em XPS (WUFI® Pro 5.3)

Como já foi mencionado anteriormente os dados utilizados para as temperaturas exteriores e interiores, bem como os dados de precipitação são os mesmos dos cenários expostos acima.

Na Fig. 51 podemos observar que os fluxos de calor medidos na superfície exterior com e sem influencia da precipitação têm uma variação muito ligeira ou praticamente nula, provavelmente por atuação das propriedades de absorção da água da chuva por parte do substrato ou pelo mecanismo de evapotranspiração associado às plantas da camada de vegetação. É de notar que a variação do fluxo na superfície interior permanece praticamente constante ao longo do tempo.

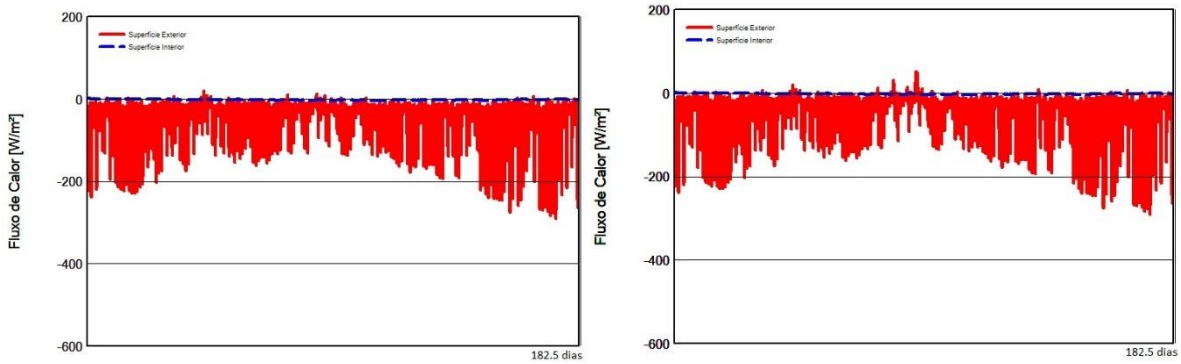


Fig. 51 - Fluxos de calor medidos na superfície exterior e interior sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)

Mais uma vez, o teor de humidade total da cobertura (Fig. 52) é mais elevado quando há uma precipitação mais acentuada, contudo, ao contrário do que acontecia na cobertura tradicional, o teor de humidade recupera mais rápido o seu valor inicial sendo também este mais reduzido do que na cobertura tradicional.

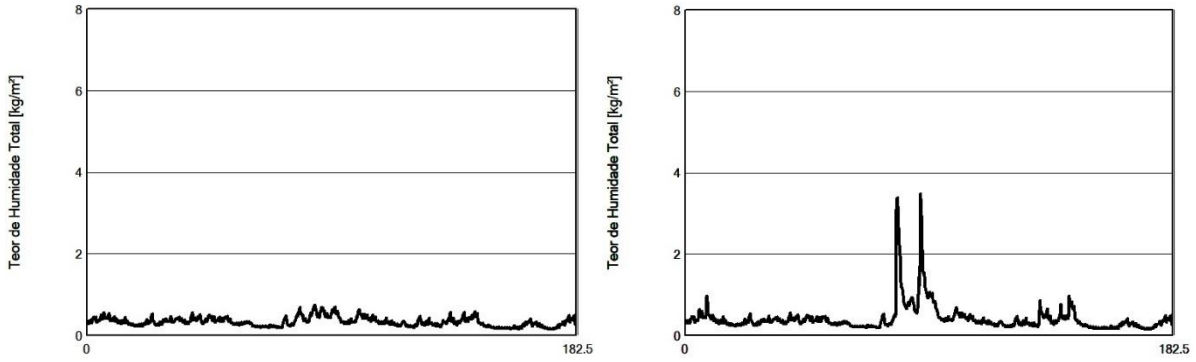


Fig. 52 - Teor de humidade total do elemento construtivo sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)

4.3.4. COBERTURA VERDE COM ISOLAMENTO EM ICB

No quarto cenário temos uma cobertura verde constituída por uma primeira camada de vegetação, uma camada de substrato com espessura de 10 cm, uma camada de isolamento térmico em ICB com espessura de 7,8 cm (espessura calculada no capítulo 3), uma manta de proteção, uma laje em betão com 25 cm de espessura finalizada pelo interior com reboco.

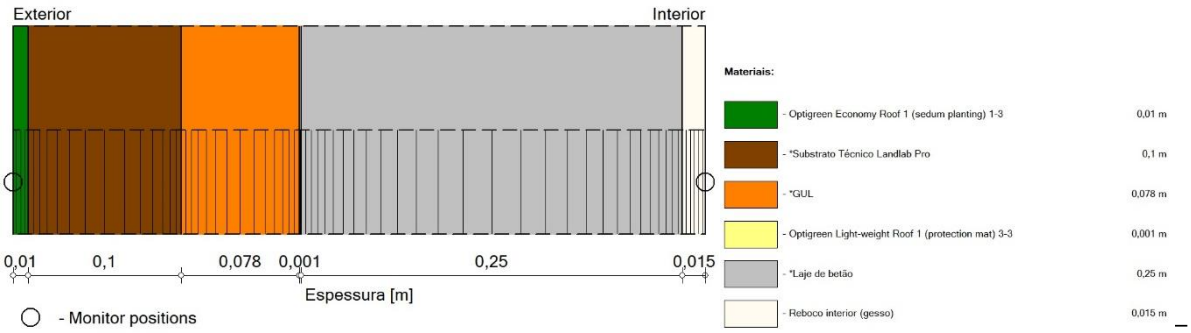


Fig. 53 - Configuração da cobertura verde com isolamento em ICB (WUFI® Pro 5.3)

Os valores do fluxo de calor medidos neste elemento construtivo são semelhantes aos valores medidos no cenário anterior, ou seja, têm uma variação pouco significativa aquando a incidência de chuva (Fig. 54).

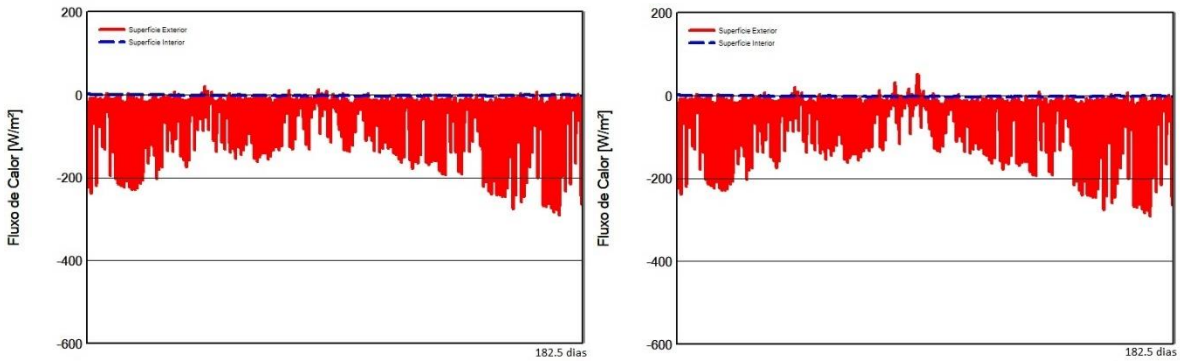


Fig. 54 - Fluxos de calor medidos na superfície exterior e interior sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)

Analogamente ao que acontece nos cenários anteriores, o valor máximo do teor de humidade coincide com o período de maior precipitação, contudo na cobertura verde este recupera mais rapidamente o seu valor inicial (Fig. 55).

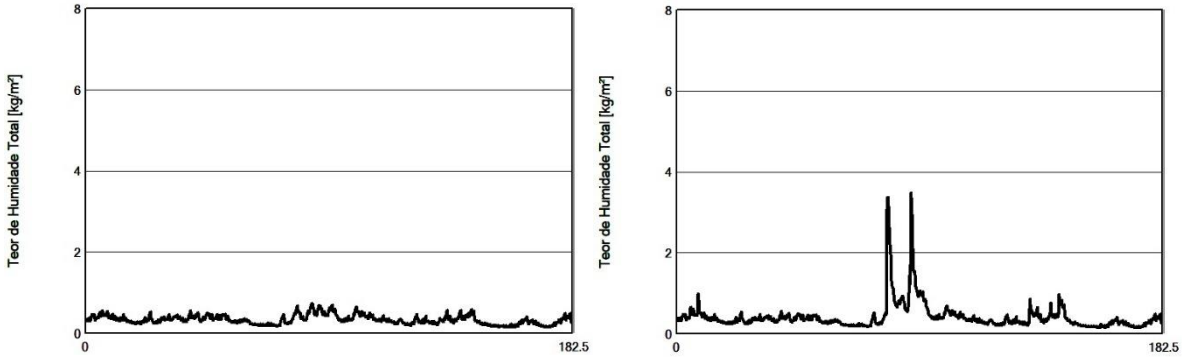


Fig. 55 - Teor de humidade total do elemento construtivo sem incidência de precipitação (à esquerda) e com incidência de precipitação (à direita) (WUFI® Pro 5.3)

4.3.5. ANÁLISE COMPARATIVA

Comparando os dois tipos de cobertura acima estudados podemos concluir que, a cobertura tradicional sofre uma maior variação de fluxos de calor, independentemente do isolamento térmico utilizado e da existência, ou não, de precipitação, do que a cobertura verde. A variação do fluxo de calor na superfície interior é praticamente constante.

O teor de humidade total na cobertura tradicional sem chuva varia sensivelmente entre 1 e 3 kg/m^2, em contrapartida, quando há precipitação, a cobertura que é constituída por isolamento térmico em XPS tem um teor de humidade total máximo de 14 kg/m^2 e a cobertura que é constituída por isolamento térmico em ICB tem um teor de humidade total máximo de 8 kg/m^2.

O teor de humidade total na cobertura verde sem chuva varia aproximadamente entre 0,5 e 0,8 kg/m^2, por outro lado, quando existe ocorrência de precipitação, o teor de humidade aumenta significativamente para um valor máximo de 3,5 kg/m^2, sensivelmente.

Os valores máximos do teor de humidade correspondem os valores máximos da precipitação. Embora a incidência de chuva tenha uma maior influência na cobertura tradicional, a cobertura verde recuperar mais rapidamente dos picos de teor de humidade, normalizando-os.

4.4. QUANTIFICAÇÃO DO FLUXO DE CALOR EM REGIME VARIÁVEL

A quantificação do fluxo de calor em regime variável foi calculada de forma semelhante ao regime permanente. O somatório do fluxo de calor quantifica o calor que é transmitido ao longo de todo o elemento construtivo, sendo calculado a partir da multiplicação do coeficiente de transmissão térmica (U) do elemento pela variação da temperatura entre o exterior e o interior. Por outro lado, foi também quantificado o somatório do fluxo de calor na superfície interior do elemento construtivo, determinado a partir da soma dos fluxos de calor horários calculados pelo software WUFI. Estes valores podem ser observados no Quadro 16.

Quadro 16 – Fluxo de calor na cobertura tradicional e na cobertura verde

Tipo de cobertura	Tipo de isolamento térmico	Temperatura interior	∑ Fluxo de calor [W/m^2]		∑ Fluxo de calor Superfície Interior [W/m^2]	
			Seco	Com Precipitação	Seco	Com Precipitação
Cobertura Tradicional	XPS [U=0,40 W/m^{2}K; e=7,8 cm]	16ºC	6207,42	7754,14	6654,38	6906,65
		18ºC	9494,58	11052,02	10136,80	10393,30
		20ºC	12781,12	14349,63	13659,30	13914,40
		22ºC	16067,28	17646,88	17203,60	17456,10
	ICB [U=0,40 W/m^{2}K; e=9,4 cm]	16ºC	6208,64	7759,96	6668,48	6795,41
		18ºC	9497,38	11059,65	10098,50	10216,70
		20ºC	12786,43	14359,70	13571,70	13682,30
		22ºC	16075,49	17659,91	17059,70	17167,17

Cobertura Verde	XPS [U=0,40 W/m²K; e=6,4 cm]	16ºC	3436,36	3515,64	3415,40	3539,36
		18ºC	6737,91	6816,83	6628,17	6766,80
		20ºC	10040,42	10118,84	9857,44	10013,00
		22ºC	13343,84	13421,61	13076,40	13251,10
	ICB [U=0,40 W/m²K; e=7,8 cm]	16ºC	3437,34	3549,50	3408,62	3537,28
		18ºC	6741,43	6852,71	6571,21	6713,74
		20ºC	10046,80	10157,29	9744,57	9902,53
		22ºC	13353,85	13463,15	12899,30	13075,40

Pela análise do Quadro 16, podemos constatar que independentemente da cobertura o fluxo de calor aumenta com a temperatura ambiente interior. A cobertura tradicional tem uma maior variação do fluxo de calor quando comparada com a cobertura verde, tanto quando está seca como quando está submetida à incidência de precipitação. Podemos constatar que os dois tipos de isolamento térmico, XPS e ICB, funcionam de forma muito idêntica.

Com base nos dados acima apresentados, podemos também verificar que ambas as coberturas têm um melhor desempenho quando se encontram secas, ou seja, sem precipitação incidente. Podemos ainda verificar que quanto menor é a variação de temperatura, ou seja, quando menor é a diferença entre a temperatura média exterior e a temperatura média interior, maior é a variação de fluxo de calor entre a cobertura tradicional e a cobertura verde. Analisando os dados acima, constatamos que para uma temperatura média interior de 16ºC o valor do somatório do fluxo de calor, em estado seco, é de aproximadamente duas vezes superior na cobertura tradicional quando comparado com a cobertura verde, tendo em conta a incidência de precipitação o valor supera as duas vezes. Estes resultados são sustentados pela resistência térmica da laje de betão, R_t=0,15 m²K/W, (valor retirado do WUFI) ser bastante menor do que a resistência térmica do substrato, R_t=0,35 m²K/W, (valor retirado do WUFI), permitindo concluir que quanto maior a resistência térmica, melhor o desempenho térmico do elemento construtivo. Assim, perante os dados apresentados, a cobertura verde tem um melhor desempenho térmico.

4.5. COMPARAÇÃO DOS FLUXOS DE CALOR EM REGIME VARIÁVEL E EM REGIME PERMANENTE

Na estação de aquecimento devem ser cumpridas as necessidades nominais anuais de energia útil, isto é, a quantidade de energia necessária para manter a temperatura interior de um edifício nos 18ºC ao longo das 24 horas do dia durante toda a estação de aquecimento.

Para o cálculo da energia útil necessária temos que ter em conta a localização do edifício de maneira a conseguirmos determinar o valor de graus-dias, assim assumiu-se a mesma localização do caso de estudo descrito no capítulo 5.

No cálculo dos graus-dias, os valores regulamentares estão dispostos no Despacho n.º 6476-H/2021 e a altitude da localização em estudo foi retirada do Google Earth.

$$GD = GD_{REF} + \alpha(z - z_{REF}) \quad (4.1)$$

Quadro 17 – Dados para o cálculo dos graus-dias

NUTS III	z (m)	z_{REF} (m)	M_{REF} (meses)	GD_{REF} (ºC)	α (ºC/km)	GD (ºC)
Grande Porto	61	94	6,2	1250	1600	1197,2

O cálculo da energia necessária em regime permanente ao longo da estação de aquecimento para compensar as perdas de calor pode ser determinado da seguinte forma:

$$E = UA * GD * 0{,}024 \qquad [kWh/ano] \tag{4.2}$$

Em que:

UA – Coeficiente de transmissão térmica por 1m^2;

GD – Número de graus-dias na estação de aquecimento, na base de 18ºC;

E – Energia necessária para compensar as perdas de calor;

Quadro 18 – Comparação do fluxo de calor em regime variável e em regime permanente

Tipo de cobertura	Tipo de isolamento térmico	Temperatura interior	Regime Variável				Regime Permanente
			∑ Fluxo de Calor [W/m^2]		∑ Fluxo de calor Superfície Interior [W/m^2]		
			Seco	Com Precipitação	Seco	Com Precipitação	
Cobertura Tradicional	XPS [U=0,40 W/m^{2}K; e=7,8 cm]	16ºC	6207,42	7754,14	6654,38	6906,65	11493 Wh/ano.m^2
		18ºC	9494,58	11052,02	10136,80	10393,30	
		20ºC	12781,12	14349,63	13659,30	13914,40	
		22ºC	16067,28	17646,88	17203,6	17456,10	
	ICB [U=0,40 W/m^{2}K; e=9,4 cm]	16ºC	6208,64	7759,96	6668,48	6795,41	
		18ºC	9497,38	11059,65	10098,50	10216,70	
		20ºC	12786,43	14359,70	13571,70	13682,30	
		22ºC	16075,49	17659,91	17059,70	17167,17	
Cobertura Verde	XPS [U=0,40 W/m^{2}K; e=6,4 cm]	16ºC	3436,36	3515,64	3415,40	3539,36	
		18ºC	6737,91	6816,83	6628,17	6766,80	
		20ºC	10040,42	10118,84	9857,44	10013,00	
		22ºC	13343,84	13421,61	13076,40	13251,10	
	ICB	16ºC	3437,34	3549,50	3408,62	3537,28	
		18ºC	6741,43	6852,71	6571,21	6713,74	
		20ºC	10046,80	10157,29	9744,57	9902,53	

	[U=0,40 W/m²K; e=7,8 cm]	22ºC	13353,85	13463,15	12899,30	13075,40

É importante mencionar que os GD são quantificados para 6,2 meses de referência da estação de aquecimento e os cálculos do regime variável foram executados para 6 meses, de outubro a março, por isso, devemos admitir que temos valores termicamente aproximados.

A transmissão de calor através da envolvente opaca horizontal do edifício, isto é, da cobertura, traduz perdas de calor no valor de 11493 Wh/ano.m^2 em regime permanente. Sendo que os graus-dias são determinados na base de 18ºC, comparamos apenas com os valores em regime variável determinados para a mesma temperatura interior (valores sombreados).

Concluímos que o fluxo de calor é menor em regime variável, tanto quando a cobertura está seca como quando está molhada, sendo a diferença mais significativa quando a cobertura está seca. Quando estamos perante uma cobertura verde o fluxo de calor, em regime variável, é aproximadamente menor 28% para a cobertura seca e 38% para a cobertura molhada, relativamente à cobertura tradicional. Sendo a diferença de perdas de calor ainda maior para o regime permanente na cobertura verde. Assim podemos concluir que a cobertura verde tem um melhor desempenho térmico sendo necessárias menos medidas de aquecimento.

4.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO

O estudo efetuado pode ser resumido da seguinte forma:

- Avaliou-se a importância da simulação em regime variável;
- Descreveu-se o modelo de simulação utilizado – WUFI, nomeadamente as suas componentes, como as condições fronteira exteriores e interiores e as propriedades dos elementos construtivos utilizados nas simulações;
- Pormenorizou-se os cenários simulados, sendo eles, uma cobertura tradicional com isolamento térmico em XPS, uma cobertura tradicional com isolamento térmico em ICB, uma cobertura verde com isolamento térmico em XPS e uma cobertura verde com isolamento térmico em ICB, atribuindo-lhes os respetivos gráficos de fluxo de calor e teor de humidade total com e sem incidência de precipitação;
- Calculou-se o somatório do fluxo de calor ao longo do todo o elemento construtivo e o fluxo de calor na superfície interior em regime variável dos quatro cenários acima mencionados, para quatro temperaturas interiores constantes, 16ºC, 18ºC, 20ºC e 22ºC. Concluindo que o valor do fluxo aumenta conforme a temperatura interior aumenta independentemente do cenário simulado. Na cobertura tradicional, as variações do fluxo crescem de forma semelhante quer para isolamento em XPS quer para isolamento em ICB, contudo quando temos isolamento térmico em XPS as variações de fluxo são ligeiramente menores. Na cobertura verde, tal como na tradicional, as variações de fluxo têm um crescimento semelhante para os dois tipos de isolamento térmico testados, sendo no cenário onde o isolamento é em XPS que se verificam as variações de fluxo de calor ligeiramente menores;
- Verificou-se a influência da precipitação no comportamento higrotérmico das coberturas, verificando-se que esta tem uma influência mais significativa na cobertura tradicional sendo que os valores do fluxo de calor aumentam em cerca de 1500 W/m^2 quando comparados com os resultados em estado seco. Enquanto na cobertura verde os fluxos de calor variam apenas em

cerca de 100 W/m^2. Estes valores podem estar influenciados pelo dados de precipitação que revelam um ano atípicos, com poucos períodos de chuva;

- Constatou-se que para uma temperatura média interior de 16ºC o valor do somatório do fluxo de calor, em estado seco, é de aproximadamente duas vezes superior na cobertura tradicional quando comparado com a cobertura verde, tendo em conta a incidência de precipitação o valor supera as duas vezes. Estes resultados são sustentados pela resistência térmica da laje de betão, R_t=0,15 m^{2}K/W, (valor retirado do WUFI) ser bastante menor do que a resistência térmica do substrato, R_t=0,35 m^{2}K/W, (valor retirado do WUFI), permitindo concluir que quanto maior a resistência térmica, melhor o desempenho térmico do elemento construtivo. Assim, a cobertura verde revela um melhor desempenho térmico, não havendo tanta necessidade de aquecimento;
- Comparou-se os resultados obtidos para o regime variável com o regime permanente, calculando-se as perdas de calor através da fórmula da energia necessária para a estação de aquecimento, concluindo que a diferença das perdas de calor são mais notórias na cobertura verde;

5. CASO DE ESTUDO

5.1. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Esta dissertação foi desenvolvida em ambiente empresarial, sendo o caso de estudo a Escola Básica de 1º CEB/JI do Falcão do agrupamento de escolas do Cerco localizada na Rua do Falcão no Porto, como se encontra representado na Fig. 56.

Fig. 56 – Fotografia aérea da Escola Básica de 1º CEB/JI do Falcão (Google Earth)

A Escola Básica de 1º CEB/JI do Falcão foi alvo de um investimento de 1,2 milhões de euros por parte da Câmara Municipal do Porto, parte integrante do projeto LIFE - My building is green cofinanciado pela União Europeia que foca na requalificação e amplificação de edifícios públicos de educação utilizando soluções de base natural como medida de mitigação das alterações climáticas melhorando o conforto e saúde ambientais. Assim a requalificação desta escola assentará na implantação de coberturas verdes, no encaminhamento das águas pluviais para uma charca localizada na horta comunitária mesmo ao lado da escola, e na execução de uma parede verde com a função de sombrear a área de salas criando um melhor conforto térmico.

Como esta dissertação se foca na importância da aplicação de coberturas verdes, estas serão o objeto do caso de estudo. Na obra de requalificação em questão serão aplicados três tipos de cobertura verde diferentes, que são os seguintes: cobertura verde inclinada com uma área de implantação de 38 m^2, cobertura verde biosolar roof com uma área de implantação de 204 m^2 e cobertura verde GUL (novo sistema de cobertura verde em aglomerado de cortiça expandida) com uma área de implantação de 353 m^2, como podemos observar na Fig. 57.

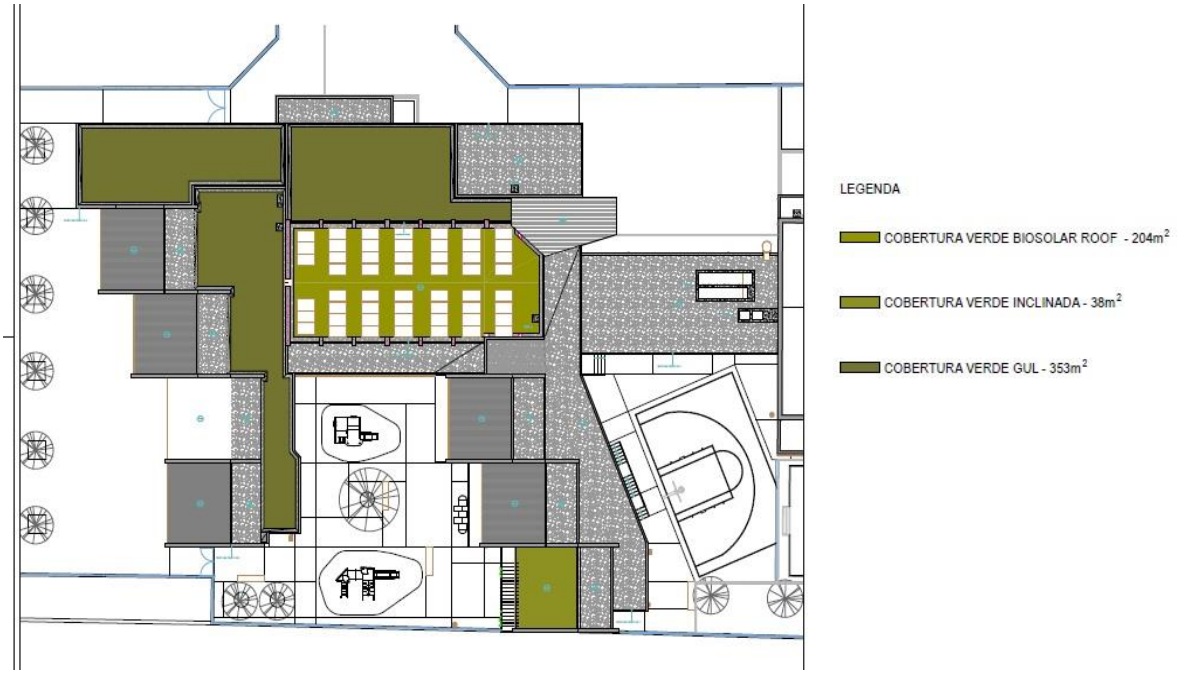


Fig. 57 – Planta com proposta de intervenção (Projeto ANCV)

5.2. OBJETIVOS

Sendo esta dissertação em ambiente empresarial permite um contacto direito com o objeto de estudo, neste caso, com a obra de aplicação de coberturas verdes na requalificação da Escola Básica de 1º CEB/JI do Falcão. Tendo os seguintes objetivos: aprendizagem e domínio da conceção de coberturas verdes, análise de 3 casos distintos de aplicação de coberturas verdes e reflexão para uma futura monitorização das coberturas em estudo.

5.3. PLANO DE INTERVENÇÃO

Na escolha da cobertura verde a ser executada nesta obra teve-se em conta a baixa espessura de substrato, a fácil manutenção e a vegetação adequada ao clima local, com isto, decidiu-se que a cobertura verde extensiva seria a escolha mais acertada. O plano de intervenção apresenta a aplicação de três tipos diferentes de cobertura verde extensiva, já mencionadas em cima, descritas em seguida com mais detalhe.

5.3.1. COBERTURA VERDE EXTENSIVA COM O SISTEMA GUL

Cada vez mais se acentua a necessidade de utilização de materiais sustentáveis e renováveis, e nas coberturas verdes não é diferente. Com o objetivo de inovar neste sentido, uma empresa especializada em coberturas verdes em colaboração com a Amorim Isolamentos, o ITeCons (Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção) e a ANQIP (Associação Nacional para a Qualidade nas Instalações Prediais), desenvolveu um projeto para novos sistemas de coberturas e fachadas verdes estruturados em aglomerado de cortiça expandida (ICB). Ao fim de um período de investigação de 3 anos, saiu para o mercado um novo sistema, sustentável e inovador, produzido a partir de resíduos da extração da cortiça e com uma produção 100% nacional, denominado GUL – Green Urban Living.

O GUL veio substituir o típico isolamento em XPS e a camada de drenagem. Com um perfil ambiental e energético superior às soluções tradicionais, o GUL possui um melhor isolamento térmico e acústico do edifício, substitui os elementos de drenagem convencionais, é pré-fabricado sendo possível personalizar as suas dimensões e é produzido com materiais renováveis e recicláveis.

Durante o projeto de desenvolvimento do GUL, mencionado anteriormente, foram estudadas algumas características do aglomerado de cortiça expandida (ICB), como por exemplo, a resistência térmica e comportamento higrotérmico em câmara bioclimática. Podendo se observar os resultados abaixo na Fig. 58:

RESISTÊNCIA TÉRMICA

Espessura do substrato (em mm)

Espessura do aglomerado de cortiça expandida (em mm)	80	100	120	140
50	1.18	1.26	1.34	1.42
60	1.34	1.43	1.51	1.59
70	1.51	1.60	1.68	1.76
80	1.68	1.76	1.85	1.93
100	2.02	2.10	2.19	2.27
120	2.36	2.44	2.52	2.61
140	2.70	2.78	2.86	2.94

ICB | estado saturado 161.45 kg/m³

ICB | 40 mm de espessura estado saturado 6.46 kg/m²

Resistência térmica [m²ºC/W] da solução da cobertura, não contemplando as resistências superficiais e da laje. Valor de cálculo para materiais saturados.

Para diferentes teores em água, u, as condutibilidades térmicas, λ [W/(mºC)], devem ser determinadas utilizando as seguintes expressões:

Substrato selecionado: λ(u)= 0.0917u + 0.0594

ICB: λ(u)= 0.0274u+ 0.0388

Teores em água no substrato e no ICB para a condição de saturado: u_{subs}=1.987 kg/kg e u_{ICB}=0.745 kg/kg.

COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO EM CÂMARA BIOCLIMÁTICA

As simulações em câmara bioclimática revelam que, após um período de precipitação, o sistema recupera rapidamente para um comportamento semelhante ao registado em condições normais (sem precipitação).

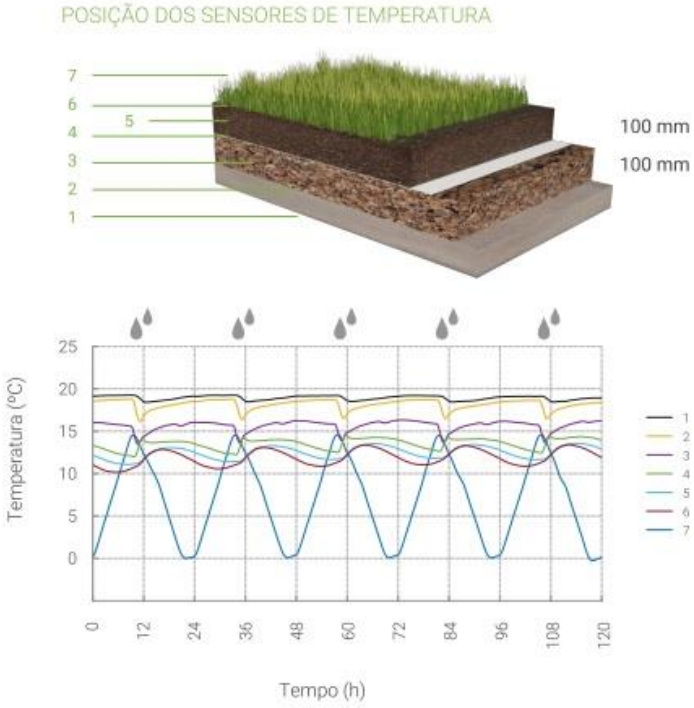


Fig. 58 – Informação disponível acerca do funcionamento do GUL (Neoturf)

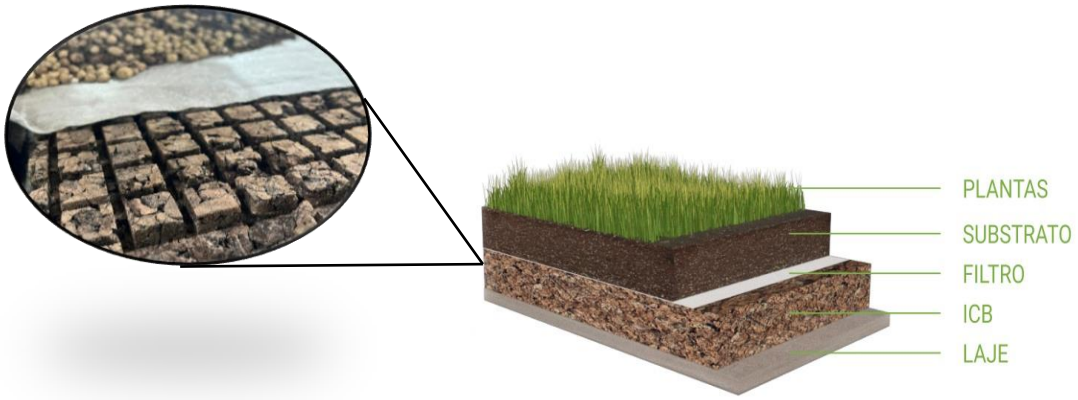


Fig. 59 – Pormenorização do isolamento térmico utilizado - GUL

A cobertura verde com GUL é constituída por uma laje impermeabilizada e protegida por uma tela anti raízes, a placa de GUL, uma camada filtrante, substrato e a vegetação, como está representada na Fig. 59.

O substrato utilizado será um substrato técnico e terá uma altura de 12 cm, a vegetação escolhida foram espécies herbáceas pela sua rápida colonização, pouca exigência em termos nutricionais e de alta resistência a temperaturas extremas. A escolha da plantação tem como objetivo o aumento de biodiversidade da cobertura verde. O isolamento desta cobertura será em aglomerado de cortiça expandida, o novo sistema GUL já mencionado, com 8 cm de espessura tendo como funções não só o isolamento térmico como também a drenagem do excesso de água e o isolamento acústico. Como acabamento, a cobertura terá faixas perimetrais em gravilha com 30 cm de largura onde estarão colocadas as caixas de visita que cobrem os tubos de queda sendo necessária a inspeção periódica de forma a evitar a sua colmatação.

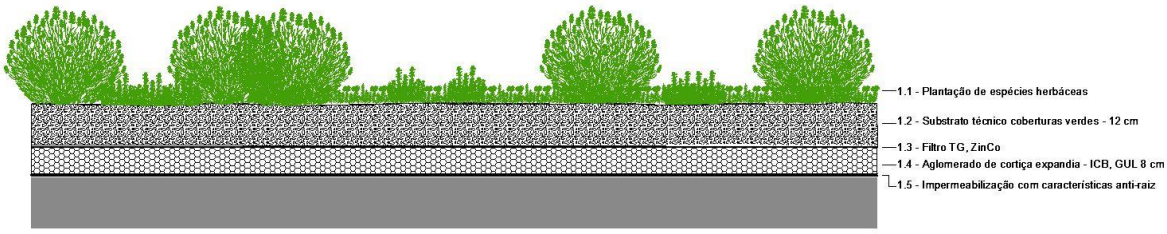


Fig. 60 – Pormenorização de uma cobertura verde com GUL (ANCV)

5.3.2. COBERTURA VERDE COM PAINÉIS SOLARES – BIOSOLAR ROOF

A cobertura verde biosolar roof, combina a vegetação com a instalação de painéis solares. É um tipo de cobertura verde leve, de baixa espessura e de aspeto natural que exige pouca manutenção. A diversa vegetação que compõe o tapete pré-cultivado de sedum é de crescimento baixo e resistente às condições climatéricas. A combinação das variedades de sedum com um substrato bem dimensionado, confere durabilidade à cobertura verde.

A cobertura verde com aplicação de tapete pré-cultivo de sedum é composta pelas seguintes camadas (Fig. 61):

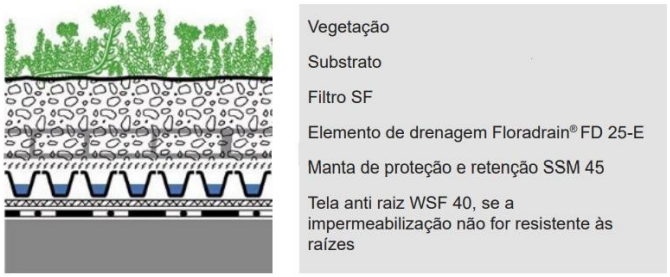


Fig. 61 – Pormenorização de uma cobertura verde com aplicação de tapete pré-cultivado de sedum (Landlab)

Sobre a camada de vegetação serão colocados painéis solares fotovoltaicos que em combinação com a vegetação atingem efeitos consideráveis de sinergia, podendo ser denominada de cobertura verde biosolar.

O plano de intervenção propõe a colocação de um sistema de integração dos painéis solares na cobertura verde (Fig.62) que não necessita de fixação na membrana de impermeabilização, evitando assim problemas de estanquicidade na cobertura. Será colocada gravilha de rio na base do sistema de integração dos painéis para criar peso na estrutura.

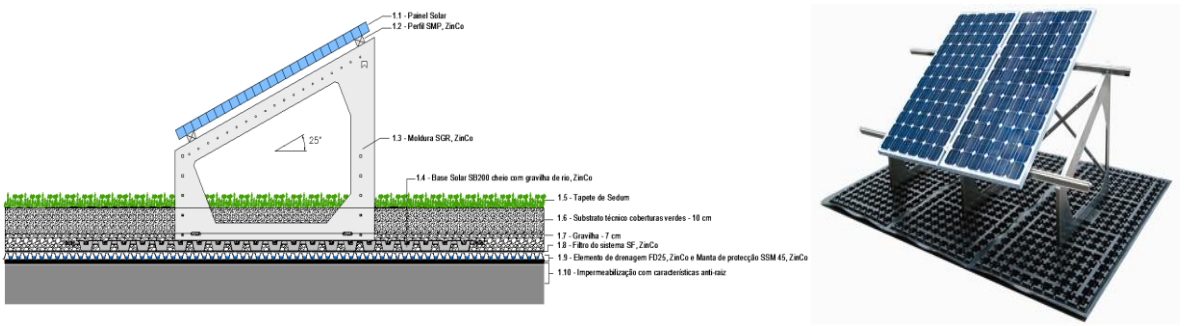


Fig. 62 – Pormenorização da aplicação de painéis solares na cobertura verde (ANCV)

A cobertura verde biosolar roof será constituída por um tapete pré-cultivado de sedum colocado por cima de uma camada de substrato técnico com cerca de 10 cm de altura. Em todo o perímetro desta cobertura será colocada uma faixa de gravilha com largura a variar entre os 22 e os 30 cm que permite a manutenção e inspeção periódica das caixas de visita e tubos de quedas presentes nesta faixa.

5.3.3. COBERTURA VERDE EXTENSIVA INCLINADA

Nas coberturas verdes inclinadas enfrentam-se alguns desafios, como a estabilidade do substrato e a retenção da água. Quando mais inclinada a cobertura for, maior é a força de deslizamento, sendo necessária a colocação de barreiras de contenção no limite inferior da cobertura. Com o objetivo de conceder estabilidade ao substrato é colocado um elemento de drenagem multifuncional que evita o deslizamento deste.

A cobertura verde inclinada será constituída pelo substrato técnico com cerca de 10 cm de altura que servirá de apoio à colocação do tapete pré-cultivado de sedum. O excesso de água desta cobertura será encaminhado para um depósito que água que posteriormente será reencaminhado para a charca construída na Horta Comunitária da Oliveira.

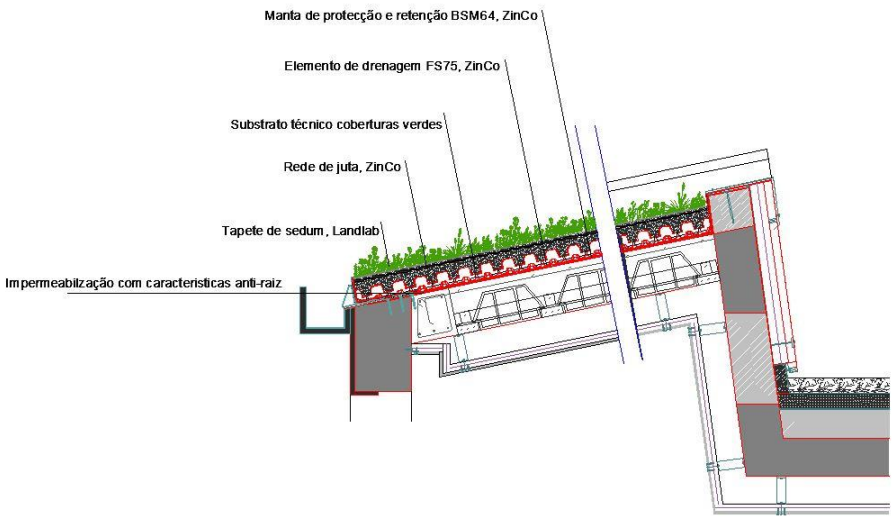


Fig. 63 – Pormenorização de uma cobertura verde inclinada (ANCV)

5.3.4. SUBSTRATO TÉCNICO

Com o passar dos tempos, os substratos utilizados nas coberturas verdes também foram sofrendo alterações principalmente quando deparados com o problema da sobrecarga na cobertura. De maneira a tornar o substrato mais leve e mais controlado no que diz respeito aos parasitas nele existente, uma empresa espacializada em materiais de construção para coberturas verdes em colaboração com especialistas alemães e tendo por base a normativa FLL e o guia técnico de coberturas verdes da ANCV, desenvolveram um substrato técnico de melhor qualidade. A composição deste substrato assenta na utilização de matéria mineral e orgânica, como por exemplo, húmus de casca de pinho fermentado e certificado, turfa loura selecionada, argila expandida e rocha vulcânica.

Para além das características anteriormente apresentadas, o substrato técnico revela-se termicamente superior ao substrato totalmente constituído por terra, isto é, o valor da condutibilidade térmica do substrato técnico seco é aproximadamente ¼ do valor da condutibilidade térmica do substrato de terra seca, por outro lado quando estes se encontram saturados a condutibilidade térmica do substrato técnico é cerca de 5 vezes menor.

5.4.DESAFIOS NA INTERVENÇÃO

5.4.1. PROBLEMAS LOGÍSTICOS E CLIMÁTICOS

Uma empresa especializada na construção de coberturas verdes foi contratada como subempreiteiro ficando dependente de alguns serviços do empreiteiro da obra da Escola Básica de 1º CEB/JI do Falcão, nomeadamente da grua que facilitaria o espalhamento do substrato, mas esta foi retirada da obra anteriormente ao início deste procedimento. Como resposta a esta complicação o substrato teve que ser espalhado com auxílio do carrinho de mão o que levou ao atraso do planeamento inicialmente definido. Aquando a grua na obra apenas foi possível transportar os sacos de substrato para a cobertura, o que criou um problema de subcarga que deixou os responsáveis reticentes. A falta e o atraso de materiais também têm acompanhado toda a intervenção da Escola do Falcão.

As condições climáticas, períodos de chuva e vento intensos, têm prejudicado o cumprimento de prazos levando ao encerramento dos trabalhos várias vezes, por não se cumprirem as condições de segurança necessárias.

5.4.2. OBSTÁCULOS DO PROJETO INICIAL

O projeto de intervenção da Escola Básica de 1º CEB/JI do Falcão foi executado pela ANCV, Associação Nacional de Coberturas Verdes, bastante tempo antes da escola começar a ser intervencionada pelo empreiteiro. Quando a Neoturf iniciou os trabalhos de execução das coberturas verdes deparou-se com um conjunto de vigas visíveis e salientes, que possivelmente ficaram expostas apenas depois da intervenção por parte do empreiteiro, no local onde seria realizada parte da cobertura verde extensiva com sistema GUL. Com isto, foram encontrados dois obstáculos sendo eles a altura do muro perimetral da cobertura e a altura a que estão localizadas as janelas (Fig. 64), pois estão a alturas inferiores à espessura da cobertura verde a ser ali executada. A altura do muro perimetral da cobertura poderia ter sido aumentada antes da colocação da tela de impermeabilização e anti raiz, contudo não se poderia mexer na localização das janelas havendo assim incompatibilidades com o projeto inicialmente pensado. Como resolução a este problema não será colocada cobertura verde sobre as vigas salientes, funcionarão como interrupções da mesma, levantando assim outra preocupação porque serão pontos de fragilidade da cobertura, ou seja, se estas vigas não forem devidamente isoladas e impermeabilizadas aumentarão o efeito das pontes térmicas por elas criadas, criando desconforto térmico na divisão.

Fig. 64 – Vigas salientes na cobertura verde com sistema de GUL

5.5. PLANO DE MONITORIZAÇÃO

A proposta de intervenção pretende com a implantação das coberturas verdes monitorizar o seu desempenho térmico através da colocação de sensores térmicos ao longo das camadas que constituem a cobertura.

5.5.1. IMPORTÂNCIA DA MONITORIZAÇÃO

Nos dias de hoje ainda existem várias lacunas nos dados utilizados na investigação do comportamento das coberturas verdes, possivelmente por falta de apoios económicos. Contudo a monitorização de um caso de estudo em que se consiga retirar o maior número de dados possível só tem vantagens, se retiraremos informações sobre a precipitação, a velocidade do vento, a radiação solar incidente, a temperatura medida em várias camadas e a humidade dos materiais de uma cobertura verde comparando-as com uma cobertura tradicional localizada no mesmo sítio com as mesmas características climáticas, teremos uma análise muito fidedigna. Podendo assim se retirar conclusões concretas e propor soluções menos convencionais, mas com melhores resultados.

5.5.2. OBJETIVOS DA MONITORIZAÇÃO

A monitorização a realizar na Escola Básica de 1º CEB/JI do Falcão estará a cargo do CIIMAR, Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental com a Engenheira Cristina Calheiros, e da Neoturf com objetivo de recolher dados suficientes para caracterizar o comportamento higrotérmico dois tipos de cobertura verde distintos, um deles comparando-o com uma cobertura tradicional. Identificando o seu potencial térmico, mas também ambiental, bem como problemas existentes neste tipo de cobertura de forma a os corrigir futuramente.

5.5.3. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS SENSORES DE MONITORIZAÇÃO

As coberturas a serem monitorizadas são apenas a cobertura verde extensiva inclinada, a cobertura tradicional inclinada, para comparação, e a cobertura verde com painéis fotovoltaicos, como está representado na Fig. 65.

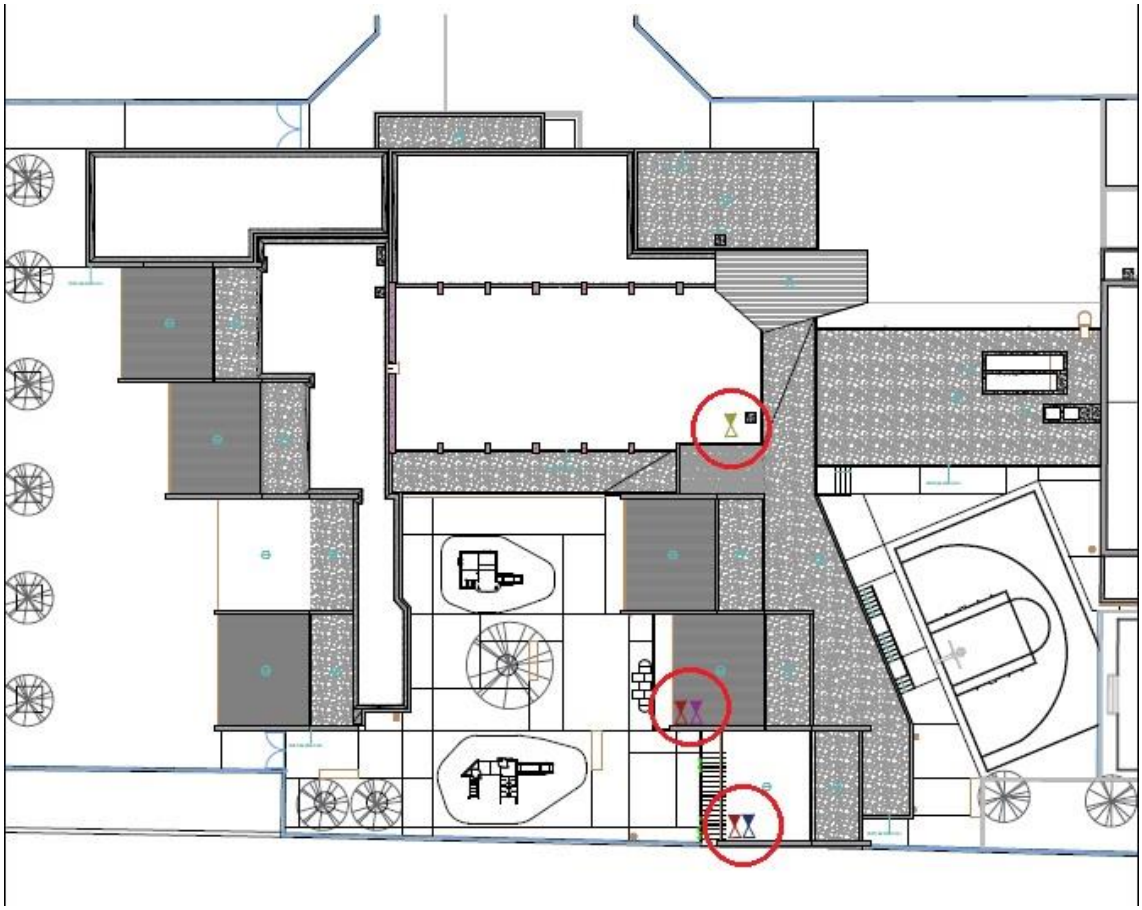


Fig. 65 - Localização dos sensores (Projeto ANCV)

Relativamente aos equipamentos instalados para monitorizar serão utilizados sensores de temperatura, velocidade e direção do vento, precipitação, luz fotossintética, temperatura e humidade relativa, radiação solar, temperatura e luz e temperatura da água, os registos destes dados serão guardados num registador HOBO U30-NRC com capacidade de funcionamento em ambientes com temperaturas a variarem entre -40ºC e os 60ºC. É possível através do software HOBOware descarregar os dados provenientes da monitorização e analisá-los no próprio software ou exportá-los para um documento Excel.

Na cobertura verde inclinada serão colocados dois sensores de temperatura na camada de vegetação e por baixo da camada de substrato, normalmente utilizam-se dois sensores por segurança no caso de alguma avaria, e um sensor submergível de temperatura e luz.

Na cobertura tradicional inclinada serão colocados dois sensores de temperatura na superfície exterior da cobertura de forma a se obter resultados de comparação com a cobertura verde inclinada.

Possivelmente também serão colocados sensores na cobertura verde com painéis solares, dependendo dos custos associados, sendo eles sensores de temperatura, velocidade e direção do vento, precipitação, temperatura e humidade relativa, radiação solar e luz fotossintética. Seria uma mais valia a colocação destes sensores de forma a ter uma monitorização mais abrangente e nas mesmas condições, mas acima de tudo para compreender a importância da colocação de vegetação numa cobertura onde também serão instalados painéis fotovoltaicos.

Segundo um estudo da Universidade de Hong Kong, a temperatura na superfície do painel solar vai aumentando com a incidência da radiação solar afetando negativamente o seu desempenho, eficiência e confiabilidade. A vegetação colocada nas coberturas verdes, através da evapotranspiração, tem a capacidade de reduzir a temperatura ambiente, ajudando a baixar a temperatura na superfície dos painéis fotovoltaicos otimizando o seu desempenho energético. Os resultados deste estudo mostram que os painéis fotovoltaicos combinados com a vegetação aumentam a sua produção energética em 6% quando comparados com uma cobertura apenas com painéis fotovoltaicos. (M. Shafique et al, 2020)

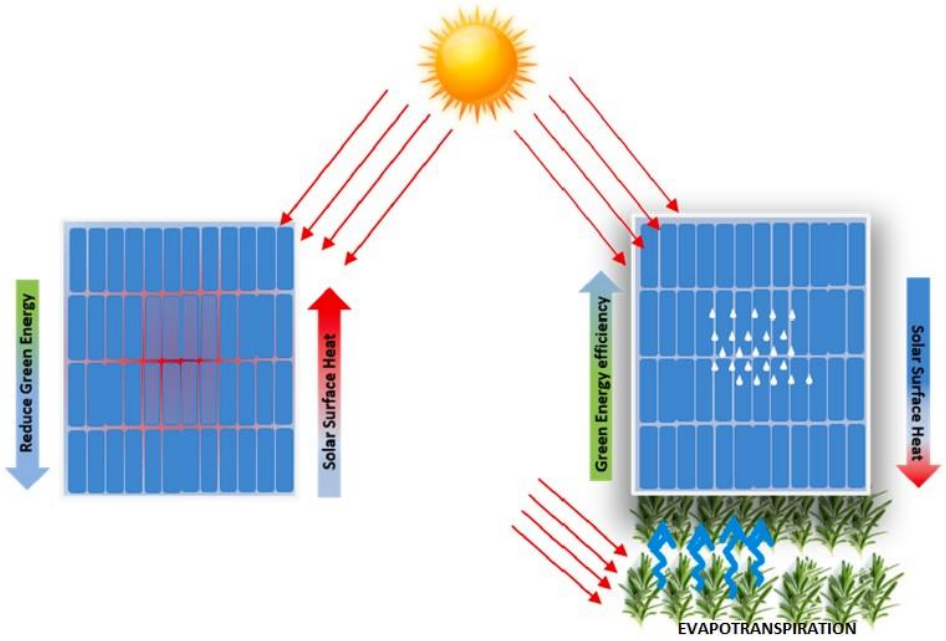


Fig. 66 – Mecanismo de funcionamento dos painéis fotovoltaicos sem e com cobertura verde (M. Shafique et al, 2020)

5.5.4. MELHORIAS E FUTURAS MONITORIZAÇÕES EM COBERTURAS VERDES

Na minha opinião seria benéfico monitorizar todas as coberturas verdes e tradicionais de forma a obter resultados comparativos com uma maior credibilidade, coberturas com a mesma cota, inclinação e condições climáticas.

A cobertura verde com painéis solares devia ser comparada com uma cobertura tradicional com painéis solares de maneira a obtermos resultados que corroborem o estudo mencionado no subcapítulo 5.5.3, isto é, resultados que mostrem a capacidade sinergética que a vegetação em conjunto com os painéis

fotovoltaicos tem de otimizar e maximizar a produção de energia. Assim, dever-se-ia colocar sensores de temperatura na superfície exterior do painel fotovoltaico, por baixo do módulo do painel à sombra, na vegetação e na superfície interior da divisão. Relativamente à cobertura tradicional deveriam ser colocados sensores na superfície exterior do painel, por baixo do painel à sombra e na superfície interior da divisão.

Embora a cobertura verde com sistema de GUL já esteja a ser monitorizada pelo Itecons noutra obra, deveria ser também nesta intervenção para ser possível comparar o desempenho dos três tipos de cobertura verde construídos na Escola do Falcão. Assim, dever-se-ia colocar sensores de temperatura na vegetação, por baixo do substrato, por baixo das placas de GUL e na superfície interior da divisão. Em relação à cobertura tradicional que funcionaria em termos de comparação, dever-se-ia colocar sensores de temperatura na superfície exterior da cobertura e na superfície interior da divisão.

A cobertura verde inclinada e a cobertura tradicional inclinada serão monitorizadas, mas dever-se-ia colocar também sensores de temperatura na superfície exterior e na superfície interior da divisão de ambas as coberturas.

Na colocação dos sensores de temperatura na superfície interior das divisões tem que ser ter em conta que não fiquem expostos a radiação solar de forma a que os resultados não sejam negativamente influenciados. Os sensores de temperatura mencionados anteriormente têm como principal objetivo analisar os fluxos de calor das coberturas verdes comparativamente com as coberturas tradicionais, verificando assim o seu desempenho térmico.

O período de monitorização tem que ser no mínimo de um ano para que os sensores registem dados de todas as estações do ano, contudo como as alterações climáticas têm vindo a influenciar o clima o ideal seria monitorizar durante três anos, para o caso de teremos alguma estação ou até mesmo um ano anómalo.

Também seria interessante a utilização da câmara termográfica na monitorização com o objetivo de identificar pontos de fragilidade das coberturas por vezes ocultos, tentando compreender o motivo por detrás do problema e solucionando-o.

A evolução e aceitação de novas soluções construtivas por parte da sociedade dependem das informações reais e fundamentadas que lhes são apresentadas. Uma correta e abrangente monitorização apresentará resultados fiáveis.

5.6. SÍNTESE DO CAPÍTULO

O estudo efetuado pode ser resumido da seguinte forma:

- Descreveu-se e localizou-se o caso de estudo analisado durante 3 meses, em ambiente empresarial;
- Mencionou-se os objetivos desta dissertação em ambiente empresarial;
- Descreveu-se o plano de intervenção que a Escola Básica de 1º CEB/JI do Falcão sofreu e os desafios logísticos e climáticos associados a esta obra;
- Pormenorizou-se o plano de monitorização das coberturas que será executado nesta obra enumerando os seus objetivos e o que poderia ser melhorado. Como não acompanharei a continuação da obra sugiro algumas alterações à monitorização de forma a se obter resultados mais credíveis e fundamentados;

6. CONCLUSÃO

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

Sendo o objetivo final de comparar o desempenho térmico de coberturas verdes e tradicionais, quantificaram-se os fluxos de calor em regime permanente e em regime variável, para situação de inverno, para diversos cenários.

Em regime permanente, de forma a cumprir as exigências regulamentares do coeficiente de transmissão térmica, $U_{máx}$=0,40 W/m^2.ºC, calculou-se a espessura de isolamento térmico, ICB e XPS, para diferentes alturas de substrato, substrato de terra e substrato técnico. Com isto concluímos que, independentemente do isolamento térmico utilizado a cobertura verde necessita de espessuras menores de isolamento do que a cobertura tradicional. Quando o substrato de terra se encontra seco e tem uma altura igual ou superior a 0,80 m deixa de ser necessária a colocação de isolamento térmico, por outro lado quando este se encontra saturado, há sempre necessidade, pelo menos até 1m de altura, de colocar isolamento térmico devido ao aumento significativo da condutibilidade térmica, consequência do aumento de teor de humidade no substrato. Analisando o substrato técnico seco verifica-se que quando este possui 0,20 m ou mais de altura deixa de ser necessária a colocação de isolamento térmico, por outro lado, quando se encontrado saturado, de forma a que não seja necessário isolamento térmico a altura do substrato técnico atingir pelo menos 0,60 m.

Podemos constatar pelos valores apresentados no Quadro 19 que há reduções significativas da espessura de isolamento térmico na cobertura verde quando comparada com a cobertura tradicional.

Quadro 19 – Redução da espessura de isolamento térmico na cobertura verde em relação à cobertura tradicional

Altura de substrato	Terra Seca		Terra Saturada		Substrato Técnico Seco		Substrato Técnico Saturado	
	ICB	XPS	ICB	XPS	ICB	XPS	ICB	XPS
0,20 m	-2,54	-2,10	-0,42	-0,36	-9,41	-7,75	-3,65	-3,01
0,40 m	-5,34	-4,41	-1,11	-0,93	-9,41	-7,75	-7,56	-6,23
0,60 m	-8,15	-6,71	-1,80	-1,49	-9,41	-7,75	-9,41	-7,75

Verificamos que, para alturas de substrato de terra seca de 0,20 m a 0,60 m há uma redução da espessura de isolamento térmico de 2,5 a 8 cm quando se utiliza ICB e de 2 a 6,5 cm quando se utiliza XPS. Para alturas de substrato de terra saturada de 0,40 m a 0,60 m há uma redução da espessura de ICB de 1 a 2 cm e de XPS de 1 a 1,5 cm. Verificamos também que, para alturas de substrato técnico saturado entre

0,20 e 0,40 m há uma redução da espessura de isolamento térmico de 3,5 a 7,5 cm quando se coloca ICB e de 3 a 6 cm quando se coloca XPS. Quando as reduções de espessura assumem o valor da cobertura tradicional, 9,41 cm para o ICB e 7,75 cm para o XPS, significa que já não é necessária a colocação de isolamento térmico.

Em regime variável, com auxílio do software WUFI® Pro 5.3 simularam-se quatro cenários distintos, são eles uma cobertura tradicional com isolamento térmico em XPS, uma cobertura tradicional com isolamento térmico em ICB, uma cobertura verde com isolamento térmico em XPS e uma cobertura verde com isolamento térmico em ICB. De maneira a teremos uma análise comparativa fidedigna e a cumprir o mesmo requisito do coeficiente de transmissão térmica do regime permanente, $U_{máx}$=0,40 W/m^2.ºC, utilizaram-se as espessuras de isolamento térmico calculadas no capítulo 3. Analisando os dados retirados a partir das simulações concluiu-se que o valor do fluxo de calor aumenta conforme a temperatura média interior aumenta e que a incidência de precipitação influencia o valor do fluxo, sendo mais significativa na cobertura tradicional. Com precipitação, o fluxo de calor aumenta cerca de 1500 W/m^2 na cobertura tradicional, quando comparado com o estado seco, enquanto que na cobertura verde tem um aumento de cerca de 100 W/m^2.

Verificou-se também que para uma temperatura média interior de 16ºC o valor do somatório do fluxo de calor, em estado seco, é de aproximadamente duas vezes superior na cobertura tradicional quando comparado com a cobertura verde, tendo em conta a incidência de precipitação o valor supera as duas vezes. Estes resultados são sustentados pela resistência térmica da laje de betão, R_t=0,15 m^{2}K/W, (valor retirado do WUFI) ser bastante menor do que a resistência térmica do substrato, R_t=0,35 m^{2}K/W, (valor retirado do WUFI), permitindo concluir que quanto maior a resistência térmica, melhor o desempenho térmico do elemento construtivo. Assim, a cobertura verde revela um melhor desempenho térmico.

Relativamente ao caso de estudo, acompanhei a construção da cobertura verde inclinada e parte da cobertura verde extensiva com aplicação do sistema GUL, dominando já o conceito e forma de execução das coberturas verdes. A monitorização a ser implementada na obra em questão será de extrema relevância para compreender o comportamento higrotérmico desta nova solução construtiva que são as coberturas verdes.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como sugestão a desenvolvimentos futuros, seria importante simular os fluxos de calor e teor de humidade, em regime variável, todas as combinações de espessuras de isolamento térmico e alturas de substrato quantificadas no capítulo 3, sendo que neste trabalho, por tempo limitado, foram apenas simulados os substratos com 0,10 m de altura. Tentar perceber a influência da espessura do substrato e do isolamento térmico na resistência térmica e consequente desempenho higrotérmico das coberturas verdes.

Sendo que ainda existe muito trabalho a desenvolver no âmbito da monitorização das coberturas verdes, seria interessante aproveitar esta obra para monitorizar a totalidade das coberturas existentes, podendo extrair dados com mais exatidão, sendo que todos os cenários teriam as mesmas condições climáticas, percebendo com mais rigor a resposta às necessidades energéticas do edifício, como por exemplo, o fluxo de calor e a humidade relativa. Sobretudo seria interessante avaliar a resposta de produção energética da cobertura verde com painéis fotovoltaicos comparativamente com uma cobertura tradicional com painéis fotovoltaicos.

Sabendo que as monitorizações e estudos ambientais são cofinanciados e muitas das vezes têm uma margem económica muito curta, mas seria importante a colocação de uma estação meteorológica com

capacidade de registar todas as condições climáticas durante o período de monitorização, porque muitas vezes são utilizados dados climáticos de outras zonas que influenciaram os resultados finais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COSTA, Luís Miguel Loureiro. (2010). *"Espaços Verdes Sobre Cobertura: Uma Abordagem Estética e Ética"*. Dissertação de Mestrado em Arquitetura Paisagista, Instituto Superior de Agronomia Universidade Técnica de Lisboa.

LEAL, Márcia Filipa Pessoa. (2019). *"Conceção, Especificação e Pormenorização de Coberturas Verdes"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

VALENTE, José Carlos Costa. (2019). *"Telhados Verdes em Portugal – Perceção, Atitudes e Preferências Estéticas"*. Dissertação de Mestrado em Arquitetura Paisagista, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade do Algarve.

COELHO, Ana Luísa Rodrigues. (2014). *"Manutenção de Coberturas Verdes. Apoio ao projeto"*. Dissertação de Mestrado em Construção e Reabilitação, Instituto Técnico de Lisboa.

ALBINO, Pedro Filipe Dias Veríssimo. (2020). *"Importância do Substrato no Comportamento Higrotérmico das Coberturas Verdes"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

BERNARDINO, André Alexandre Nunes. (2018). *"Desempenho Térmico de Revestimentos de Cobertura Utilizando a Técnica da Termografia"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

COELHO, Katya de Sousa Dias. (2019). *"Avaliação de um Sistema Modular de Cobertura Verde: Comportamento Térmico, Hídrico e Acústico".* Dissertação de Mestrado em Energia para a Sustentabilidade, Universidade de Coimbra.

RAPOSO, Fausto Miguel Ferreira. (2013). *"Manual de Boas Práticas de Coberturas Verdes. Análise de casos de estudo"*. Dissertação de Mestrado em Construção e Reabilitação, Instituto Técnico de Lisboa.

DIAS, Luís Filipe de Barros Maria. (2014). *"Reabilitação do edifício da Escola de Educação Ambiental da Quinta da Gruta através da implementação de uma Cobertura Ajardinada".* Relatório de Estágio em Ciências e Tecnologia do Ambiente, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

MENESES, Gustavo Alexandre Pires. (2015). *"Avaliação Experimental do Comportamento Térmico de Coberturas Verdes Semi-Intensivas na Estação de Arrefecimento"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Técnico de Lisboa.

NEVES, Diogo André Ferreira. (2017). *"Estudo Experimental do Comportamento Térmico de Coberturas Verdes Semi-Intensivas"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Técnico de Lisboa.

PEREIRA, Daniela Alexandra Alves. (2017). *"Estudo do Desempenho Térmico de Coberturas Verdes: Caso de Estudo".* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro.

CARVALHO, Pedro Couceiro Dias de. (2017). *"Caracterização do Desempenho Térmico de Soluções Construtivas Sujeitas a um Regime de Transferência de Calor Dinâmico"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

FREITAS, Ana Sara Stingl Leal Araújo de. (2011). *"Avaliação do Comportamento Higrotérmico de Revestimentos Exteriores de Fachadas devido à Acção da Chuva Incidente"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

VASCONCELOS, Bruno Esteves de. (2010*). "Avaliação do Desempenho Higrotérmico de Paredes em Regime Dinâmico em Função do Clima".* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

BORGA, Pedro Nuno Liberato Vieira. (2012*). "Análise Exigencial dos Green Roofs – Estudo de Casos".* Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

FERREIRA, Ricardo Jorge da Silva. (2013). *"Análise de Sensibilidade dos Parâmetros de Cálculo das Coberturas Jardim"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

PINTO, Catarina Isabel da Rocha Correia. (2014). *"Introdução às Coberturas Ajardinadas"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

NOVO, Cláudio André Bernardino. (2016). *"Análise da eficiência energética de coberturas verdes em edifícios residenciais"*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

FERREIRA, Cláudia Sofia Faia Miranda. (2015). *"Inércia Higroscópica em Museus Instalados em Edifícios Antigos: Utilização de Técnicas Passivas no Controlo da Humidade Relativa Interior".* Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Despacho n.º 6476-H/2021. Diário da República, 2ª série, nº 126, 1 de julho de 2021. Direção-Geral de Energia e Geologia, Lisboa.

LNEC. (2006). *"Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios"*, ITE50. Lisboa.

ANCV - Associação Nacional de Coberturas Verdes. (2019). *"Coberturas Verdes. Guia Técnico. Guia Técnico para projeto, construção e manutenção de coberturas verdes"* (1ª edição). Porto.

FLL, Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau [Sociedade de Pesquisa em Desenvolvimento e Construção da Paisagem. (2018). *"Green Roof Guidelines. Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofs"* (6ª edição). Bona, Alemanha.

ENERGUIA, Guia de Eficiência Energética nos Edifícios. (2020). *"Consumidores Inteligentes. Casas Eficientes"* (14ª edição). Porto

MANSO, Maria; TEOTÓNIO, Inês; SILVA, Cristina Matos; CRUZ, Carlos Oliveira. (2021). "Green roof and green Wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 135, 110111, doi: 10.1016/j.rser.2020.110111

FREITAS, S.; RAMOS, N.N.M; FREITAS, V.P; KUNZEL, H.M; ZIRKELBACH, D. (2016). *"Vegetative Roof Performance during Summer – Critical Analysis of the Irrigation Effect".* Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XIII Internacional Conferece. Florida.

YANG, Yige; DAVIDSON, Cliff I.; ZHANG, Jianshun. (2021*). "Evaluation of thermal performance of green roofs via field measurements and hygrothermal simulations".* Energy and Buildings, vol. 237, 110800, doi: 10.1016/j.enbuild.2021.110800

TANG, Xin e QU, Ming. (2016). *"Phase change and thermal performance analysis for green roofs in cold climates"*. Energy and Buildigs, vol. 121, 165-175, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.03.069

HE, Yang; YU, Hang; OZAKI Akihito; DONG, Nannan; ZHENG, Shiling. (2017). *"Long-term thermal performance evaluation of green roof system based on two new indexes: A case study in Shanghai area".* Building and Environment, vol. 120, 13-28, doi: 10.1016/j.buildenv.2017.04.001

SHAFIQUE, Muhammad; LUO, Xiaowei; ZUO, Jian. (2020). *"Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations and trends"*. Solar Energy, vol. 202, 485-497, doi: 10.1016/j.solener.2020.02.101

SILVA, Cristina M.; GOMES, M. Glória; SILVA, Marcelo. (2016). *"Green roofs energy performance in Mediterranean climate"*. Energy and Buildings, vol.116, 318-325, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.01.012

MARTOS, Rocío Pineda; CALHEIROS, Cristina S. C. (2021). *"Nature-Based Solutions in Cities – Contribution of the Portuguese National Association of Green Roofs of Urban Circularity"*. Circular Economy and Sustainability, vol. 3, 1019-1035, doi: 10.1007/s43615-021-00070-9

Nações Unidas. População Mundial. (2022). Disponível em https://news.un.org/pt/tags/populacao-mundial. Acesso a 2/10/2022

Mozaik Education. Zigurate de Ur. Disponível em https://www.mozaweb.com/pt/Extra-Cenas_3D-Zigurate_de_Ur_3_milenio_a_C-12042. Acesso a 4/10/2022

Histoty. "Hanging Gardens Existed – But Not in Babylon". (2018). Disponível em https://www.history.com/news/hanging-gardens-existed-but-not-in-babylon. Acesso a 4/10/2022

Funchal Notícias. "As 7 Maravilhas do Mundo Antigo: Jardins Suspensos da Babilónia". (2016). Disponível em https://funchalnoticias.net/2016/01/29/as-7-maravilhas-do-mundo-antigo-jardins-suspensos-da-babilonia/. Acesso a 4/10/2022

BoredPanda. "30 Scandinavian Houses with Green Roofs Look Straight Out of a Fairytale". (2019). Disponível em https://www.boredpanda.com/grass-roofs-turf-houses-scandinavia/?utm_source=google&utm_medium=organic&utm_campaign=organic. Acesso a 4/10/2022

REBOLLAR, Nora Alejandra Patricia. "Telhados Verdes. Uma abordagem multidisciplinar". (2017). (1ª edição). Disponível em https://issuu.com/fatenp/docs/telhados_verdes_e-book. Acesso a 6/10/2022

Guia de Florença. "A Torre Guinigi, um jardim pênsil em Lucca". (2018). Disponível em https://guiaflorenca.net/lucca/a-torre-guinigi-de-lucca/. Acesso a 6/10/2022

Wikiwand. "Grande Palácio do Kremlin". Disponível em https://www.wikiwand.com/pt/Grande_Pal%C3%A1cio_do_Kremlin. Acesso a 6/10/2022

Diário de Notícia. "Villa Savoye é o edifício mais espetacular do século XX". (2019). Disponível em https://www.dn.pt/cultura/villa-savoye-e-o-edificio-mais-espetacular-do-seculo-xx-10624227.html. Acesso a 6/10/2022

ArchDaily. "Clássicos da Arquitetura: Casa da Cascata/Frank Lloyd Wright". (2012). Disponível em https://www.archdaily.com.br/br/01-53156/classicos-da-arquitetura-casa-da-cascata-frank-lloyd-wright. Acesso a 6/10/2022

Sistema de Informação para o Património Arquitectónico. "Hotel Ritz". (2011). Disponível em http://www.monumentos.gov.pt/site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=778. Acesso a 6/10/2022

Jardim Gulbenkian. "História do Jardim". (2019). Disponível em https://gulbenkian.pt/jardim/visitar/historia-do-jardim/. Acesso a 12/10/2022

ANCV - Associação Nacional de Coberturas Verdes. "Políticas Coberturas Verdes". (2023). Disponível em https://www.greenroofs.pt/pt/mapa-politicas. Acesso a 12/10/2022

Iberdrola. "Ilhas de Calor". (2022). Disponível em https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/ilha-de-calor. Acesso a 15/10/2022

ANCV - Associação Nacional de Coberturas Verdes. "Projeto Quinto Alçado do Porto (PQAP)". (2017). Disponível em https://www.greenroofs.pt/pt/pqap. Acesso a 18/10/2022

Neoturf. (2017). Coberturas Verdes. Disponível em https://www.neoturf.pt/pt/servico/coberturas-verdes. Acesso a 20/10/2022

Thermoconcept. "Conductivité Thermique des Sols Secs et Humides". (2022). Disponível em https://www.thermoconcept-sarl.com/conductivite-thermique-des-sols-secs-et-humides/. Acesso a 27/10/2022

Lanlab. "Susbstrato Landlab Pro". Disponível em https://www.landlab.pt/pt/produto/substrato-landlab-pro-1. Acesso a 27/10/2022

Itecons. "Green Urban Living. Cork Green Roof System". (2015). Disponível em https://www.itecons.uc.pt/projectos/greenurbanliving/index.php?module=sec&id=818. Acesso a 11/12/2022

Porto. "Investimento municipal de 1,2 milhões para unir requalificar Escola do Falcão". (2021). Disponível em https://www.porto.pt/pt/noticia/investimento-municipal-de-12-milhoes-para-unir-e-requalificar-escola-do-falcao. Acesso a 11/12/2022

Porto. "Futuro requalificado da Escola do Falcão ganhou asas esta semana". (2021). Disponível em https://www.porto.pt/pt/noticia/futuro-requalificado-da-escola-do-falcao-ganhou-asas-esta-semana. Acesso a 11/12/2022

Landlab. "Coberturas Verdes". Disponível em https://www.landlab.pt/pt/produtos. Acesso a 20/12/2022