



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Maria de Fátima Rosa Pereira Areias

CARACTERIZAÇÃO *IN SITU* DE SOLUÇÕES DE
ISOLAMENTO TÉRMICO ALTAMENTE EFICIENTES
PARA APLICAÇÃO EM EDIFÍCIOS

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 2020

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

Maria de Fátima Rosa Pereira Areias

**CARACTERIZAÇÃO *IN SITU* DE SOLUÇÕES DE
ISOLAMENTO TÉRMICO ALTAMENTE EFICIENTES
PARA APLICAÇÃO EM EDIFÍCIOS**

***IN SITU* CHARACTERIZATION OF HIGHLY
EFFICIENT THERMAL INSULATION SOLUTIONS
FOR BUILDING APPLICATIONS**

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 2020

1 2  9 0

UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Terminando o meu percurso académico, devo um agradecimento a várias pessoas que me ajudaram durante estes cinco anos e durante a elaboração desta dissertação.

Começando por agradecer a quem mais contribuiu para a realização deste trabalho: aos meus orientadores Nuno e Catarina pela ajuda e conhecimento transmitido. Um agradecimento também a toda a equipa do Itecons, em especial ao Márcio pela disponibilidade e ajuda prestada.

Devo um enorme agradecimento às minhas amigas Ana, Beatriz, Inês, Sofia e Mariana por terem estado sempre ao meu lado.

Um agradecimento especial ao Luís por acreditar em mim, por me fazer acreditar em mim própria e por ter sido um apoio fundamental.

Aos meus pais, irmãos e sobrinhos pela força, apoio e amor transmitido.

Este trabalho foi realizado no âmbito do Projeto INNOVIP, financiado pelo programa de Investigação e Inovação Horizonte 2020 da União Europeia conforme o acordo nº 723441, e do Projeto OnThermalHP, apoiado pelo Sistema de Incentivos à Investigação e Desenvolvimento Tecnológico - Projetos de I&D em Copromoção, com o código CENTRO-01-0247-FEDER-033390.

RESUMO

Passamos a maioria do nosso tempo em edifícios, onde habitamos ou em contexto laboral. Nos edifícios regista-se um grande gasto energético para que sejam atingidos os níveis de conforto térmico. Com a crescente urbanização, a quantidade de edifícios, bem como o seu tamanho, tendem a aumentar, resultando numa ainda maior necessidade energética deste setor.

Torna-se claro que o investimento na eficiência energética dos edifícios tem de continuar a ser feito e passa, em grande parte, pela melhoria do isolamento térmico aplicado.

Os Painéis de Isolamento a Vácuo (VIP) apresentam-se como uma solução de isolamento altamente eficiente uma vez que o facto do seu núcleo estar sob vácuo permite a redução da condução térmica. Isto resulta numa menor condutibilidade térmica neste tipo de soluções e numa capacidade isolante superior à dos materiais de isolamento convencionais, permitindo assim o uso de uma menor espessura de isolamento.

O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento térmico dos VIP, aplicados em sistemas de isolamento térmico pelo exterior (ETICS), sob a influência de diferentes climas e em diferentes aplicações, sendo para tal considerados 2 casos de estudo. No caso de estudo 1, os VIP foram instalados em protótipos de paredes em Coimbra. No caso de estudo 2, foi possível a instalação em contexto real, na parede exterior de um edifício em Varsóvia. A análise de resultados passa pelo estudo das temperaturas superficiais medidas e pelo risco de ocorrência de condensações superficiais. Para o caso de estudo 2, foi ainda possível o estudo dos perfis de temperatura e fluxos de calor ao longo das paredes, e dos coeficientes de transmissão térmica (teóricos e calculados com base nas medições *in situ*).

No caso de estudo 2, verifica-se uma diminuição significativa no coeficiente de transmissão térmica teórico obtido após a aplicação dos VIP na parede em estudo em comparação com a aplicação da mesma espessura de EPS. Esta redução traduz-se numa diminuição do fluxo de calor que passa através do elemento construtivo, e no aumento da eficiência energética.

Palavras-chave: Eficiência energética dos edifícios, medições *in situ*, sistemas ETICS, VIP.

ABSTRACT

We spend most of our time inside buildings, where we live and where we work. In buildings takes place a great spent in energy in order to achieve the level of comfort required. Given the growing urbanization, the number of buildings, as well as their size, tend to increase, resulting in an even greater energy demand in this sector.

It becomes clear that the investment in energy efficiency of buildings must continue to be made and largely involves improving the thermal insulation applied.

Vacuum Insulation Panels (VIP) are a highly efficient insulation solution since their core is under vacuum, allowing a drastic reduction in thermal conduction, which leads to lower thermal conductivity in this type of solutions. This results in lower thermal conductivity in this type of solutions than in conventional insulation materials, thus allowing the use of a lower insulation thickness.

The objective of the present work is to study the thermal behavior of the VIP, applied in ETICS systems, under the influence of different climates and in different applications, being considered 2 case studies. In case study 1, the VIP were installed in wall prototypes Coimbra and in case study 2 it was possible to install them on the exterior wall of a building in Warsaw. The analysis of results involves the study of measured surface temperatures and the risk of surface condensation in both case studies. For case study 2, it will also possible to study temperature profiles and heat fluxes along the walls and the thermal transmission coefficients (theoretical and calculated based on *in situ* measurements).

In case study 2, it was possible to verify a decrease in the theoretical thermal transmission coefficient obtained after the application of the VIP on the wall under study, compared to the application of the same thickness of EPS, resulting in a decrease in the heat flux through the wall and an increase in energy efficiency.

Keywords: Energy efficiency of buildings, *in situ* measurements, ETICS systems, VIP.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE GRÁFICOS	vii
ÍNDICE DE QUADROS.....	ix
SIMBOLOGIA	x
ABREVIATURAS.....	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação.....	11
1.2 Objetivos	12
1.3 Estrutura da dissertação	14
2 MATERIAIS E MÉTODOS	15
2.1 Caracterização dos climas	15
2.2 Instalações experimentais.....	16
2.2.1 Caso de estudo 1	17
2.2.2 Caso de estudo 2	20
3 RESULTADOS	25
3.1 Caso de estudo 1	25
3.1.1 Análise das temperaturas superficiais.....	25
3.1.2 Análise do risco de ocorrência de condensações superficiais exteriores.....	33
3.2 Caso de estudo 2.....	37
3.2.1 Análise das temperaturas superficiais.....	37
3.2.2 Análise do risco de ocorrência de condensações superficiais exteriores.....	39
3.2.3 Análise dos fluxos de calor	41
3.2.4 Cálculo do coeficiente de transmissão térmica	44

4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	47
4.1	Trabalhos futuros	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Comparação entre a espessura de um VIP e de um material de isolamento convencional com o mesmo desempenho térmico (Baetens et al., 2010).....	2
Figura 1.2 - Condutibilidade térmica gasosa 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 drasticamente a condutibilidade do gás mesmo à pressão atmosférica de 1000 mbar (Baetens et al., 2010).....	3
Figura 1.3 - Representação de várias alternativas de constituição do invólucro dos VIP (Wegger et al., 2010).....	4
Figura 1.4 - Condutibilidade térmica em função do tempo de vida para diferentes tipos de invólucro (Wegger et al., 2010).....	5
Figura 1.5 - Constituição dos sistemas ETICS.....	9
Figura 1.6 – Representação, em corte, da solução INNOVIP.....	11
Figura 2.1 – Paredes instaladas no Itecons.....	17
Figura 2.2 – Representação, em alçado, das paredes segundo o tipo de isolamento aplicado nas faces orientadas a norte e a sul e respetivas dimensões.	18
Figura 2.3 – Corte AB - representação da localização dos termopares.	19
Figura 2.4 – Identificação das paredes de Referência e com INNOVIP.....	20
Figura 2.5 - Corte da parede de Referência e localização dos aparelhos de medição.	22
Figura 2.6 - Corte da parede com INNOVIP e localização dos aparelhos de medição.	23
Figura 2.7 - Representação esquemática da camada de INNOVIP para cálculo da condutibilidade térmica equivalente.	23

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Características do clima de Coimbra.....	15
Gráfico 2.2 - Características do clima de Varsóvia.	16
Gráfico 3.1 - Variação da temperatura ambiente, temperaturas superficiais e temperatura sol ar durante 6 dias da estação de aquecimento, para ambas as paredes, para a orientação norte. ..	26
Gráfico 3.2 - Variação da temperatura ambiente, temperaturas superficiais e temperatura sol-ar durante 6 dias da estação de aquecimento, para ambas as paredes, para a orientação sul.....	26
Gráfico 3.3 - Variação da temperatura ambiente, temperaturas superficiais e temperatura sol-ar durante 6 dias da estação de arrefecimento, para ambas as paredes, para a orientação norte..	26
Gráfico 3.4 - Variação da temperatura ambiente, temperaturas superficiais e temperatura sol-ar durante 6 dias da estação de arrefecimento, para ambas as paredes, para a orientação sul.	27
Gráfico 3.5 - Temperaturas superficiais para um dia da estação de aquecimento para as superfícies orientadas a sul.....	29
Gráfico 3.6 - Temperaturas superficiais para um dia da estação de aquecimento, para as superfícies orientadas a norte.	29
Gráfico 3.7 - Temperaturas superficiais para um dia da estação de arrefecimento, para as superfícies orientadas a sul.....	31
Gráfico 3.8 - Temperaturas superficiais para um dia da estação de arrefecimento para as superfícies orientadas a norte.	31
Gráfico 3.9 – Variação da temperatura ambiente e das temperaturas medidas na interface entre o acabamento e o isolamento durante 6 dias na estação de aquecimento nas soluções de EPS e VIP para a superfície sul da parede branca.	32
Gráfico 3.10 - Variação da temperatura ambiente e das temperaturas medidas na interface entre o acabamento e o isolamento durante 6 dias na estação de arrefecimento nas soluções de EPS e VIP para a superfície sul da parede branca.	33
Gráfico 3.11 - Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho durante 6 dias da estação de aquecimento para ambas as paredes e para a orientação norte.	34
Gráfico 3.12 - Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho durante 6 dias da estação de aquecimento para ambas as paredes e para a orientação sul.	34
Gráfico 3.13 - Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho para um dia da estação de aquecimento para ambas as paredes e para a orientação norte.	35
Gráfico 3.14 - Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho para um dia da estação de aquecimento para ambas as paredes e para a orientação sul.....	36
Gráfico 3.15 - Variação da temperatura ambiente e das temperaturas medidas durante 6 dias na estação de aquecimento na interface entre o acabamento e o isolamento nas paredes de Referência e com INNOVIP.....	38

Gráfico 3.16 - Variação da temperatura ambiente e das temperaturas medidas durante 6 dias na estação de arrefecimento na interface entre o acabamento e o isolamento nas paredes de Referência e com INNOVIP.....	38
Gráfico 3.17 - Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho durante 6 dias da estação de aquecimento para a parede de Referência e com INNOVIP.	40
Gráfico 3.18 - Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho para um dia da estação de aquecimento para a parede de Referência e INNOVIP.	40
Gráfico 3.19 - Variação dos fluxos de calor registados para as paredes de Referência e INNOVIP durante 6 dias da estação de aquecimento.	41
Gráfico 3.20 - Variação do perfil de temperaturas ao longo da parede de Referência para 6 dias da estação de aquecimento.	42
Gráfico 3.21 - Variação do perfil de temperaturas ao longo da parede com INNOVIP para 6 dias da estação de aquecimento.	43
Gráfico 3.22 - Variação do perfil de temperaturas ao longo da parede com INNOVIP para 6 dias da estação de aquecimento (após correção do sensor).	44
Gráfico 3.23 - Curvas de fluxo e temperatura dos ambientes interiores e exterior para a parede de Referência e com INNOVIP durante 6 dias da estação de aquecimento.	45

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Características dos materiais de isolamento térmico aplicados.	18
Quadro 2.2 - Equipamentos usados na campanha experimental.	20
Quadro 2.3 - Valores de condutibilidade térmica usados no cálculo de U.	21
Quadro 2.4 - Equipamentos usados na campanha experimental.	24
Quadro 3.1 - Número de horas em que a temperatura superficial das diferentes soluções de isolamento foi inferior à temperatura de orvalho para um dia estação de aquecimento.	36
Quadro 3.2 – Valores obtidos para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica <i>in situ</i> e segundo a ISO 6946.	45

SIMBOLOGIA

q_{tot} - Densidade do fluxo de calor total através do núcleo de um VIP [W/m^2];

q_s - Densidade do fluxo de calor devida à condução na matriz sólida [W/m^2];

q_r - Densidade do fluxo de calor devida à radiação [W/m^2];

q_g - Densidade do fluxo de calor devida às colisões entre as moléculas de gás [W/m^2];

q_{coup} - Densidade do fluxo de calor devida devido aos efeitos de segunda ordem [W/m^2];

R_{se} - Resistência superficial exterior [$\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$];

R_{si} - Resistência superficial interior [$\text{m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$];

U - Coeficiente de transmissão térmica [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$];

T_{SA} - Temperatura sol-ar [$^{\circ}\text{C}$];

T_{in} - Temperatura do ambiente interior;

T_{out} - Temperatura do ambiente exterior;

T_i - Temperatura do lado interno [$^{\circ}\text{C}$];

T_e - Temperatura do lado externo [$^{\circ}\text{C}$];

α - Coeficiente de absorção da radiação solar;

R_t - Radiação solar global [W/m^2];

h_0 - Coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{C}$];

e_i - Espessura da camada i [m];

λ_i - Condutibilidade térmica da camada i [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{C}$].

ABREVIATURAS

AF- Folha de alumínio;

AT- Argamassa térmica;

EPS- Poliestireno expandido;

ETICS- External thermal insulation composite systems;

HD- Alta densidade;

ICB- Aglomerado de cortiça expandida;

IV- Infravermelho;

LD- Baixa densidade;

MF- Folha multicamada laminada;

MW- Lã mineral;

PE- Polietileno;

PET- Polietileno tereftalato;

PP-Polipropileno;

VIP- Painéis de Isolamento a Vácuo.

1 INTRODUÇÃO

Passamos a maioria do nosso tempo em edifícios, quer em contexto doméstico quer em contexto laboral, havendo um grande gasto energético para que se atinjam os níveis de conforto térmico. Segundo a Direção Geral de Energia e Geologia, o setor dos edifícios é responsável pelo consumo de cerca 40% da energia final na Europa e cerca de 30% em Portugal.

O nível de urbanização da Europa está nos 74%, sendo estimado que em 2050, 83,7% da população europeia viva em zonas urbanas (Comissão Europeia, 2020). Com esta crescente urbanização, a quantidade de edifícios, bem como o seu tamanho, tendem a aumentar, resultando numa ainda maior necessidade energética deste setor.

A produção e consumo de energia constituem as maiores fontes de emissão de gases com efeito de estufa na União Europeia, perfazendo cerca de 80% do total de emissões destes gases (AEA, 2020). Os estados membros da União Europeia adotaram, em 2014, um quadro de ação relativo ao clima e à energia que impõe um conjunto de metas a ser atingidas até 2030 que passam pela diminuição, em 40 %, das emissões de gases com efeito de estufa em relação a 1990, a incorporação de pelo menos 27 % de renováveis no consumo final de energia e pelo aumento da eficiência energética em, pelo menos, 27 % (Comissão Europeia, 2012).

Torna-se claro que tem de ser feito um investimento na eficiência energética, havendo um grande potencial de redução do consumo de energia no setor dos edifícios. Através da melhoria da envolvente, que passa pela aplicação de isolamento térmico adequado, é possível obter uma redução da energia necessária para que se alcancem os níveis de conforto térmico.

Neste sentido, e com o objetivo de atingir os *nearly zero energy buildings*, ou seja, edifícios com um balanço energético quase nulo, têm-se investigado materiais com uma capacidade isolante superior aos convencionais, os chamados materiais super isolantes com condutibilidade térmica inferior a 0,025 W/m.°C (Mandilaras et al., 2014).

Os Painéis de Isolamento a Vácuo (VIP) apresentam-se como uma solução alternativa aos materiais de isolamento térmico convencionais. Os VIP são constituídos por um núcleo de material microporoso, embalado a vácuo e revestido por um invólucro protetor.

O facto de o material que constitui o seu núcleo estar sob vácuo, permite a redução das colisões entre as moléculas do gás nele presentes, o que leva a uma menor condutibilidade térmica neste tipo de soluções.

Tal como a figura 1.1 evidencia, os VIP apresentam uma capacidade isolante superior à dos materiais de isolamento convencionais, permitindo assim o uso de uma menor espessura de isolamento (Wegger et al., 2010).

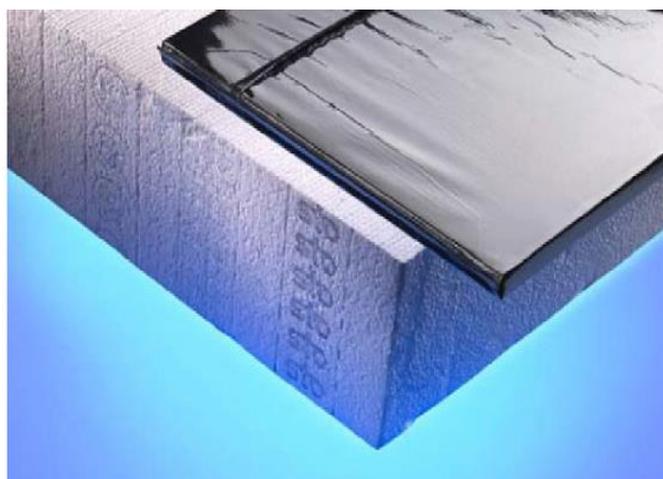


Figura 1.1- Comparação entre a espessura de um VIP e de um material de isolamento convencional com o mesmo desempenho térmico (Baetens et al., 2010).

A densidade do fluxo de calor [W/m^2] através do núcleo dos VIP pode ser expressa da seguinte forma:

$$q_{tot} = q_s + q_r + q_g + q_{coup} \quad (1.1)$$

onde q_s representa a transferência de calor por condução na matriz sólida, q_r a transferência de calor por radiação devida à emissão de radiação eletromagnética na zona do infravermelho pela superfície do material, q_g a transferência de calor devida às colisões entre as moléculas de gás presente no interior do material e q_{coup} representa a transferência de calor devida aos efeitos de segunda ordem entre as várias formas de transferência de calor anteriormente mencionadas, que pela sua complexidade, é normalmente ignorada (Baetens et al., 2010).

A condutibilidade térmica gasosa num meio poroso depende da pressão aplicada, do número de moléculas de gás e do número de obstruções que as moléculas de gás encontram no caminho entre o ambiente quente e o frio (Baetens et al., 2010). O material mais usado como núcleo é a sílica fumada que quando comprimida até 200 kg/m^3 , permite que o tamanho dos poros entre os grãos de SiO_2 seja tão pequeno que a taxa de colisões moleculares é altamente reduzida, tornando a transferência de calor no gás insignificante (Simmler e Brunner, 2005).

A transferência de calor está, então, limitada à condução na matriz sólida ($0,002 - 0,003 \text{ W/m}$

°C) e à radiação (sendo que esta pode ser reduzida pela adição de um opacificador para 0,001 W/m°C). Assim, a condutibilidade térmica de um núcleo de sílica fumada é de aproximadamente 0,004 W/m.°C (Simmler e Brunner, 2005).

Se compararmos este valor com a condutibilidade térmica de outros materiais de isolamento usados, observamos uma redução significativa. O valor da condutibilidade térmica de fibras minerais é, tipicamente 0,037 W/m.°C e da espuma de poliuretano 0,024 W/m.°C. Um VIP de apenas 20 mm, consegue substituir uma placa de fibra mineral ou de espuma de poliuretano de 185 mm e 120 mm, respetivamente (Tenpierik, 2010).

Características do núcleo

Diversos materiais podem ser usados como núcleo dos VIP, desde que satisfaçam um conjunto de requisitos (Baetens et al., 2010):

1. O material deve ser resistente à compressão: os VIP atualmente produzidos têm uma pressão interna na faixa de 0,2 a 3 mbar;
2. O diâmetro dos poros deve ser muito pequeno. Para reduzir a condutibilidade do gás em materiais de isolamento com grandes poros, a pressão tem que ser muito baixa, como mostra a figura 1.2, o que é difícil de manter;

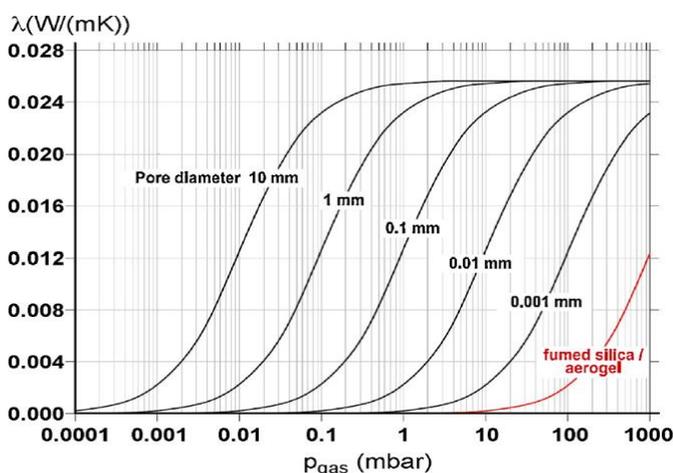


Figura 1.2 - Condutibilidade térmica no gás em função da pressão e do diâmetro médio dos poros do material que constituem o núcleo. O reduzido tamanho dos poros de sílica fumada reduz a condutibilidade do gás mesmo à pressão atmosférica de 1000 mbar (Baetens et al., 2010).

3. O material tem que ter uma estrutura celular 100% aberta para poder evacuar todo o gás;

4. O material deve ser o mais impermeável possível à radiação infravermelha (IV) de forma a reduzir a transferência de calor por radiação.

Características do invólucro

Também o invólucro que reveste os painéis deve satisfazer alguns requisitos para assegurar que a sua eficácia é mantida por longos períodos de tempo, segundo Tenpierik (2010).

1. Deve garantir baixas taxas de transmissão, tanto de vapor de água como de ar, e deve assegurar que a pressão dos painéis é mantida;
2. Deve apresentar uma baixa condutibilidade térmica e espessura de modo a minimizar os efeitos das pontes térmicas que afetam negativamente o desempenho térmico dos painéis;
3. Deve ter capacidade de ser selado ou fechado com elevada qualidade de modo a aumentar o tempo de vida útil dos VIP.

O invólucro é normalmente dividido em, pelo menos, 3 camadas, como ilustrado na figura 1.3 (Kalnæs e Jelle, 2014):

1. A camada selante, normalmente de polietileno (PE) de alta (HD) ou baixa densidade (LD) que sela o material do núcleo;
2. A camada de barreira cujo objetivo é proteger contra a entrada de vapor de água, constituída por uma folha de alumínio (AF) ou uma multicamada laminada (MF);
3. A camada protetora que confere proteção mecânica ao painel, normalmente constituída por polietileno tereftalato (PET) ou polipropileno (PP).

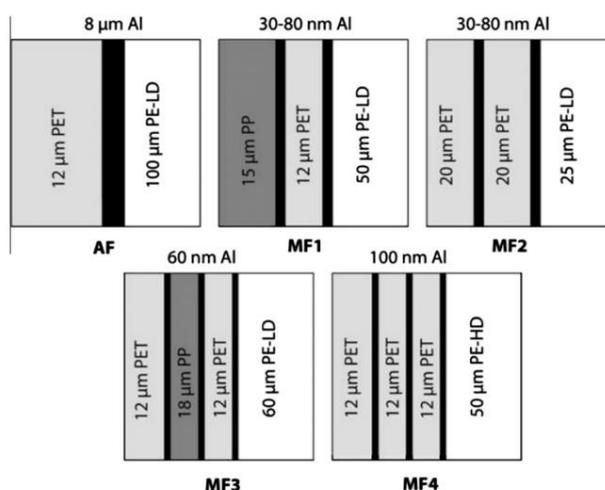


Figura 1.3 - Representação de várias alternativas de constituição do invólucro dos VIP (Wegger et al., 2010).

A constituição do invólucro com AF consiste numa folha de alumínio como camada de barreira entre a camada selante de PE-LD e a camada protetora de PET. Esta constituição permite aumentar o tempo de vida útil dos painéis (figura 1.4) pela diminuição da permeabilidade ao ar e ao vapor de água. No entanto, a espessura da folha de alumínio aumenta o efeito das pontes térmicas uma vez que a condutibilidade térmica do alumínio é de $210 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, muito maior do que a condutibilidade térmica no centro do painel ($\approx 0,004 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) e que a das camadas de polímero ($0,25\text{--}0,30 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$) (Kalnæs e Jelle, 2014).

A constituição com MF consiste em até 3 camadas intercaladas de polímero com folha de alumínio e a camada selante de PE. Esta solução é a mais usada atualmente. Devido à menor espessura total de alumínio, o efeito das pontes térmicas é diminuído, aumentando, no entanto, a permeabilidade ao ar e vapor de água e consequentemente a condutibilidade térmica ao longo do tempo de vida (Kalnæs e Jelle, 2014).

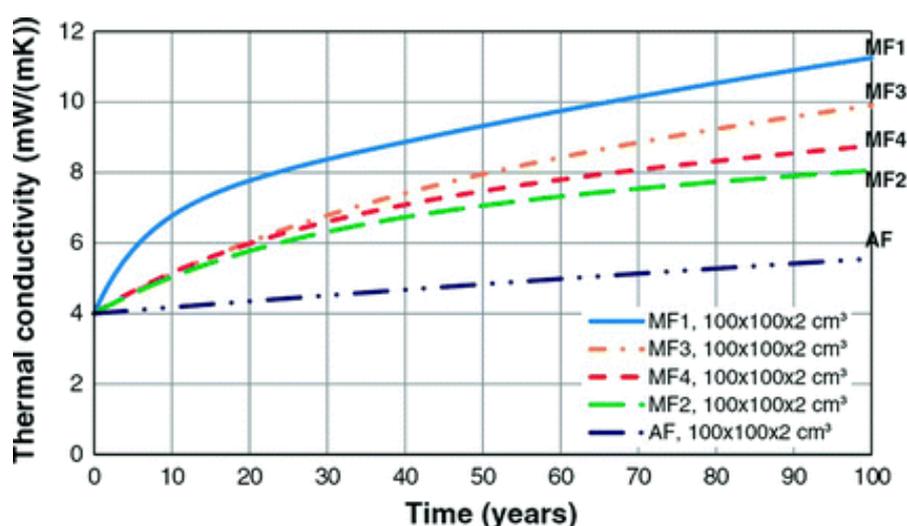


Figura 1.4 - Condutibilidade térmica em função do tempo de vida para diferentes tipos de invólucro (Wegger et al., 2010).

Embora os metais tenham propriedades de barreira muito promissoras (baixa permeabilidade ao vapor e ao ar), têm uma condutibilidade térmica relativamente alta. Os polímeros, por outro lado, têm uma condutibilidade térmica mais baixa, mas propriedades de barreira não tão favoráveis. É necessário encontrar o balanço ideal entre propriedades térmicas e de barreira (Tenpierik, 2010).

Pontes térmicas

As pontes térmicas podem dever-se aos materiais que constituem o invólucro dos painéis. Este material tem uma condutibilidade térmica muito maior do que a do núcleo e, tendo em conta que o envolve completamente, as pontes térmicas surgem nos cantos e arestas dos painéis (Tenpierik, 2010).

Ao nível do edifício, as pontes térmicas definem-se como sendo pontos da envolvente que permitem a passagem de um maior fluxo de calor em comparação com a restante área dos elementos da envolvente (DGGE, 2004).

As pontes térmicas podem ser planas ou lineares. As planas surgem em zonas de pilares e vigas, cuja resistência térmica é inferior à do elemento construtivo onde estão inseridos. As pontes térmicas lineares surgem na ligação entre elementos construtivos (ligação da parede com pavimentos intermédios, por exemplo). O efeito das pontes térmicas pode ser diminuído pela aplicação de isolamento térmico pelo exterior, uma vez que permite um isolamento contínuo da envolvente do edifício (DGGE, 2004).

Na aplicação de VIP, as pontes térmicas podem também dever-se a um inadequado sistema de montagem, cujas descontinuidades permitem a existência de espaços de ar entre dois painéis adjacentes, constituindo pontos preferenciais para a transferência de calor entre o ambiente interior e o exterior.

Com o objetivo de avaliar a influência das pontes térmicas nos requisitos energéticos dos edifícios, Isaia et al. (2015) estudaram, através de simulação numérica 2D, várias configurações de parede, várias espessuras de VIP e vários materiais de preenchimento das juntas entre painéis.

Os resultados mostram que o coeficiente global de transferência de calor por transmissão pode aumentar mais de 50% quando os efeitos das pontes térmicas são considerados, conduzindo a um aumento da transferência de calor por transmissão e, conseqüentemente, das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento do ar interior.

Este cenário correspondeu à situação em que se usou uma maior espessura de VIP, baixos valores de condutibilidade térmica dos materiais de preenchimento das juntas entre painéis e baixos valores de resistência térmica das paredes (que corresponde à soma das resistências térmicas das camadas que as constituem, à exceção dos VIP).

Os autores do estudo concluíram que:

1. Quanto maior a espessura de VIP e, conseqüentemente, a sua resistência térmica, maiores serão os efeitos das pontes térmicas. Neste caso, a influência da condutibilidade térmica do material das juntas é significativa;
2. As duas maneiras mais eficazes de reduzir os efeitos das pontes térmicas em edifícios isolados termicamente com VIP são o aumento das resistências térmicas das paredes e o uso de materiais de preenchimento das juntas com menor condutibilidade térmica.

Vida útil

O aumento da condutibilidade térmica de um material poroso depende do aumento da pressão e do teor de água. Segundo Baetens et al. (2010), a vida útil dos VIP acaba quando a condutibilidade térmica no centro do painel atinge, aproximadamente, o dobro da condutibilidade de um painel novo (cerca de 0,008 W/m.°C).

A adição de dissecantes ao material do núcleo permite o aumento da vida útil dos VIP, uma vez que estes absorvem a humidade impedindo o aumento da condutibilidade térmica até que a sua capacidade seja atingida. Também a adição de *getters* é importante para manter uma baixa pressão gasosa no interior do painel, uma vez que estes aprisionam os gases nele contidos (Kalnæs e Jelle, 2014).

A vida útil depende também dos materiais que envolvem os painéis, do tamanho dos painéis e das características do clima (temperatura e humidade).

Kim et al. (2017) avaliaram experimentalmente a evolução da condutibilidade térmica e pressão interna de 2 amostras diferentes de VIP (A e B) com núcleo de sílica fumada, quando submetidos a testes de envelhecimento, de acordo com o documento da Agência Internacional de Energia sobre a previsão de tempo de vida útil dos VIP em aplicação em edifícios (IEA ECBCS Annex 39 (Subtask A)). Os testes consistiram em submeter os painéis a condições severas para simular o seu envelhecimento. Numa câmara de temperatura e humidade, os VIP foram submetidos a temperaturas entre os 80 e os -15 °C em intervalos de 12h. Posteriormente, numa câmara de vácuo, foi medido a pressão interna após o envelhecimento e comparada com a inicial.

As condutibilidades térmicas iniciais medidas a uma temperatura média de 23°C foram de 0,0042 W/m.°C para a amostra A, cuja pressão interna inicial era de 2,4 mbar, e 0,0045 W/m.°C para a amostra B, cuja pressão inicial era de 1,7 mbar. A pressão interna, aumentou para 3,0 mbar no caso da amostra A e para 1,8 mbar no caso da amostra B. Estimou-se que as condutibilidades térmicas aumentariam para 0,0079 W/m.°C e 0,0081 W/m.°C para as amostras

A e B, respetivamente, ao fim de um período de 25 anos.

Os autores (Kim et al., 2017) concluíram ainda que houve uma grande discrepância entre os dados de condutibilidade e pressão interna fornecidos pelos fabricantes e os determinados experimentalmente.

Manuseamento

Devido à diminuta espessura do invólucro dos painéis, estes são suscetíveis de sofrer danos durante o seu transporte, manuseamento e aplicação. Uma vez perfurados, os painéis perdem o vácuo e a condutibilidade térmica aumenta para cerca de 0,02 W/m.°C para VIP com núcleo de sílica fumada (Meersman et al., 2015).

Para aplicações externas, é altamente recomendável equipar os painéis com uma proteção mecânica. Uma cobertura dos painéis feita de EPS, XPS ou lã mineral provou ser adequada (Zimmermann e Bertschinger, 2001). Segundo Fantucci et al., (2019), para além da proteção mecânica, a cobertura dos painéis com estes materiais permite a redução da condutibilidade térmica e da temperatura a que os VIP estão sujeitos. Uma vez que as taxas de permeabilidade ao vapor de água e aos gases diminuem exponencialmente com a diminuição da temperatura, a cobertura dos painéis tem um impacto positivo na durabilidade dos VIP (Simmler et al., 2005).

Aplicação em sistemas ETICS

Em termos de aplicação, tem vindo a ser estudada a aplicação dos VIP em sistemas ETICS (*External Thermal Insulation Composite Systems*) ou seja, sistemas de isolamento pelo exterior. Estes sistemas permitem a correção do isolamento em edifícios existentes e têm, normalmente, a constituição representada na figura 1.5. Na fachada do edifício é aplicado um reboco, ao qual se colam ou fixam os painéis de isolamento, sendo revestidos por outra camada de reboco reforçado com uma rede de fibra de vidro seguindo-se o acabamento exterior.

Segundo o Guia de Aprovação Técnica Europeia referente a ETICS (ETAG 004), estes devem conferir uma resistência térmica mínima superior a 1 m².°C/W.

Este sistema de isolamento tem vantagens ao nível da reabilitação de fachadas de edifícios, uma vez que a sua aplicação tem pouco impacto no dia a dia dos moradores. Esta solução oferece ainda uma maior proteção da fachada do edifício, aumentando a sua impermeabilidade e durabilidade (Barreira e Freitas, 2016).

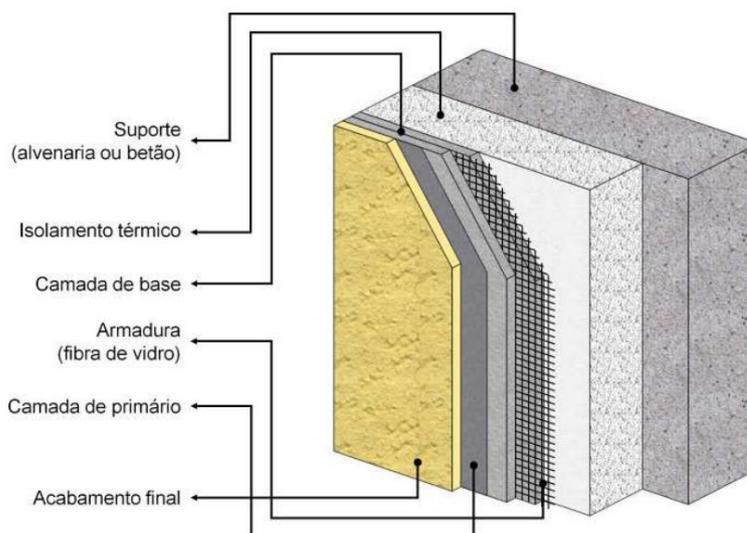


Figura 1.5 - Constituição dos sistemas ETICS (APFAC, 2014).

No que toca ao desempenho térmico, ao haver um isolamento contínuo da fachada do edifício, reduz-se o efeito das pontes térmicas planas e lineares. Também a inércia térmica se vê melhorada nestas soluções de isolamento pelo exterior uma vez que há uma maior massa superficial útil capaz de acumular os ganhos internos de energia, traduzindo-se numa diminuição da energia necessária para atingir e manter a temperatura de conforto na estação de aquecimento (Barreira e Freitas, 2016).

No entanto, os sistemas ETICS estão associados a potenciais patologias, sendo uma das mais frequentes o desenvolvimento de microrganismos na sua superfície devido à ocorrência de condensações superficiais.

O risco de ocorrência de condensações superficiais surge quando a temperatura superficial é inferior à temperatura de orvalho - temperatura abaixo da qual o vapor de água presente no ar condensa. A temperatura de orvalho depende da temperatura e humidade do ar exterior e calcula-se através da seguinte expressão:

$$T_o = \frac{b \left(\frac{aT_{out}}{b + T_{out}} + \ln \frac{HR}{100} \right)}{a - \left(\frac{aT_{out}}{b + T_{out}} + \ln \frac{HR}{100} \right)} \quad (1.2)$$

onde T_o é a temperatura de orvalho [°C], a e b são constantes que, para a gama de temperaturas -45 °C a 60 °C, tomam o valor de 17,62 e 243,12, respetivamente, T_{out} é a temperatura do ambiente exterior [°C] e HR é a humidade relativa do ar exterior [%].

A presença de água na fachada por períodos prolongados promove o desenvolvimento de microorganismos (algas, fungos, líquenes). Apesar de não afetar o desempenho térmico, tem um grande impacto visual, o que não é de todo desejável e pode levar à necessidade de reabilitação das fachadas.

Paredes da envolvente cuja camada exterior tenha baixa inércia térmica, o que se verifica nos sistemas ETICS, propiciam a ocorrência de condensações superficiais exteriores. Se a estes sistemas aplicarmos um material super isolante, potencia-se ainda mais este fenómeno, pelo que será difícil evitar o crescimento biológico em sistemas ETICS com VIP (Gonçalves et al., 2020).

Barreira e Freitas (2013) estudaram a relação entre a orientação da fachada e a ocorrência de condensações superficiais para o clima do Porto. O estudo experimental foi levado a cabo durante 1 ano, num edifício da Universidade do Porto, isolado com sistema ETICS com 4 cm de EPS, e cujas 4 fachadas estão orientadas a norte, sul, este e oeste.

A fachada orientada a norte foi a que apresentou maior biofilme bacteriano seguida da fachada orientada a oeste, o que realça a importância do processo de secagem no crescimento biológico. Estas fachadas foram as mais afetadas porque a evaporação do conteúdo de humidade nelas presente, resultante de chuva ou das condensações superficiais, é mais lenta por estarem sujeitas a menores temperaturas superficiais.

A textura do revestimento é também uma condicionante (APFAC, 2014). Quanto mais rugosa for a superfície do revestimento, maior a área superficial disponível à colonização biológica e mais difícil é obter-se uma secagem uniforme da superfície.

A Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS (APFAC) elaborou um relatório com as patologias que ocorrem mais frequentemente nestes sistemas em Portugal. Para além da problemática da colonização biológica anteriormente descrita, destacam-se ainda as seguintes patologias:

1. A fissuração do reboco ao longo das juntas do painel de isolamento, devido ao gradiente térmico a que o acabamento e a superfície exterior do isolamento estão sujeitos. Os painéis de isolamento deformam e encurvam no sentido exterior durante o dia causando tensões e consequentemente, as fissuras;
2. Podem também ocorrer fissuras aleatórias devido à diminuta espessura do acabamento, podendo estas ser agravadas pelo facto de existir uma sobreposição insuficiente da rede de fibra de vidro, que, segundo a ETAG 004, não deve ser inferior a 10 mm;
3. Devido à fraca resistência mecânica da superfície dos sistemas ETICS, estes podem ser facilmente danificados devido a choques ou vandalismo, o que pode comprometer o

desempenho térmico, pelo que é recomendada a aplicação de armadura de reforço nas zonas acessíveis.

Para o estudo comparativo do comportamento térmico de sistemas ETICS incorporando materiais de isolamento térmico convencionais e materiais super isolantes, Mandilaras et al. (2014) levaram a cabo uma campanha experimental numa fachada 2 soluções de isolamento diferentes: uma solução com EPS e outra solução com VIP cobertos dos dois lados por lã mineral, para lhes conferir proteção.

Os resultados obtidos permitiram aos autores concluir que a resistência térmica da parede com VIP, determinada experimentalmente, foi inferior ao esperado. No caso da parede isolada com EPS, não se verificaram desvios tão significativos entre os valores teóricos e experimentais.

O estudo indica que os métodos teóricos de determinação da resistência térmica não permitem estimativas tão precisas para materiais super isolantes, havendo a necessidade de realização de estudos experimentais que permitam caracterizar o comportamento térmico destes materiais em aplicações reais.

1.1 Motivação

Para que os VIP se apresentem como uma alternativa viável e competitiva face aos materiais de isolamento tradicionais, é necessário que sejam ultrapassadas as lacunas de conhecimento quanto ao seu desempenho térmico. Para tal, é necessária a realização de estudos experimentais que permitam caracterizar o seu desempenho em aplicações reais.

Nesse sentido, surge o projeto INNOVIP, cujo objetivo é alcançar desenvolvimentos significativos com uma solução inovadora de painéis de isolamento a vácuo para o setor dos edifícios. Este trabalho surge no âmbito do mesmo projeto e vai concentrar-se no estudo do comportamento térmico dos VIP aplicados em sistemas ETICS.

Os VIP estudados no âmbito deste trabalho têm um núcleo de sílica fumada, um invólucro do tipo MF, 2 cm de espessura e área de 42x42 cm². São revestidos por uma camada de EPS de cada um dos lados, com área de 44x44 cm² e 1 cm de espessura. No âmbito deste trabalho, esta solução de isolamento designar-se-á INNOVIP, representada em corte na figura 1.6. Esta solução apresenta um valor de condutibilidade térmica, medida no centro do painel, de 0,0075 W/m.°C.

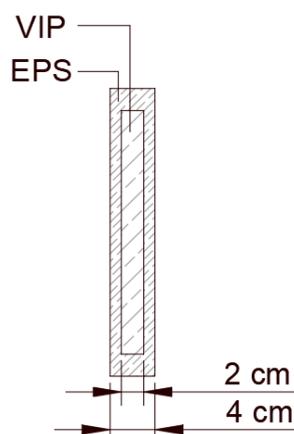


Figura 1.6 – Representação, em corte, da solução INNOVIP.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento térmico de sistemas ETICS incorporando VIP, quando sujeitos a solicitações reais. O estudo foi levado a cabo em duas fases, correspondentes a dois casos de estudo, cujas principais diferenças se descrevem de seguida:

1. Numa primeira fase, os objetivos foram o estudo da temperatura superficial e do risco de ocorrência de condensações superficiais exteriores nos VIP, em comparação com outros materiais de isolamento. Este estudo foi realizado para um clima ameno e através da instalação de protótipos de parede em Portugal.
2. Numa segunda fase, correspondente ao segundo caso de estudo, o objetivo foi estudar o desempenho térmico dos VIP aplicados em contexto de edifício real num clima mais rigoroso (Varsóvia). Foi feita análise comparativa dos resultados obtidos para os VIP com os obtidos para um material de isolamento convencional, o EPS.

Os objetivos dos casos de estudo e os procedimentos levados a cabo para que os mesmos fossem atingidos são descritos mais detalhadamente de seguida:

Caso de estudo 1

O objetivo deste caso de estudo prende-se com a avaliação da influência da orientação e da cor do acabamento em parâmetros como a temperatura superficial e o risco de ocorrência de

condensações superficiais exteriores nos VIP, em comparação com outros materiais de isolamento.

Procedeu-se, para tal, à instalação de protótipos de parede nas instalações do Itecons, em Coimbra. Há protótipos de parede com uma face orientada a norte e outra a sul e a cor do acabamento difere, sendo uma parede branca e outra preta.

Cada parede integra, para além de VIP, outras 4 soluções de isolamento: poliestireno expandido (EPS), argamassa térmica (AT), aglomerado de cortiça expandida (ICB) e lã mineral (MW).

O estudo será levado a cabo para a estação de aquecimento e de arrefecimento, a título de comparação. Será ainda analisada a temperatura sol-ar, em comparação com a temperatura superficial medida *in situ*.

Caso de estudo 2

O objetivo principal deste caso de estudo é a avaliação do desempenho térmico de uma aplicação de VIP em contexto de edifício real e a sua comparação com o desempenho de uma aplicação de EPS.

A avaliação do desempenho térmico passa pela análise dos fluxos de calor e dos coeficientes de transmissão térmica (U). Os valores de U estimados teoricamente (através da ISO 6946) serão comparados com os calculados através de dados das medições *in situ*.

É também objetivo deste caso de estudo a avaliação das temperaturas superficiais e do risco de ocorrência de condensações superficiais exteriores num clima com inverno mais rigoroso.

Para tal, instalaram-se VIP em sistema ETICS numa parte da fachada orientada a nordeste de um edifício não habitacional, no jardim zoológico de Varsóvia (Polónia). Instalou-se também uma solução de ETICS com EPS na mesma fachada que servirá como referência.

Como já foi referido, a solução de VIP estudada no âmbito deste trabalho é a solução INNOVIP. Como tal, a parte da fachada isolada com esta solução designa-se parede com INNOVIP, em comparação com a parede isolada com EPS, designada parede de Referência.

1.3 Estrutura da dissertação

Neste capítulo foi feito um enquadramento ao tema que motivou a realização da dissertação, nomeadamente a necessidade do aumento da eficiência energética dos edifícios através da melhoria do isolamento térmico aplicado, dando destaque aos VIP como soluções altamente eficientes e aos sistemas do tipo ETICS devido às vantagens que apresentam ao nível da reabilitação de edifícios. São descritas as características dos VIP e dos sistemas ETICS e é apresentada a solução de isolamento adotada no âmbito deste trabalho. Foram ainda descritos os objetivos e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, apresentam-se os materiais e métodos aplicados para cada um dos casos de estudo em análise, são descritos os climas associados a cada caso, bem como as instalações experimentais e equipamentos usados.

No terceiro capítulo, apresentam-se os resultados obtidos através das campanhas experimentais para ambos os casos, sendo feita a análise e discussão dos mesmos. A análise de resultados passa pelo estudo das temperaturas superficiais medidas e pelo risco de ocorrência de condensações superficiais em ambos os casos de estudo. Para o caso de estudo 2, será ainda possível o estudo dos perfis de temperatura e fluxos de calor ao longo das paredes e dos coeficientes de transmissão térmica (teóricos e calculados com base nas medições *in situ*).

No quarto capítulo, é feito o resumo das principais conclusões retiradas com base na análise dos resultados obtidos e apresentadas propostas para trabalhos futuros.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para atingir os objetivos propostos, foram realizados procedimentos experimentais de modo a aplicar os painéis INNOVP em sistemas ETICS, para ambos os casos de estudo. A influência do clima é uma variável importante no estudo, pelo que será feita, de seguida, a sua caracterização, bem como a descrição pormenorizada das instalações experimentais, materiais e métodos usados.

2.1 Caracterização dos climas

Como referido anteriormente, os dois casos de estudo considerados neste trabalho estão sob a influência de dois climas bastante diferentes: o de Coimbra (Portugal) e o de Varsóvia (Polónia).

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima em Coimbra é classificado como Csb, ou seja, um clima temperado mediterrânico com inverno chuvoso e verão seco e pouco quente (IPMA, 2019a). O gráfico 2.1 mostra a variação anual das temperaturas médias mensais e da precipitação média mensal, baseadas na série temporal de 1971-2000 (IPMA, 2019b). Os valores da temperatura e da precipitação média anual são de 15,5 °C e 905,1 mm, respetivamente. Coimbra tem, em média, 2463 horas de sol anualmente (Climatedata, 2019).

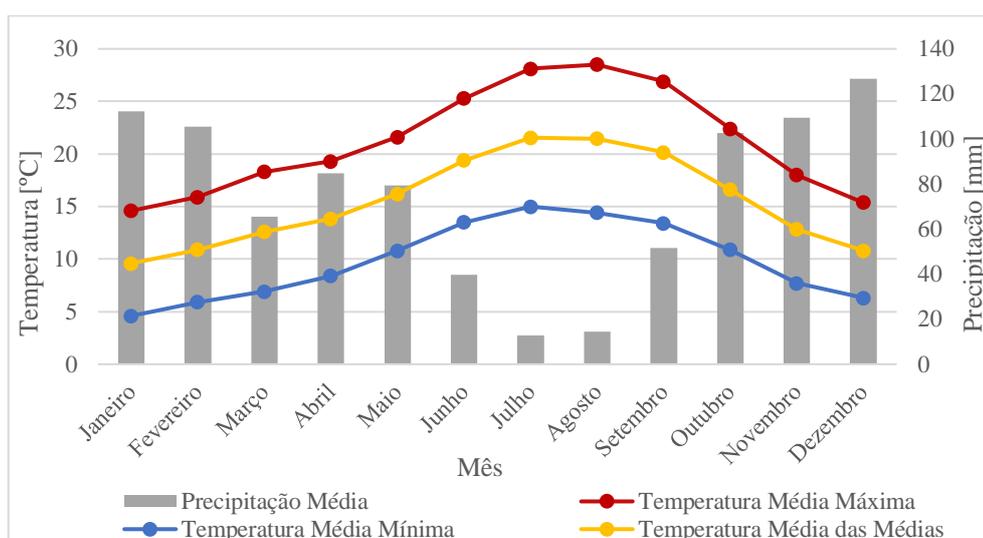


Gráfico 2.1 - Características do clima de Coimbra.

Em Varsóvia, o clima é caracterizado por Köppen-Geiger como Dfb, ou seja, clima continental húmido de verão fresco. A variação anual das temperaturas médias mensais e da precipitação média mensal, baseada na série temporal 1961-2000, está representada no gráfico 2.2. (WMO, 2019). Os valores da temperatura e da precipitação média anual são de 7,8 °C e 515 mm, respetivamente. Em Varsóvia, o número médio anual de horas de sol é de 1589 (Climatedata, 2019).

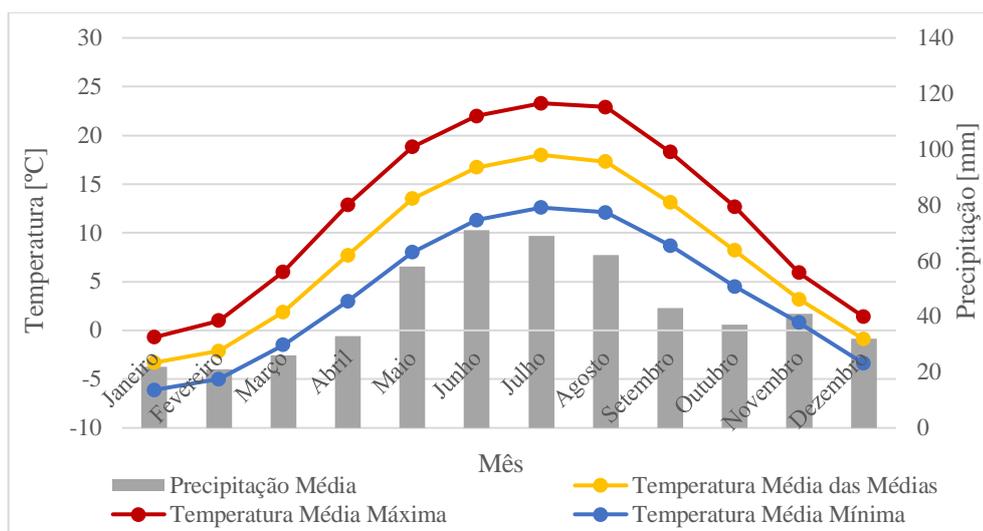


Gráfico 2.2 - Características do clima de Varsóvia.

Comparando os dois climas percebe-se que o clima em Varsóvia é bastante mais severo, sendo a sua temperatura média anual praticamente metade da registada para Coimbra. No que toca à precipitação, em Varsóvia os meses mais chuvosos são os de verão ao contrário do que acontece em Coimbra, que apresenta um maior valor de precipitação média anual, e cujos meses mais chuvosos são os de inverno.

2.2 Instalações experimentais

A descrição das instalações experimentais levadas a cabo para o estudo do comportamento térmico da solução INNOVIP é feita de seguida para ambos os casos de estudo. Serão também descritos os materiais e equipamentos usados.

2.2.1 Caso de estudo 1

Para o estudo da influência de parâmetros como a cor e a orientação na temperatura superficial e no risco de ocorrência de condensações superficiais, foram construídos no Itecons, em Coimbra, dois protótipos de parede, integrando vários tipos de materiais de isolamento.

As paredes, constituídas por de tijolo furado, têm área de 5 m². A cor do acabamento difere entre elas, tendo uma sido pintada de preto e outra de branco, para estudar a influência da cor. Para estudar a influência da orientação, cada uma das paredes tem uma face orientada a sul e outra a norte (figura 2.1).

Foi também montada uma pequena estação meteorológica para a monitorização de parâmetros como a temperatura ambiente, humidade relativa do ar e radiação solar.

Para além da solução de INNOVIP, foram instalados mais 4 tipos de isolamentos térmicos com espessura de 8 cm, cujas características se encontram resumidas no quadro 2.1. Apesar da solução INNOVIP apenas se encontrar nas faces orientadas a sul, os resultados obtidos na campanha experimental para as superfícies orientadas a norte serão também analisados para o estudo da influência da orientação.



Figura 2.1 – Paredes instaladas no Itecons.

Quadro 2.1 – Características dos materiais de isolamento térmico aplicados.

Material	Descrição	λ [W/m.°C]	ρ [kg/m ³]	c [J/kg.°C]
EPS	O poliestireno expandido é um plástico que apresenta uma estrutura celular fechada preenchida por ar – composto por cerca de 95% de ar em repouso e 5% de matéria sólida.	0,036	18	1450
ICB	O aglomerado de cortiça expandida é um produto de origem vegetal que se obtém através da expansão da cortiça com vapor de água.	0,040	120	1670
AT	Argamassa Térmica com agregados de muito baixa densidade (EPS).	0,05	350	≈1450*
MW	A lã mineral é obtida através da fundição de rochas vulcânicas.	0,036	115	1030

Valores obtidos a partir de fichas técnicas.

* Valor adaptado do EPS.

Cada tipo de isolamento está instalado em ambas as orientações de cada uma das paredes à exceção da MW e INNOVIP que estão instalados apenas na orientação norte e sul, respetivamente. As placas de EPS, AT e ICB têm área de 1x0,5 m² e a MW tem 0,6x0,8 m², conforme esquematizado na figura 2.2.

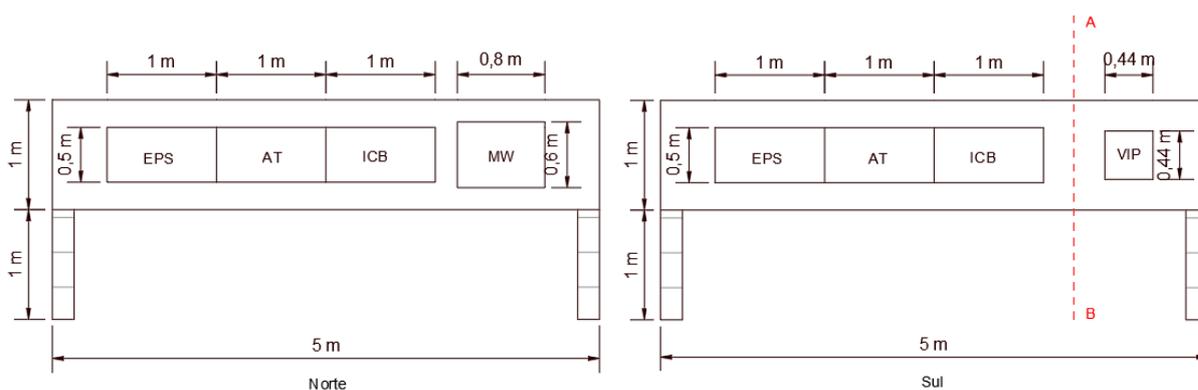


Figura 2.2 – Representação, em alçado, das paredes segundo o tipo de isolamento aplicado nas faces orientadas a norte e a sul e respetivas dimensões.

Para cada solução de isolamento, são medidas as temperaturas à superfície das paredes e na interface entre o acabamento e o isolamento (figura 2.3), usando termopares do tipo k. As curvas de temperatura superficial medidas podem ser comparadas com a temperatura sol-ar estimada.

Este parâmetro representa o efeito combinado da temperatura do ar exterior e da radiação solar na temperatura superficial e foi calculada para cada cor e para cada orientação com base na expressão seguinte:

A temperatura sol-ar para superfícies verticais é dada por:

$$T_{SA} \cong T_{out} + \frac{\alpha R_t}{h_0} \quad (2.1)$$

onde T_{SA} é a temperatura sol-ar [°C], T_{out} é a temperatura do ambiente exterior [°C], α é o coeficiente de absorção da radiação solar, R_t é a radiação solar global incidente na superfície vertical [W/m²] e h_0 é a condutância térmica do ambiente exterior [W/m².°C].

O coeficiente de absorção da radiação solar, que traduz a fração da radiação solar incidente que é absorvida por uma superfície, varia de acordo com a cor da superfície, tendo sido adotados os valores de 0,96 para a cor preta e 0,3 para a cor branca.

A condutância térmica do ambiente exterior, sendo o inverso do valor de resistência térmica superficial exterior, ou seja, $h_0 = \frac{1}{0,04}$, toma o valor de 25 W/m².°C. Uma vez que os valores da radiação solar global obtidos através do piranómetro são dados para o plano horizontal, aplicou-se um fator redutor de 0,27 e 0,51 para as faces das paredes orientadas a norte e sul, respetivamente, de acordo com o Despacho n.º 15793-F/2013.

O registo das leituras foi feito em intervalos de 30 minutos. A listagem e descrição dos equipamentos utilizados na campanha experimental encontram-se no quadro 2.2.

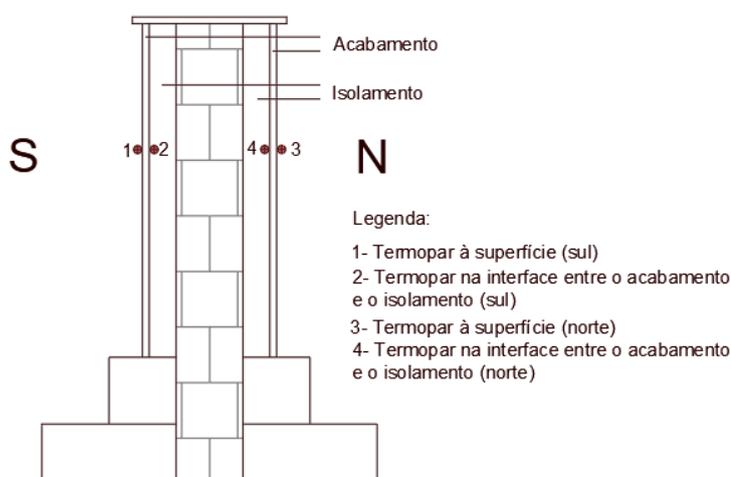


Figura 2.3 – Corte AB - Localização dos termopares.

Quadro 2.2 – Equipamentos usados na campanha experimental.

Equipamento	Descrição
Termopares do tipo k	Sensor termoelétrico usado para a medição de temperaturas.
Piranómetro com anel móvel	Aparelho usado para medir a densidade do fluxo da radiação solar direta e difusa.
Sondas de temperatura e humidade	Medição da temperatura e humidade relativa do ar.
<i>Data logger</i>	Aparelho de registo dos dados provenientes dos equipamentos de medição.

2.2.2 Caso de estudo 2

Em Varsóvia procedeu-se à instalação dos painéis de INNOVIP em soluções do tipo ETICS na fachada nordeste de um edifício do jardim zoológico previamente isolado internamente com EPS. Para efeitos deste trabalho, a parte da fachada na qual se instalaram os painéis designar-se-á parede com INNOVIP por oposição a outra parte na qual se instalou EPS com 4 cm de espessura, e que serve como parede de Referência.

A figura 2.4 mostra a fachada na qual houve a instalação das soluções mencionadas.



Figura 2.4 – Identificação das paredes de Referência e com INNOVIP.

Para o estudo do desempenho térmico das paredes antes e depois da intervenção, estimaram-se os coeficientes de transmissão térmicos teóricos.

O cálculo foi feito segundo a ISO 6946 que permite estimar o valor de U recorrendo à condutibilidade térmica e espessuras das várias camadas que constituem as paredes, bem como às resistências térmicas superficiais, de acordo com a expressão:

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + R_{si}} \quad (2.2)$$

onde U é o coeficiente de transmissão térmica [W/m².°C], R_{se} e R_{si} são as resistências térmicas superficiais exterior e interior, respetivamente [m².°C/W], e_i [m] e λ_i [W/m.°C] são a espessura e condutibilidade térmica de cada uma das camadas.

Antes da intervenção, as paredes eram constituídas por (de fora para dentro): 2,5 cm de reboco, 11 cm de tijolo furado, 10 cm de EPS, 2,5 cm de reboco, 22 cm de tijolo furado e 2,5 cm de reboco, sendo o valor do seu coeficiente de transmissão térmica de 0,263 W/m².°C, não satisfazendo o requisito máximo de 0,23 W/m².°C estipulado para paredes exteriores em Varsóvia.

Os painéis de EPS e INNOVIP foram colados e fixados com recurso a buchas plásticas e os espaços entre painéis foram preenchidos com espuma de poliuretano. Após a aplicação dos painéis de isolamento em cada uma das paredes, foi aplicada uma camada de reboco de 2,5 cm. Estas novas configurações de parede permitiram obter valores para os coeficientes de transmissão térmica de 0,203 W/m².°C para a parede de Referência, 0,109 W/m².°C e 0,160 W/m².°C para a parede com INNOVIP para o centro do painel e na junta entre painéis, respetivamente.

Os valores de condutibilidade térmica usados no cálculo encontram-se no quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Valores de condutibilidade e resistência térmica usados no cálculo de U.

Material	λ [W/m.°C]	R [m ² .°C/W]
Reboco ⁽¹⁾	1,3	0,019
Tijolo de 22 cm ⁽¹⁾	-	0,520
Tijolo de 11 cm ⁽¹⁾	-	0,270
EPS	0,036	1,111
INNOVIP (centro do painel) ^(*)	0,0075	5,333
INNOVIP (junta entre painéis) ^(*)	0,0167	2,424

(1) Valores retirados do documento ITE 50.

(*) Valores obtidos usando o equipamento *Guarded Hot Plate: λ-Meter EP500e*

Para o estudo do comportamento térmico das paredes são medidas as temperaturas e fluxos de calor. Para ambas as paredes medem-se: a temperatura na interface entre o acabamento e o isolamento, a temperatura após o isolamento, a temperatura superficial interior e o fluxo de calor após o isolamento.

Na parede de Referência, as temperaturas e o fluxo de calor são medidos no centro do painel de EPS. Na parede com INNOVIP, devido à maior influência das pontes térmicas nesta solução, para além das medições efetuadas no centro do painel, mede-se também a temperatura na interface entre o acabamento e o isolamento, a temperatura após o isolamento e o fluxo de calor para a junta entre painéis.

São também medidas as temperaturas dos ambientes interiores e exterior. As temperaturas dos ambientes interiores pretendidas são acima dos 26 °C, controladas a partir de *setpoint*, uma vez que os espaços são usados para o alojamento de répteis. As figuras 2.5 e 2.6 ilustram as paredes, em corte, e a localização dos aparelhos de medição.

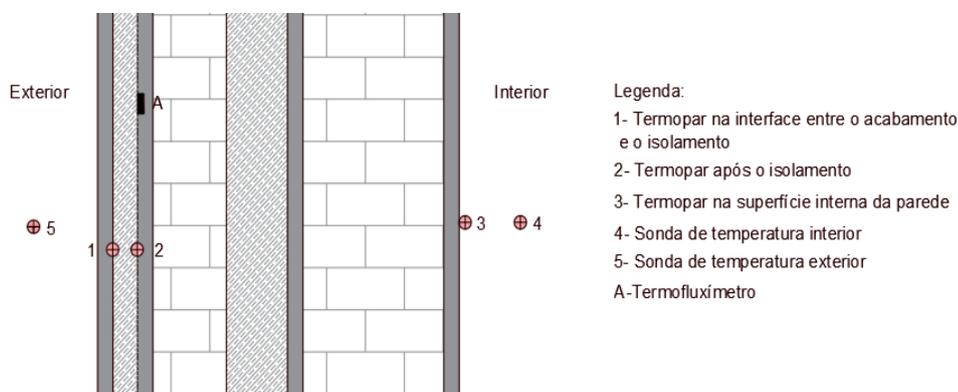


Figura 2.5 – Corte esquemático da parede de Referência com a localização dos equipamentos de medição.

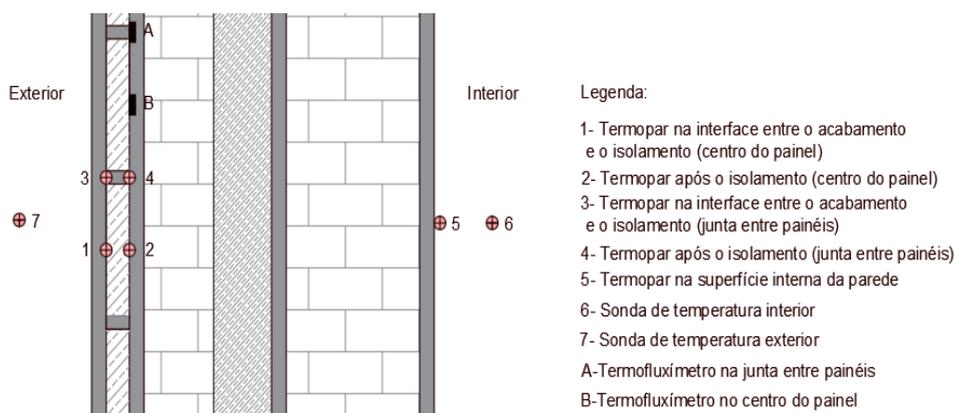


Figura 2.6 - Corte esquemático da parede com INNOVIP, com localização dos equipamentos de medição.

Uma vez que a transferência de calor se está a dar em regime transiente, os fluxos apresentam uma grande variabilidade. Como tal, o cálculo do valor de U para as paredes em estudo foi efetuado para os períodos em que a condutibilidade térmica equivalente da camada de INNOVIP, calculada com base nas medições e segundo a equação 2.4, mais se aproximou do valor medido em laboratório ($0,0075 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$). O cálculo do valor de U com base nos resultados das medições *in situ* foi feito com recurso à seguinte expressão:

$$U = \frac{q}{T_{in} - T_{out}}$$

onde q é o fluxo de calor que atravessa a parede [W/m^2], T_{in} e T_{out} são as temperaturas dos ambientes interior e exterior, respetivamente [$^\circ\text{C}$].

A figura 2.7 representa a camada de INNOVIP e os parâmetros usados no cálculo: as temperaturas medidas em cada um dos lados da camada, o fluxo de calor que a atravessa e a sua espessura.

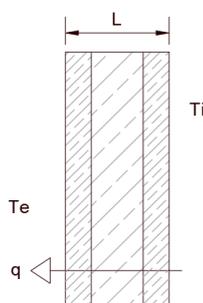


Figura 2.7 - Representação esquemática da camada de INNOVIP para cálculo da condutibilidade térmica equivalente.

A expressão que permite o cálculo é a seguinte:

$$\lambda = \frac{q}{(T_i - T_e)} * L \quad (2.4)$$

onde q é a densidade do fluxo de calor [W/m²], T_i e T_e são as temperaturas medidas no lado interior e exterior da camada de INNOVIP, respetivamente [°C] e L é a espessura da mesma [m].

Os equipamentos usados constam no quadro 2.4. O registo das leituras provenientes dos equipamentos de medição foi feito em intervalos de 5 minutos. Será feita a análise comparativa dos resultados das medições obtidos para ambas as paredes

Quadro 2.4 - Equipamentos usados na campanha experimental.

Equipamento	Descrição
Termopares do tipo T	Sensor termoelétrico usado para a medição de temperaturas.
Termofluxímetros	Servem para medir a densidade do fluxo de calor que atravessa um elemento construtivo.
Sondas de temperatura e humidade	Medição da temperatura e humidade relativa do ar.
<i>Data logger</i>	Aparelho de registo dos dados provenientes dos equipamentos de medição.

3 RESULTADOS

Apresentam-se, de seguida, os resultados obtidos. É feita a análise das temperaturas superficiais para ambos os casos de estudo e para ambas as estações: aquecimento e arrefecimento. Para o caso de estudo 1, é ainda possível a comparação entre as temperaturas superficiais obtidas e a temperatura sol-ar estimada.

É também apresentada a análise do risco de ocorrência de condensações superficiais exteriores para ambos os casos de estudo.

Para o caso de estudo 2, é feita uma análise comparativa entre os fluxos de calor registados e é calculado, com base nas medições *in situ*, o valor de U para ambas as paredes - Referência e com INNOVIP.

3.1 Caso de estudo 1

Apresentam-se de seguida os resultados das medições de temperatura superficial efetuadas em Coimbra. Os resultados são apresentados para cada uma das estações (aquecimento e arrefecimento). Efetuou-se também o cálculo da temperatura sol-ar para comparação com as temperaturas superficiais medidas.

O objetivo é tirar conclusões sobre o efeito da estação, da cor, da orientação e da radiação solar nas temperaturas superficiais bem como a análise dos valores registados para as diferentes soluções de isolamento.

3.1.1 Análise das temperaturas superficiais

São apresentados de seguida, a título de exemplo, os gráficos referentes às temperaturas superficiais registadas de acordo com a orientação para 6 dias da estação de aquecimento, de 2 a 7 de fevereiro de 2019 (gráficos 3.1 e 3.2) e arrefecimento, de 8 a 13 de julho de 2019 (gráficos 3.3 e 3.4).

Estes gráficos incluem também as curvas da temperatura sol-ar para comparação com as temperaturas superficiais registadas.

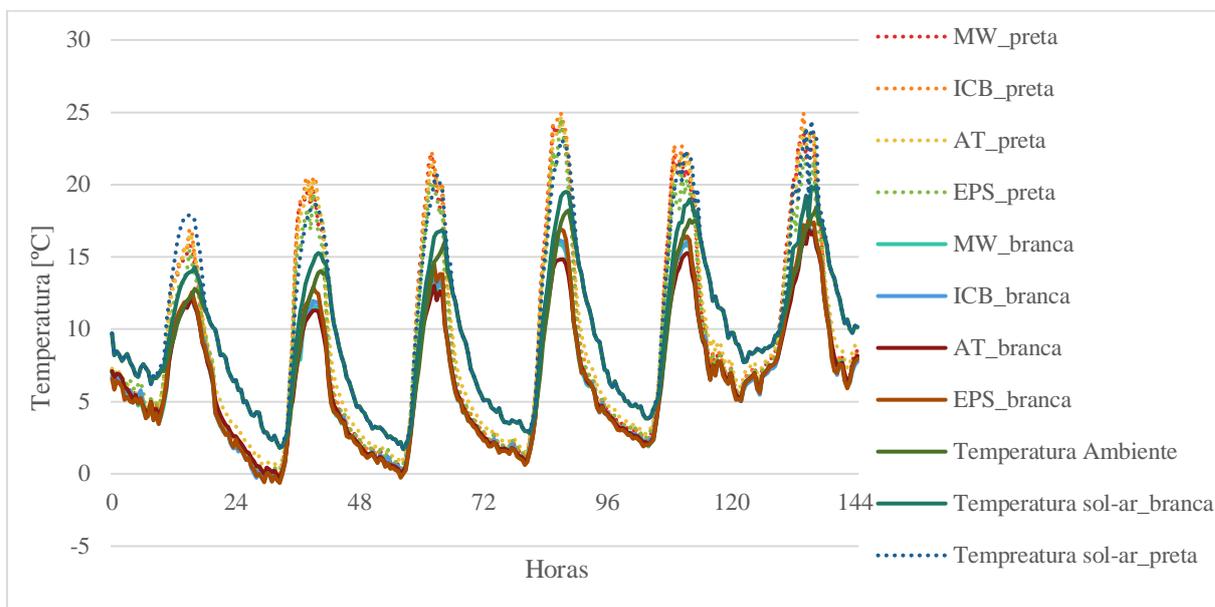


Gráfico 3.1 - Variação da temperatura ambiente, temperaturas superficiais e temperatura solar durante 6 dias da estação de **aquecimento** para ambas as paredes, para a orientação **norte**.

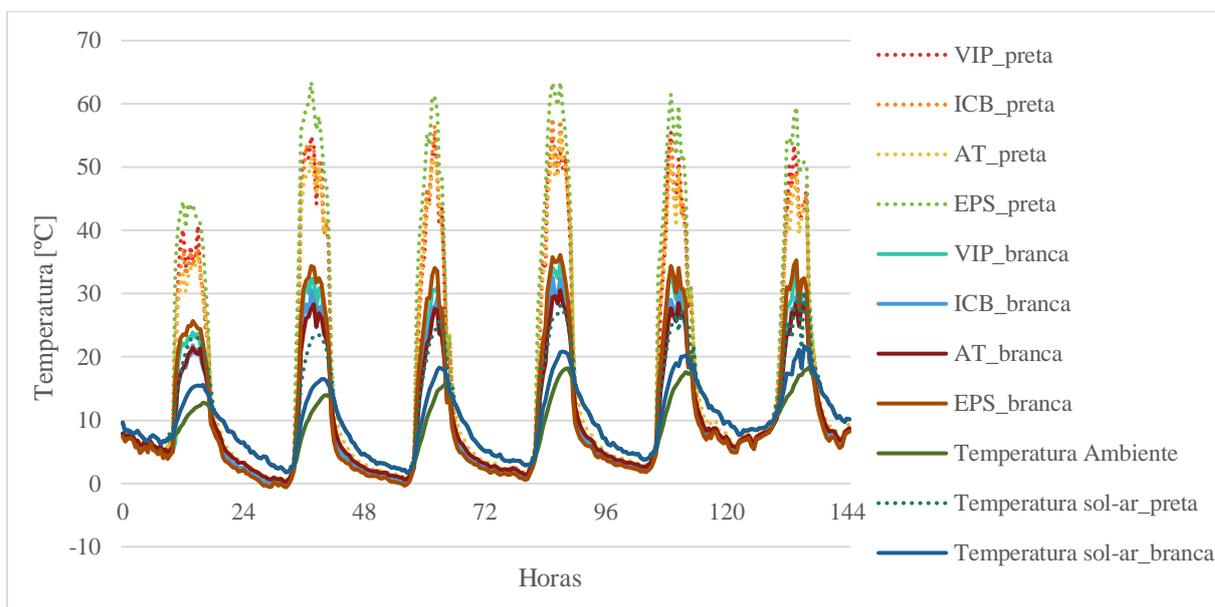


Gráfico 3.2 - Variação da temperatura ambiente, temperaturas superficiais e temperatura solar durante 6 dias da estação de **aquecimento** para ambas as paredes, para a orientação **sul**.

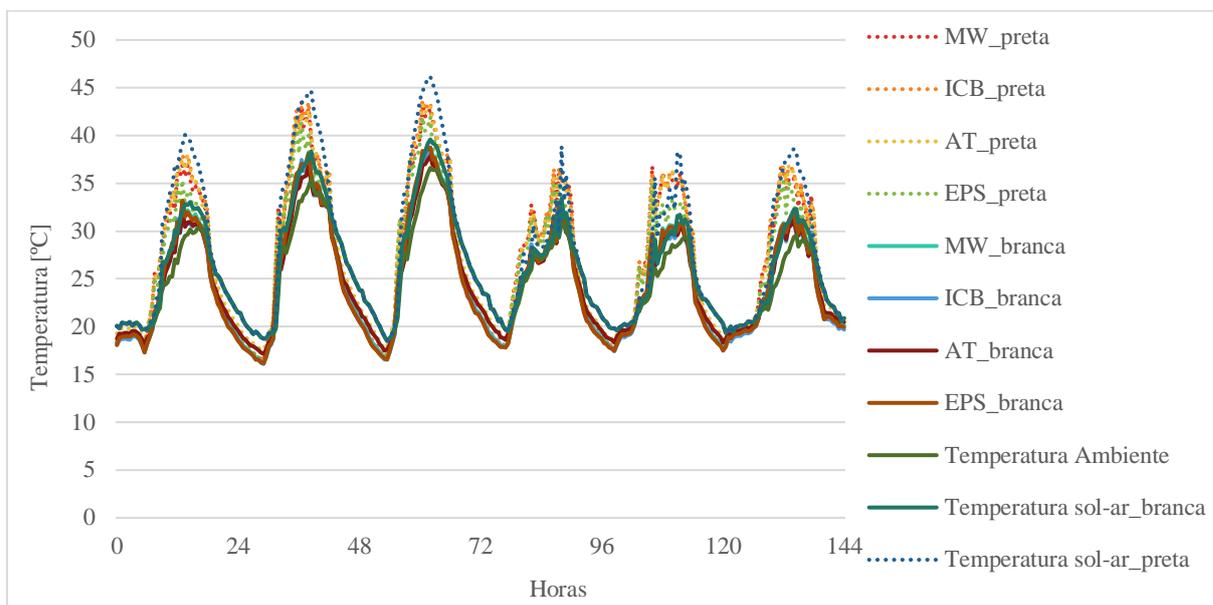


Gráfico 3.3 - Variação da temperatura ambiente, temperaturas superficiais e temperatura solar durante 6 dias da estação de **arrefecimento**, para ambas as paredes, para a orientação **norte**.

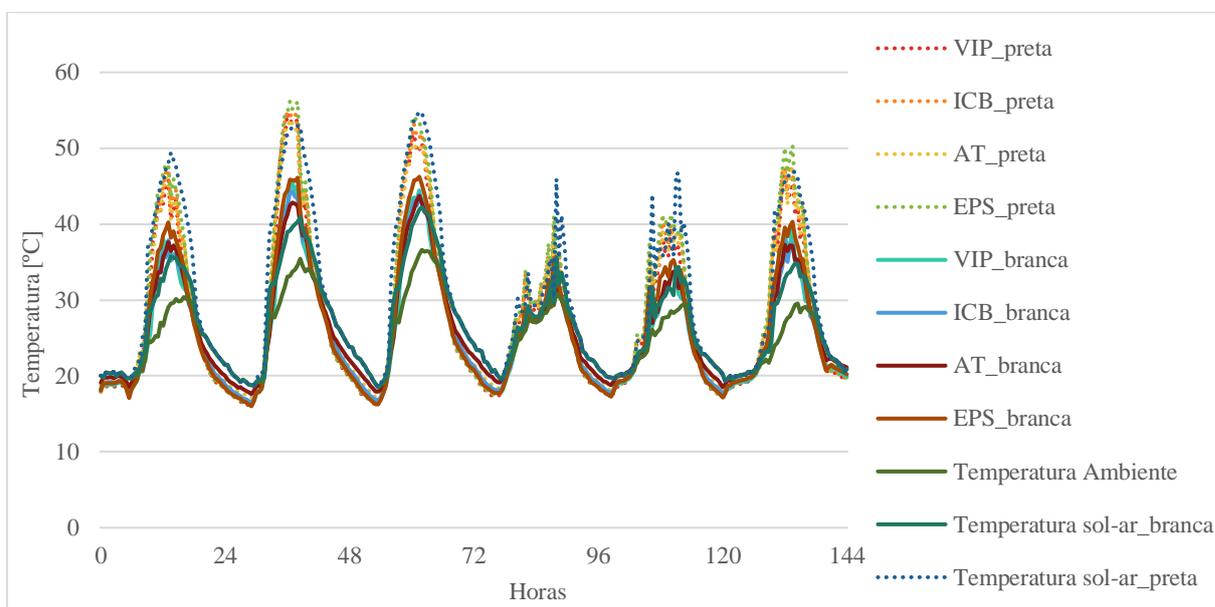


Gráfico 3.4 - Variação da temperatura ambiente, temperaturas superficiais e temperatura solar durante 6 dias da estação de **arrefecimento**, para ambas as paredes, para a orientação **sul**.

No gráfico 3.1, durante o período diurno, a temperatura sol-ar estimada, para a parede branca, é superior às temperaturas superficiais registadas. No caso da parede preta, a temperatura sol-ar acompanha melhor as curvas de temperatura superficial.

No gráfico 3.2, no período diurno, a temperatura sol-ar não se apresenta como uma boa aproximação às temperaturas superficiais medidas, uma vez que os seus valores são bastante inferiores aos valores de temperatura superficial medidos, tanto para a parede branca como para a parede preta.

Nos gráficos 3.3 e 3.4, as curvas de temperatura sol-ar acompanham as curvas das temperaturas superficiais medidas para ambas as paredes.

No período noturno, a temperatura sol-ar iguala a temperatura ambiente uma vez que a parcela correspondente à radiação solar é nula.

Da análise dos gráficos 3.1 a 3.4 podemos afirmar que a temperatura sol-ar é uma boa aproximação da temperatura superficial para a estação de arrefecimento.

Para uma análise mais pormenorizada das temperaturas superficiais registadas para cada tipo de isolamento, será apresentado e analisado um dia de cada estação: o dia 6 de fevereiro na estação de aquecimento e o dia 9 de julho na estação de arrefecimento.

Os gráficos 3.5 e 3.6 apresentam a evolução das temperaturas superficiais para um dia da estação de aquecimento para ambas as paredes nas faces sul e norte, respetivamente.

Cada gráfico inclui a curva da temperatura ambiente registada para o dia em estudo e as curvas que dizem respeito aos valores de radiação solar direta e difusa. No caso das superfícies orientadas a sul, a radiação solar direta tem maior influência nas temperaturas superficiais medidas. Nas superfícies orientadas a norte, apenas incide a radiação solar difusa.

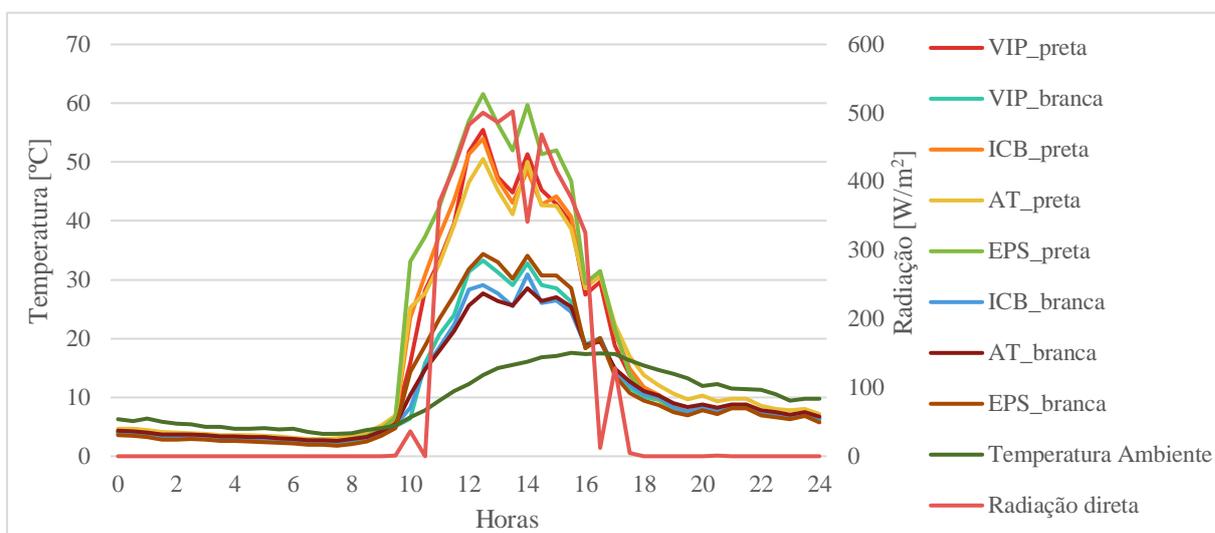


Figura 3.5 - Temperaturas superficiais medidas num dia da estação de **aquecimento**, para as superfícies orientadas a **sul**.

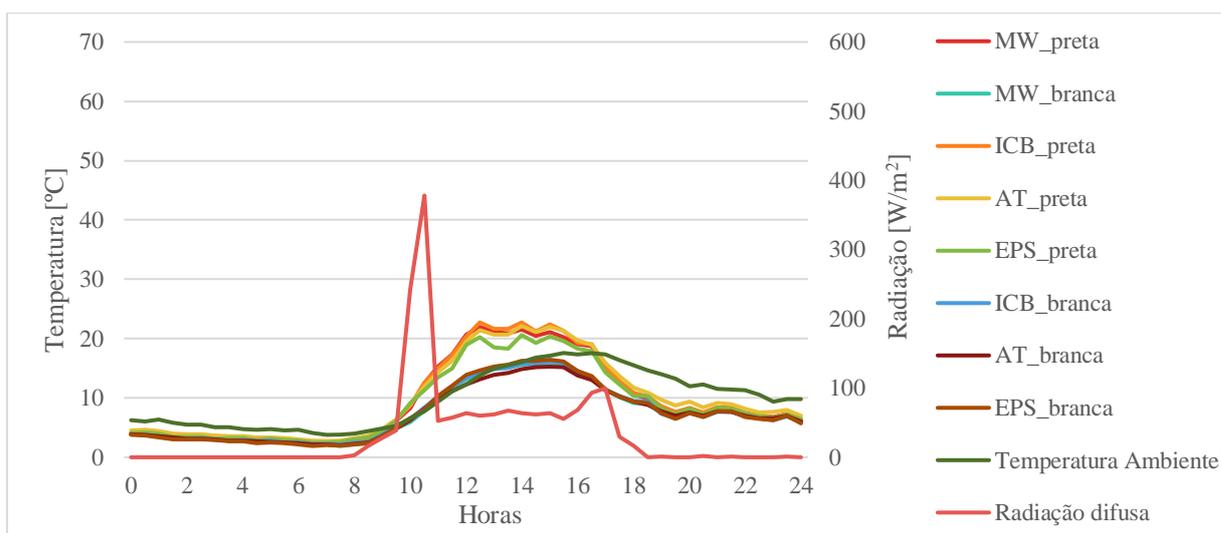


Gráfico 3.6 - Temperaturas superficiais para um dia da estação de **aquecimento** para as superfícies orientadas a **norte**.

Como seria de esperar, na parede preta as temperaturas superficiais são superiores às registadas na parede branca devido ao maior fator de absorção solar das cores escuras. As diferenças mais significativas entre a parede branca e a preta são registadas nas superfícies orientadas a sul, nas quais incide a radiação solar direta durante o dia.

No período noturno, sem influência da radiação solar, as temperaturas são bastante semelhantes independentemente da cor e da orientação. Nas faces orientadas a sul, as temperaturas superficiais, durante a noite, continuam a ser superiores às registadas nas faces orientadas a norte devido à maior temperatura a que estão sujeitas durante o dia.

Na superfície da parede branca orientada a norte, o baixo valor verificado para a radiação difusa não é suficiente para elevar os picos das temperaturas superficiais acima do pico da temperatura ambiente.

Nas superfícies orientadas a sul, tanto na parede branca como na preta, e na superfície da parede branca orientada a norte, as maiores temperaturas superficiais verificam-se para a solução EPS. Apenas na superfície da parede preta orientada a norte, o maior valor de temperatura superficial é registado para a solução ICB.

Os VIP apresentam temperaturas superficiais entre as temperaturas superficiais registadas para as soluções de EPS e ICB, aproximando-se mais da solução ICB.

Em ambos os gráficos, os picos de temperatura superficial estão desfasados dos picos de temperatura ambiente devido à influência da radiação direta nas superfícies orientadas a sul e difusa nas superfícies orientadas a norte.

São apresentados de seguida os gráficos que apresentam a evolução das temperaturas superficiais para um dia da estação de arrefecimento para ambas as paredes, e para as faces orientadas a sul (gráfico 3.7) e norte (gráfico 3.8), respetivamente.

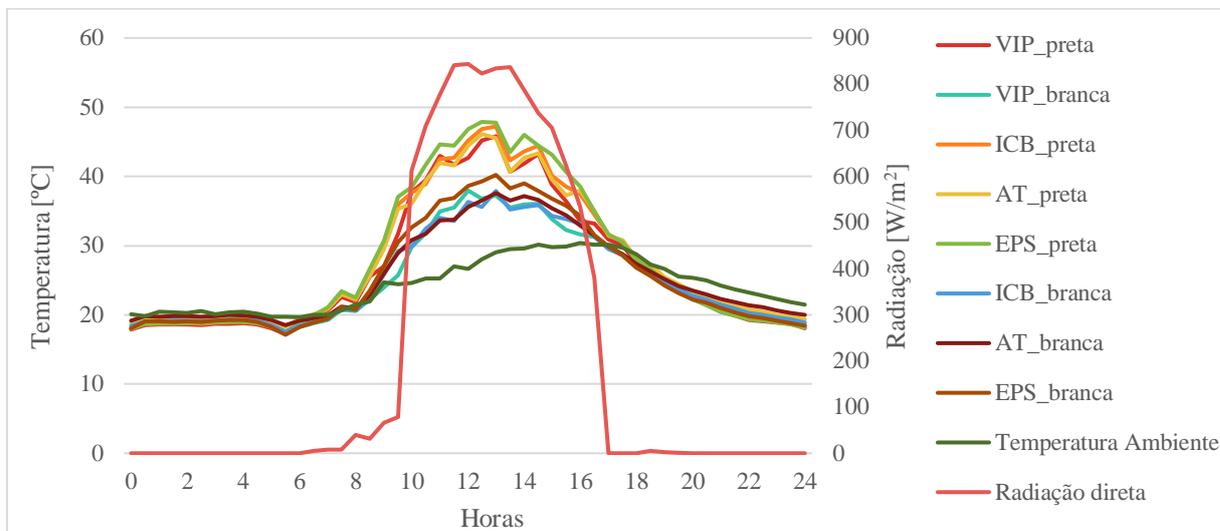


Gráfico 3.7 - Temperaturas superficiais para um dia da estação de **arrefecimento** para as superfícies orientadas a **sul**.

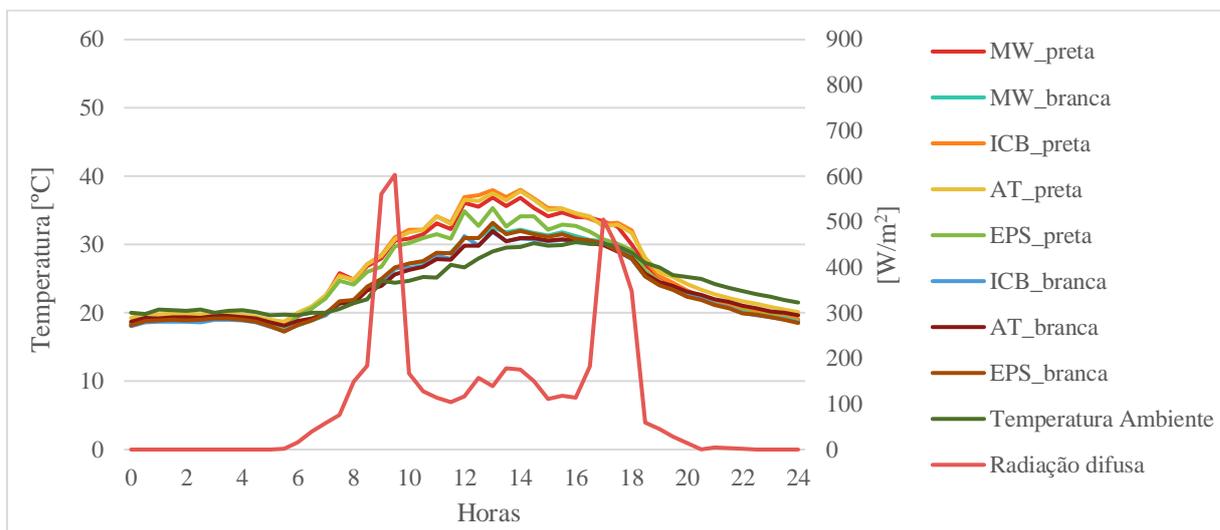


Gráfico 3.8 - Temperaturas superficiais para um dia da estação de **arrefecimento** para as superfícies orientadas a **norte**.

Para a estação de arrefecimento, a maior diferença face aos resultados obtidos para a estação de aquecimento, está na diminuição da discrepância entre as temperaturas da parede branca e preta, para ambas as orientações, devido ao aumento da temperatura ambiente.

Para efeitos de comparação das temperaturas superficiais entre ambos os casos de estudo, apresentam-se de seguida os gráficos referentes às temperaturas medidas entre o acabamento e o isolamento para ambas as estações nas soluções em comum: EPS e VIP, orientação sul e cor branca.

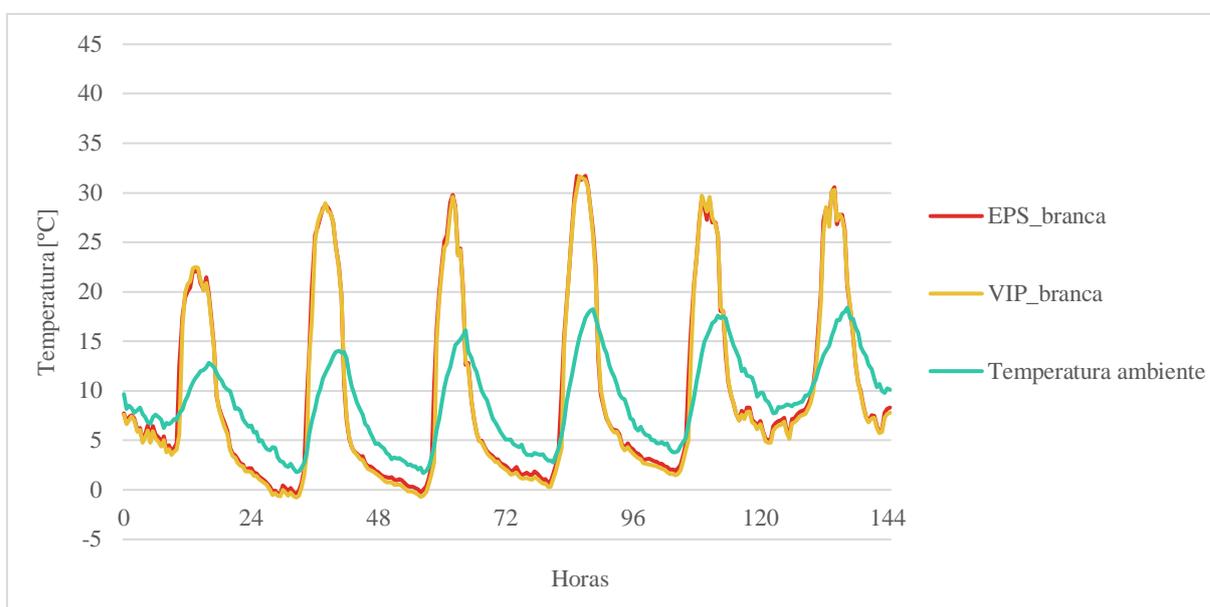


Gráfico 3.9 – Variação da temperatura ambiente e das temperaturas medidas na interface entre o acabamento e o isolamento durante 6 dias na estação de **aquecimento** nas soluções de EPS e VIP para a superfície **sul** da parede **branca**.

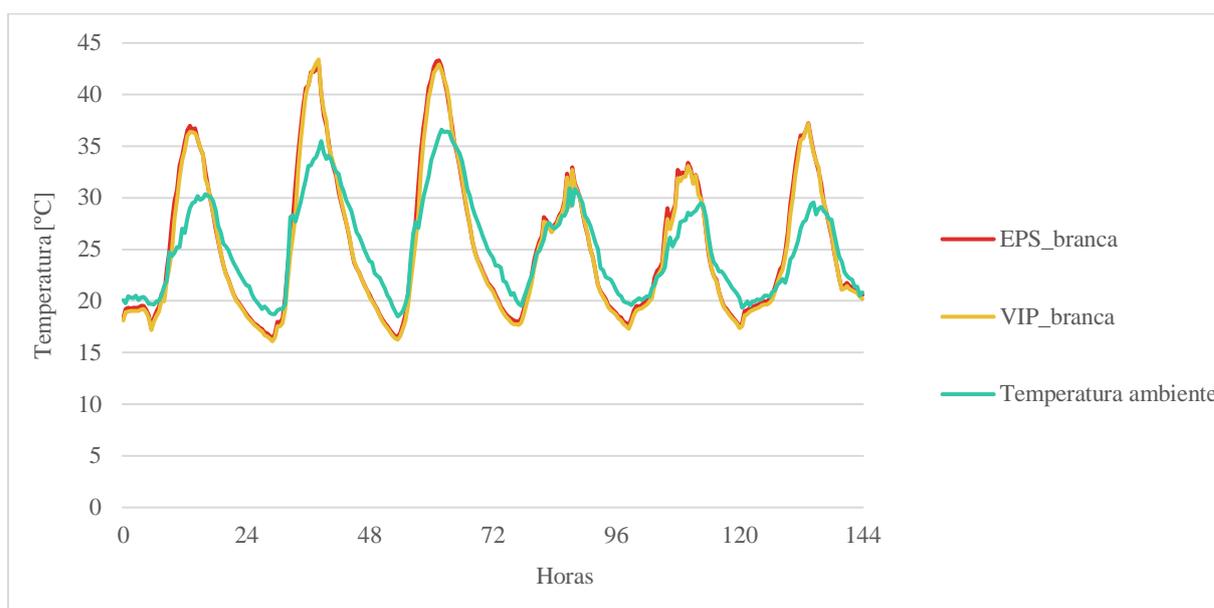


Gráfico 3.10 - Variação da temperatura ambiente e das temperaturas medidas na interface entre o acabamento e o isolamento durante 6 dias na estação de **arrefecimento** nas soluções de EPS e VIP para a superfície **sul** da parede **branca**.

As temperaturas registadas, em ambas estações, para o EPS e VIP são bastante semelhantes. Apenas no período noturno, há uma maior diferença, atingindo o VIP temperaturas sempre inferiores ao EPS para a estação de aquecimento. Nessa estação, a taxa máxima de arrefecimento chega aos 13 °C/h para o EPS e é ligeiramente inferior para o VIP, 12 °C/h (atingidas às 17h). Na estação de arrefecimento, estas taxas são muito inferiores, 5,1 °C/h para o EPS e 4,9 °C/h para o VIP (atingidas às 15h), uma vez que as amplitudes térmicas registadas nas temperaturas superficiais são também menores.

3.1.2 Análise do risco de ocorrência de condensações superficiais exteriores

Apresentam-se de seguida os gráficos que mostram a evolução das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho para ambas as orientações e durante os mesmos 6 dias da estação de aquecimento (gráficos 3.11 e 3.12) registadas para o clima de Coimbra. Nos dias analisados na estação de arrefecimento, não se verificou que as temperaturas superficiais tivessem descido abaixo da temperatura de orvalho, pelo que não serão apresentados os gráficos relativos a essa estação.

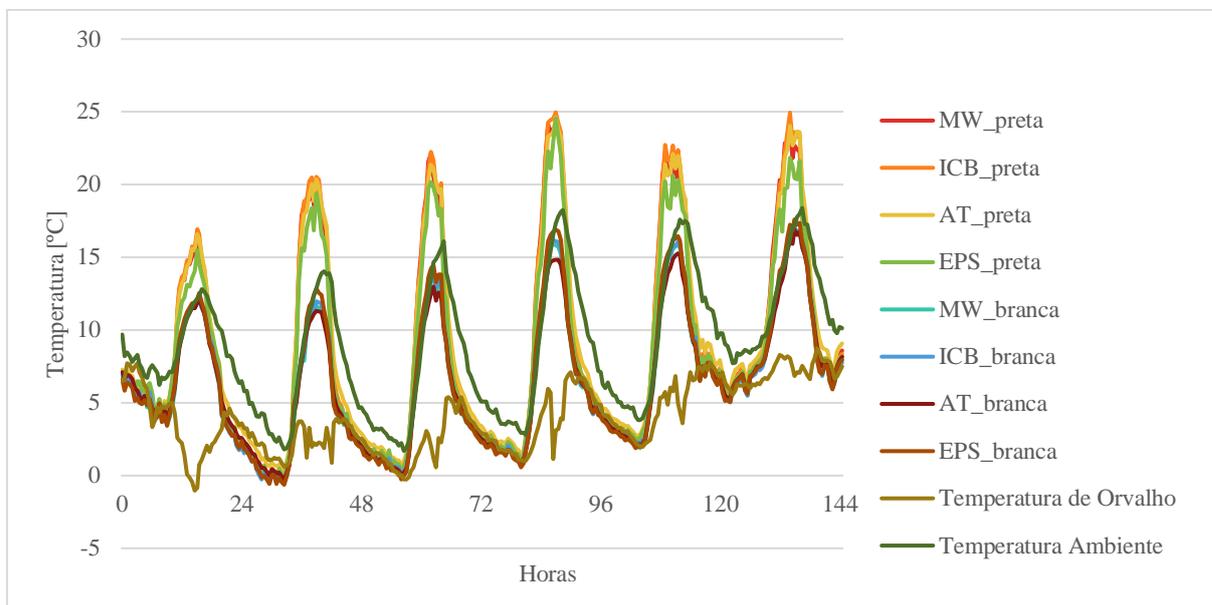


Gráfico 3.11 - Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho durante 6 dias da estação de **aquecimento** para ambas as paredes e para a orientação **norte**.

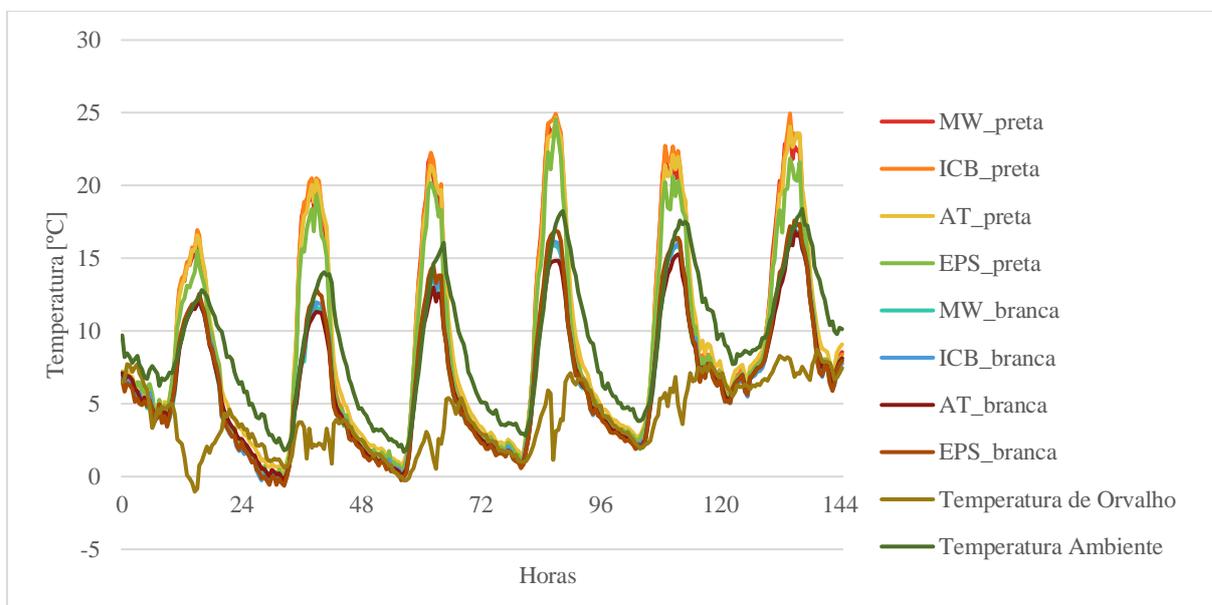


Gráfico 3.12 - Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho durante 6 dias da estação de **aquecimento** para ambas as paredes e para a orientação **sul**.

Para os 6 dias em estudo, a temperatura de orvalho manteve-se entre os -1 e 8,7 °C, pelo que facilmente, a temperaturas superficiais podem descer abaixo desta, no período noturno.

Para a comparação do risco de ocorrência de condensações superficiais entre as várias soluções de isolamento em ambas as paredes e para a orientação norte (gráfico 3.13) e sul (gráfico 3.14), seleccionou-se, a título de exemplo, um dia da estação de aquecimento, o dia 6 de fevereiro, e calculou-se o número de horas em que a temperatura superficial foi inferior à temperatura de orvalho.

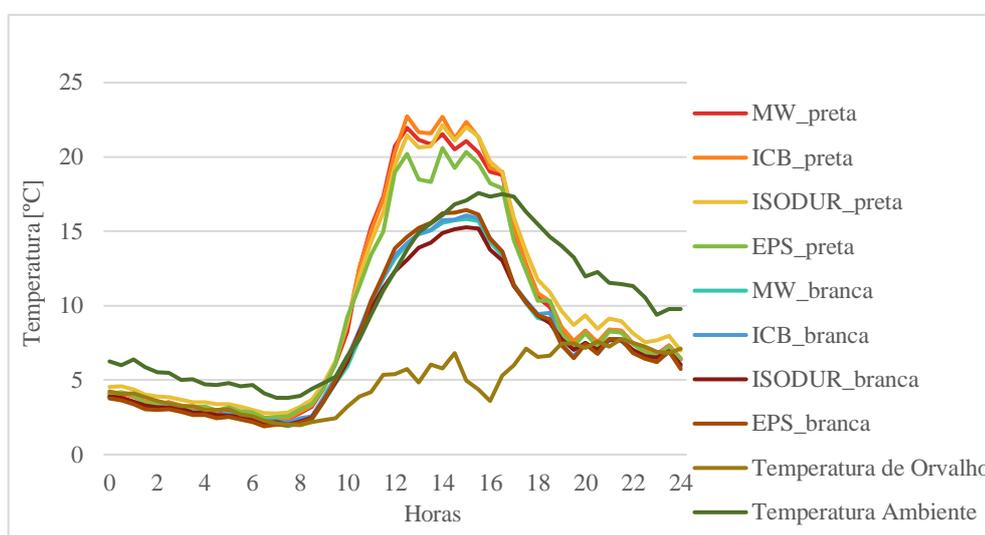


Gráfico 3.13 - Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho para um dia da estação de aquecimento para ambas as paredes e para a orientação **norte**.

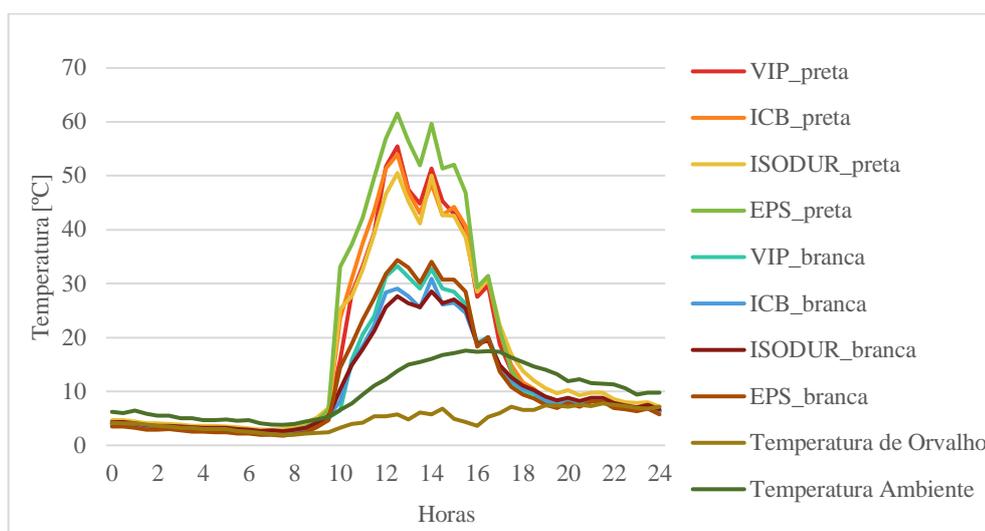


Gráfico 3.14 - Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho para um dia da estação de **aquecimento** para ambas as paredes e para a orientação **sul**.

Quadro 3.1 - Número de horas em que a temperatura superficial das diferentes soluções de isolamento foi inferior à temperatura de orvalho para um dia estação de aquecimento.

Parede Preta	Norte	Sul	Parede Branca	Norte	Sul
	MW	11		-	MW
ICB	10	12	ICB	13	12
AT	8	8	AT	14	9
EPS	11	12	EPS	14	14
VIP	-	11	VIP	-	13

A parede preta apresenta, em geral, uma menor propensão à ocorrência de condensações superficiais uma vez que atinge maiores temperaturas durante o dia.

No que diz respeito ao tipo de isolamento, a argamassa térmica é o que apresenta, no geral, menor risco de condensações superficiais devido à sua elevada capacidade de reter calor. Para o EPS e para o VIP, os resultados obtidos são muito idênticos, como seria de esperar uma vez que os VIP são revestidos externamente por uma camada de EPS.

Era, no entanto, de esperar que o risco de ocorrência de condensações superficiais fosse maior para as superfícies orientadas a norte, o que não se verifica para a parede preta.

Para a parede branca, o risco é ligeiramente superior para a orientação norte, especialmente para a solução de argamassa térmica, uma vez que este material de isolamento apresenta uma baixa resistência térmica.

3.2 Caso de estudo 2

Neste caso, para além da análise das temperaturas superficiais e do risco de ocorrência de condensações superficiais, é também possível avaliar os perfis de temperatura para ambas as paredes (Referência e com INNOVIP), uma vez que há a influência de um ambiente interior. É ainda calculado o coeficiente de transmissão térmica para as paredes em estudo.

3.2.1 Análise das temperaturas superficiais

Uma vez que neste caso não se procedeu à instalação de termopares na superfície externa das paredes, a análise das temperaturas superficiais será feita com recurso às temperaturas registadas entre o acabamento e o isolamento.

Os gráficos 3.15 e 3.16 representam as temperaturas entre o acabamento e o isolamento para a parede de Referência e para a parede com INNOVIP (no centro do painel e na junta entre painéis) durante 6 dias para as estações de aquecimento, de 5 a 10 de fevereiro de 2019, e arrefecimento, de 9 a 14 de julho, respetivamente.

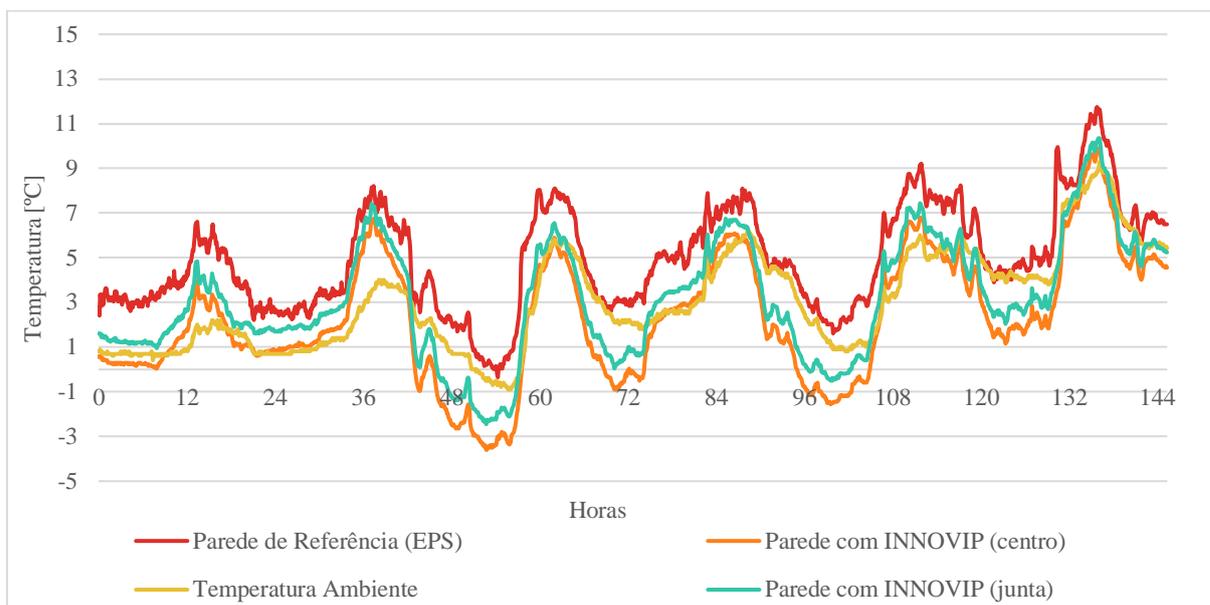


Gráfico 3.15 - Variação da temperatura ambiente e das temperaturas medidas durante 6 dias na estação de **aquecimento** na interface entre o acabamento e o isolamento nas paredes de Referência e com INNOVIP.

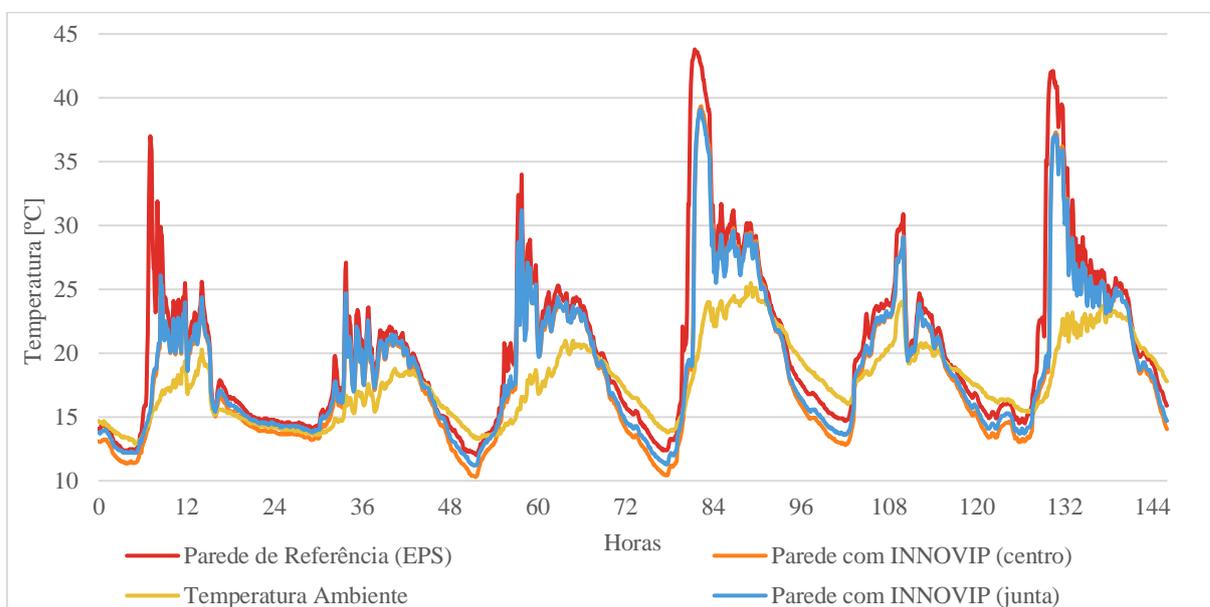


Gráfico 3.16 - Variação da temperatura ambiente e das temperaturas medidas durante 6 dias na estação de **arrefecimento** na interface entre o acabamento e o isolamento nas paredes de Referência e com INNOVIP.

Na estação de aquecimento, há uma maior diferenciação entre as temperaturas superficiais registadas em cada sensor, sendo que a parede de Referência é a que apresenta sempre temperaturas superiores. Isto pode dever-se à influência do ambiente interior (cuja temperatura é superior à temperatura interior no caso da parede com INNOVIP), aliada ao facto de esta parede ter um maior coeficiente de transmissão térmica, permitindo a passagem de um maior fluxo de calor. Mesmo no período noturno, a temperatura superficial é superior à ambiente. No caso da parede com INNOVIP, a temperatura medida na junta entre painéis é superior à medida no centro do painel uma vez permite a passagem de um maior fluxo de calor. No período noturno, o fluxo de calor que atravessa esta parede não é suficiente para manter a temperatura superficial acima da temperatura ambiente exterior. A taxa máxima de arrefecimento é de 3°C/h para a temperatura superficial da parede com INNOVIP medida no centro do painel, 2,5°C/h quando medida no centro do painel e 2 °C/h no caso da parede de Referência (atingidas às 19h).

Na estação de arrefecimento, embora as curvas de temperatura superficial sejam mais próximas, a parede de Referência continua a registar a temperatura mais elevada. No período noturno, as temperaturas superficiais são ligeiramente mais baixas que a temperatura ambiente em ambas as paredes. Neste caso, as taxas máximas de arrefecimento são de 10,6 °C/h para a parede de Referência, 9,4 °C/h para a parede com INNOVIP quando a temperatura superficial é medida no centro do painel e 9,2 °C/h quando é medida na junta entre painéis (atingidas às 13h). As taxas máximas de arrefecimento são superiores na estação de arrefecimento uma vez que, durante o dia, se atingem temperaturas elevadas devido à radiação solar, descendo rapidamente quando a influência desta diminui.

3.2.2 Análise do risco de ocorrência de condensações superficiais exteriores

Em Varsóvia, a comparação será feita entre a parede de Referência e com INNOVIP. As temperaturas superficiais usadas são, mais uma vez, as medidas entre o acabamento e o isolamento. O gráfico 3.17 mostra a variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho para a estação de aquecimento e o gráfico 3.18 mostra detalhadamente essas variações para o dia assinalado.

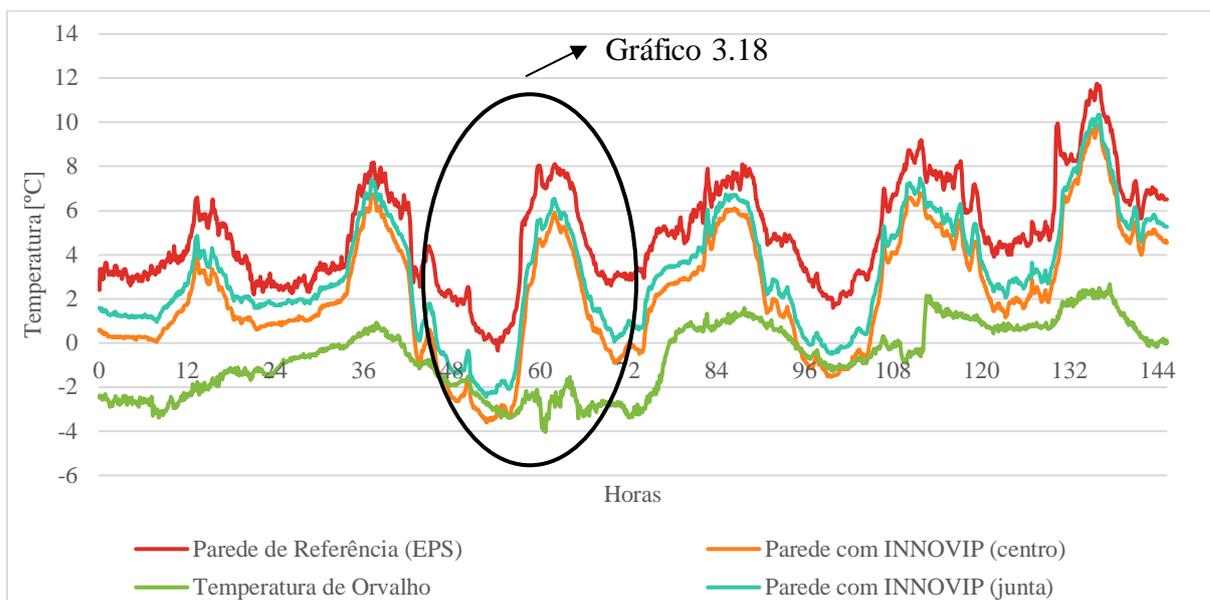


Gráfico 3.17- Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho durante 6 dias da estação de **aquecimento** para a parede de Referência e com INNOVIP.

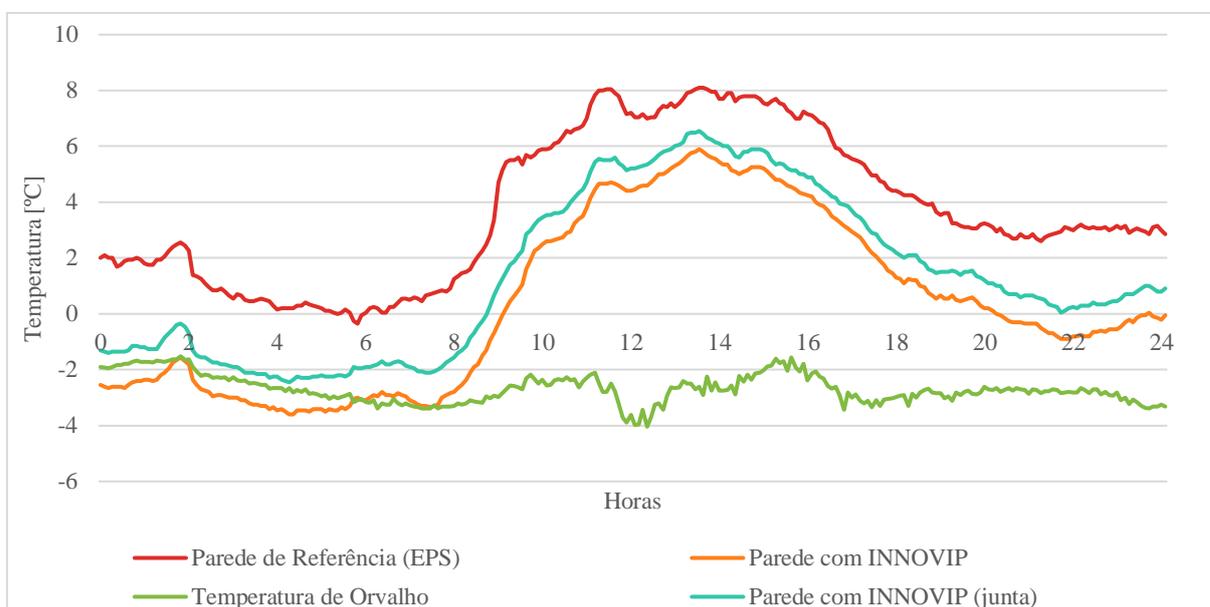


Gráfico 3.18 - Variação das temperaturas superficiais e da temperatura de orvalho para um dia da estação de **aquecimento** para a parede de Referência e INNOVIP.

Analisando o gráfico 3.17 percebe-se que a parede de Referência nunca apresenta risco de ocorrência de condensações superficiais. O mesmo não acontece para a parede com INNOVIP, devido à sua inferior temperatura superficial. Durante o dia da estação de aquecimento representado no gráfico 3.18 (7 de fevereiro), no qual a temperatura de orvalho variou entre -4°C e $-1,5^{\circ}\text{C}$, a parede com INNOVIP apresentou temperatura superficial inferior à temperatura de orvalho durante 6 horas, no período noturno, para o caso em que a temperatura foi medida no centro dos painéis. No caso em que a temperatura superficial foi medida na junta entre painéis, esta nunca foi inferior à temperatura de orvalho.

3.2.3 Análise dos fluxos de calor

Para a avaliação do desempenho térmico de ambas as paredes, é feita a análise dos perfis de temperatura e dos fluxos de calor que as atravessam, para a estação de aquecimento. É também efetuado o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica através do método teórico e através dos dados das medições efetuadas *in situ*.

O gráfico 3.19 apresenta a evolução dos fluxos de calor, durante os mesmos 6 dias da estação de aquecimento, para as paredes de Referência e com INNOVIP.

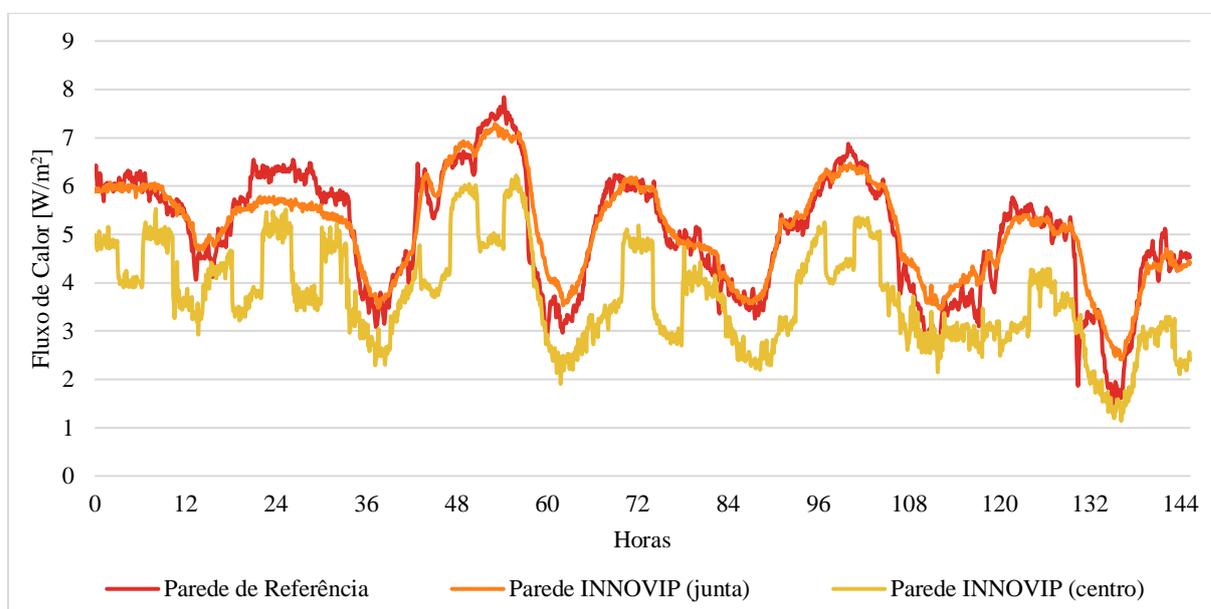


Gráfico 3.19 - Variação dos fluxos de calor registados para as paredes de Referência e INNOVIP durante 6 dias da estação de aquecimento.

Há, uma vez mais, semelhanças entre os resultados obtidos para a parede de Referência e com INNOVIP na junta entre painéis, uma vez que, em ambos os casos, o material de isolamento em causa é o EPS. Da análise do gráfico percebe-se que os menores valores de fluxo se obtêm para a parede com INNOVIP, medido no centro do painel, como expectável. No entanto, e ao contrário das restantes curvas, esta apresenta quebras anormais de fluxo. Estas podem dever-se a limitações dos sensores ou dos equipamentos.

Apresentam-se de seguida os gráficos referentes aos perfis de temperatura registados para a parede de Referência (gráfico 3.20) e com INNOVIP (gráfico 3.21).

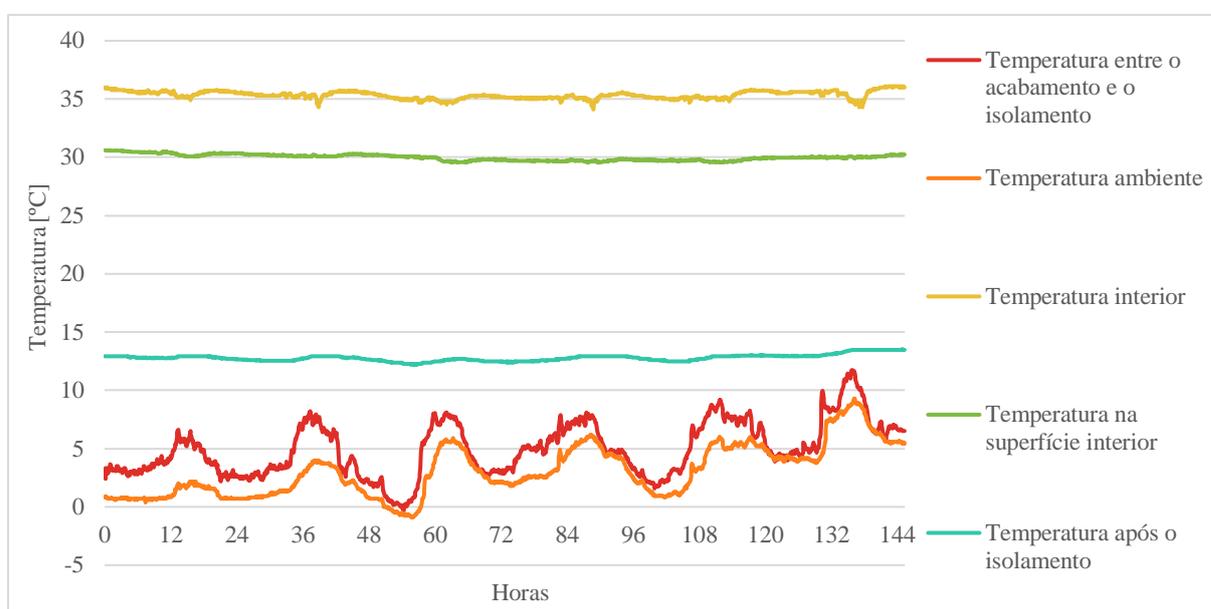


Gráfico 3.20 - Variação do perfil de temperaturas ao longo da parede de Referência para 6 dias da estação de **aquecimento**.

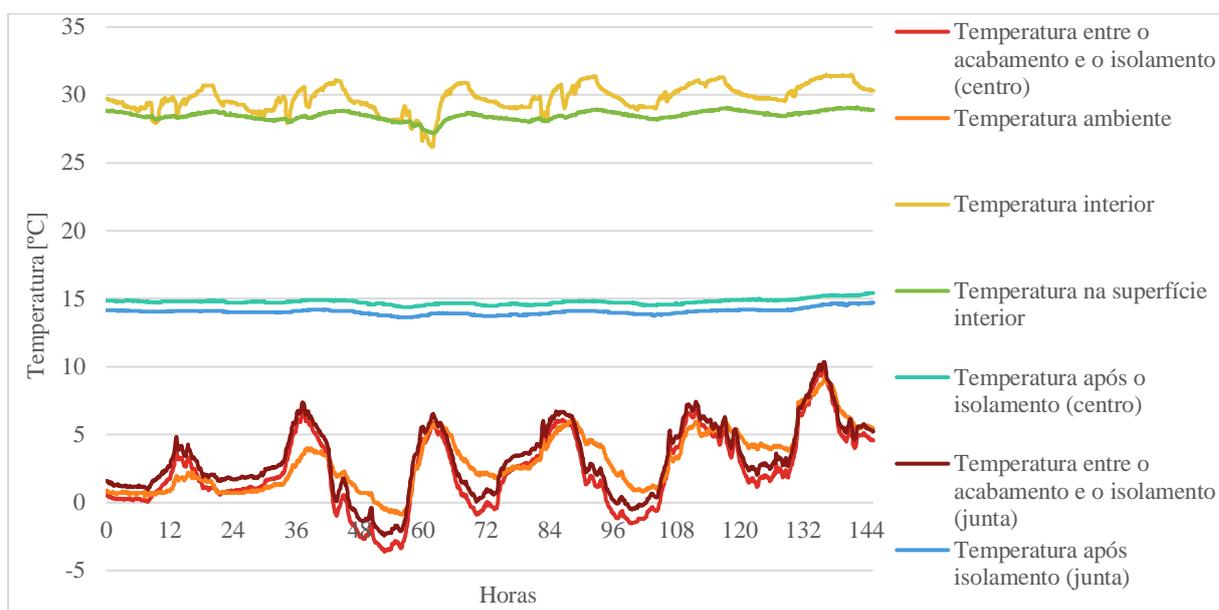


Gráfico 3.21 - Variação do perfil de temperaturas ao longo da parede com INNOVIP para 6 dias da estação de **aquecimento**.

A temperatura dos ambientes interiores apresenta ligeiras oscilações. Estas são mais evidentes para a parede com INNOVIP.

A temperatura registada na interface entre o acabamento e o isolamento, na parede de Referência, é sempre superior à temperatura ambiente, ao contrário do que acontece na parede com INNOVIP, o que indica a passagem de um maior fluxo de calor através da parede de Referência (o que é comprovado pela análise do gráfico 3.19). Como tal, a temperatura medida após o isolamento é superior na parede com INNOVIP comparando com a parede de Referência, apesar de a temperatura do seu ambiente interior ser menor.

A diferença registada entre a temperatura interior e a temperatura da superfície, no caso da parede de Referência, é superior ao que seria de esperar.

Após ter sido realizada uma visita ao edifício monitorizado, percebeu-se que esta diferença registada se devia à influência de tubagens de água quente perto do sensor de temperatura superficial e da sonda de temperatura ambiente. Alterou-se a localização do sensor e da sonda e obtiveram-se os resultados apresentados no gráfico 3.22. Estas medições foram realizadas na estação de aquecimento, durante 6 dias, de 23 a 28 de dezembro de 2019.

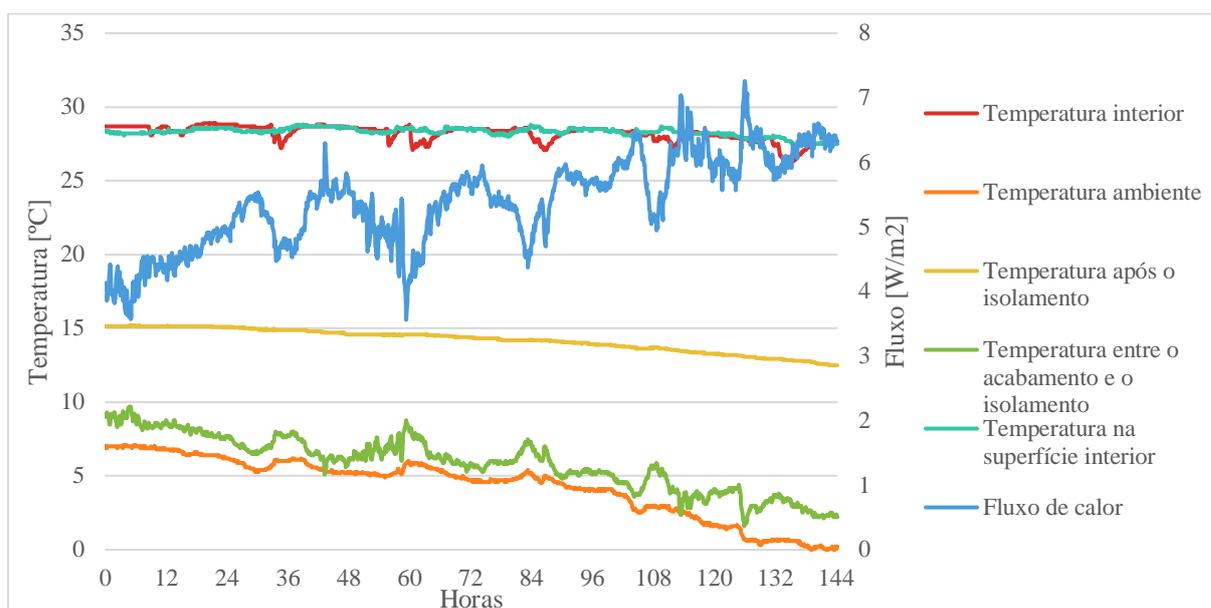


Gráfico 3.22 - Variação do perfil de temperaturas ao longo da parede com INNOVIP para 6 dias da estação de **aquecimento (após correção do sensor e da sonda)**.

Como era de esperar, após a alteração da localização do sensor e da sonda, a temperatura do ambiente interior e da superfície interior medidas aproximam-se.

3.2.4 Cálculo do coeficiente de transmissão térmica

Tal como referido no capítulo anterior, o cálculo do valor de U para as paredes em estudo foi efetuado para os períodos em que a condutibilidade térmica equivalente da camada de INNOVIP, calculada com base nas medições *in situ*, mais se aproximou do valor medido em laboratório (0,0075 W/m.°C).

O gráfico 3.23 apresenta a variação dos fluxos de calor, das temperaturas dos ambientes interiores e da temperatura do ambiente exterior para os 6 dias da estação de aquecimento em estudo. Os períodos 1 e 2 verificaram-se ao entardecer, entre as 17h e as 19h e os períodos 3 e 4 encontram-se no período noturno, entre as 22h e a 1h.

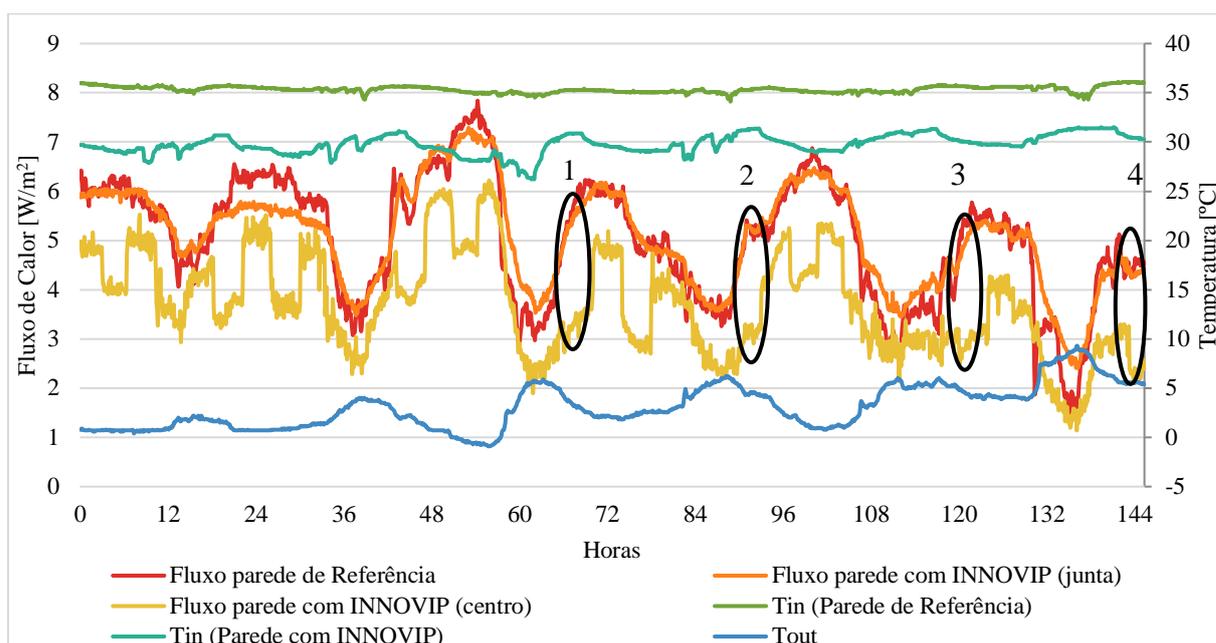


Gráfico 3.23 - Curvas de fluxo e temperatura dos ambientes interiores e exterior para a parede de Referência e com INNOVIP durante 6 dias da estação de aquecimento.

Quadro 3.2 – Valores obtidos para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica *in situ* e segundo a ISO 6946.

Período	Coeficiente de Transmissão Térmica [$W/m^2\text{°C}$]		
	Parede de Referência	Parede com INNOVIP	
		Centro	Junta
1	0,166	0,109	0,191
2	0,144	0,096	0,167
3	0,170	0,110	0,193
4	0,147	0,093	0,175
ISO 6946	0,196	0,109	0,159

Da análise do quadro 3.2 percebe-se que os valores obtidos *in situ* são bastante diferentes dos obtidos segundo a ISO 6946. Esta diferença pode dever-se, por exemplo, ao facto de as espessuras e as condutibilidades térmicas dos materiais constituintes das paredes poderem ser diferentes das admitidas no cálculo ou devido à presença de humidade nos materiais.

Os valores mais próximos são obtidos para a parede com INNOVIP, no centro dos painéis uma vez que a camada preponderante no cálculo é a camada de INNOVIP cuja espessura e resistência térmica são conhecidas.

Na junta entre painéis, o valor obtido *in situ* é superior ao obtido pelo método teórico uma vez que este método admite que o fluxo de calor é unidimensional, o que não se verifica em zonas de ponte térmica, onde o fluxo de calor é bidimensional.

O contrário acontece para a parede de Referência, obtendo-se um valor teórico superior aos obtidos *in situ*.

Efetuuou-se o cálculo do valor de U para a parede de Referência, após terem sido recolocados os equipamentos de medição. Perante os dados disponíveis, ou seja, temperatura do ambiente interior, exterior e fluxo de calor através da parede, calculou-se o valor médio de U para os 6 dias da estação de aquecimento em estudo, obtendo-se o valor de $0,216 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. Este valor é mais próximo do valor teórico do que os valores obtidos anteriormente.

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No presente capítulo resumem-se as conclusões obtidas ao longo deste trabalho e apresentam-se propostas de trabalhos futuros.

A análise dos resultados obtidos durante a campanha experimental permite tirar várias conclusões:

Caso de estudo 1

- A temperatura sol-ar permite obter uma boa aproximação da temperatura superficial apenas para a estação de arrefecimento;
- Como seria de esperar, as superfícies orientadas a sul apresentam maiores temperaturas superficiais do que as orientadas a norte devido à incidência da radiação solar direta. O mesmo acontece para as superfícies de cor preta em comparação com as de cor branca devido ao maior coeficiente de absorção da radiação solar das cores escuras;
- A temperatura superficial atingida pelos VIP é muito semelhante à atingida na superfície com EPS, uma vez que é este o material que os reveste;
- A cor da parede é mais preponderante no risco de ocorrência de condensações superficiais do que a orientação uma vez que se consegue definir um padrão diferenciador entre a cor branca e preta e não entre a orientação norte e sul;

Caso de estudo 2

- A temperatura superficial atingida na parede de Referência é superior à atingida na parede com INNOVIP uma vez que a temperatura do seu ambiente interior é maior, aliando-se o facto de esta ter um coeficiente de transmissão térmica também superior. Como consequência, a parede de Referência não apresenta temperaturas superficiais abaixo da temperatura de orvalho durante os dias em estudo, não apresentando o risco de ocorrência de condensações superficiais. Já a parede com INNOVIP apresenta intervalos no período noturno nos quais a temperatura superficial é inferior à de orvalho;
- A curva de fluxo de calor que atravessa a parede de Referência é muito semelhante à curva de fluxo obtida para a parede com INNOVIP na junta entre painéis, uma vez que têm o mesmo material de isolamento- EPS.
- A curva de fluxo obtida para a parede com INNOVIP no centro do painel apresenta valores inferiores às supracitadas, devido ao menor coeficiente de transmissão térmica. No entanto, esta curva apresenta quebras anormais de fluxo, que não se verificam nas outras duas curvas.

- Note-se que os valores obtidos *in situ* variam bastante, principalmente para a parede de Referência, não dando robustez aos resultados. No entanto, comparando os resultados obtidos pelo método teórico, é notória a redução do coeficiente de transmissão térmica alcançada através do uso dos VIP.
- O cálculo do valor teórico do coeficiente de transmissão térmica para a parede com INNOVIP (centro dos painéis) indica uma diminuição de cerca de 44 % em relação à parede de Referência e consequentemente uma diminuição do fluxo de calor após a colocação dos painéis de INNOVIP;
- O facto de o valor teórico de U obtido para a parede com INNOVIP, na junta entre painéis, ser cerca de 46% superior ao valor teórico calculado para o centro do painel, reforça a necessidade de haver um isolamento adicional nas juntas, para que estas soluções sejam ainda mais eficientes.

4.1 Trabalhos futuros

A aplicação de Painéis de Isolamento a Vácuo como solução de isolamento no setor dos edifícios é relativamente recente, pelo que é de máxima pertinência o estudo dos mesmos de modo a que se tornem uma alternativa viável aos materiais de isolamento tradicionais.

De modo a dar continuidade ao trabalho desenvolvido nesta dissertação, recomenda-se a realização de ensaios experimentais de modo a obter um estudo mais abrangente do comportamento dos VIP em aplicações reais.

O isolamento térmico em sistemas ETICS propicia as condensações superficiais exteriores uma vez que diminui a inércia térmica das camadas de revestimento exterior. Este fenómeno pode ser agravado quando se integram, em sistemas ETICS, materiais super isolantes. Deste modo, deve estudar-se a aplicação destas soluções de modo a reduzir o risco de ocorrência de condensações superficiais, nomeadamente a aplicação de revestimento com alto coeficiente de absorção da radiação solar e em orientações favoráveis, preferencialmente a sul.

De modo a obter um desempenho térmico melhorado nestas soluções de isolamento, deve proceder-se ao preenchimento dos espaços de ar existentes nas juntas entre painéis, de modo a reduzir as pontes térmicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEA@ (2020). <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/en01-energy-and-non-energy>. Agência Europeia do Ambiente (página internet oficial), Copenhaga.

APFAC (2014). “Patologias de sistemas de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS”. Associação Portuguesa dos Fabricantes de Argamassas e ETICS, Coimbra.

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 & Buildings*, Vol. 42, Issue 2, pp. 147–172.

Barreira, E., Freitas, V. P. (2013). “Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)”. *Building and Environment*, Vol. 63, pp. 31-39.

Barreira, E., Freitas, V. P. (2016). "External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS): An Evaluation of Hygrothermal Behaviour". Springer.

Climatedata@ (2019). <https://www.climatedata.eu>.

Comissão Europeia@ (2020). https://ec.europa.eu/knowledge4policy/foresight/topic/continuing-urbanisation/developments-and-forecasts-on-continuing-urbanisation_en. Comissão Europeia (página internet oficial), Bruxelas.

Comissão Europeia. (2012). “The roadmap for transforming the EU into a competitive, low-carbon economy by 2050. The 2050 low-carbon economy roadmap in a nutshell”. Comissão Europeia, Bruxelas.

Despacho n.º 15793-F/2013. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia – Direção Geral de Energia e Geologia, Lisboa.

DGEG@ (2020). <http://www.dgeg.gov.pt/default.aspx?cn=636364486449AAAAAAAAAAAAAA> . Direção Geral de Energia e Geologia (página internet oficial), Lisboa.

DGGE (2004). “Reabilitação energética da envolvente de edifícios residenciais”. Direção Geral de Geologia e Energia, Lisboa.

EOTA (2013). “Guideline For European Technical Approval Of External Thermal Insulation Composite Systems (Etics) With Rendering- ETAG 004”. European Organisation for Technical Approvals, Bruxelas.

Fantucci, S., Lorenzati, A., Capozzoli, A., Perino, M. (2019). “Analysis of the temperature dependence of the thermal conductivity in Vacuum Insulation Panels”. *Energy & Buildings*, Vol 183, pp 64-74.

Ficha Técnica EPS. Contact Group @ (2019). http://sistemaintegrado.fassabortolo.pt/fichas-tecnicas/EPS%20100_FT.pdf.

Ficha Técnica ICB. Erodor @ (2019). <https://www.erodor.co.il/uploadfiles/73.pdf?fbclid=IwAR0YxT84pjqn9rIGY250Y2j2BbTVaL3EgBeljiMs2cO2XCxRt9XUSLXDRjI>.

Ficha Técnica ISODUR. Secil@ (2019). https://www.secilargamassas.pt/uploads/documentos/Ficha_Tecnica_ISODUR.pdf?fbclid=IwAR1XyktPxWGLNufatiB10fBZ29q-jS2KJywJIYshATGI2iWdkggnS1HGG7U.

Ficha Técnica MW. Vimark @ (2019). https://www.vimark.com/wp-content/uploads/2015/09/COVER_STONE_WOOL_0116_ENG.pdf.

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*, Vol 257, Article 114028.

IPMA@ (2019a). <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/>. Instituto Português do Mar e da Atmosfera (página internet oficial), Lisboa.

IPMA@ (2019b). <https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1971-2000/>. 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”. *Energy Procedia*, Vol. 83, pp. 269–278.

ISO 6946 (2015). “Building components and building elements - thermal resistance and thermal transmittance - calculation methods”. International Organization for Standardization.

Pina dos Santos, C. A., Matias, L. (2006). “Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios - ITE50”, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Kalnæs, S. E., Jelle, B. P. (2014). “Vacuum insulation panel products : A state-of-the-art review

and future research pathways". *Applied Energy*, Vol. 116, pp. 355–375.

Kim, J. H., Boafó, F. E., Kim, S. M., Kim, J. T. (2017). "Aging performance evaluation of vacuum insulation panel (VIP)". *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 7, pp. 329–335.

Mandilaras, I., Atsonios, I., Zannis, G., Founti, M. (2014). "Thermal performance of a building invólucro incorporating ETICS with vacuum insulation panels and EPS". *Energy & Buildings*, Vol. 85, pp. 654–665.

Meersman, G. D., Bossche, N. V. D., Janssens, A. (2015). "Long term durability of Vacuum Insulation Panels : determination of the Sd-value of MF-2 foils". *Energy Procedia*, Vol. 78, pp. 1574–1580.

Simmler, H., Brunner, S. (2005). "Vacuum insulation panels for building application: Basic properties, aging mechanisms and service life". *Energy & Buildings*, Vol. 37, Issue 11, pp. 1122–1131.

Simmler, H., Brunner, S., Heinemann, U., Schwab, H., Kumaran, K., Mukhopadhyaya, P., Quénard, D., Sallée, H., Noller, K., Küçükpinar-Niarchos, E., Stramm, C., Tenpierik, M., Cauberg, H., Erb, M. (2005). "Vacuum Insulation Panels. Study on VIP components and Panels for Service Life Prediction in Building Applications (Subtask A)". Final Report for the IEA/ECBCS Annex 39 HiPTI-project (High Performance Thermal Insulation for Buildings and Building Systems).

Tenpierik, M. J. (2010). "Vacuum Insulation Panels Applied in Building Constructions". Tese de Doutorado, Department of Architectural Engineering and Technology of the University of Delft, Delft.

Wegger, E., Jelle, B. P., Sveipe, E., Grynning, S., Gustavsen, A., Baetens, R., Thue, J. V. (2010). "Aging effects on thermal properties and service life of vacuum insulation panels". *Journal of Building Physics*, Vol. 32, Issue 2, pp. 128-167.

WMO@ (2019). <http://cpdb.wmo.int/poland>. World Meteorological Organization (página internet oficial), Geneva.

Zimmermann, M., Bertschinger, H. (2001). "High Performance Thermal Insulation Systems, Vacuum Insulated Products (VIP)". Proceedings of the International Conference and Workshop EMPA Duebendorf, January 22-24.