



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Bruno Miguel Seguro Roque

MONITORIZAÇÃO DE SOLUÇÕES ALTAMENTE  
EFICIENTES PARA APLICAÇÃO EM EDIFÍCIOS

MONITORING OF HIGHLY EFFICIENT SOLUTIONS FOR  
APPLICATION IN BUILDINGS

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e pela Doutora Catarina Lopes Serra e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Fevereiro de 2021

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

Bruno Miguel Seguro Roque

# MONITORIZAÇÃO DE SOLUÇÕES ALTAMENTE EFICIENTES PARA APLICAÇÃO EM EDIFÍCIOS

**MONITORING OF HIGHLY EFFICIENT SOLUTIONS FOR APPLICATION IN BUILDINGS**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente,  
orientada pelo Professor Doutor Nuno Albino Vieira Simões e pela Doutora Catarina Lopes Serra.

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

fevereiro de 2021



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

*“As pessoas suficientemente loucas para acharem que podem mudar o mundo são as que o mudam.”*

Steve Jobs, 1997.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha primeira palavra de agradecimento vai para os meu pais, irmã e avós que me apoiam inteiramente e são fundamentais para eu conseguir alcançar os objetivos com que sempre sonhei.

O meu profundo reconhecimento e agradecimento aos meus orientadores, o Professor Nuno e Doutora Catarina, que me ajudaram a concretizar este trabalho e me deram o seu inestimável apoio ao longo de toda a jornada. Um agradecimento também a toda a equipa do Itecons, em especial ao Engenheiro Márcio pela disponibilidade e ajuda prestada.

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto INNOVIP, o qual é financiado pelo programa de investigação e inovação Horizonte 2020 da União Europeia conforme o acordo nº. 723441.

À Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, em especial ao Departamento de Engenharia Civil por todo o conhecimento transmitido e por me ajudarem a conquistar mais ferramentas a nível profissional e social.

Agradecer também a todos os meus amigos e colegas, em especial ao grupo L’Ambientro que me integraram desde o início, e contribuíram a longo destes anos para que este percurso fosse completado.

E porque os últimos são sempre os primeiros, a mais profunda gratidão à minha namorada, a Maria! Obrigado por todas as sugestões, sábios conselhos e porque em todos os momentos sempre acreditaste em mim e nas minhas capacidades, e nunca, nem por um segundo, deixaste de estar ao meu lado.

A todos, o meu muito obrigado!

## RESUMO

No contexto atual de pandemia causada pela COVID-19, a importância da climatização e ventilação dos edifícios é novamente discutida em detalhe. Seja em contexto de trabalho, descanso ou lazer, as pessoas passam grande parte do tempo no interior dos edifícios. Adicionalmente, seja por questões de conforto, segurança, saúde ou qualidade de vida, a renovação de edifícios é inevitável e constitui uma oportunidade única para repensar, redesenhar e modernizar os edifícios.

O setor dos edifícios é responsável por uma grande quantidade do consumo de energia e, consequentemente, de emissões de gases com efeito de estufa. Face a isto e à crescente preocupação global com as alterações climáticas e com a escassez de recursos, têm vindo a ser implementadas políticas e medidas de eficiência energética que vieram aumentar consideravelmente a espessura mínima da camada de isolamento aplicada na envolvente dos edifícios. Uma vez que estes requisitos têm tendência a serem cada vez mais exigentes, tornou-se necessário explorar a utilização de materiais altamente eficientes.

Os painéis de isolamento a vácuo (VIP - *Vacuum Insulation Panel*), devido à sua baixa condutibilidade, surgem como uma forte alternativa aos materiais convencionais, permitindo assim o uso de uma menor espessura de isolamento. A possibilidade de se aplicarem espessuras menores traduz-se num benefício no volume útil disponível nos ambientes interiores.

O presente trabalho irá focar-se na caracterização de soluções de isolamento com recurso a VIPs na cobertura de edifícios, nomeadamente através da monitorização do seu desempenho, sob a influência de diferentes climas e em diferentes aplicações, sendo para tal considerados 2 casos de estudo. No caso de estudo 1, os VIPs foram instalados na cobertura exterior de um edifício em Varsóvia (Polónia) e permitem a comparação entre dimensões diferentes de painéis. No caso de estudo 2, localizado em Coimbra (Portugal), a reabilitação foi feita pelo interior e permite a comparação entre uma solução convencional de lã mineral e a solução integrando os VIPs. Este trabalho irá contribuir para o desenvolvimento de soluções construtivas altamente eficientes com menor espessura do isolamento.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética dos Edifícios; Monitorizações; Coberturas; VIP.

## ABSTRACT

In the current context, and with the COVID-19 pandemic, the air conditioning and ventilation of buildings is again discussed in detail. Whether in the context of work, rest or leisure, people spend much of their time inside the buildings. For reasons of comfort, safety, health or quality of life, the renovation of buildings is inevitable and constitutes a unique opportunity to rethink, redesign and modernise buildings.

The buildings sector is responsible for a large amount of energy consumption and, in warm cases, greenhouse gas emissions. In view of this and the growing global concern about climate change and resource scarcity, energy efficiency policies and measures have been implemented that have considerably increase the minimum thickness of the insulation layer applied to buildings. As these requirements tend to be increasingly demanding, it has become necessary to explore the use of highly efficient materials.

Vacuum insulation panels (VIP), due to their low conductivity, emerge as a strong alternative to conventional materials, thus allowing the use of a smaller insulation thickness. The possibility of applying smaller thicknesses translates into a benefit in the useful volume available in indoor environments.

This work will focus on the characterization of insulation solutions using VIPs in the roof of buildings, monitoring of its performance, under the influence of different climates and in different applications, and for this purpose are considered 2 cases of study. In the case of study 1, the VIPs were installed on the exterior roof of a building in Warsaw (Poland) and allow comparison between different dimensions of panels. In the case of study 2, located in Coimbra (Portugal), the rehabilitation was done by the interior and allows the comparison between a conventional solution of mineral wool and the solution integrating the VIPs. This work will contribute to the development of highly efficient constructive solutions with lower insulation thickness.

**Keywords:** Energy Efficiency of Buildings; Measurements; Roofs; VIP.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	ii
ABSTRACT .....	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Soluções de Isolamento a Vácuo .....	4
1.2.1 Efeito das Pontes Térmicas nos VIPs.....	6
1.2.2 Vida Útil e Envelhecimento dos VIPs.....	7
1.2.3 Aplicabilidade dos Painéis VIP .....	8
1.3 Motivação .....	9
1.4 Objetivos.....	10
1.5 Estrutura da Dissertação .....	11
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	12
2.1 Casos de Estudo .....	12
2.2 Caracterização dos Climas.....	14
2.2.1 Zona Climática de Varsóvia - Polónia.....	14
2.2.2 Zona Climática de Coimbra - Portugal.....	15
2.3 Aplicação das Soluções .....	16
2.3.1 Caso de Estudo em Varsóvia.....	16
2.3.2 Caso de Estudo em Coimbra .....	20
2.4 Instrumentação das Soluções .....	26
2.4.1 Caso de Estudo de Varsóvia .....	27
2.4.2 Caso de Estudo de Coimbra .....	29
3 RESULTADOS .....	32
3.1 Caso de Estudo 1.....	33
3.1.1 Análise da Medição de Temperaturas .....	33
3.1.2 Análise da Medição do Fluxo de Calor .....	38
3.1.3 Análise da Humidade.....	43
3.2 Caso de Estudo 2.....	45
3.2.1 Regime com Controlo de Temperatura Interior (Condição 1) .....	45
3.2.2 Regime sem Controlo de Temperatura Interior (Condição 2).....	50

3.2.3	Inspeção Termográfica .....	56
4	DISCUSSÃO .....	57
5	CONCLUSÕES .....	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Condutibilidade térmica no gás em função da pressão e do diâmetro médio dos poros do material que constituem o núcleo. O reduzido tamanho dos poros de sílica fumada reduz a condutibilidade do gás mesmo à pressão atmosférica de 1000 mbar (fonte: Baetens et al. 2010).....	4
Figura 1.2 – Soluções de painéis a vácuo. a) Exemplo de soluções existentes no mercado para a indústria da construção; b) Comparação entre um painel de isolamento por vácuo e isolamento convencional com resistência térmica equivalente. ....	5
Figura 2.1 – Caso de estudo do edifício pertencente ao Jardim Zoológico de Varsóvia: a) Localização do edifício (fonte: google.maps.com); b) Imagem satélite do Google Earth. ....	12
Figura 2.2 – Caso de estudo em Coimbra: a) Desenho esquemático com informação sobre os quartos; b) Imagem satélite Google Earth com a localização do telhado.....	13
Figura 2.3 – Dados meteorológicos médios mensais para Varsóvia. ....	14
Figura 2.4 – Dados meteorológicos médios mensais para Coimbra. ....	15
Figura 2.5 – Caracterização do edifício estudo em Varsóvia e representação do telhado reabilitado. ....	16
Figura 2.6 – Desenho esquemático com a localização dos painéis VIP na cobertura.....	18
Figura 2.7 – Fotografia dos trabalhos de colocação da espuma poliuretano antes da aplicação dos painéis VIP. ....	18
Figura 2.8 – Secção transversal da solução VIP aplicada na reabilitação. ....	19
Figura 2.9 – Fotografia final da cobertura reabilitada no edifício localizado em Varsóvia.....	19
Figura 2.10 – Localização caso de estudo 2, em Coimbra, Portugal (fonte: GoogleEarth).....	20
Figura 2.11 – Representação esquemática da aplicação VIP na cobertura do caso de estudo em Coimbra.....	21
Figura 2.12 – Esquema da construção das placas que contêm os painéis VIP. ....	22
Figura 2.13 – Fotografia da aplicação do perfil metálico no telhado do caso de estudo em Coimbra.....	23
Figura 2.14 – Fotografia da colocação das placas contendo os painéis ao perfil.....	23
Figura 2.15 – Esquema da aplicação dos painéis VIP na solução de isolamento pelo interior em Coimbra.....	24
Figura 2.16 – Fotografia da reabilitação do caso de estudo nº2: [Esquerda] Quarto com a solução VIP, [Direita] Quarto de referência.....	25
Figura 2.17 – Quadro com a descrição dos equipamentos utilizados nas campanhas experimentais. ....	26
Figura 2.18 – Esquema da solução construtiva e da localização dos sensores utilizados na solução pelo exterior em Varsóvia. ....	28
Figura 2.19 – Esboço do posicionamento dos painéis e dos sensores no telhado de Varsóvia.....	28
Figura 2.20 – Esquema com a localização dos sensores no quarto com os VIP e no quarto de referência. ....	30
Figura 2.21 – Localização dos sensores consoante as superfícies, para ambos os quartos em estudo: a) quarto de referência, b) quarto com os painéis VIP.....	31
Figura 3.1 – Monitorização da temperatura para a <b>zona A</b> da cobertura durante uma semana na estação de <b>aquecimento</b> .....	33
Figura 3.2 – Monitorização da temperatura para a <b>zona B</b> da cobertura durante uma semana na estação de <b>aquecimento</b> .....	34
Figura 3.3 – Compilação das monitorizações das temperaturas nas <b>áreas A e B</b> do telhado durante uma semana da estação de <b>aquecimento</b> . ....	35

---

Figura 3.4 – Monitorização da temperatura para a <b>zona A</b> da cobertura durante uma semana na estação de <b>arrefecimento</b> .	37
Figura 3.5 – Monitorização da temperatura para a área B do telhado durante uma semana na estação de <b>arrefecimento</b> .	37
Figura 3.6 – Monitorização do fluxo de calor para a <b>zona A</b> da cobertura durante uma semana na estação de <b>aquecimento</b> .	39
Figura 3.7 – Monitorização do fluxo de calor para a <b>zona B</b> da cobertura durante uma semana na estação de <b>aquecimento</b> .	39
Figura 3.8 – Compilação das monitorizações dos fluxos de calor nas <b>zonas A e B</b> da cobertura durante uma semana da <b>estação de aquecimento</b> .	40
Figura 3.9 – Monitorização do fluxo de calor para a <b>zona A</b> da cobertura durante a estação de <b>arrefecimento</b> .	42
Figura 3.10 – Monitorização do fluxo de calor para a <b>zona B</b> da cobertura na estação de <b>arrefecimento</b> .	42
Figura 3.11 – Monitorização da humidade relativa da <b>zona A</b> da cobertura na estação de <b>aquecimento</b> .	43
Figura 3.12 – Monitorização da humidade relativa da <b>zona B</b> da cobertura durante uma semana no <b>verão</b> .	44
Figura 3.13 – Monitorização da temperatura da cobertura pelo <b>interior com solução VIP</b> durante uma semana com <b>condições controladas (condição 1)</b> .	46
Figura 3.14 – Monitorização da temperatura da cobertura pelo <b>interior com solução de MW</b> durante uma semana com <b>condições controladas (condição 1)</b> .	47
Figura 3.15 – Temperaturas na superfície mais interna da cobertura VIP nos dias 5 e 7 de março de 2020 (condição 1).	48
Figura 3.16 – Monitorização do fluxo de calor para condições de temperatura controlada (condição 1).	49
Figura 3.17 – Monitorização da temperatura da cobertura pelo <b>interior para solução VIP</b> durante a semana com <b>condições controladas (condição 2)</b> .	51
Figura 3.18 – Valores para o dia 12 de abril de 2020 no <b>quarto com a solução VIP</b> com a <b>condição 2</b> .	51
Figura 3.19 – Monitorização da temperatura da cobertura pelo <b>interior com solução de lâ mineral</b> durante uma semana sem <b>condições controladas (condição 2)</b> .	53
Figura 3.20 – Valores para o dia 14 e 15 de abril de 2020 no <b>quarto de referência</b> nas <b>condições 2</b> .	53
Figura 3.21 – Temperaturas na superfície mais interna da cobertura VIP nos dias 14 e 15 de abril de 2020.	54
Figura 3.22 – Monitorização do fluxo de calor durante a semana sem condições de controlo de temperatura.	55
Figura 3.23 – Termograma do quarto com isolamento VIP.	56
Figura 3.24 – Termograma do quarto de referência.	56

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Ao longo dos últimos anos, o setor dos edifícios tem sido alvo da implementação de políticas energéticas na maior parte dos países a nível mundial. Na União Europeia (UE), este é responsável por 40% do consumo total de energia e 36% das emissões de gases com efeito de estufa relacionados com a energia da UE (European Commission, 2020a). No contexto atual, e com a pandemia COVID-19, a importância da climatização e ventilação dos edifícios é novamente discutida em detalhe. Se a ventilação tem a vantagem de contribuir na redução do nível de carga poluente, já o impacto da circulação de ar, associado à climatização, pode constituir um problema de propagação de poluentes. Nesta discussão, o nível de isolamento da envolvente mantém a sua importância, talvez reforçada, devido à preocupação em se reduzir o uso de sistemas de climatização.

As normas de construção com regras específicas em matéria de isolamento térmico da envolvente dos edifícios começaram a surgir na Europa após a década de 1970, o que significa que uma grande parte do atual parque imobiliário da UE foi construída sem obedecer a quaisquer requisitos de desempenho energético: aproximadamente um terço (35 %) das habitações da UE tem mais de 50 anos, e mais de 40 % do imobiliário foi construído antes de 1960. De acordo com as atuais normas de construção<sup>1</sup>, quase 75 % desses edifícios são ineficientes do ponto de vista energético.

A legislação em vigor na UE revela uma preocupação acrescida com a eficiência energética. Esta resulta da implementação da Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios (EPBD) (Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (Recast), 2010) e da Diretiva Eficiência Energética (EE) (European Parliament & European Council, 2012), que mais recentemente foram revistas na Diretiva 2018/844 (European Parliament & European Council of the European Union, 2018). Estas Diretivas visam promover a melhoria do desempenho energético dos edifícios, incluindo

---

<sup>1</sup> JRC Report. (2019). Achieving the cost-effective energy transformation of Europe's buildings. <https://doi.org/10.2760/278207>

a necessidade de fixar os custos ótimos dos requisitos mínimos de energia, tendo em conta as condições climáticas locais.

A Comissão Europeia, no seu Plano para atingir a Meta Climática em 2030, estimou uma redução de, pelo menos, 55% das emissões dos gases com efeito de estufa (GEEs) na EU até 2030, em comparação com 1990 (European Commission, 2020b). De forma a isto ser possível, é necessário que a UE tenha uma redução de GEEs nos seus edifícios de 60% bem como o consumo de energia final em 14% e o consumo de energia para fins de aquecimento e arrefecimento em 18% ((UE) 2019/786, 2019).

Seja em contexto de trabalho, descanso ou lazer, a população em geral passa grande parte do tempo no interior dos edifícios. Seja por questões de conforto, segurança, saúde ou qualidade de vida, a renovação de edifícios é inevitável e constitui uma oportunidade única para repensar, redesenhar e modernizar os edifícios, nomeadamente a fim de se garantirem soluções energeticamente mais eficientes e sustentáveis.

A renovação dos edifícios da Europa, para além de reduzir as faturas da energia e as emissões de gases com efeito de estufa, vai também possibilitar a criação, até 2030, de mais 160 mil empregos verdes no sector da construção<sup>2</sup>, bem como gerar amplos benefícios sociais, ambientais e económicos. Posto isto, a Comissão Europeia propôs uma estratégia para desencadear uma vaga de renovação na Europa com o objetivo de, pelo menos, duplicar a taxa anual de renovação de edifícios residenciais e não residenciais até 2030 e promover renovações energéticas profundas. Ambiciona-se a renovação de 35 milhões de edifícios até 2030 (European Commission, 2020a) . Em especial, tem de haver um forte crescimento das renovações profundas que visam a envolvente dos edifícios, a digitalização inteligente e a integração das fontes de energia renováveis (European Commission, 2020b).

A implementação de medidas de melhoria dos edifícios tem de ter em consideração, não só o grau de deterioração, devido a envelhecimento natural e eventual falta de manutenção, mas também o potencial de redução dos consumos energéticos. Assim, as intervenções devem resolver problemas associados ao isolamento térmico insuficiente, à existência de pontes térmicas

---

<sup>2</sup> Employment and Social Developments in Europe. Annual Review 2019, Comissão Europeia.

na envolvente e à presença de humidade (afetando o desempenho energético, salubridade do ambiente interior e a durabilidade dos materiais) (DGEG, 2004).

Das soluções de eficiência energética a necessidade de aplicar na envolvente dos edifícios, o reforço da proteção térmica, ou seja, o aumento do isolamento térmico dos elementos da envolvente (paredes exteriores, pavimentos sobre espaços exteriores ou não-aquecidos, coberturas e vãos envidraçados), é incontornável na maior parte dos casos. Vários estudos concluíram que, a aplicação de isolamento térmico na cobertura é uma das soluções com maior viabilidade técnico-económica, enquanto que a intervenção nos envidraçados é a que apresenta menor viabilidade económica. (Rodrigues et al., 2014) (Tadeu et al., 2018)

A cobertura de um edifício é um dos elementos mais exposto às situações adversas do ambiente, nomeadamente radiação e maiores amplitudes térmicas, sendo que o seu desempenho condiciona bastante as condições ambientais dos compartimentos em contacto com esse elemento. Assim, a aplicação de isolamento térmico neste elemento é considerada uma intervenção de carácter prioritário, até por normalmente ser uma medida relativamente simples de implementar e das menos dispendiosas (Veiga, 2011).

Neste sentido, o investimento na pesquisa de novos materiais de isolamento térmico capazes de apresentarem valores de condutibilidade térmica muito baixos, considera-se ser de extrema importância. Recentemente têm surgido no mercado materiais super isolantes, de entre os quais se destacam soluções que usam aerogel ou soluções a vácuo. Esta última solução é o objeto de estudo no presente trabalho, no qual se pretende avaliar a sua aplicabilidade em soluções de cobertura e o respetivo desempenho térmico.

Na secção seguinte é feita uma breve apresentação das soluções de isolamento que recorrem à tecnologia a vácuo. São também abordados alguns aspetos relevantes como a ocorrência de pontes térmicas (criadas nos bordos dos painéis) o envelhecimento, assim como questões relativas à facilidade de aplicação das soluções.

## 1.2 Soluções de Isolamento a Vácuo

Um painel de isolamento a vácuo (VIP - *Vacuum Insulation Panel*) é composto por um núcleo, geralmente constituído por um material microporoso, que é embalado e revestido por um invólucro protetor. Após a aplicação do vácuo atingem-se valores de condutibilidade térmica muito reduzidos que poderão variar entre  $4 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , em perfeitas condições, e  $8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , após 25 anos de envelhecimento (Jelle, 2011).

O núcleo dos VIPs é de um material microporoso devendo satisfazer os requisitos mencionados de seguida (Baetens et al., 2010):

- Poros de diâmetro bastante reduzido. De forma a reduzir a condutibilidade do gás em materiais de isolamento com grande tamanho dos poros, a pressão no gás tem de ser muito baixa, com mostra na Figura 1.1;
- O material tem de ter uma estrutura celular 100% aberta para poder evacuar qualquer gás que fique retido;
- O material do núcleo deve ser resistente à compressão para assegurar bom comportamento mecânico e controlo dimensional;
- O material deve ser o mais impermeável possível à radiação infravermelha. Isto é necessário, para reduzir a transferência de calor por radiação no material.

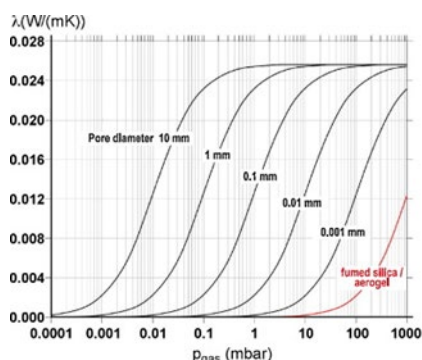


Figura 1.1 – Condutibilidade térmica no gás em função da pressão e do diâmetro médio dos poros do material que constituem o núcleo. O reduzido tamanho dos poros de sílica fumada reduz a condutibilidade do gás mesmo à pressão atmosférica de 1000 mbar (fonte: Baetens et al. 2010).

Os painéis de isolamento a vácuo, devido à sua baixa condutibilidade, apresentam elevadas resistências térmicas para espessuras baixas. A título de exemplo, uma parede necessitaria de uma camada de isolamento convencional, lã mineral (MW) ou poliestireno expandido (EPS), de 200 mm de espessura para apresentar um coeficiente de transmissão térmica de  $0.18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , enquanto que para obter o mesmo valor só seria necessário 40 mm de espessura (Figura 1.2 – b). A aplicação de camadas espessas de isolamento é muitas vezes indesejada e até, por vezes, tecnicamente inviável, particularmente em intervenções em edifícios existentes. Adicionalmente, a possibilidade de se aplicarem espessuras menores poderá traduzir-se num benefício no volume útil disponível nos ambientes interiores (Simões et al., 2021).

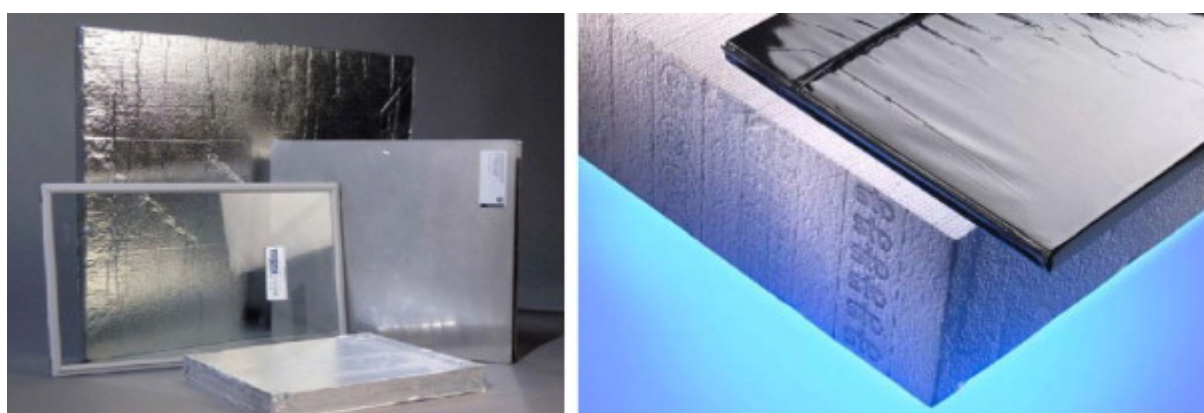


Figura 1.2 – Soluções de painéis a vácuo. a) Exemplo de soluções existentes no mercado para a indústria da construção; b) Comparação entre um painel de isolamento por vácuo e isolamento convencional com resistência térmica equivalente.

Conforme foi referido anteriormente, atendendo à situação atual da Europa e às exigências a nível energético, a reabilitação de edifícios constitui uma das áreas com maior potencial de crescimento no sector da construção. Os VIPs assumem-se como uma alternativa viável face aos materiais de isolamento tradicionais, embora se reconheça a necessidade de se avaliar a sua viabilidade técnica e económica.

De seguida serão abordados alguns pontos fulcrais relativamente às soluções de VIP, de forma a que estas possam ter um bom desempenho, bem como se apresentam algumas situações da sua aplicação.

### 1.2.1 Efeito das Pontes Térmicas nos VIPs

As pontes térmicas são pontos localizados na envolvente do edifício onde há maior perda de calor em relação às restantes áreas dos elementos envolventes. De acordo com a (EN ISO 10211-1, 2007), uma ponte térmica é uma descontinuidade no que diz respeito às propriedades térmico-físicas da envolvente do edifício, ou seja, variações da espessura, do material ou da forma dos materiais, e que se traduz na concentração de fluxos de calor. Este efeito aumenta o consumo de energia para aquecimento e pode causar danos na envolvente do edifício, reduzindo a sua durabilidade (DGEG, 2004). De acordo com a literatura, as pontes térmicas podem causar até 30% das perdas térmicas no inverno aumentando significativamente o consumo de energia (Theodosiou & Papadopoulos, 2008).

Quanto maior a capacidade isolante do material, maior será a importância do fluxo de calor devido às pontes térmicas. Em particular, nos painéis a vácuo, como existe um invólucro usado para manter o vácuo no interior, este cria uma ligação entre o lado frio com o lado quente do painel, originando o efeito de ponte térmica nos bordos. Para além disso, entre painéis adjacentes podem formar-se espaços de ar que contribuem para o aumento das perdas térmicas (Binz et al., 2005).

Diversos estudos foram já conduzidos com vista à avaliação da influência das pontes térmicas em aplicações VIP, demonstrando um grande impacto na zona de junção entre painéis e constatando assim que o comportamento térmico dependerá das propriedades físicas e geométricas (Lorenzati et al., 2014). Investigadores verificaram que o valor do coeficiente de transferência de calor por transmissão pode aumentar até 50% quando são considerados os efeitos das pontes térmicas. Este aumento vai, conseqüentemente, afetar as necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do ar interior (Isaia et al., 2015).

O desempenho térmico de soluções com painéis VIP pode ser melhorado através da adoção de materiais adequados para criar as articulações e fixações dos painéis, bem como a utilização de painéis quadrados de grandes dimensões, pois a condutibilidade térmica tem uma forte dependência linear do fator perímetro/área do painel (Nussbaumer et al., 2006).



## 1.2.2 Vida Útil e Envelhecimento dos VIPs

No sector da construção, o tempo de vida útil dos materiais é um fator decisivo para a sua seleção, e que não pode ser negligenciado, já que um edifício é tipicamente utilizado por uma larga dezena de anos. Os valores da condutibilidade térmica dos materiais de isolamento devem ser dados consoante o desempenho médio ao longo de 25 anos (Johansson, 2014).

Com base nos estudos realizados no âmbito do projeto “AIE/ECBC Anexo 39”, é de esperar que a vida útil dos VIPs seja entre os 30 e os 50 anos (Binz et al., 2005). De forma a existir uma manutenção do desempenho térmico dos painéis durante o seu tipo de vida útil é crucial que as condições de baixa pressão e baixa húmida no núcleo do painel sejam mantidas (Bouquerel et al., 2012).

Em 2011, um estudo (Jelle, 2011) revelou que no centro de um painel de vácuo novo os valores típicos de condutibilidade andam por volta dos 4 mW/(m·K), sendo que ao fim de 25 anos, se o núcleo for de sílica fumada, e dependendo das condições de humidade e pressão na construção, pode atingir 7-8 mW/(m·K) . Se por acaso um painel for perfurado, há vários estudos que indicam um aumento da condutibilidade térmica para valores na ordem dos 22 mW/(m·K), o que mesmo assim, é inferior à condutibilidade térmica dos materiais de isolamento convencionais, como por exemplo, a lã mineral, que apresenta valores típicos de 35 mW/(m·K) (Gonçalves et al., 2020).

Os VIPs, desde que garantam qualidade elevada de fabrico e sejam sujeitos a uma instalação adequada, podem ter uma vida útil de várias décadas.

### 1.2.3 Aplicabilidade dos Painéis VIP

A principal vantagem dos VIPs é apresentarem uma condutibilidade térmica extremamente baixa, pelo que é possível, com recurso a painéis finos, garantir o mesmo nível de resistência térmica que materiais de isolamento tradicionais com elevada espessura. A implementação destas soluções pode contribuir para que se atingia os objetivos nZEB<sup>3</sup> e aumentar o valor das habitações, visto que melhora a eficiência energética das mesmas. Adicionalmente a aplicação dos painéis na envolvente dos edifícios permitir um ganho do espaço útil (Simões et al., 2021).

Devido à fragilidade dos painéis, estes são suscetíveis de sofrer danos durante o seu transporte, manuseamento e aplicação. Sendo que em painéis perfurados, existe a perda do vácuo e a condutibilidade térmica pode aumentar para cerca de 20 mW/(m.K) para VIP com núcleo de sílica fumada (De Meersman et al., 2015). Consequentemente, o uso de painéis VIP é mais complexo do que um isolamento convencional devido à sua fragilidade, isto é, não podem ser adaptados no local de obra e não devem ser cobertos em ambos os lados por materiais com alta condutibilidade ou colocados atrás de espaços de ar ventilados (Applications, 2010). É importante, que na instalação destes, esteja presente um especialista e é necessário que existam desenhos de pormenor com a configuração da localização dos painéis.

Os VIPs podem ser aplicados em diferentes soluções construtivas, tanto em construção nova como em reabilitação. Situações em que são requeridas elevadas resistências térmicas ou em que existem limitações de espessura, suscita o interesse na seleção dos VIPs (Johansson, 2012). Exemplos dessas aplicações são as seguintes, quer em situação de construção nova ou reabilitação:

- Isolamento do pavimento;
- Isolamento de portas;
- Isolamento de fachadas de novos edifícios;
- Isolamento pelo exterior ou interior de fachadas;
- Isolamento de coberturas em desvão ou planas e terraços.

---

<sup>3</sup> Nearly Zero-Energy Building Strategy 2020 (ZEBRA2020) | European Commission

### **1.3 Motivação**

É necessário e fundamental apostar na reabilitação de edifícios, destacando-se o interesse na melhoria do comportamento térmico das envolventes através da aplicação de isolamento. Neste sentido, para além do interesse do mercado nos isolamentos mais convencionais, há uma procura de alternativas de isolamento, que tem conduzido ao aparecimento dos super-isolamentos, como é o caso dos VIPs.

As coberturas são elementos muito expostos às adversidades do ambiente, sendo dos elementos construtivos onde ocorrem as maiores taxas de transferência de calor. Posto isto, é natural que estes elementos sejam aqueles em que ocorrem mais intervenções e reabilitações.

Para que os painéis de isolamento a vácuo sejam considerados uma alternativa viável, é necessária a realização de estudos experimentais que permitam desenvolver soluções, demonstrar a sua aplicabilidade em situações de reabilitação das coberturas, bem como avaliar o seu comportamento *in-situ* no contexto de edifício reais.

## **1.4 Objetivos**

Como mencionado anteriormente, os VIPs têm vindo a ser usados como uma solução construtiva das envolventes de edifícios com o objetivo de melhorar o desempenho térmico dos mesmos. São soluções que podem contribuir na verificação de requisitos térmicos cada vez mais exigentes.

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar o comportamento real de soluções VIP em coberturas. Para se atingir este objetivo foram monitorizadas, ao longo de um determinado período de tempo, duas aplicações diferentes localizadas em climas distintos.

Uma das soluções consiste na aplicação de isolamento pelo interior numa cobertura inclinada, enquanto a outra corresponde a uma aplicação pelo exterior, numa cobertura plana. As soluções foram aplicadas na reabilitação térmica de coberturas em dois climas totalmente distintos: no caso de estudo 1, em Varsóvia (Polónia), e no caso de estudo 2, em Coimbra (Portugal).

A utilização de dois casos de estudos em diferentes climas também vai permitir realizar uma avaliação do desempenho de diferentes soluções VIP em diferentes zonas climáticas.

O caso de estudo situado em Varsóvia, a solução de reabilitação da cobertura ocorre pelo exterior e permitiu avaliar a influência da dimensão dos painéis de vácuo no comportamento real de um edifício.

No segundo caso de estudo, situado em Coimbra, a reabilitação foi feita pelo interior e permite fazer uma comparação do desempenho entre uma solução com matérias de referência e uma solução integrando os VIPs.

## **1.5 Estrutura da Dissertação**

Em primeiro lugar, foi apresentado o enquadramento do assunto alvo de estudo que motivou à realização do presente trabalho. Foi dado destaque ao estudo dos VIPs, como soluções alternativas aos materiais convencionais na reabilitação de coberturas, com objetivo de comprovar que a sua aplicação promove o aumento da eficiência energética dos edifícios.

No segundo capítulo apresentam-se os casos de estudo, onde são caracterizadas as zonas climáticas, bem como descreve-se a aplicação e instrumentação das soluções da cobertura.

Seguidamente, no terceiro capítulo, apresentam-se os resultados obtidos nas campanhas de medição para ambos os casos, sendo feita uma análise dos mesmos. A análise das medições passa pelo estudo das temperaturas superficiais e do estudo dos fluxos de calor de ambas as soluções. No caso de estudo de Varsóvia (Caso 1), foi realizada uma análise à humidade. Já no caso de estudo de Coimbra (Caso 2) foi feita uma inspeção termográfica.

No quarto capítulo, é apresentada uma discussão aos resultados obtidos e procede-se a uma síntese dos aspetos mais importantes relativos aos comportamentos das soluções.

Para finalizar, o último capítulo corresponde às conclusões obtidas da realização do trabalho, bem como são apresentadas propostas de investigações futuras.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo tem como propósito a caracterização e descrição pormenorizada dos casos práticos, dando a conhecer de que forma foram aplicadas as soluções, os materiais e os métodos. Foi realizada uma descrição detalhada dos climas, bem como da aplicação das soluções e da sua instrumentação.

### 2.1 Casos de Estudo

#### Caso de Estudo 1:

Neste caso de estudo, os painéis foram aplicados pelo exterior de uma cobertura plana de um conjunto de escritórios de um edifício pertencente ao Jardim Zoológico de Varsóvia, localizado próximo do centro da cidade (Figura 2.1). Importa mencionar que neste caso de estudo se pretende estudar a influência da dimensão dos painéis de vácuo no comportamento térmico.

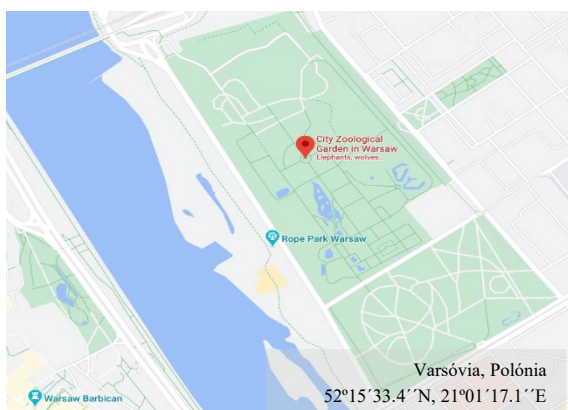


Figura 2.1 – Caso de estudo do edifício pertencente ao Jardim Zoológico de Varsóvia: a) Localização do edifício (fonte: google.maps.com); b) Imagem satélite do Google Earth.

### Caso de Estudo 2:

O estudo incidiu em dois compartimentos localizados na cidade de Coimbra (Portugal), sendo de referir que estes foram alvo de uma reabilitação pelo interior. Num dos quartos aplicou-se um isolamento corrente de lã mineral (MW), funcionando com quarto de referência, enquanto que no quarto adjacente se aplicou a solução em VIP (Figura 2.2).

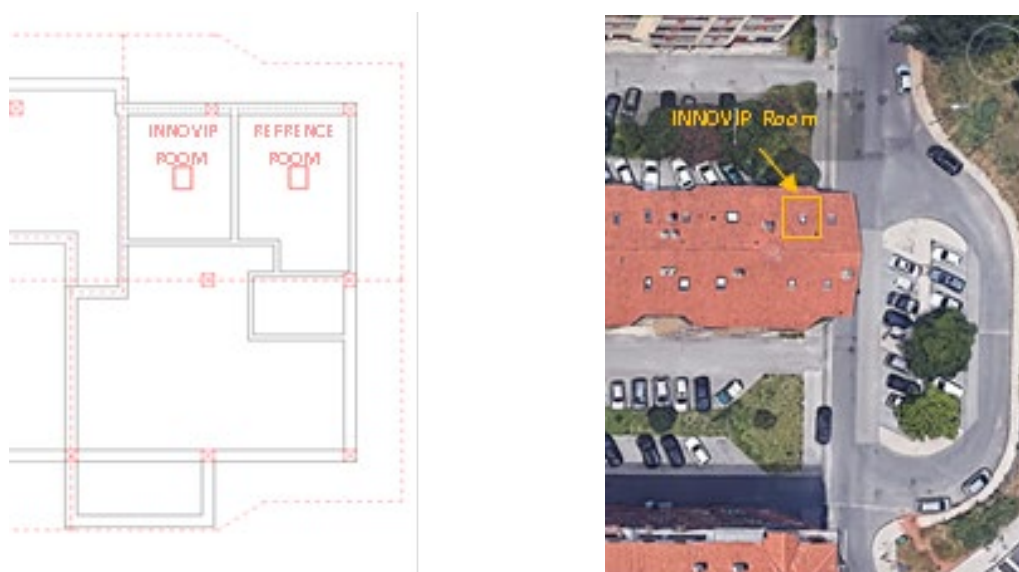


Figura 2.2 – Caso de estudo em Coimbra: a) Desenho esquemático com informação sobre os quartos; b) Imagem satélite Google Earth com a localização do telhado.

## 2.2 Caracterização dos Climas

Como referido anteriormente, os dois casos realizaram-se em zonas climatológicas completamente distintas, com o objetivo de avaliar o comportamento das soluções em contextos completamente diferentes. Apresentam-se de seguida alguns dados acerca do clima de Varsóvia, Polónia (caso de estudo nº 1) e de Coimbra, Portugal (caso de estudo nº 2).

### 2.2.1 Zona Climática de Varsóvia - Polónia

A respeito da descrição do clima em Varsóvia, este é caracterizado por Köppen-Geiger<sup>4</sup> como Dfb, ou seja, clima continental húmido de verão fresco. Os gráficos na Figura 2.3 mostram a variação anual das temperaturas médias mensais e da precipitação média mensal, com base em dados recolhidos no período entre 1961 e 2000 (WNO, 2019).

Verifica-se ainda, que durante todo o ano em Varsóvia, existe ocorrência de chuva, mesmo durante os meses mais secos. A temperatura média anual é de 7,7 °C, e a precipitação média anual é de 501 mm. O número médio anual de horas de sol, em Varsóvia, é de 1589 horas (Climatedata, 2019).

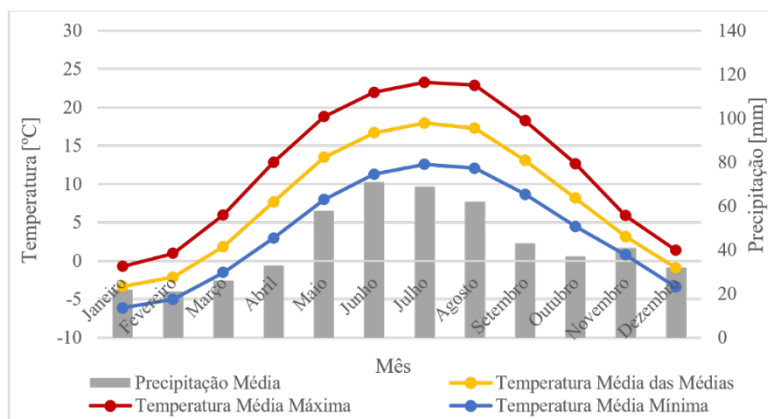


Figura 2.3 – Dados meteorológicos médios mensais para Varsóvia.

<sup>4</sup> Sistema de classificação climática global. Originário em 1900 pelo climatologista russo Wladimir Köppen, tendo sido publicadas novas versões em colaboração com o alemão Rudolf Geiger (daí o nome Köppen-Geiger).



## 2.2.2 Zona Climática de Coimbra - Portugal

O clima em Coimbra é caracterizado, segundo Köppen-Geiger, como Csb, ou seja, um clima temperado mediterrânico com inverno chuvoso e verão seco e pouco quente (IPMA, 2019a). Os gráficos na Figura 2.4 mostram a variação anual das temperaturas médias mensais, bem como a precipitação média com base na série temporal entre 1971 e 2000 (IPMA, 2019b). Pela observação destes, é possível verificar que existe significativamente mais chuva no inverno do que no verão. A temperatura média é de 15,5 °C e a precipitação média atinge os 905,1 mm. Coimbra tem, em média, 2463 horas de sol anualmente (Climatedata, 2019).

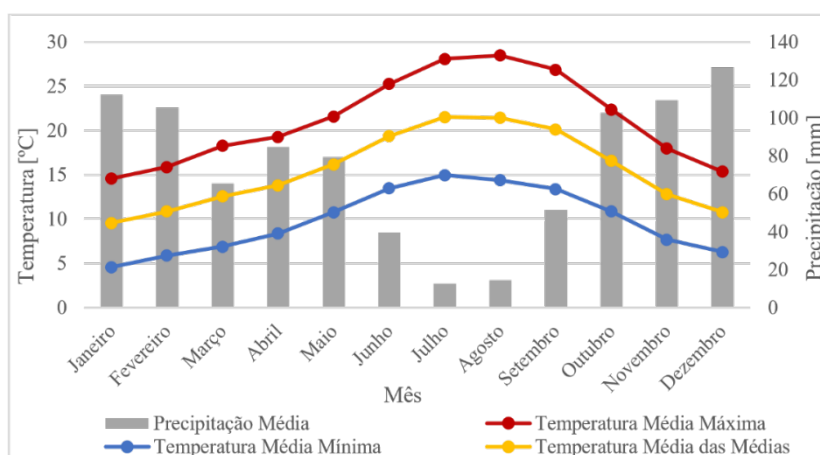


Figura 2.4 – Dados meteorológicos médios mensais para Coimbra.

## 2.3 Aplicação das Soluções

### 2.3.1 Caso de Estudo em Varsóvia

O edifício em estudo na Polónia trata-se de um conjunto de escritórios, destinado à exposição e reprodução de répteis e anfíbios. Devido aos requisitos de reprodução animal, o edifício deve ser mantido a uma temperatura elevada (mínima de 26 °C). De forma a que seja possível atingir essa temperatura, e se as soluções construtivas não forem eficientes a nível energético, é de esperar que exista um custo elevado associado ao consumo de energia. É um caso em que claramente se pretende ter uma melhoria da envolvente térmica.

Originalmente, parte do edifício era usada como um armazém, pelo que não apresentava qualquer tipo de requisitos energéticos. Em 1996, o edifício foi completamente modernizado e ampliado, sendo que, nessa altura, já existiam requisitos relativos ao isolamento térmico, embora muito inferiores aos verificados atualmente. Posto isto, decidiu-se isolar a cobertura da parte dos escritórios do edifício (Figura 2.5).

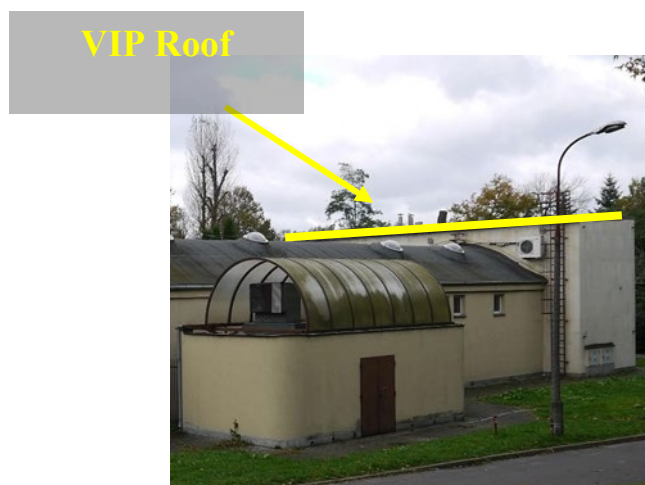


Figura 2.5 – Caracterização do edifício estudo em Varsóvia e representação do telhado rehabilitado.

A montagem dos painéis VIP na superfície do telhado plano, deu-se em toda a sua extensão e de acordo com o desenho técnico apresentado na Figura 2.6. Neste desenho é possível verificar a utilização de painéis com dimensões diferentes, 440x440 mm<sup>2</sup> e 640x640 mm<sup>2</sup>. A fixação dos painéis à superfície da cobertura, foi conseguida através da utilização de espuma de poliuretano (PU), sendo que esta é aplicada diretamente na superfície (Figura 2.7). Na Figura 2.8 exibe-se uma secção transversal do telhado antes e depois da instalação do painel, e na Figura 2.9 está representada a imagem com a intervenção final do caso em estudo.

O telhado apresenta uma área de 102.73 m<sup>2</sup>, pelo que com esta disposição consegue-se uma área coberta pelos painéis de 95.81 m<sup>2</sup>, representando uma percentagem de 93.3% de telhado coberto.

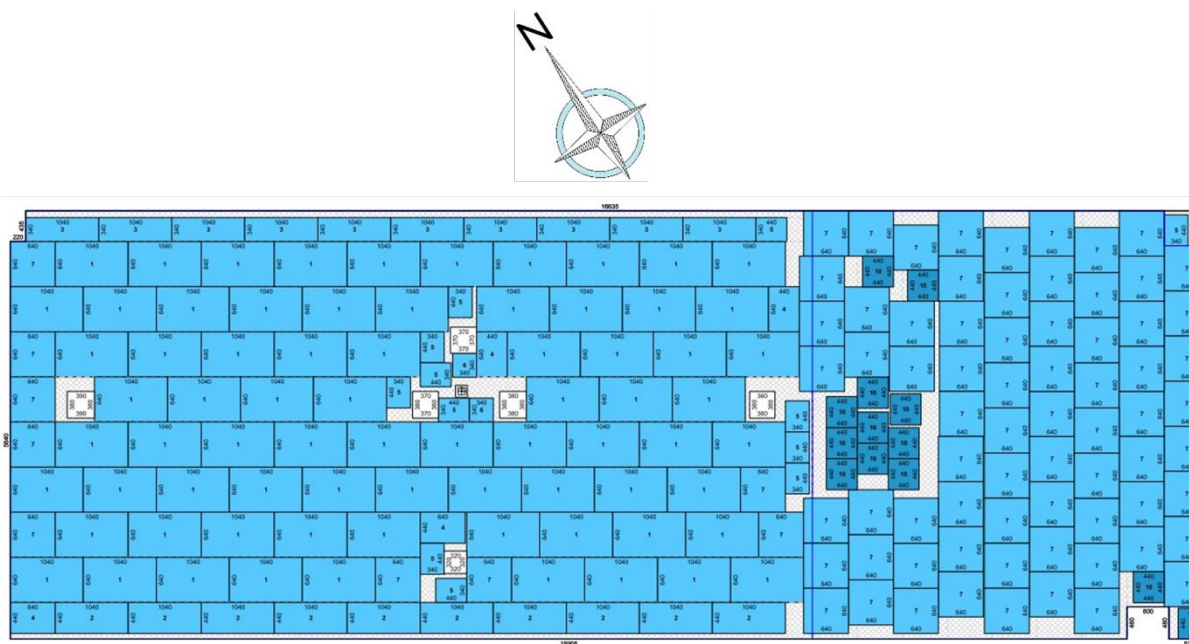


Figura 2.6 – Desenho esquemático com a localização dos painéis VIP na cobertura.



Figura 2.7 – Fotografia dos trabalhos de colocação da espuma poliuretano antes da aplicação dos painéis VIP.

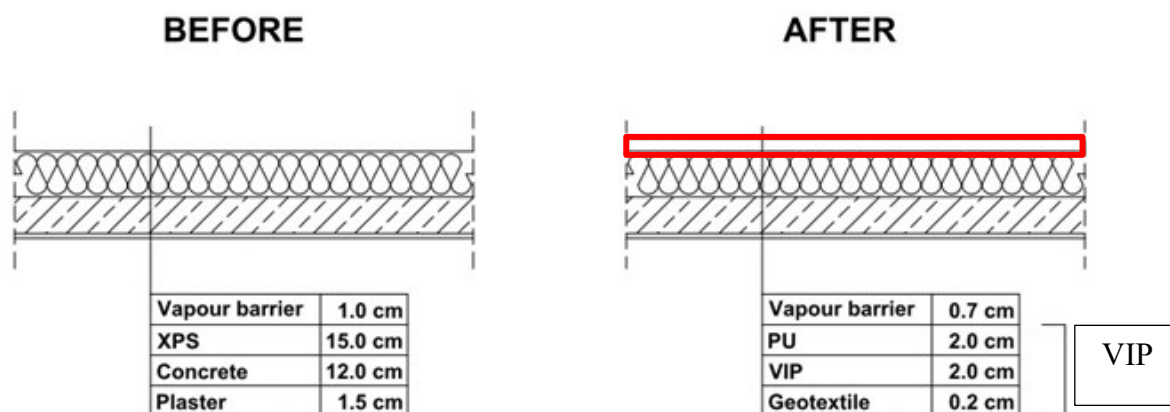


Figura 2.8 – Secção transversal da solução VIP aplicada na reabilitação.



Figura 2.9 – Fotografia final da cobertura reabilitada no edifício localizado em Varsóvia.

### 2.3.2 Caso de Estudo em Coimbra

O segundo caso de estudo, como referido anteriormente, foi implementado numa cobertura inclinada de um edifício residencial localizado em Coimbra. Esta unidade é um apartamento que foi construído no início da década de 1980, muito antes de existirem quaisquer requisitos de comportamento térmico na legislação portuguesa. Justifica-se deste modo, a inexistência de isolamento térmico. O espaço em estudo está localizado no nível superior de um edifício de apartamentos (Figura 2.10).



Figura 2.10 – Localização caso de estudo 2, em Coimbra, Portugal (fonte: GoogleEarth).

A habitação em estudo é composta por dois andares, em que o segundo andar, é o nosso objeto de análise. Este espaço é de um sótão habitável com um telhado inclinado onde existem dois compartimentos adjacentes. Como mencionado anteriormente, num dos quartos utilizou-se uma solução pelo interior dos painéis VIP; e no outro uma solução pelo interior de um isolamento convencional com 60 mm de espessura, neste caso lã mineral (MW). Este último é considerado o compartimento de referência.

A estrutura da cobertura é composta por telhas na parte exterior seguida de uma laje, com zonas em betão e outras em laje aligeirada de vigotas com blocos cerâmicos, ambas com 30 cm de espessura, e a superfície interior é coberta com um reboco de argamassa. Na Figura 2.11 é possível observar a solução de reabilitação prevista com os painéis VIP.

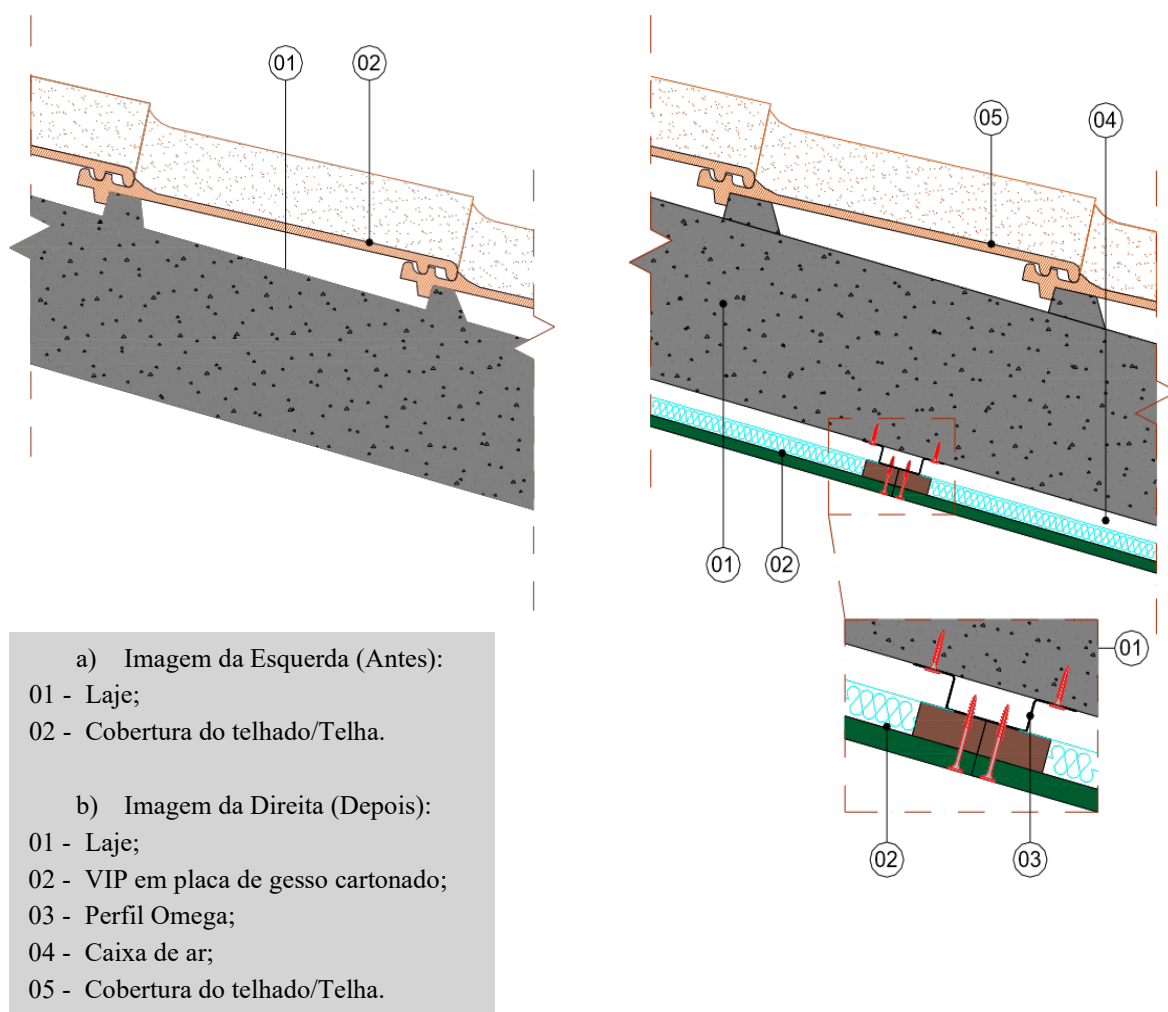


Figura 2.11 – Representação esquemática da aplicação VIP na cobertura do caso de estudo em Coimbra

Para aplicação dos painéis, e depois de efetuadas as medições das dimensões do quarto, foi possível planear o arranjo das placas da solução de VIP para o sótão. Sendo que, para este efeito, foram concebidas 3 placas diferentes (Figura 2.12): **1)** com dois painéis de vácuo,  $600 \times 600 \text{ mm}^2$ , colados entre si por 40 mm de espuma PU e ao gesso cartado com espessura de 13 mm; **2)** com três painéis de vácuo,  $600 \times 600 \text{ mm}^2$  colados entre si por 40 mm de espuma PU e ao gesso cartado com espessura de 13 mm; **3)** com quatro painéis de vácuo com  $400 \times 400 \text{ mm}^2$  colados entre si por 40 mm de espuma PU e ao gesso cartado com espessura de 13 mm.

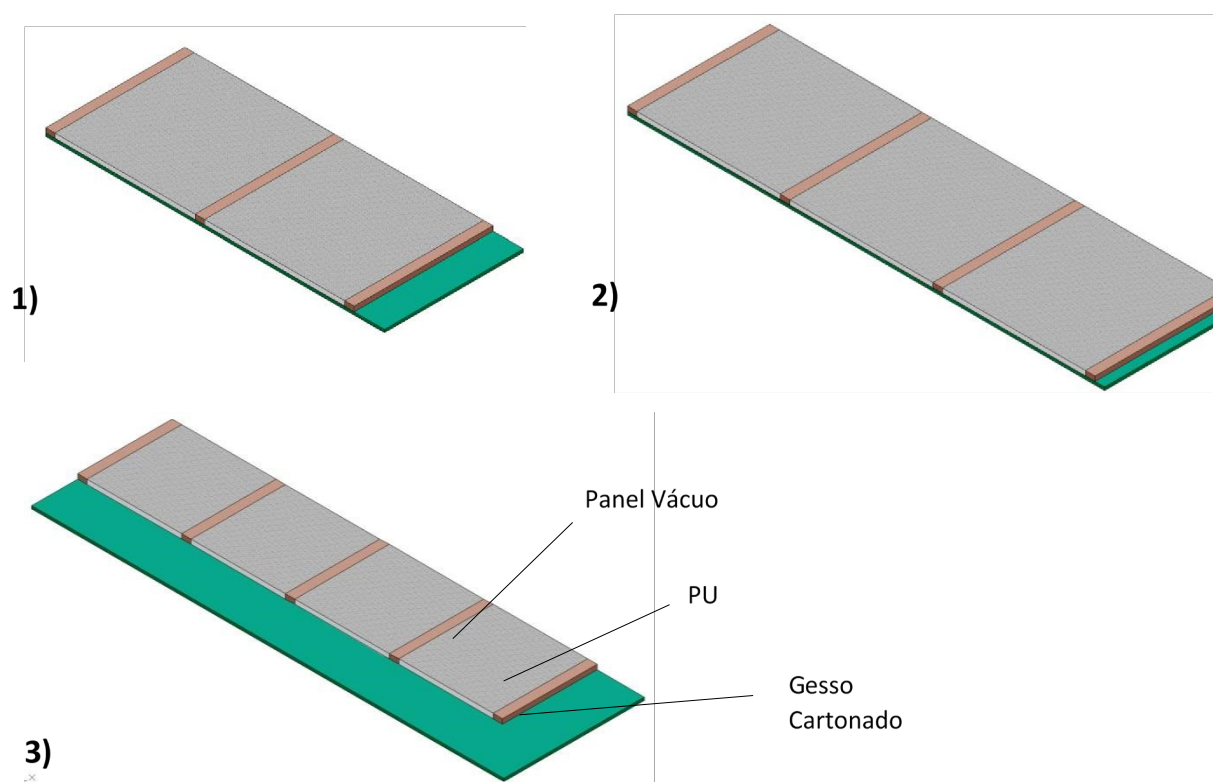


Figura 2.12 – Esquema da construção das placas que contêm os painéis VIP.



De forma análoga ao realizado para o caso de estudo 1, foi produzido um layout das placas de forma a maximizar a utilização dos VIPs na cobertura. De acordo com essa configuração (Figura 2.15), o isolamento por vácuo cobre 78% do telhado, sendo que os restantes 22% são correspondentes à espuma de PU e a espaços vazios que foram preenchidos com MW. Na aplicação das placas, foi necessário fixar perfis metálicos na cobertura (Figura 2.13). Com alguns ajustes nas placas de gesso, foi possível finalizar a instalação dos VIPs (Figura 2.14).

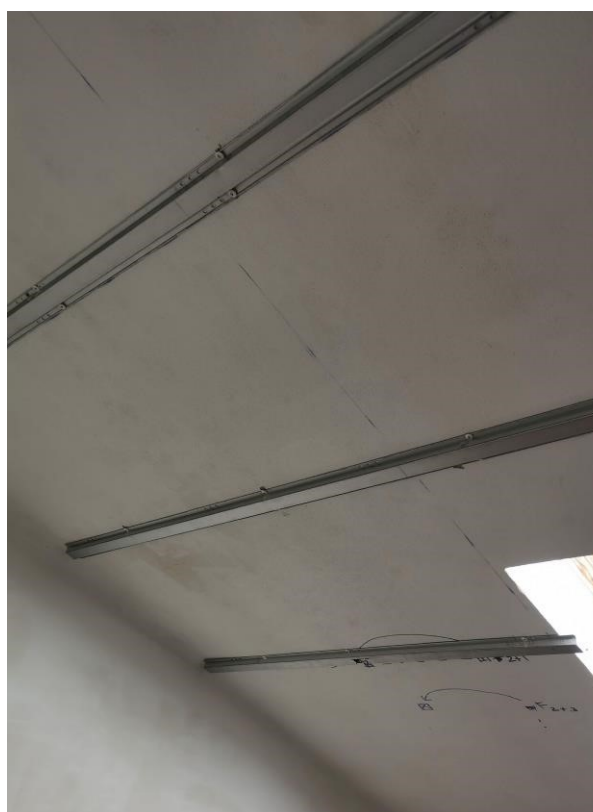


Figura 2.13 – Fotografia da aplicação do perfil metálico no telhado do caso de estudo em Coimbra.



Figura 2.14 – Fotografia da colocação das placas contendo os painéis ao perfil.

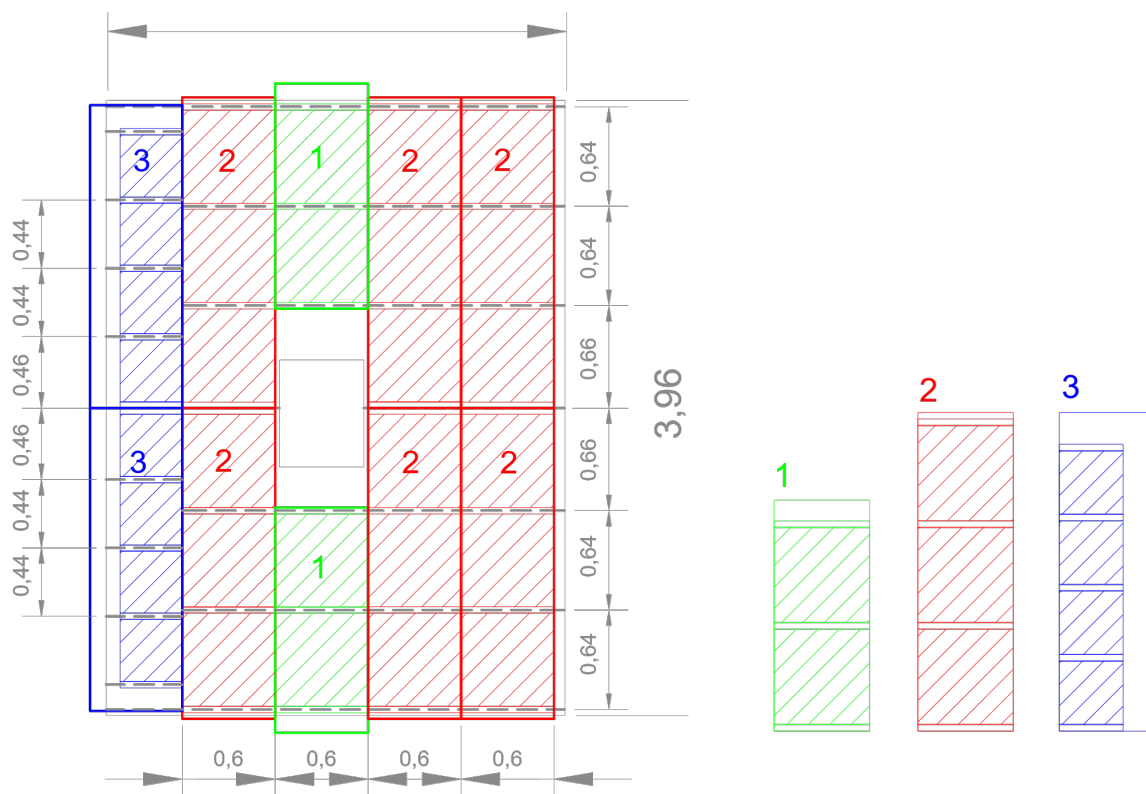


Figura 2.15 – Esquema da aplicação dos painéis VIP na solução de isolamento pelo interior em Coimbra.

Em seguida é apresentada a Figura 2.16, onde é possível observar o aspeto final da cobertura com a aplicação da solução construtiva VIP pelo interior. Por sua vez, o compartimento adjacente, e como mencionado anteriormente, também foi alvo de uma reabilitação, sendo que para tal, foi utilizado um isolamento convencional, ou seja, uma camada de 60 mm de Lã Mineral (MW).



Figura 2.16 – Fotografia da reabilitação do caso de estudo nº2: [Esquerda] Quarto com a solução VIP, [Direita] Quarto de referência.

## 2.4 Instrumentação das Soluções

Para efeitos de monitorização do comportamento térmico da solução aplicada na cobertura pelo interior, em Varsóvia, foram aplicados sensores de temperatura, humidade e fluxo de calor que registaram os valores durante um período de inverno e um período de verão.

No caso de demonstração em Coimbra, onde a solução da cobertura se localizava pelo interior, os sensores utilizados registaram a temperatura e o fluxo de calor em dois regimes diferentes. Inicialmente foi feita a monitorização com controlo da temperatura interior, e depois fez-se sem controlo de temperatura interior. Conforme referido, simultaneamente foi medido o comportamento de uma sala adjacente com aplicação de lã de rocha pelo interior.

Os equipamentos usados constam no Figura 2.17. Referir ainda que, o registo das leituras provenientes dos equipamentos de medição foi feito em intervalos de 5 minutos.

Equipamento	Descrição
Termopares do tipo T	Sensor termoelétrico usado para a medição de temperaturas. (Representados pela letra T, nas figuras seguintes.)
Termofluxímetros	Sensor que serve para medir a densidade de fluxo de calor que atravessa um elemento construtivo. (Representados pela letra V, nas figuras seguintes.)
Sondas de temperatura e humidade	Medição da temperatura e humidade relativa do ar. (Representados pela letra TH, nas figuras seguintes.)
<i>Data logger</i>	Aparelho para registar os dados provenientes dos equipamentos de medição.

Figura 2.17 – Quadro com a descrição dos equipamentos utilizados nas campanhas experimentais.

### 2.4.1 Caso de Estudo de Varsóvia

Os sensores foram instalados para efeitos de monitorização antes da aplicação dos painéis. Isto permitiu delinear a instalação dos sensores de modo a que os fios ficassem escondidos e assim os painéis fossem aplicados numa superfície uniforme.

Os resultados foram sendo obtidos ao longo de todas as superfícies, sendo que os sensores foram colocados: na superfície interna da cobertura; abaixo do isolamento (entre o telhado existente e a camada de isolamento com os painéis VIP); e acima do isolamento. Adicionalmente, e de forma a medir a temperatura e humidade do ar interior foi colocado um sensor no interior do edifício (Figura 2.18).

Na Figura 2.19 é possível verificar que os sensores foram posicionados perto da área do centro do painel (CoP), bem como perto das juntas entre os painéis de forma a monitorizar o efeito das pontes térmicas. Como foi referido anteriormente, existe a divisão do telhado em conformidade com as dimensões dos painéis, pelo que os sensores também foram distinguidos. Os sensores colocados nos painéis com dimensão 440x440 mm<sup>2</sup> são representados pela letra A, enquanto que nos painéis com dimensão 640x640 mm<sup>2</sup> os sensores são representados pela letra B.

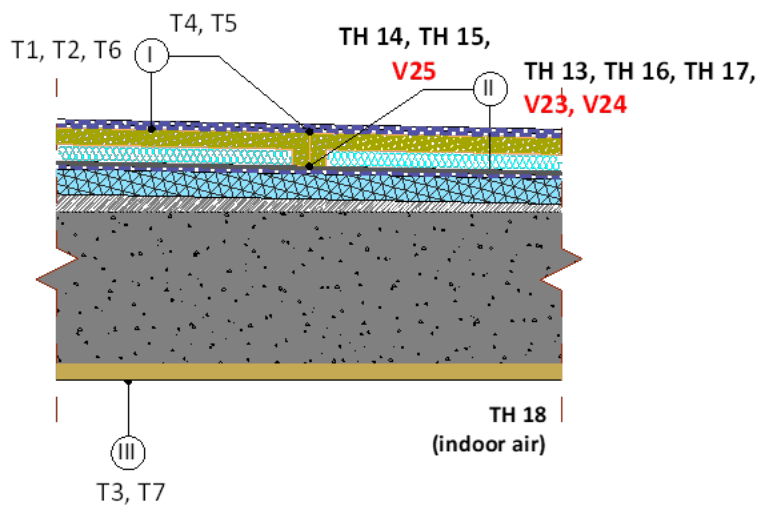


Figura 2.18 – Esquema da solução construtiva e da localização dos sensores utilizados na solução pelo exterior em Varsóvia.

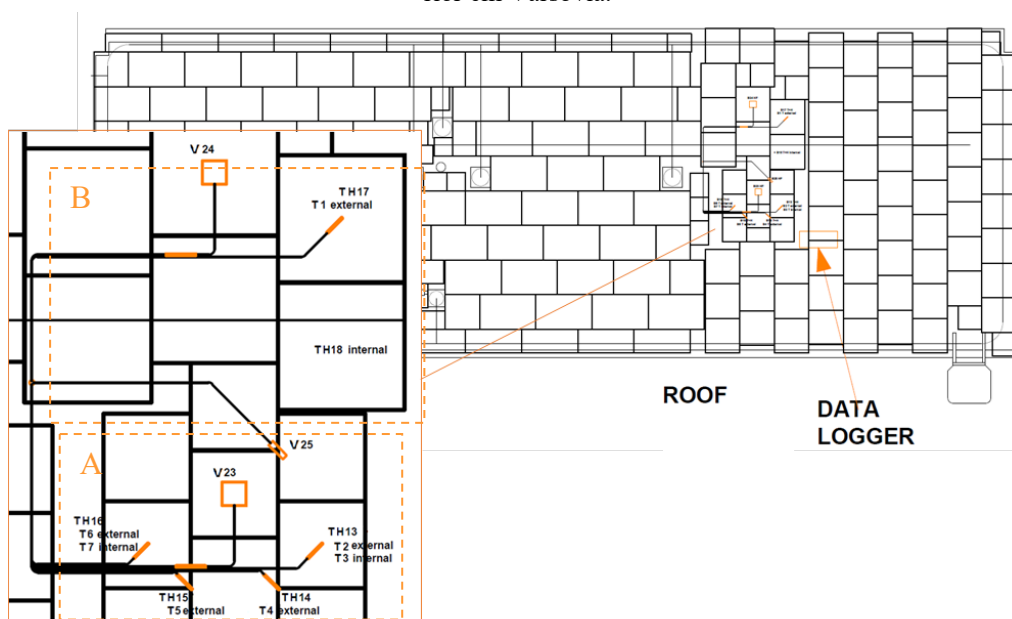


Figura 2.19 – Esboço do posicionamento dos painéis e dos sensores no telhado de Varsóvia.

## 2.4.2 Caso de Estudo de Coimbra

Como referido em pontos anteriores, tanto no quarto que apresenta a solução construtiva com os painéis VIP, como no quarto de referência, houve a aplicação de sensores que registaram a temperatura e o fluxo de calor. Alguns destes sensores foram alinhados nos centros dos painéis (CoP) e outros foram colocados na junção entre painéis (Figura 2.20).

Os sensores foram postos ao longo de várias superfícies da cobertura, ou seja, sobre as telhas do telhado; sobre a laje; sob a laje; sobre o isolamento e sob a superfície de gesso cartonado (Figura 2.21).

Durante o período de monitorização, inicialmente foi utilizado um sistema de aquecimento para impor condições de temperatura internas constantes (temperatura definida de 20 °C). Por fim, este sistema de aquecimento foi desligado, passando a um regime em que não se implicava nenhuma condicionante na temperatura interior.

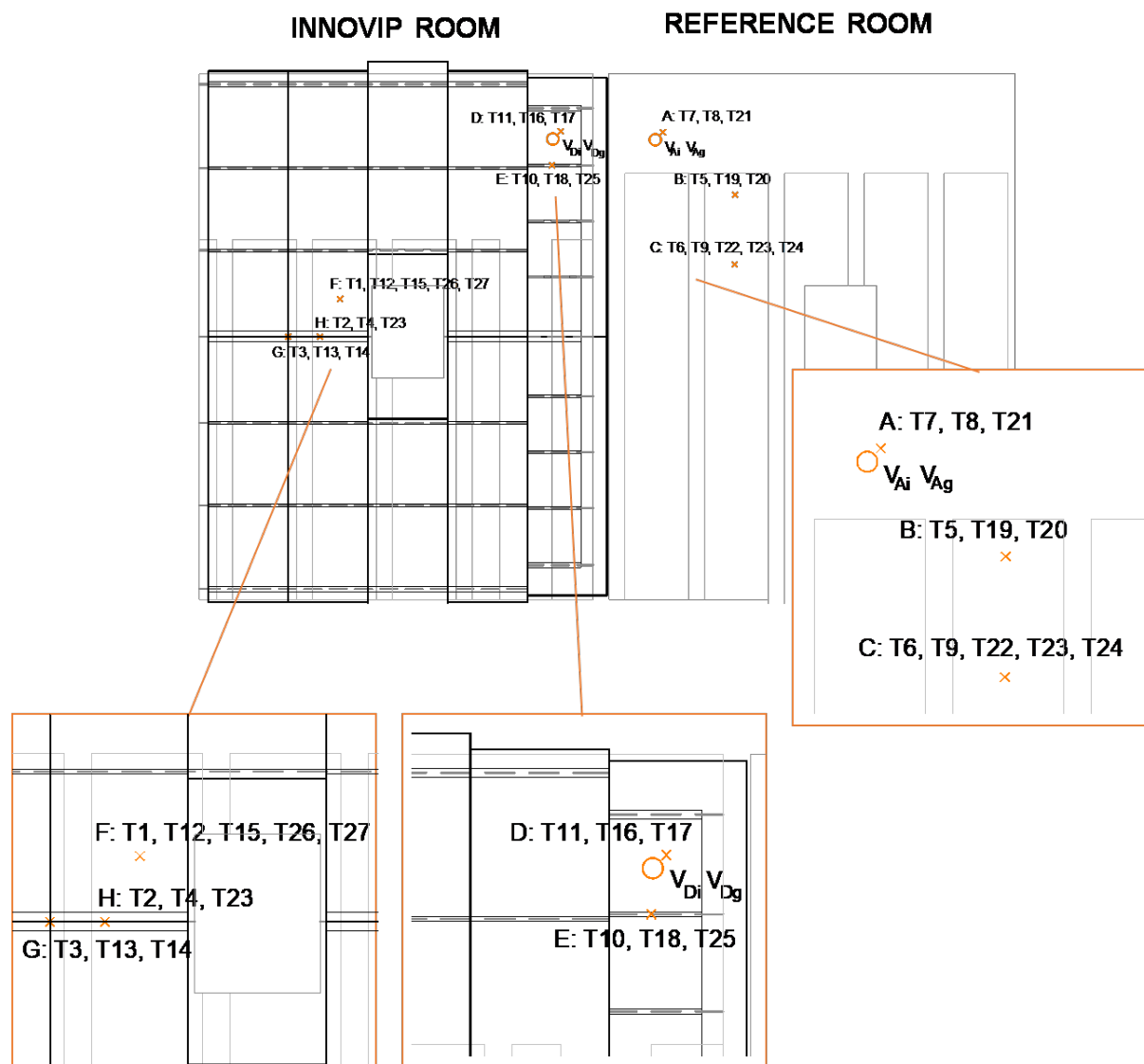


Figura 2.20 – Esquema com a localização dos sensores no quarto com os VIP e no quarto de referência.



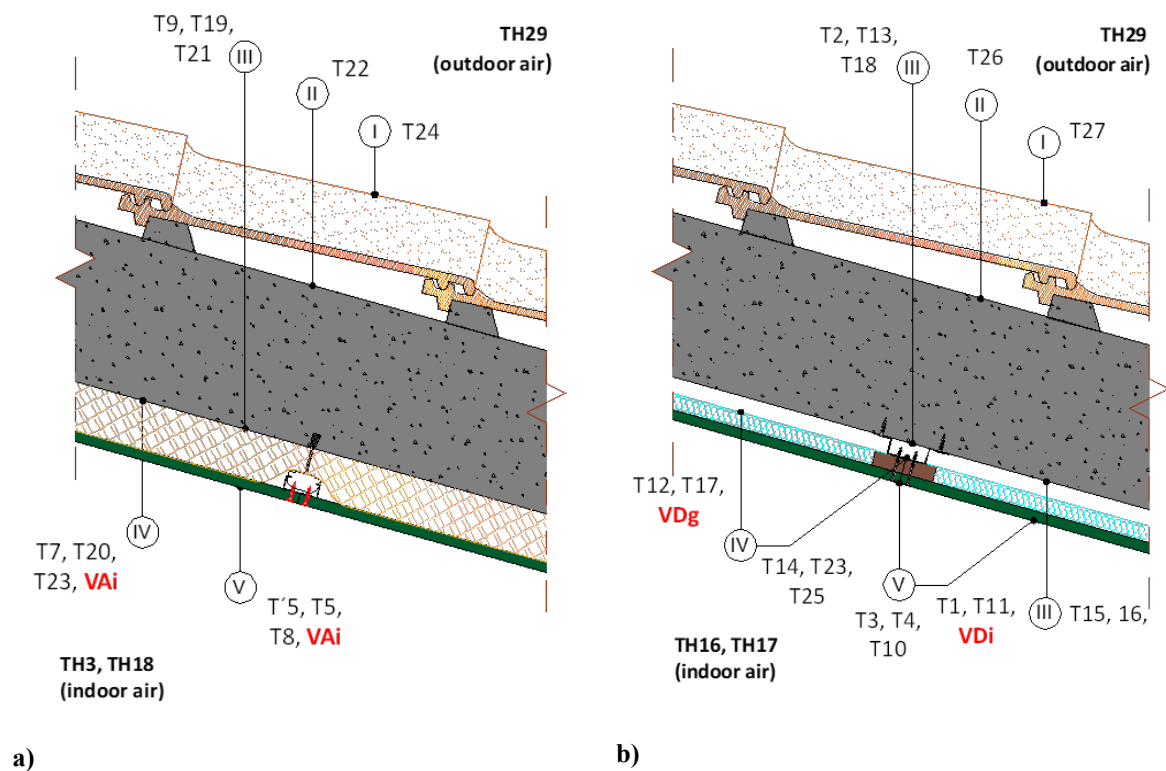


Figura 2.21 – Localização dos sensores consoante as superfícies, para ambos os quartos em estudo: a) quarto de referência, b) quarto com os painéis VIP

### 3 RESULTADOS

Este capítulo tem o intuito de apresentar os resultados das medições realizadas nos casos de estudo. No caso de estudo 1 é efetuada uma análise para as estações de aquecimento e arrefecimento, enquanto que, no caso de estudo 2, a análise é feita para a condição de regime com controlo de temperatura interior, condição 1, e posteriormente, para a condição de regime sem controlo de temperatura interior, condição 2.

No caso de estudo em Varsóvia, são ainda apresentados os valores medidos dos fluxos de calor e da humidade.

Para o caso de estudo em Coimbra foi também efetuada a monitorização dos fluxos de calor em ambas as condições de controlo da temperatura interior, bem como se realizou uma inspeção termográfica com a finalidade de avaliar a integridade dos painéis VIP após a aplicação.

### 3.1 Caso de Estudo 1

Nesta secção, são apresentados os resultados da monitorização para a solução de isolamento da cobertura plana pelo exterior em Varsóvia (Polónia). Estes são apresentados para ambas as estações (aquecimento e arrefecimento).

#### 3.1.1 Análise da Medição de Temperaturas

##### *Estação de Aquecimento*

De seguida são apresentados os resultados da monitorização da temperatura das superfícies da cobertura para a estação de aquecimento, em particular entre o 25 de fevereiro de 2019 e 3 de março de 2019. De relembrar que nesta monitorização, existe a distinção entre duas zonas devido às dimensões dos painéis, a zona “A”, onde os painéis têm 440x440 mm<sup>2</sup> (Figura 3.1), e a zona “B”, onde os painéis têm 640x640 mm<sup>2</sup> (Figura 3.2).

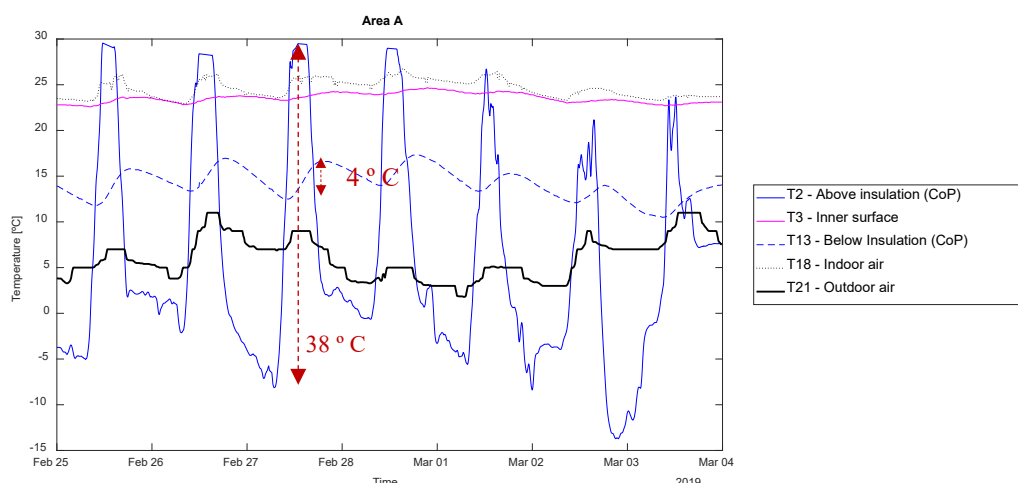


Figura 3.1 – Monitorização da temperatura para a **zona A** da cobertura durante uma semana na estação de **aquecimento**.

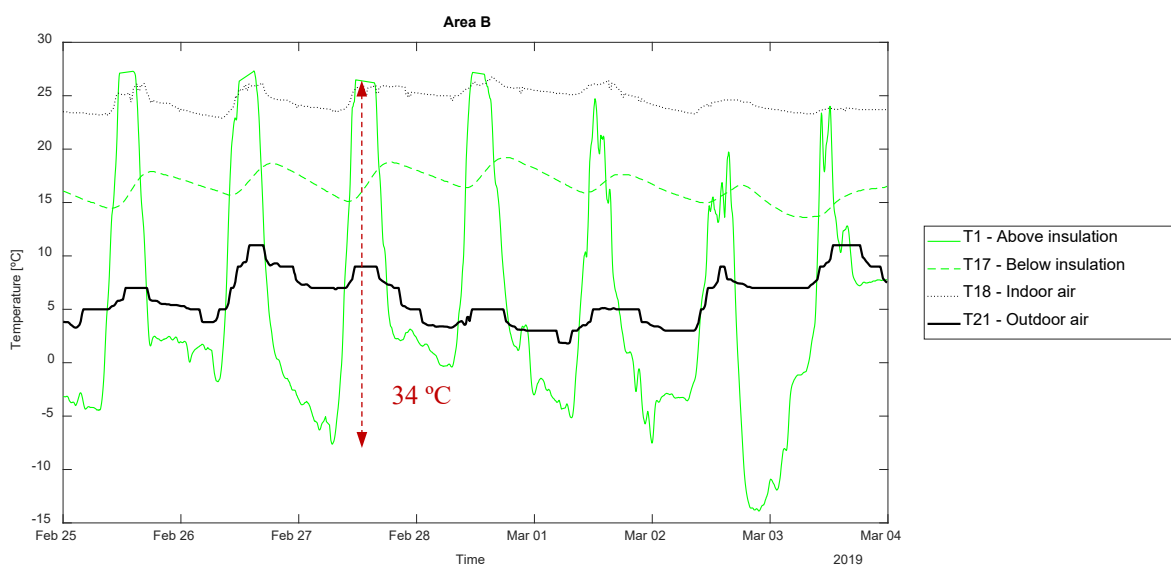


Figura 3.2 – Monitorização da temperatura para a **zona B** da cobertura durante uma semana na estação de aquecimento.

É possível verificar pela Figura 3.1, que no dia 27 de fevereiro 2019, as amplitudes térmicas medidas foram as mais elevadas na superfície exterior (lado exterior do isolamento, no centro do painel), atingindo cerca de 38 °C.

A camada de isolamento apresenta uma elevada resistência térmica, devido às características dos painéis de vácuo, o que pode justificar o facto de as amplitudes térmicas, na camada por baixo do isolamento, serem relativamente pequenas (aproximadamente 4 °C). Existe assim uma elevada proteção térmica conferida pelo isolamento.

Na zona dos painéis com dimensões maiores, os gráficos da Figura 3.2, revelam um comportamento térmico ligeiramente diferente ao dos painéis mais pequenos. As amplitudes térmicas alcançadas são ligeiramente inferiores e a temperatura na superfície por baixo da camada de isolamento é um pouco mais elevada, estando praticamente sempre acima dos 15 °C.

Na Figura 3.3 apresenta-se uma comparação entre as duas zonas, sendo possível constatar que por baixo do isolamento existe uma diferença clara e constante entre as duas áreas da cobertura

(T13 vs T17), onde a temperatura é mais baixa em média 2,4 °C na zona B, o que indica um desempenho pior onde os painéis têm dimensões de 440x440 mm<sup>2</sup>. Esta diferença pode ser explicada pelos efeitos das pontes térmicas, que são mais significativos quanto mais pequenos forem os painéis utilizados.

Os gráficos demonstram, para ambas as zonas da cobertura, que independentemente das variações da temperatura exterior (T21 – Ar exterior), a temperatura interior (T18 – Ar interior) manteve-se praticamente constante ao longo da semana, em cerca de 24 °C, o que é apenas 2 °C abaixo da temperatura imposta para o interior.

No dia 2 de março o valor da temperatura da superfície mais exterior da cobertura atingiu os 14 °C negativos (valor mais baixo da semana), no entanto a temperatura no interior do edifício foi 24 °C.

Nos gráficos *infra* é possível verificar um desfasamento temporal, que ronda cerca de 30 minutos, entre os extremos da temperatura na superfície acima do isolamento, e os extremos da temperatura na superfície abaixo do isolamento.

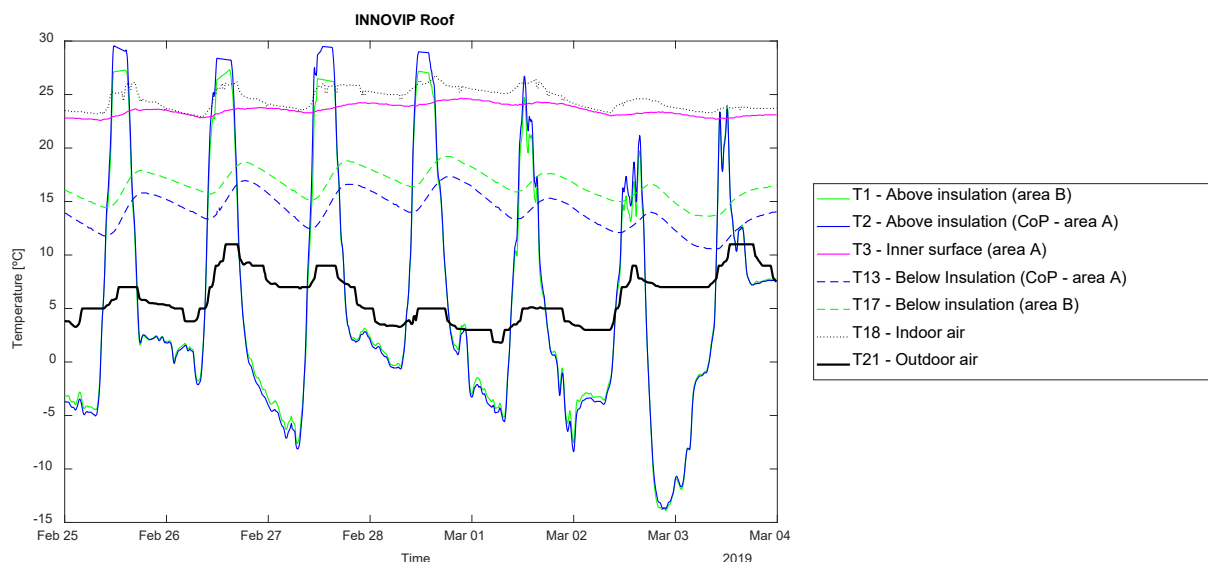


Figura 3.3 – Compilação das monitorizações das temperaturas nas áreas A e B do telhado durante uma semana da estação de aquecimento.

### *Estação de Arrefecimento*

Para o caso de estudo 1, realizou-se também a monitorização para a estação de arrefecimento. A avaliação do comportamento térmico da cobertura pelo exterior durante uma semana representativa da estação de arrefecimento, ocorreu entre 25 de junho de 2019 e 1 de julho 2019, completando uma semana na totalidade.

Nas figuras seguintes, é possível, e de modo análogo ao realizado para a estação de aquecimento, verificar a distinção entre as duas zonas da cobertura, ou seja, uma zona com os painéis de menores dimensões (440x440 mm<sup>2</sup>) - Figura 3.4, e outra zona com os painéis de maiores dimensões (640x640 mm<sup>2</sup>) - Figura 3.5.

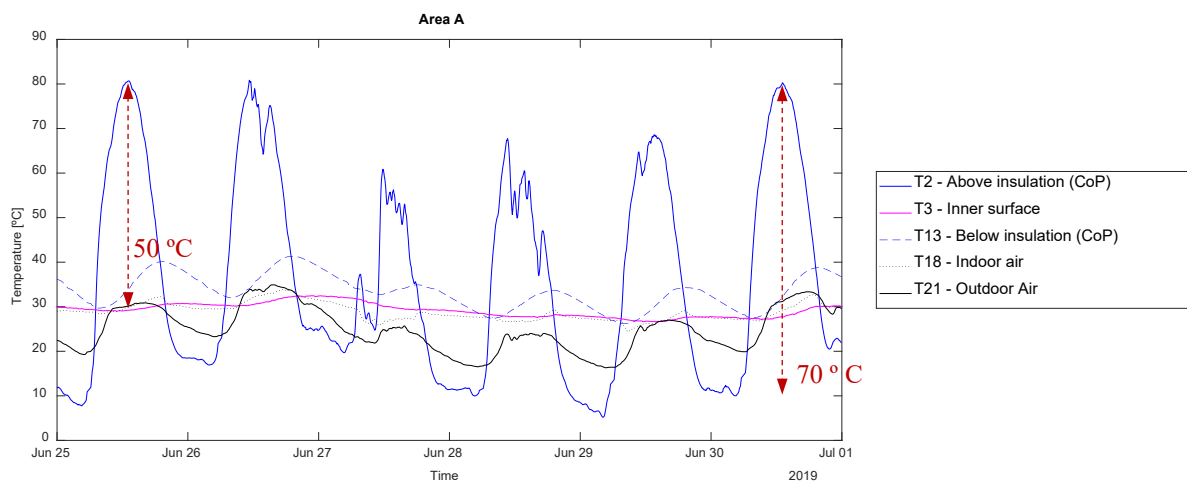


Figura 3.4 – Monitorização da temperatura para a **zona A** da cobertura durante uma semana na estação de **arrefecimento**.

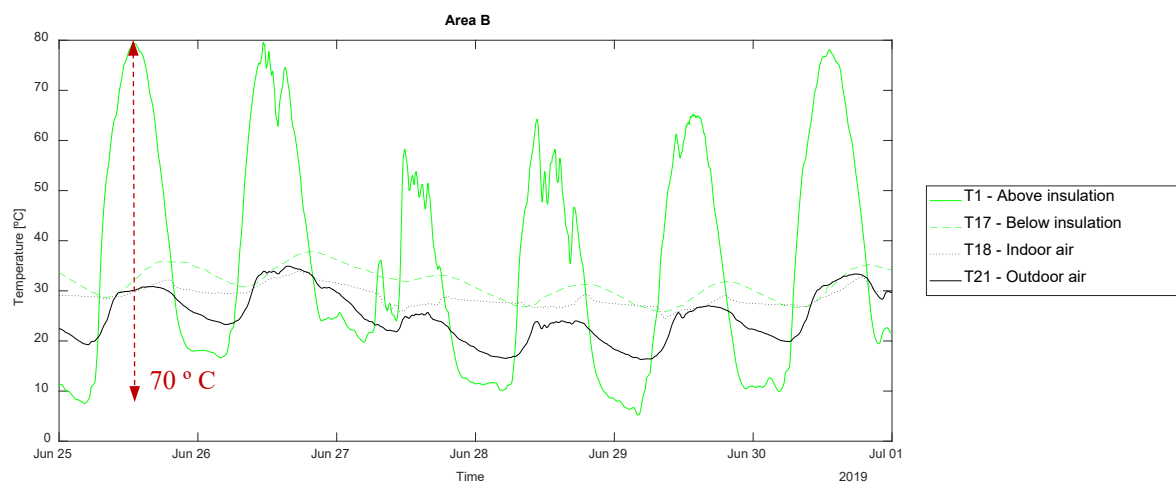


Figura 3.5 – Monitorização da temperatura para a **área B** do telhado durante uma semana na estação de **arrefecimento**.

Em ambas as figuras, as temperaturas das superfícies externas da cobertura apresentam grandes amplitudes (cerca de 70 °C). Estes podem ser explicados devido à exposição à radiação solar que se observa na cobertura. A título de exemplo, no dia 25 de junho a superfície externa do telhado é 50 °C mais quente do que a temperatura exterior.

De modo análogo ao que acontecia para a estação de aquecimento, em ambas as figuras se constata um desfasamento temporal entre os extremos da temperatura na superfície acima e abaixo do isolamento. Também se verifica que o comportamento dos painéis é muito semelhante tanto na zona A como na zona B.

Ao longo da semana, verifica-se que as temperaturas do ar interior nas duas zonas (A e B) e da superfície interior são praticamente semelhantes, mantendo-se próximas dos 30 °C.

### **3.1.2 Análise da Medição do Fluxo de Calor**

#### *Estação de Aquecimento*

Para a avaliação do desempenho da cobertura isolada pelo exterior, foi feita também a monitorização dos fluxos de calor que a atravessam. Apresenta-se, de seguida, os resultados obtidos durante uma semana representativa da estação de aquecimento (semana de 25 de fevereiro de 2019 até 3 de março de 2019).

De modo similar ao realizado para as medições das temperaturas, também para o fluxo de calor foi realizado um estudo individualizado para cada área da cobertura, zona A com painéis 440x440 mm - Figura 3.6, a zona B (painéis 640x640 mm) - Figura 3.7, e posteriormente uma análise simultânea das duas zonas - Figura 3.8.



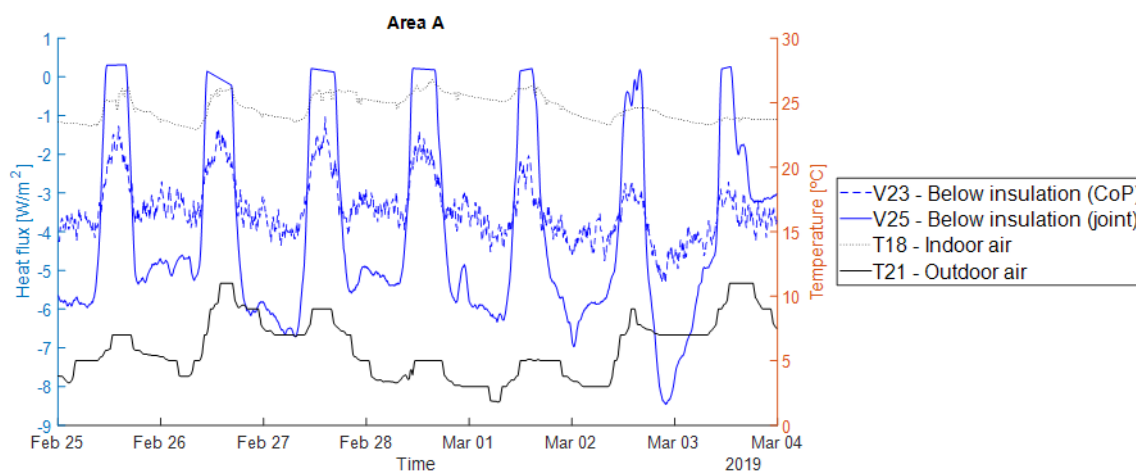


Figura 3.6 – Monitorização do fluxo de calor para a **zona A** da cobertura durante uma semana na estação de **aquecimento**.

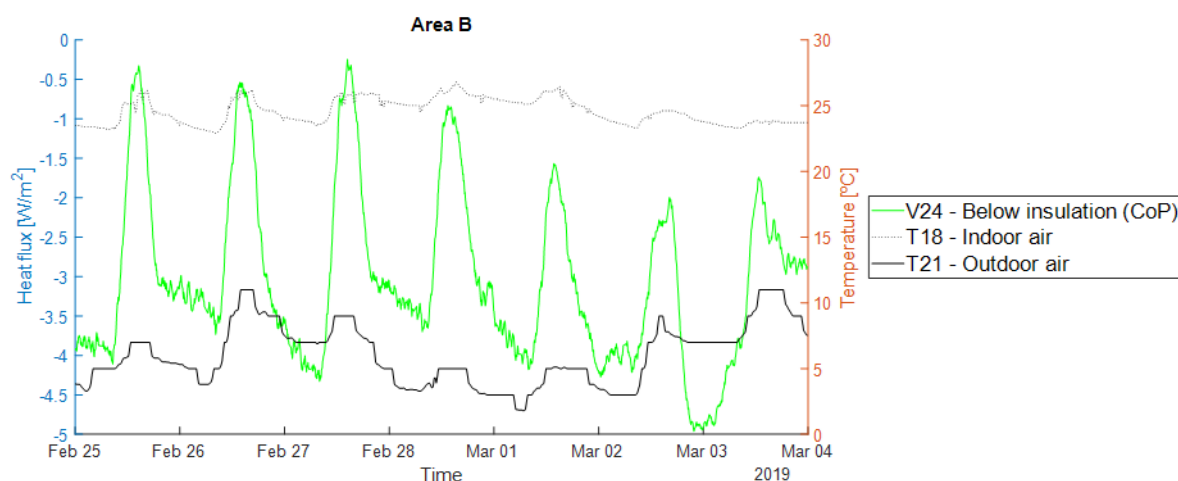


Figura 3.7 – Monitorização do fluxo de calor para a **zona B** da cobertura durante uma semana na estação de **aquecimento**.

Visto nos encontrarmos na estação de aquecimento, o fluxo de calor vai ocorrer no sentido do interior para o exterior, sendo que quanto menor for a temperatura exterior maior será a perda de calor para exterior. E, de facto, nas figuras é possível verificar que o fluxo de calor é mais elevado em valor absoluto quando a temperatura exterior é mais baixa, nomeadamente durante a noite.

Na Figura 3.6, vê-se que os valores do fluxo de calor no sensor que se encontra no ponto de união entre os painéis variam entre os  $[0,5 \text{ a } -9] \text{ (W/m}^2\text{)}$ . Por sua vez, os valores do fluxo de calor no sensor que se localiza no centro do painel estão entre  $[-1 \text{ a } -5] \text{ (W/m}^2\text{)}$ .

A Figura 3.7 demonstra que os fluxos para a área com os painéis de maiores dimensões apresentam valores do fluxo de calor entre  $[-0,5 \text{ a } -5] \text{ (W/m}^2\text{)}$ .

Pela Figura 3.8, constata-se que o fluxo de calor é um pouco menor e com menos oscilações para o caso dos painéis  $640 \times 640 \text{ mm}^2$  instalados na zona B, do que o fluxo que atravessa os painéis mais pequenos  $440 \times 440 \text{ mm}^2$ .

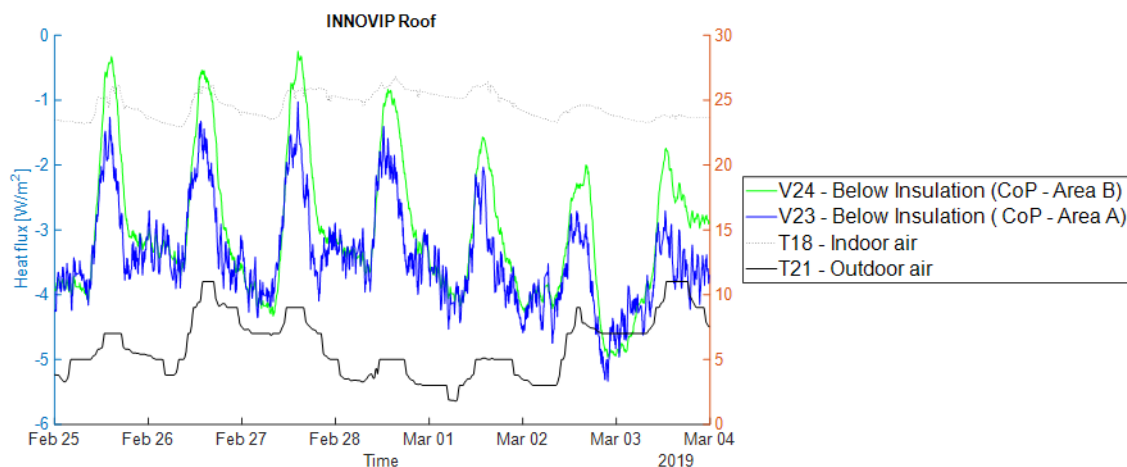


Figura 3.8 – Compilação das monitorizações dos fluxos de calor nas **zonas A e B** da cobertura durante uma semana da **estação de aquecimento**.

### *Estação de Arrefecimento*

Também se procedeu à realização de uma campanha de monitorização dos fluxos de calor durante uma semana representativa da estação de arrefecimento, sendo que esta decorreu entre 25 de junho de 2019 e 1 julho de 2019. Neste período, o fluxo de calor ocorre tipicamente, do exterior para o interior pelo que o fluxo ser positivo, neste caso significa que existem ganhos térmicos.

A Figura 3.9 apresenta os resultados das medições na zona A da cobertura plana com os painéis de menores dimensões, painéis com  $440 \times 440 \text{ mm}^2$ , enquanto que a Figura 3.10 revela os valores do fluxo de calor na área com os painéis de maiores dimensões  $640 \times 640 \text{ mm}^2$ .

O sensor que media o fluxo de calor no centro do painel na zona A, deixou de desempenhar corretamente a sua função, não permitindo que se realize uma comparação direta entre as zonas A e B da cobertura.

Pela Figura 3.9 pode-se verificar que os picos que existem para o fluxo de calor estão em concordância com o gradiente da temperatura exterior, isto significa que quando a temperatura no exterior começa a aumentar os fluxos de calor começam a diminuir, ou quando a temperatura diminui o fluxo de calor aumenta em valor absoluto. Os valores do fluxo de calor na junção entre painéis variam entre  $[-5 \text{ a } 15] \text{ (W/m}^2\text{)}$ .

Na Figura 3.6, verifica-se que os fluxos de calor variam entre  $[-4 \text{ a } 5] \text{ (W/m}^2\text{)}$ , no entanto apresentam um comportamento semelhante aos verificados na área de painéis mais pequenos.

Na comparação entre as figuras, é possível comprovar que os fluxos de calor medidos na zona A são mais elevados do que na zona B, pelo que o desempenho nos painéis de menor dimensão é inferior aos painéis maiores.

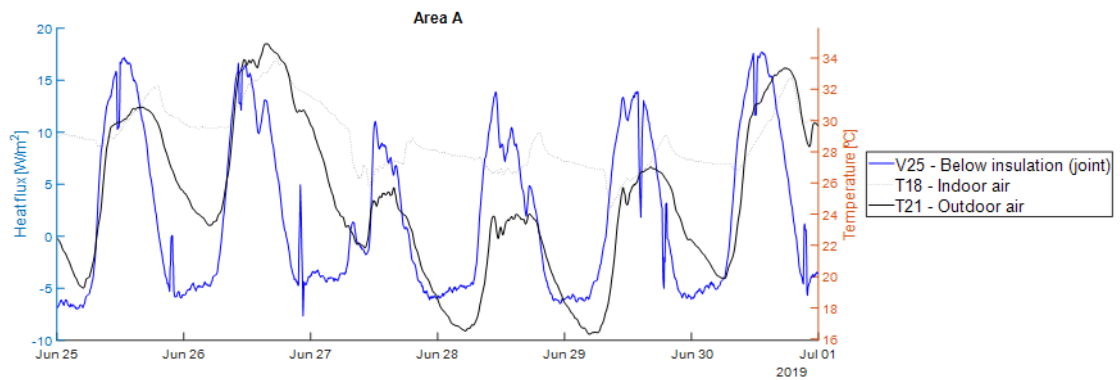


Figura 3.9 – Monitorização do fluxo de calor para a **zona A** da cobertura durante a estação de **arrefecimento**.

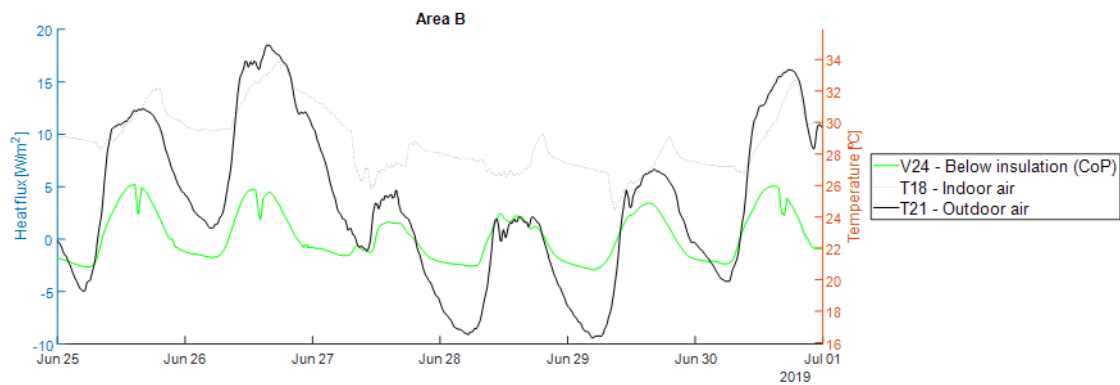


Figura 3.10 – Monitorização do fluxo de calor para a **zona B** da cobertura na estação de **arrefecimento**.

### 3.1.3 Análise da Humidade

De seguida são apresentados os valores medidos para a humidade relativa na solução pelo exterior na cobertura, durante uma semana representativa da estação de inverno, particularmente, de 24 de fevereiro 2020 a 1 de março de 2020 - Figura 3.11.

Pela análise da figura, constata-se que no centro do painel a humidade relativa é sempre mais elevada relativamente aos pontos de união entre os painéis.

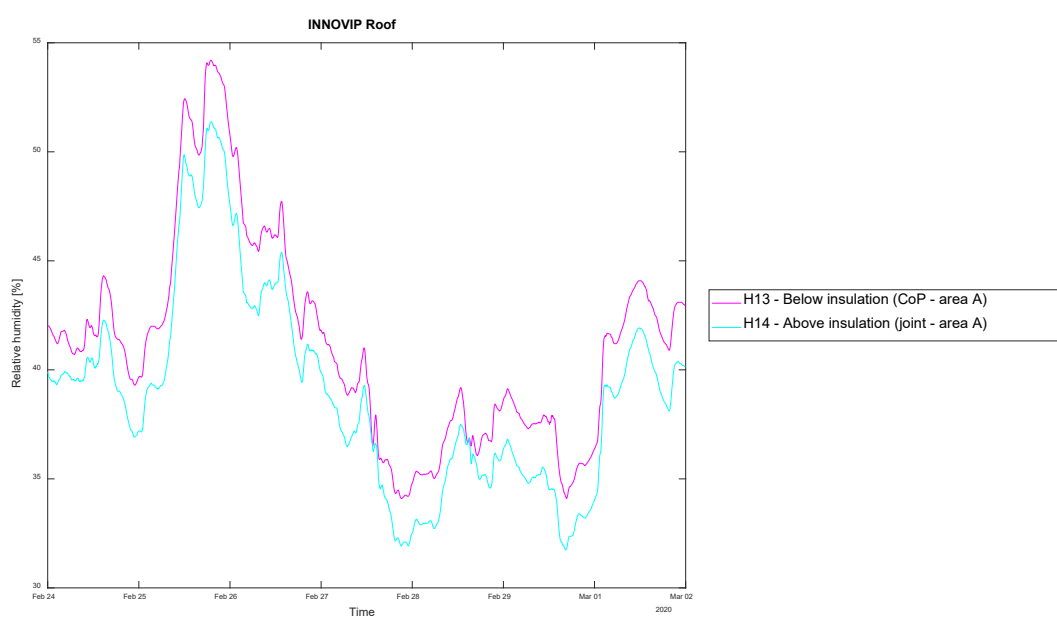


Figura 3.11 – Monitorização da humidade relativa da **zona A** da cobertura na estação de **aquecimento**.

Na Figura 3.12, é apresentada a humidade relativa medida durante a semana entre 24 de junho de 2019 e 30 de julho de 2019. É possível observar que os valores são maioritariamente inferiores a 70%, sendo que os valores para humidade relativa no interior encontravam-se entre os 25% e 50%. Uma vez mais, devido à elevada resistência dos painéis ao vapor o teor de humidade na camada isolante é maior que no interior.

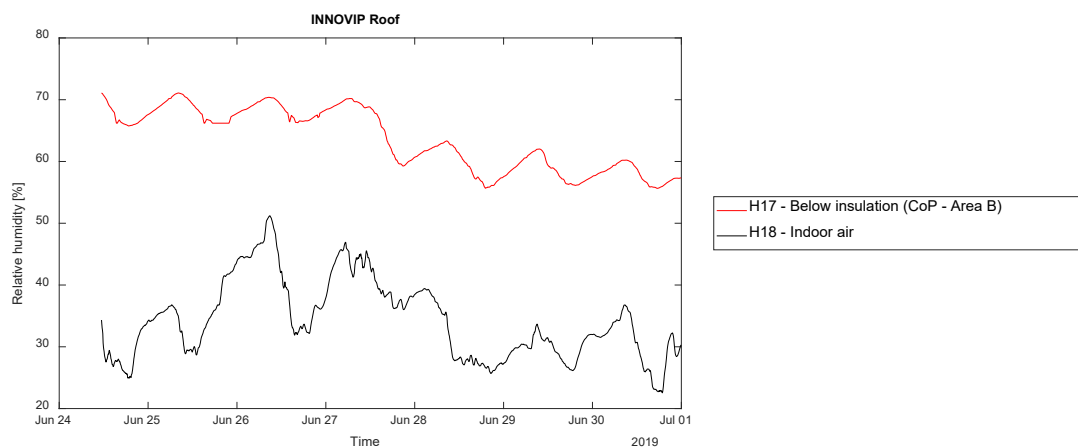


Figura 3.12 – Monitorização da humidade relativa da **zona B** da cobertura durante uma semana no **verão**.

## **3.2 Caso de Estudo 2**

Nesta secção, são apresentados os resultados da monitorização para o caso de estudo localizado em Coimbra (Portugal). Recorda-se que neste estudo existe um quarto com a solução VIP e um compartimento adjacente com um isolamento tradicional de lã mineral. Os resultados são apresentados para ambas as soluções para condições diferentes: quando a temperatura interior é mantida constante a cerca de 20 °C, condição 1; e regime sem controlo da temperatura interior, condição 2.

### **3.2.1 Regime com Controlo de Temperatura Interior (Condição 1)**

#### *Análise das Temperaturas Superficiais*

Durante a semana de 5 de março de 2020 a 11 de março de 2020 colocou-se em ambos os quartos um sistema de controlo que permitiu manter uma temperatura interior relativamente constante de 20 °C. Posto isto, foram recolhidos os dados dos sensores que estavam alinhados com os centros dos painéis no caso do quarto com a solução VIP (Figura 3.13), e também foram retirados os valores dos sensores no quarto de referência (Figura 3.14).

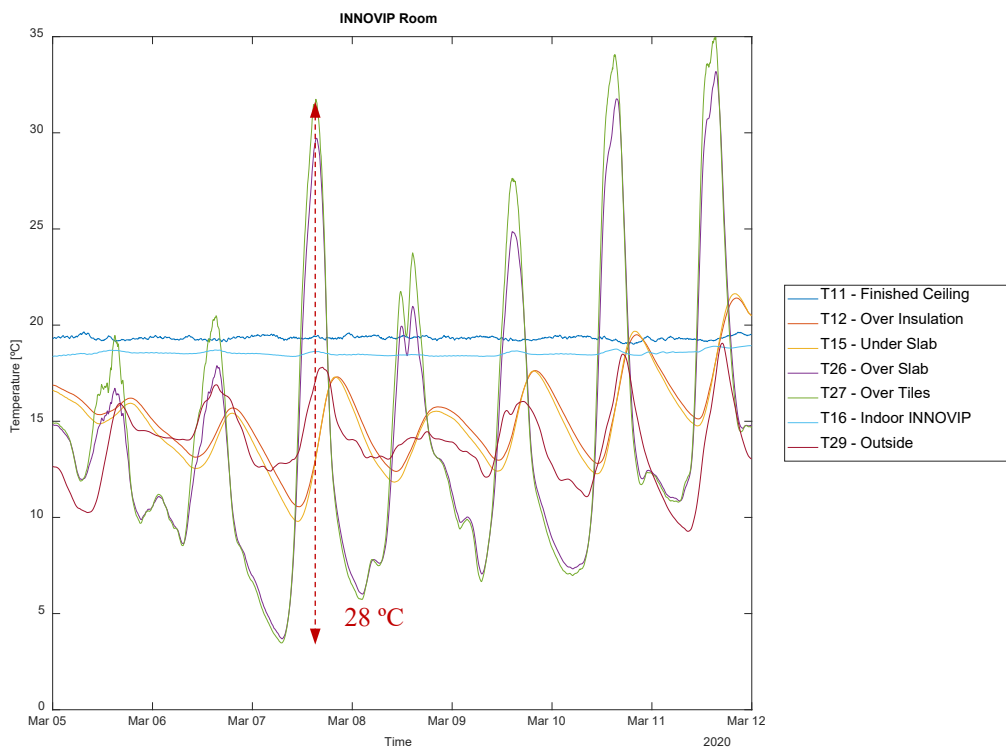


Figura 3.13 – Monitorização da temperatura da cobertura pelo interior com solução VIP durante uma semana com condições controladas (condição 1).



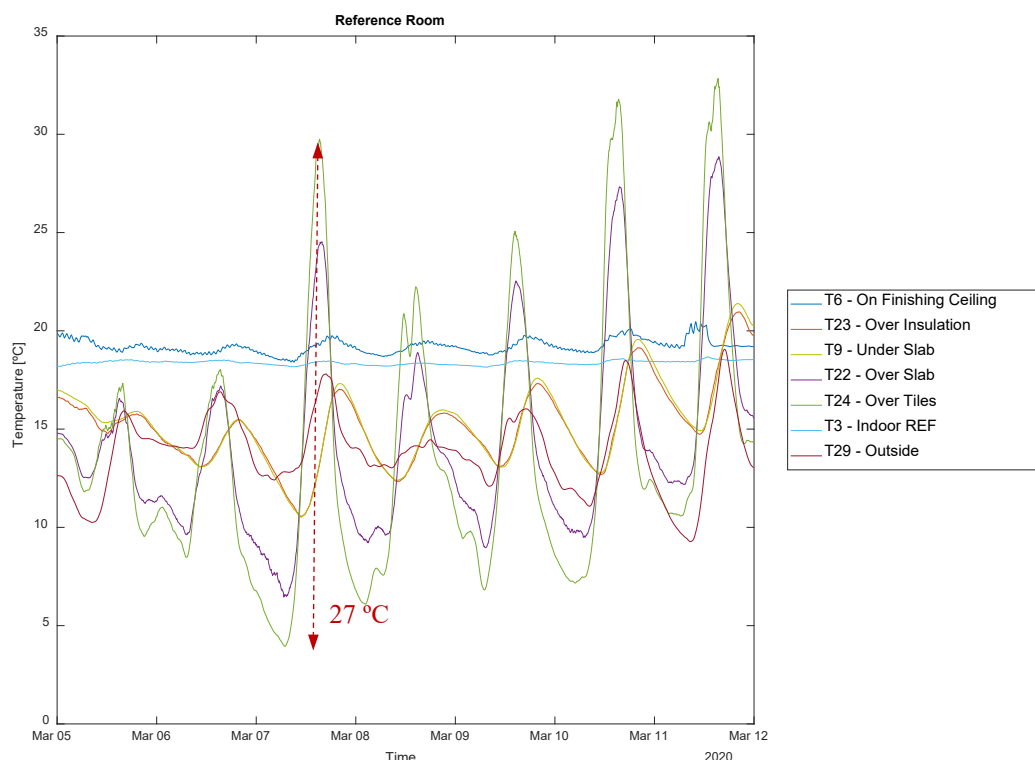


Figura 3.14 – Monitorização da temperatura da cobertura pelo interior com solução de MW durante uma semana com condições controladas (condição 1).

Vê-se que em ambas as soluções, as curvas para a temperatura têm um comportamento térmico muito semelhante. Os valores da temperatura interior são praticamente constantes ao longo de toda a semana, mesmo quando se verificam grandes amplitudes térmicas na superfície mais externa da cobertura, a título de exemplo no dia 7 de março uma variação de 28 °C no quarto VIP quando no interior a temperatura registada é de 19 °C. O impacto das temperaturas extremas verificadas na temperatura exterior repercutem-se nas restantes camadas sofrendo um amortecimento e desfasamento temporal.

Na Figura 3.13, entre a superfície acima do isolamento (T12) e a superfície abaixo da laje (T15), existe uma diferença mínima que pode ser explicada por uma pequena caixa de ar que existe entres as superfícies.

Pode-se verificar que a temperatura da superfície de acabamento interior no quarto com a solução VIP (sensor T11) é menos afeta pelos ciclos diários de variação da temperatura externa

(picos dos sensores T27 e T24), quando comparada com a temperatura da superfície de acabamento da cobertura no quarto de referência (sensor T6).

A Figura 3.15 mostra as temperaturas registadas durante 2 dias (5 a 6 de março de 2020) na superfície mais interna do quarto com a solução VIP. A temperatura no centro do painel é mais elevada que as temperaturas nos pontos de união entre os painéis. Por exemplo no dia 6 de março às 12h temos 19.5 °C para a zona do CoP e 18 e 18.5 °C para as zonas de junção. Estas diferenças são de destacar, pois apresentam os efeitos das pontes térmicas nas soluções VIP. A temperatura do quarto foi constante ao longo destes dois dias, cerca de 18.5 °C.

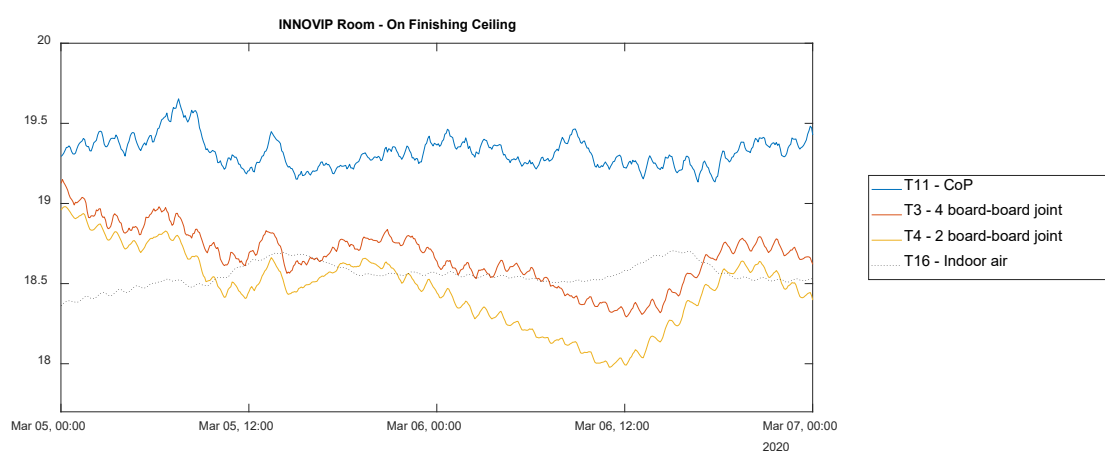


Figura 3.15 – Temperaturas na superfície mais interna da cobertura VIP nos dias 5 e 7 de março de 2020 (condição 1).

### *Análise do fluxo de calor*

Os gráficos da Figura 3.16, fornecem as medições para o fluxo de calor efetuadas durante a semana em que as condições interiores eram controladas. Os valores do fluxo de calor para a solução VIP situam-se no intervalo de  $[-2 \text{ a } 1] \text{ (W/m}^2\text{)}$ , enquanto que no quarto de referência, os valores do fluxo estão entre  $[-4 \text{ a } 1] \text{ (W/m}^2\text{)}$ , praticamente o dobro.

Como os valores do fluxo para o quarto de referência têm maiores variações que no quarto com os painéis, isso traduz-se nas temperaturas interiores registadas, que são um pouco mais baixas na solução com isolamento convencional.

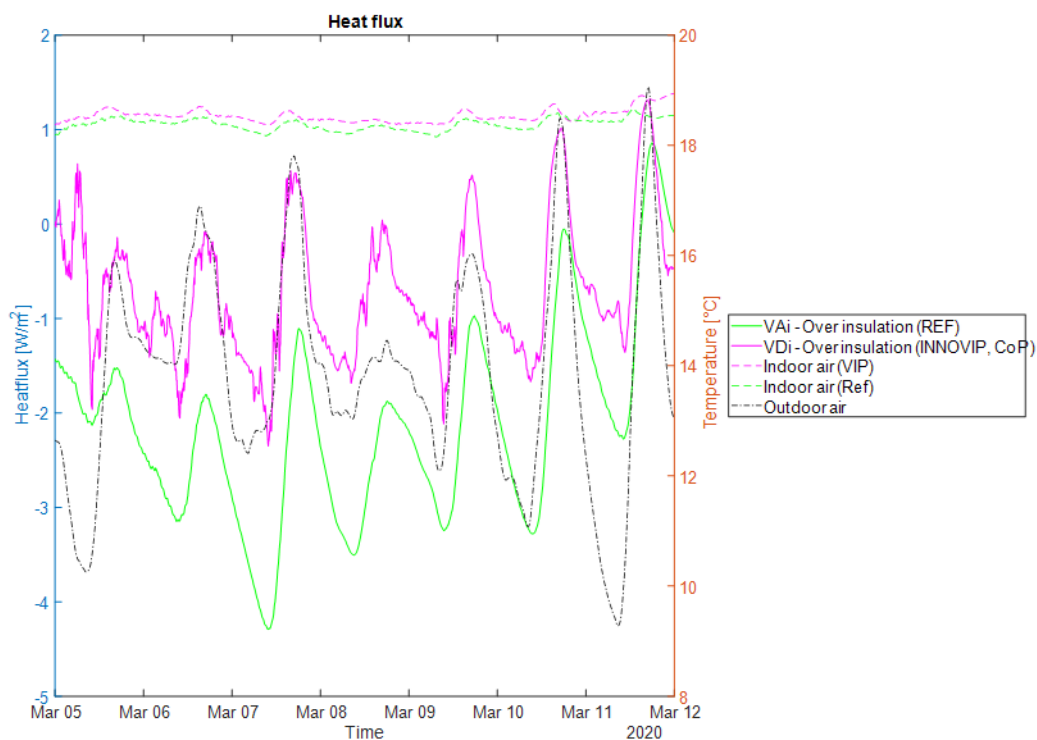


Figura 3.16 – Monitorização do fluxo de calor para condições de temperatura controlada (condição 1).

Na Figura 3.16, verifica-se ainda que, as oscilações nas temperaturas no exterior provocam uma oscilação no fluxo de calor. Quando a temperatura exterior é baixa os fluxos de calor tendem a ser mais elevados em valor absoluto no quarto de referência (ver, por exemplo quarto de referência). Isto indica que existem maiores perdas de calor para o exterior no quarto de referência que no quarto com a solução VIP.

### 3.2.2 Regime sem Controlo de Temperatura Interior (Condição 2)

#### *Análise das Temperaturas Superficiais*

Nesta secção são apresentados os resultados para a monitorização da solução isolada com VIP, durante a semana de 9 de abril de 2020 e 15 de abril de 2020, em que não foram impostas quaisquer condições de controlo para a temperatura interior (temperatura mantida a 20 °C). As medições também foram registadas para o quarto de referência.

A Figura 3.17 mostra as temperaturas para o caso da solução VIP. Como referido anteriormente, apesar da temperatura interior não ter qualquer tipo de controlo, apresenta valores muito próximo dos 20 °C. Embora que, existam grandes oscilações na superfície exterior do telhado (T27 – Por cima das telhas), o valor da temperatura na superfície pelo interior do teto (T11 - No teto acabado) não reflete esse comportamento, mantendo-se praticamente nos 21 °C ao longo de toda a semana.

Entre os extremos das temperaturas nas superfícies do exterior para o interior verifica-se um desfasamento temporal. Por exemplo no dia 12 de abril, a temperatura exterior é máxima (24 °C) por volta das 10h21 min, enquanto que a temperatura máxima (20.5 °C) na superfície interior do teto ocorre às 22h21 min (Figura 3.18).

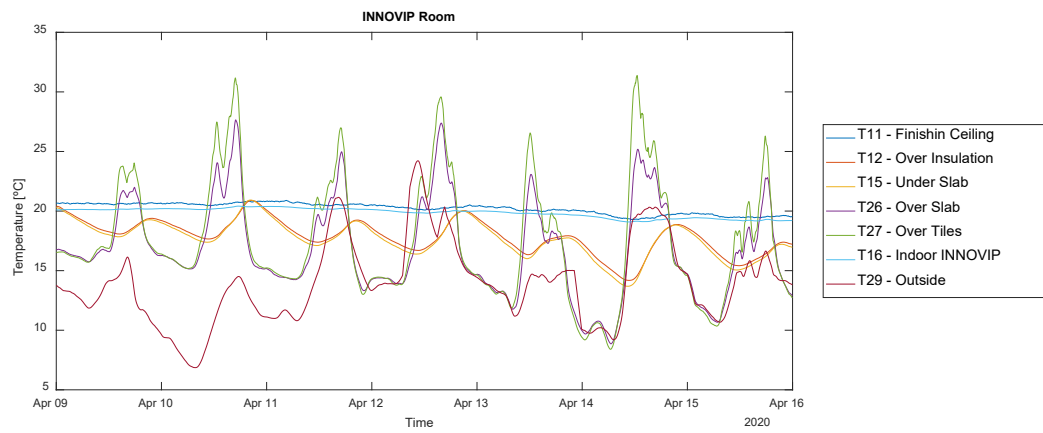


Figura 3.17 – Monitorização da temperatura da cobertura pelo interior para solução VIP durante a semana com condições controladas (condição 2).

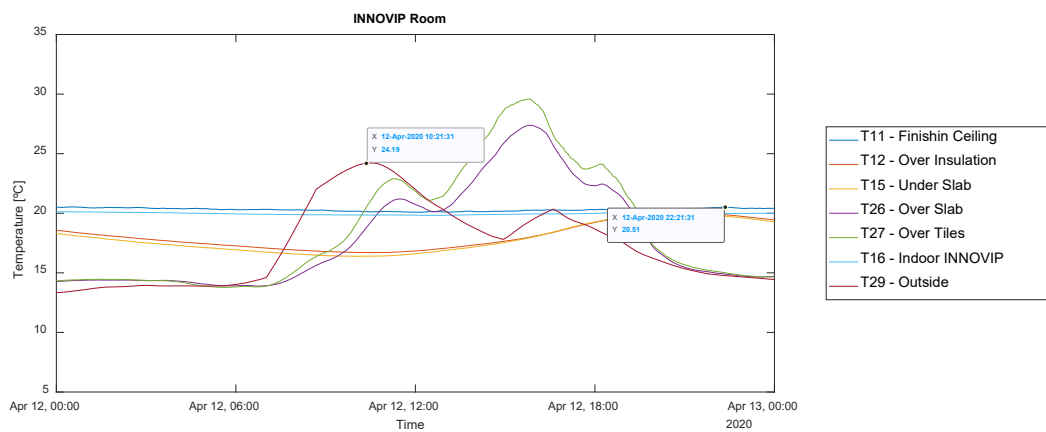


Figura 3.18 – Valores para o dia 12 de abril de 2020 no quarto com a solução VIP com a condição 2.

Na Figura 3.19, estão representadas as temperaturas na sala com a solução de isolamento de lã mineral durante a mesma semana. Os valores da temperatura interior também conseguem ser mantidos próximos dos 20 °C. No entanto, ao analisar a temperatura na superfície interior da cobertura (T6 - No teto acabado) existe maior número variações do que na solução VIP. As temperaturas extremas verificadas na temperatura exterior repercutem-se nas restantes camadas sofrendo um amortecimento e desfasamento temporal.

A título de exemplo na análise aos dias 14 e 15 de abril de 2020, pode-se verificar que a superfície pelo interior da cobertura na solução com isolamento convencional é mais suscetível às variações das superfícies adjacentes (Figura 3.20).

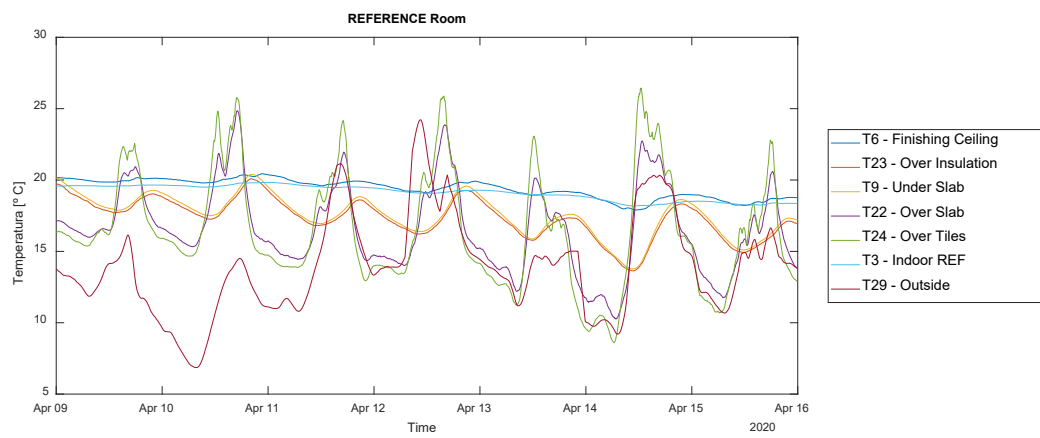


Figura 3.19 – Monitorização da temperatura da cobertura pelo interior com solução de lã mineral durante uma semana sem condições controladas (condição 2).

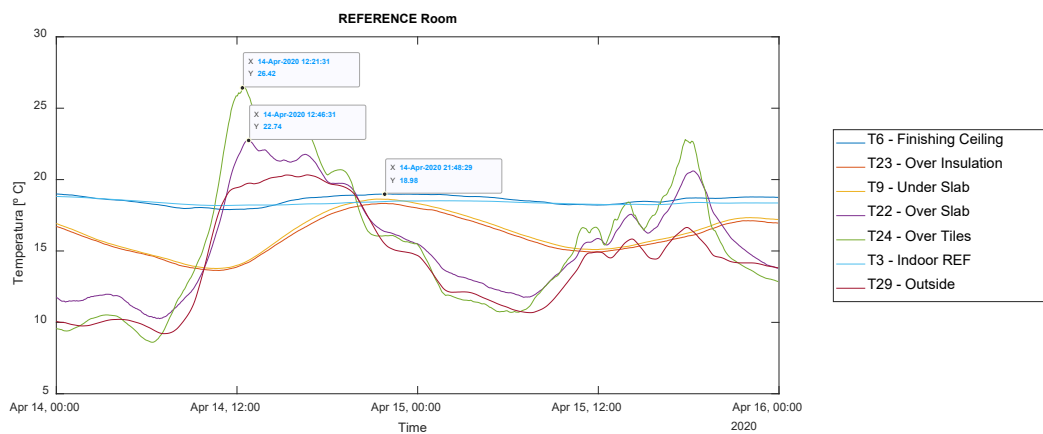


Figura 3.20 – Valores para o dia 14 e 15 de abril de 2020 no quarto de referência nas condições 2.

Embora ambos os quartos (Figura 3.17 e Figura 3.19) apresentem curvas semelhantes, as maiores oscilações na temperatura da superfície interior do quarto de referência revelam que o desempenho da solução de VIP é melhor.

Da análise da Figura 3.21 verifica-se, o efeito das pontes térmicas nos painéis, sendo que o valores das temperaturas no CoP são mais elevados que nos pontos de junção.

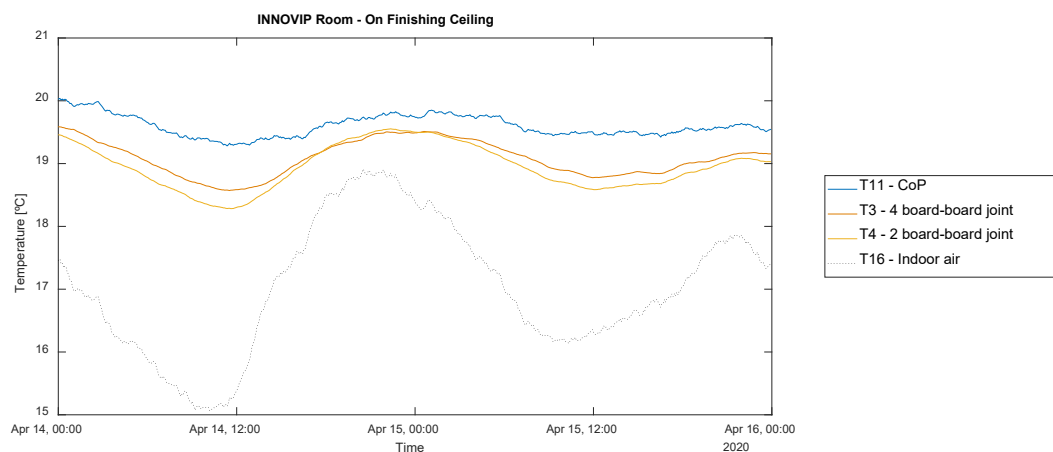


Figura 3.21 – Temperaturas na superfície mais interna da cobertura VIP nos dias 14 e 15 de abril de 2020.



### *Análise do fluxo de calor*

Os gráficos da Figura 3.22 fornecem as medições do fluxo de calor durante a semana sem controlo da temperatura interior (condição 2). Observa-se que os fluxos de calor no quarto de referência variam entre  $[0 \text{ a } -2,4] \text{ (W/m}^2\text{)}$ , ao passo que o quarto com os painéis a vácuo têm valores entre  $[0,5 \text{ e } -1,6] \text{ (W/m}^2\text{)}$ .

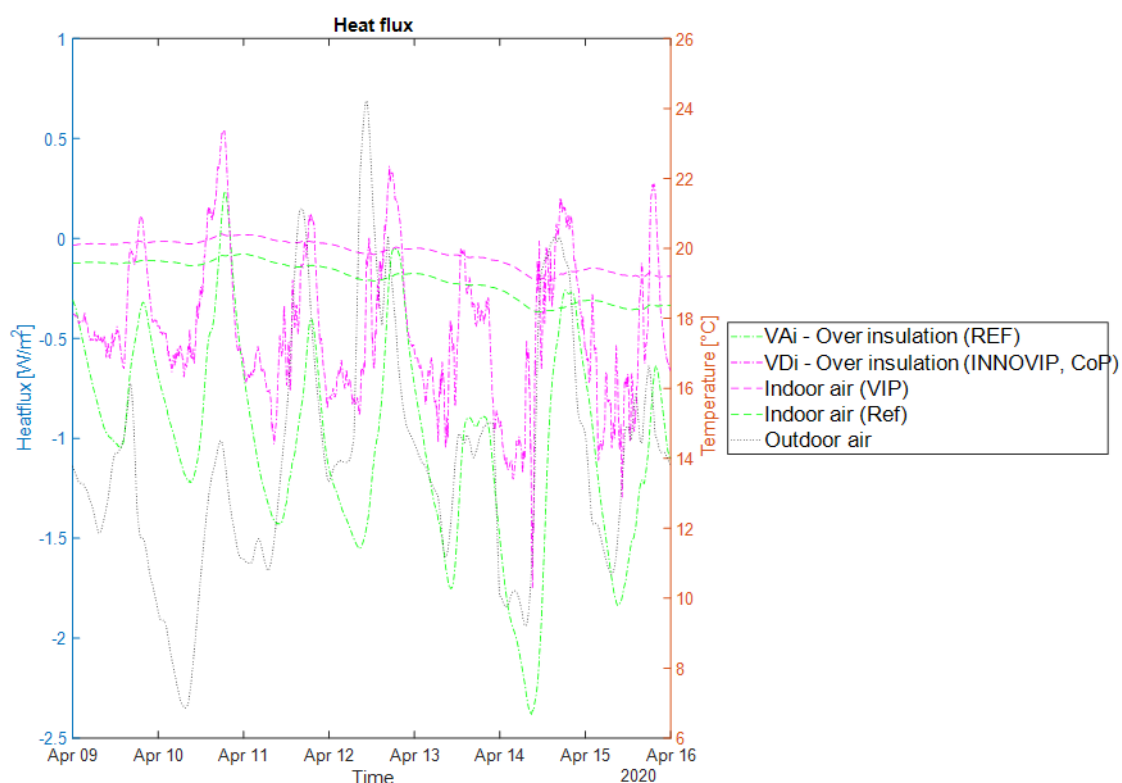


Figura 3.22 – Monitorização do fluxo de calor durante a semana sem condições de controlo de temperatura.

Uma vez mais, neste tipo de gráficos verifica-se que os valores negativos representam situações de perda de calor, pelo que se pode referir que o quarto com os VIP tem um melhor desempenho que o quarto de referência, pois apresenta valores de fluxo mais baixos e com menores variações.

### 3.2.3 Inspeção Termográfica

Para além de todos os dados de monitorização referidos anteriormente, foi conduzida uma inspeção termográfica com o fim de avaliar a integridade dos painéis VIP após a sua aplicação, salientando a possibilidade de perda de vácuo, ou identificação de alguma anomalia. Esta inspeção foi efetuada com base no método de infravermelhos proposto na ISO 6781. Para o efeito, foi utilizada uma câmara termográfica de infravermelhos (FLIR i50). Este dispositivo é capaz de capturar a radiação infravermelha emitida por qualquer objeto, e utilizando a lei Stefan-Boltzmann, produzir imagens que contenham padrões de temperatura superfícies.

De seguida são apresentados os termogramas que mostram as temperaturas interiores da superfície da solução interna de isolamento com recurso aos VIP (Figura 3.23) e da solução para o quarto de referência (Figura 3.24). Estas imagens foram gravadas no dia 27 de fevereiro de 2020 às 7h, quando a temperatura exterior era de 17°C. É possível verificar o contorno dos painéis onde a temperatura é mais baixa devido ao facto de existir um fluxo de calor do interior para o exterior (onde a temperatura era inferior).

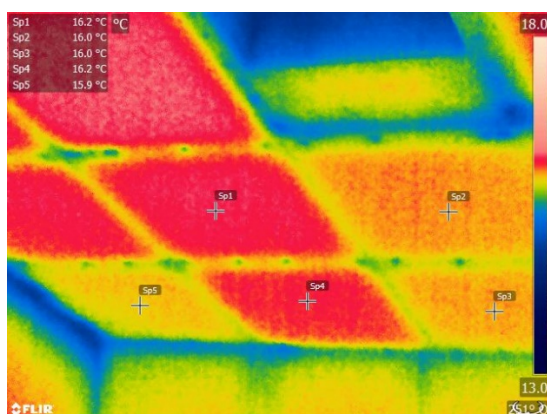


Figura 3.23 – Termograma do quarto com isolamento VIP.

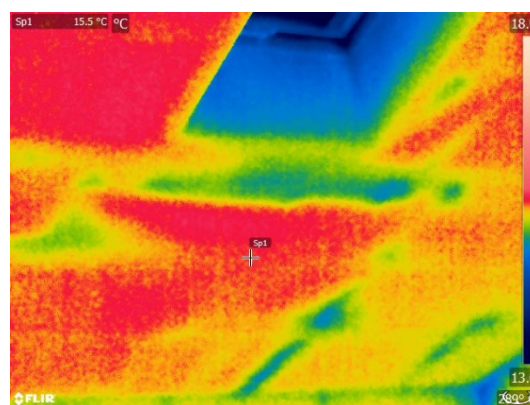


Figura 3.24 – Termograma do quarto de referência.

## 4 DISCUSSÃO

Neste capítulo pretende-se comentar e discutir alguns pontos que se consideram fundamentais sobre a aplicabilidade e os dados retirados da monitorização de ambos os casos de estudo.

### *Caso de Estudo Varsóvia*

Relativamente ao caso de estudo 1, pode-se referir que se registou um desempenho superior na zona onde os painéis tinham maiores dimensões. Este facto já era esperado, pois como foi referido, existe o efeito das pontes térmicas criadas na junção dos painéis. Ao optar por painéis de menores dimensões há mais perdas lineares nas juntas.

Na estação de aquecimento verificou-se temperaturas exteriores de  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  e amplitudes térmicas de  $38\text{ }^{\circ}\text{C}$  na cobertura, e mesmo assim a temperatura interior foi mantida praticamente constante a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  o que é relativamente perto do valor para a temperatura “ótima” da reprodução animal.

Pela análise do fluxo de calor pode-se afirmar que este é maior nas zonas em que os painéis dispõem de dimensões menores. Uma vez mais, esta diferença pode ser explicada pelo efeito das pontes térmicas.

Na estação de arrefecimento a cobertura atingiu amplitudes térmicas elevadas devido à exposição à radiação solar, cerca de  $70^{\circ}\text{C}$ . Essas diferenças foram refletidas nas temperaturas interiores durante o período noturno. Este desfasamento temporal pode ser justificada-se pela aplicação de uma solução com os painéis VIP, que favorece o armazenamento térmico. Este armazenamento permite um menor consumo de energia para a climatização dos espaços.

De forma a compreender qual o risco de ocorrência de condensação da solução de isolamento pelo exterior com vácuo, seria pertinente proceder ao melhoramento da análise à humidade relativa nas diferentes superfícies. Esta análise mais aprofundada é importante, pois se existirem condensações estas podem levar a anomalias na cobertura.

Pelos resultados obtidos conclui-se que na aplicação de painéis se deve ter em consideração a utilização de painéis com as maiores dimensões possíveis, pois os resultados demonstram uma melhor *performance* nesse caso.

### *Caso de Estudo Coimbra*

No estudo localizado em Coimbra, e de forma semelhante ao que se verificou em Varsóvia, as superfícies externas que estavam sujeitas à radiação solar em alguns dias apresentavam amplitudes térmicas elevadas, no entanto esse comportamento não é muito refletido na temperatura interior do quarto.

O comportamento da solução com os VIPs é na generalidade melhor em termos de desempenho do que a solução com isolamento convencional, pois consegue manter a temperatura interior mesmo quando a temperatura exterior sofre oscilações.

No quarto com os painéis, existe uma clara diferença entre as perdas lineares (união entre dois painéis) e as perdas pontuais (união entre quatro painéis).

Os fluxos de calor medidos no quarto com os painéis a vácuo foram geralmente inferiores, cerca de metade dos ocorridos no quarto de referência, confirmando o melhor desempenho da solução VIP.

## 5 CONCLUSÕES

O sector da construção tem de continuar a apostar na reabilitação, sendo que as questões relacionadas com o comportamento térmico dos edifícios são cada vez mais relevantes, dada a escassez de recursos e as alterações climáticas. Assim, as aplicações de isolamento nas envolventes dos edifícios são uma necessidade incontornável.

As coberturas são dos elementos dos edifícios mais expostos às adversidades do ambiente e do clima, e por esta razão são dos elementos construtivos onde existe uma elevada taxa de transferência de calor. É assim natural que estes elementos sejam aqueles em que ocorrem mais intervenções e reabilitações. Por outro lado, os painéis de isolamento a vácuo surgem como uma alternativa interessante para aplicação em edifícios novos e antigos, uma vez que pelas suas características apresentam valores de condutibilidade significativamente mais baixos que os materiais de isolamento convencionais. Estes poderão ajudar na promoção de um sector da construção mais energeticamente eficiente, bem como no alcançar dos objetivos de redução das emissões de Gases com Efeito de Estufa.

Neste trabalho, focado na avaliação do comportamento real de aplicações de VIP em coberturas, apresentaram-se os resultados de campanhas de monitorização realizadas, num longo período de tempo, em climas distintos com diferentes tipos de soluções VIP para a cobertura: uma solução pelo exterior em Varsóvia e uma solução pelo interior em Coimbra.

Na solução de Varsóvia, independentemente das amplitudes térmicas no exterior, a temperatura interior quase não sofreu variações, demonstrando um bom desempenho da solução de isolamento a vácuo. O caso de estudo da aplicação de VIP pelo exterior em Varsóvia conteve duas áreas de estudo, nas quais as dimensões dos painéis eram diferentes. Este demonstrador permitiu concluir que se devem aplicar painéis com as maiores dimensões possíveis, visto que os resultados apresentam uma melhor *performance*.

No caso de estudo em Coimbra, o comportamento da solução com os VIPs foi comparado a solução com isolamento convencional. Na generalidade o comportamento da solução VIP foi melhor em termos de desempenho, contribuindo para menores consumos de climatização.

Em termos da aplicação das soluções, deve-se referir que, apesar das vantagens em termos de comportamento, os VIPs são facilmente danificados e devem ser tratados com cuidado no local de construção. Para tal, a localização exata e as dimensões de cada VIP têm de ser decididas na fase de conceção do projeto de construção.

A aplicação destes painéis no sector dos edifícios é relativamente recente, pelo que a continuidade do estudo do comportamento é importante de forma a estes se tornarem uma alternativa viável aos materiais de isolamento tradicionais. Neste sentido, e como proposta de investigação para o futuro, recomenda-se a continuação da monitorização de ambas as soluções e a avaliação do desempenho térmico e higrotérmico das mesmas. Pelas características dos VIPs sabe-se que estes não são permeáveis ao vapor de água, pelo que podem atuar com uma barreira de vapor e reter a humidade no interior das soluções construtivas. Por esse motivo, recomenda-se o estudo aprofundado da humidade interior nas coberturas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(UE) 2019/786. (2019).

Applications, B. (2010). *Vacuum Insulation Panel Properties Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme*.

Baetens, R., Jelle, B. P., Thue, J. V., Tenpierik, M. J., Grynning, S., Uvsløkk, S., & Gustavsen, A. (2010). Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*, 42(2), 147–172. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.005>

Binz, A., Moosmann, A., Steinke, G., Schonhardt, U., Fregnan, F., Simmler, H., Brunner, S., Ghazi, K., Bundi, R., Heinemann, U., Schwab, H. H., Cauberg, H., Tenpierik, M., Johannesson, G., Thorsell, T., Erb, M., Nussbaumer, B., Armin, F.-S., André, B., ... Thorsell, T. (2005). Vacuum Insulation in the Building Sector: Systems and Applications. In *IEA/ECBCS Annex 39*.

Bouquerel, M., Duforestel, T., Baillis, D., & Rusaouen, G. (2012). Mass transfer modeling in gas barrier envelopes for vacuum insulation panels: A review. *Energy and Buildings*, 55, 903–920. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.09.004>

Climatedata. (2019). *World climate data - Temperature, Weather and rainfall*. <https://www.climatedata.eu/>

De Meersman, G., Van Den Bossche, N., & Janssens, A. (2015). Long term durability of Vacuum Insulation Panels: Determination of the Sd-value of MF-2 foils. *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.212>

DGEG. (2004). *Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais*. [www.p3e-portugal.com](http://www.p3e-portugal.com)

EN ISO 10211-1. (2007). Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures — Detailed calculations. *CEN*.

European Commission. (2020a). *Impulsionar uma Vaga de Renovação na Europa para tornar os edifícios mais ecológicos, criar emprego e melhorar as condições de vida*.

European Commission. (2020b). *Reforçar a ambição climática da Europa para 2030 Investir num futuro climaticamente neutro para benefício das pessoas*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0562&from=EN>

Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Union (2010). [https://doi.org/doi:10.3000/17252555.L\\_2010.153.eng](https://doi.org/doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng)

- European Parliament & European Council. (2012). Directive 2012/27/EU on energy efficiency. In *Official Journal of the European Union*.
- European Parliament & European Council of the European Union. (2018). *Diretiva 2018/844*.
- Gonçalves, M., Simões, N., Serra, C., & Flores-Colen, I. (2020). A review of the challenges posed by the use of vacuum panels in external insulation finishing systems. *Applied Energy*, 257(June 2019), 114028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114028>
- IPMA. (2019a). *Instituto Português do Mar e da Atmosfera (página internet oficial)*, Lisboa. <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/>
- IPMA. (2019b). *Instituto Português do Mar e da Atmosfera (página internet oficial)*, Lisboa.
- Isaia, F. ; Fantucci, S. ; Capozzoli, A. ; & Perino, M. (2015). Vacuum Insulation Panels: Thermal Bridging Effects and Energy Performance in Real Building Applications. In: *ENERGY PROCEDIA*, 83, 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.181>
- Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43(10), 2549–2563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>
- Johansson, P. (2012). *Vacuum Insulation Panels in Buildings. Literature review*. 1–27.
- Johansson, P. (2014). *Building Retrofit using Vacuum Insulation Panels Hygrothermal Performance and Durability*.
- Lorenzati, A., Fantucci, S., Capozzoli, A., & Perino, M. (2014). The effect of different materials joint in Vacuum Insulation Panels. *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.399>
- Nussbaumer, T., Ghazi Wakili, K., & Tanner, C. (2006). Experimental and numerical investigation of the thermal performance of a protected vacuum-insulation system applied to a concrete wall. *Applied Energy*, 83(8), 841–855. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.08.004>
- Rodrigues, C., Tadeu, S. F., Tadeu, A., Freire, F., & Simões, N. (2014). Energy Retrofit of an Historic Building in a UNESCO World Heritage Site : an integrated Cost Optimality and Environmental Assessment. *Proceedings of the International Conference in Energy Efficiency in Historic Buildings Madrid, Spain 29th-30th September 2014, September*, 450–463.
- Simões, N., Gonçalves, M., Serra, C., & Resalati, S. (2021). Can vacuum insulation panels be cost-effective when applied in building façades? *Building and Environment*, 191, 107602. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107602>



- Tadeu, S., Tadeu, A., Simões, N., Gonçalves, M., & Prado, R. (2018). A sensitivity analysis of a cost optimality study on the energy retrofit of a single-family reference building in Portugal. *Energy Efficiency*, 11(6), 1411–1432. <https://doi.org/10.1007/s12053-018-9645-5>
- Theodosiou, T. G., & Papadopoulos, A. M. (2008). *The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.006>
- Veiga, C. B. (2011). *Análise técnica e económica de diferentes estratégias passivas de eficiência energética de um edifício*.
- WNO. (2019). *Poland | World Meteorological Organization*. <https://community.wmo.int/members/pol>