



Diogo Geraldo Ferreira Pinheiro **Comportamento térmico e energético de edifícios com BIO-PCMs**



Diogo Geraldo Ferreira Pinheiro **Comportamento térmico e energético de edifícios com BIO-PCMs**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Romeu da Silva Vicente, Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação científica do Professor Doutor Ricardo Almeida, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu.

À memória das minhas avós

o júri

presidente

Professor Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Doutora Sandra Cristina Alves Pereira da Silva Cunha

Professora Auxiliar da Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro (arguente)

Professor Doutor Romeu da Silva Vicente

Professor Associado da Universidade de Aveiro (orientador).

agradecimentos

Começo por agradecer aos meus orientadores científicos Professor Doutor Romeu Vicente e Professor Doutor Ricardo Almeida pelo encorajamento, pelo apoio incessante e pelas orientações essenciais para a concretização desta dissertação.

Aos Engenheiros Cláudia Amaral, Tiago Silva e Rui Oliveira a infinita disponibilidade e dedicação a este trabalho foram um contributo imenso para o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço também ao Departamento de Engenharia Civil e a todos os seus docentes e funcionários. À Universidade de Aveiro e a Aveiro por me terem acolhido na fase mais importante da minha vida.

Aos colegas de casa que durante esta jornada se tornaram na minha principal família. Obrigado Cristofe, Fred, Pataco, Pica e Samuel pelos momentos partilhados.

Ao grupo fantástico de amigos que tenho, por todo apoio e amizade demonstrados, foram essenciais tanto no meu percurso escolar e académico, como também na pessoa que sou hoje. Agradeço aos meus companheiros de sempre que sem eles esta etapa não teria tido o mesmo sabor, principalmente à Chica, Inês, Regina, Rita, Sara, Silvério, Fábio, Flávio, Joel, Pina, Princesa, Rocha, Roldão, Telmo, Zero, entre outras pessoas importantes a nível pessoal.

Por último, mas não menos importante, um agradecimento especial aos meus pais, à minha irmã e a toda a minha família, pela forma como me acompanharam, ajudaram e motivaram durante o meu percurso académico, sobretudo à minha Tia Cinda e ao meu Tio Carlos pelo carinho e ajuda prestada sempre que necessária.

A todos o meu muito OBRIGADO!

palavras-chave

Material de mudança de fase (PCM), Calor latente, Eficiência energética, Comportamento térmico, Armazenamento de energia, HotBox e Condutibilidade térmica equivalente.

resumo

O aparecimento da crise energética mundial pôs em causa o crescimento económico mundial e motivou preocupações relacionadas com a eficiência energética dos edifícios. A União Europeia sublinhou a necessidade de reduzir em 20% o consumo de energia até 2020. Atualmente, a tecnologia construtiva tem revelado grandes esforços na projeção de edifícios cada vez mais independentes a níveis energéticos, denominados por “Low Energy Buildings”. É neste contexto que surge o estudo da aplicação dos materiais de mudança de fase (PCM) no comportamento térmico e energéticos dos edifícios. O PCM tem uma grande capacidade de armazenamento de energia, acumulando calor na forma latente em temperaturas ambiente elevadas, libertando-o aquando da descida da temperatura ambiente.

Nesta dissertação é avaliada a influência da introdução de materiais de mudança de fase (PCMs) no comportamento térmico e energético de um edifício. Primeiramente, é estudado o efeito da incorporação de BioPCM em soluções construtivas para controlo do sobreaquecimento e armazenamento de energia, através da monitorização de um módulo de teste. Seguidamente é avaliada a eficiência da solução de BioPCM, mediante a determinação do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente, instrumentando dois provetes recorrendo a um equipamento HotBox.

Este estudo divide-se em quatro partes. Na primeira parte, é exposto o conceito de material de mudança de fase, realizando a sua caracterização e classificação, além das formas de incorporação nos edifícios. Segue-se a descrição global do estudo executado no módulo de teste, desde a caracterização até à apresentação e discussão dos resultados. O terceiro passo consiste na apresentação da metodologia dos ensaios HotBox. Por fim, na última etapa, realiza-se a análise dos resultados da instrumentação, comparando o provete com e sem PCM, finalizando com as respetivas conclusões.

keywords

Phase change material (PCM), Latent Heat, Energy efficiency, Thermal behaviour, Storage of energy, HotBox and Equivalent thermal conductivity.

abstract

The appearance of the world energetic crisis put the world economic growth at stake and brought worries related to the energetic efficiency of the buildings. The European Union laid stress on the necessity of reducing in 20% the consumption of energy until 2020.

Nowadays, the constructive technology has revealed great efforts in the projection of more and more independent buildings, as far as the energetic levels known as “Low Energy Buildings” are concerned. It is in this context that the study of application of phase change material (PCM) appear in the thermic and energetic behaviour of the buildings. The PCM has a big capacity of storing energy amassing the latent heat in high environmental temperatures, releasing it when a decrease of environmental temperatures occurs.

In this essay we evaluate the influence of the introduction of phase change materials (PCMs) in the thermic and energetic behaviour. Firstly we study the effect of the incorporation of BioPCM in constructive solutions of the control of overheating and storage of energy through the monitorization of a test module. Afterwards we evaluate the influence of the solution of the BioPCM, by means of the determination of the coefficient of equivalent thermic conductivity using two test pieces with the help of a **HotBox** equipment.

This study is divided into four parts. In the first one we show the concept of Phase Change Material, doing its characterization and classification beyond the forms of incorporation in the buildings. Then comes the global description of the study done in the test module, from its characterization to the presentation and discussion of the results. The third step consists of the presentation of the methodology of the **HotBox** experiment. Finally, in the last stage we do the analysis of the results of the instrumentation, comparing the test piece with and without PCM, finishing with the conclusions.

Índice Geral

Índice de Figuras	XVII
Índice de Tabelas	XXI
Lista de símbolos e acrónimos	XXIII
Capítulo 1. Introdução.....	3
1.1. Enquadramento e motivação.....	3
1.2. Objetivos	4
1.3. Estrutura da dissertação.....	4
Capítulo 2. Materiais de mudança de fase	9
2.1. Considerações gerais.....	9
2.1.1. Caracterização de PCMs.....	9
2.1.2. Classificação de PCMs.....	12
2.1.3. Formas de incorporação de PCM.....	13
2.2. Incorporação em soluções construtivas	16
2.2.1. Paredes.....	16
2.2.2. Pavimentos.....	17
2.2.3. Coberturas.....	18
2.2.4. Envidraçados.....	18
2.3. Desafio dos nZEB com PCMs	20
2.4. Síntese do capítulo	21
Capítulo 3. Módulo de teste.....	25
3.1. Localização do módulo de teste	25
3.2. Caracterização do módulo de teste.....	26
3.3. Caracterização da solução PCM utilizada.....	28
3.4. Monitorização termo higrométrica do módulo de teste	30
3.4.1. Semana estudo 1 – Estação de aquecimento.....	35
3.4.2. Semana estudo 2 – Estação de arrefecimento.....	39
3.5. Estimativa da taxa de infiltração	44
3.6. Síntese do capítulo	46
Capítulo 4. Ensaio <i>HotBox</i>	51
4.1. Enquadramento	51
4.2. Processo de construção dos provetes de ensaio.....	53
4.3. Descrição do procedimento de ensaio - <i>HotBox</i>	54
4.3.1. Colocação anel e desenho da grelha.....	54
4.3.2. Colocação sensores e instrumentação dos provetes.....	55
4.3.3. Programação dos ciclos de ensaio.....	60
4.4. Síntese do capítulo	63
Capítulo 5. Apresentação e análise dos resultados.....	67
5.1. Enquadramento	67

5.2.	Provete de Referência.....	67
5.2.1.	Termofluxímetros.....	67
5.2.2.	Sondas de temperatura PT100.....	68
5.2.3.	Termopares tipo k.....	69
5.3.	Provete com PCM.....	71
5.3.1.	Termofluxímetros.....	71
5.3.2.	Sondas de temperatura PT100.....	72
5.3.3.	Termopares tipo k.....	73
5.4.	Análise comparativa dos resultados dos provetes.....	74
5.4.1.	Ciclo – determinação da eficiência do uso de PCM.....	74
5.4.2.	Ciclo – determinação do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente (λ_{eq}).....	78
5.5.	Síntese do capítulo.....	84
Capítulo 6. Conclusões e trabalhos futuros.....		87
6.1.	Principais conclusões.....	87
6.1.1.	Monitorização módulo de teste.....	87
6.1.2.	Instrumentação dos provetes de ensaio.....	88
6.1.3.	Conclusões gerais.....	88
6.2.	Trabalhos Futuros.....	89
6.2.1.	Novas campanhas de monitorização do módulo de teste.....	89
6.2.2.	Novas campanhas de instrumentação dos provetes de ensaio.....	89
Referências Bibliográficas.....		93
Anexos.....		99
	Anexo A.....	99
	Anexo B.....	101

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Temperatura em função da quantidade de calor armazenado, no caso de armazenamento de calor sensível e calor latente (adaptado de [4])	10
Figura 2.2 - Comparação da espessura entre o PCM e outros materiais mais convencionais (adaptado de [5]).....	10
Figura 2.3 - Esquema de funcionamento de um material de armazenamento térmico (adaptado de [7])... 11	11
Figura 2.4 -Exemplificação gráfica do funcionamento do PCM (adaptado de [27])	11
Figura 2.5 - Classificação dos PCMs (adaptado de [8]).....	12
Figura 2.6 - Temperatura de fusão e entalpia para os diferentes grupos de PCMs [3].....	12
Figura 2.7 - Placa de gesso cartonado impregnada com microcápsulas de PCM (adaptado de [8])	15
Figura 2.8 - Placa de BioPCM™ [13].....	15
Figura 2.9 - Aplicação de PCMs numa parede pelo interior [15]	17
Figura 2.10 – Protótipo do pavimento com incorporação de PCMs [16].....	18
Figura 2.11 – Secção transversal do protótipo [16]	18
Figura 2.12 - Ilustração da aplicação de PCMs numa cobertura metálica [17]	18
Figura 2.13 - Aplicação de PCMs nos envidraçados de um edifício [18]	19
Figura 2.14 - Representação esquemática de NZEB e Nearly Zero Energy Buildings [25].....	20
Figura 3.1 - Localização do módulo de teste.....	25
Figura 3.2 - Geometria do módulo de teste	26
Figura 3.3 - Módulo de teste, alçado norte.....	27
Figura 3.4 - Módulo de teste, alçado sul	28
Figura 3.5 - Curva do ensaio DSC do BioPCM M51/Q25, fornecido pelo fabricante	29
Figura 3.6 - Curva temperatura-entalpia do BioPCM M51/Q25, fornecido pelo fabricante	29
Figura 3.7 - Variação de temperatura medida nas duas células	31
Figura 3.8 – Variação percentual da temperatura entre células de teste.....	32
Figura 3.9 - Variação de temperatura na célula com PCM e a intensidade da radiação solar incidente.....	32
Figura 3.10 - Variação de temperatura na célula de referência e a intensidade da radiação solar incidente	33
Figura 3.11 - Variação de temperatura na célula com PCM e a velocidade do vento	33
Figura 3.12 - Variação de temperatura na célula de referência e a velocidade do vento.....	34
Figura 3.13 - Variação de temperatura registada nas duas células em comparação com a temperatura exterior do ar para a semana de estudo 1	35
Figura 3.14 – Variação percentual da temperatura da célula de teste com PCM e de referência para a semana de estudo 1.....	36
Figura 3.15 - Variação de temperatura na célula com PCM e a intensidade da radiação solar incidente para a semana de estudo 1.....	37
Figura 3.16 - Variação de temperatura na célula de referência e a intensidade da radiação solar incidente para a semana de estudo 1.....	37

Figura 3.17 - Variação de temperatura na célula com PCM e a velocidade do vento para a semana de estudo 1.....	38
Figura 3.18 - Variação de temperatura na célula de referência e a velocidade do vento para a semana de estudo 1.....	38
Figura 3.19 - <i>Boxplot</i> representativo da variação de temperatura nas duas células para a semana de estudo 1	39
Figura 3.20 - Variação da temperatura registada nas duas células em comparação com a temperatura exterior do ar para a semana de estudo 2	40
Figura 3.21 - Variação percentual da temperatura da célula de teste com PCM e de referência para a semana de estudo 2.....	41
Figura 3.22 - Variação de temperatura na célula com PCM e a intensidade da radiação solar incidente para a semana de estudo 2.....	41
Figura 3.23 - Variação de temperatura na célula de referência e a intensidade da radiação solar incidente para a semana de estudo 2.....	42
Figura 3.24 - Variação de temperatura na célula com PCM e a velocidade do vento para a semana de estudo 2.....	42
Figura 3.25 - Variação de temperatura na célula de referência e a velocidade do vento para a semana de estudo 2.....	43
Figura 3.26 - <i>Boxplot</i> representativo da variação de temperatura nas duas células para a semana de estudo 2	43
Figura 3.27 - Equipamento Datalogger Wohler CDL 210 utilizado	44
Figura 3.28 – Regressão linear feita aos resultados experimentais do 1º ensaio realizado na célula de referência	45
Figura 4.1 – Câmara climática	52
Figura 4.2 - Anel de ensaio	52
Figura 4.3 - Esquema de “Calibrated HotBox”	52
Figura 4.4 - Interior do provete de referência.....	53
Figura 4.5 - Interior do provete com PCM.....	53
Figura 4.6 - Aspeto final dos provetes	53
Figura 4.7 - Grelha de posicionamento de instrumentação	54
Figura 4.8 - Ilustração do provete de ensaio colocado no anel de ensaio.....	54
Figura 4.9 - Representação esquemática em corte das duas câmaras climáticas e do provete com os termofluxímetros aplicados.....	55
Figura 4.10 - Colocação do termofluxímetro na câmara climática 1 (interior).....	56
Figura 4.11 – Ilustração da distribuição do termofluxímetro na câmara climática 2 (exterior)	56
Figura 4.12 - Representação esquemática em corte das duas câmaras climáticas e do provete com as sondas de temperatura PT100 aplicadas	57
Figura 4.13 - Esquema da distribuição das sondas de temperatura PT100 na câmara climática 1 (interior)	57

Figura 4.14 – Ilustração da distribuição das sondas de temperatura PT100 na câmara climática 2 (exterior)	57
Figura 4.15 - Representação esquemática em corte das duas câmaras climáticas e do provete com os termopares aplicados	58
Figura 4.16 - Esquema da distribuição sobre o provete dos termopares na câmara climática 1 (interior)	59
Figura 4.17 - Ilustração da distribuição sobre o provete dos termopares na câmara climática 2 (exterior)	59
Figura 4.18 – Posicionamento dos sensores de temperatura superficial aplicados no provete e das sondas aplicadas na grelha metálica da câmara climática	59
Figura 4.19 - Representação esquemática em corte do posicionamento de todos os sensores de temperatura utilizados na instrumentação	60
Figura 4.20 - Ciclo diário imposto pela câmara climática 2 (exterior)	61
Figura 4.21 - Ciclo de instrumentação de 4 dias imposto pela câmara climática 2 (exterior)	62
Figura 4.22 - Representação das temperaturas das câmaras climáticas na segunda campanha experimental	63
Figura 5.1 - Registo dos termofluxímetros no provete de referência e do ciclo de temperatura utilizado	68
Figura 5.2 - Registo das sondas de temperatura PT100 na instrumentação do provete de referência	69
Figura 5.3 - Média das sondas de temperatura PT100 utilizadas na instrumentação do provete de referência	69
Figura 5.4 - Registo dos termopares tipo k na instrumentação do provete de referência	70
Figura 5.5 - Média dos termopares tipo k utilizados na instrumentação do provete de referência	70
Figura 5.6 - Registo dos termofluxímetros no provete com PCM e do ciclo de temperatura utilizado	71
Figura 5.7 - Registo das sondas de temperatura PT100 na instrumentação do provete com PCM	72
Figura 5.8 - Média das sondas de temperatura PT100 utilizadas na instrumentação do provete com PCM	72
Figura 5.9 - Registo dos termopares tipo k na instrumentação do provete com PCM	73
Figura 5.10 - Média dos termopares tipo k utilizados na instrumentação do provete com PCM	74
Figura 5.11 - Registo dos termofluxímetros nos dois provetes e do ciclo de temperatura utilizado	75
Figura 5.12 - Médias das temperaturas registadas pelas sondas de temperatura PT100 nos dois provetes instrumentados e do ciclo de temperatura utilizado	76
Figura 5.13 - Variação de temperaturas das sondas de temperatura PT100 entre os provetes com e sem PCM	76
Figura 5.14 - Médias das temperaturas registadas pelos termopares tipo k nos dois provetes instrumentados e do ciclo de temperatura utilizado	77
Figura 5.15 - Variação de temperaturas dos termopares tipo k entre os dois provetes instrumentados	78
Figura 5.16 Média dos registos dos termopares tipo k utilizados na instrumentação do provete de referência	79
Figura 5.17 - Temperaturas interiores e superficiais nas câmaras para o patamar (20; 30) para o provete de referência	80
Figura 5.18 – λ_{REF} em função das temperaturas superficiais médias do provete de referência	81

Figura 5.19 - λ_{PCM} em função das temperaturas superficiais médias do provete com PCM.....	83
Figura 0.1 - Média dos registos das sondas de temperatura PT100 utilizados na instrumentação do provete de referência.....	101
Figura 0.2 Média dos registos dos termopares tipo k utilizados na instrumentação do provete de referência	102
Figura 0.3 Registos dos termofluxímetros utilizados na instrumentação do provete de referência	102
Figura 0.4 Média dos registos das sondas de temperatura PT100 utilizados na instrumentação do provete com PCM.....	103
Figura 0.5 Média dos registos dos termopares tipo k utilizados na instrumentação do provete com PCM	103
Figura 0.6 Registos dos termofluxímetros utilizados na instrumentação do provete com PCM.....	104

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades dos PCMs [9] 13
Tabela 2 - Caracterização do módulo de teste 26
Tabela 3 - Temperaturas mínima, máxima e média registadas nas duas células de teste e no exterior 31
Tabela 4 – Valor de RPH estimados da taxa de infiltração nas células de teste 46
Tabela 5 - Temperaturas e fluxos de calor utilizados para calcular λ_{REF} 80
Tabela 6 - Temperaturas e fluxos de calor utilizados para calcular λ_{PCM} 82

Lista de símbolos e acrónimos

Δ	Intervalo
®	Marca Registada
<i>AVAC</i>	Ar, Ventilação e Ar Condicionado
<i>CE</i>	Comunidade Europeia
<i>CHB</i>	Calibrated HotBox
<i>CO₂</i>	Dióxido de Carbono
DSC	Differential Scanning Calorimeter
<i>EPBD</i>	Energy Performance of Buildings Directive
<i>GHB</i>	Guarded HotBox
<i>HR</i>	Humidade Relativa
<i>NZEB</i>	Net Zero Energy Buildings
<i>nZEB</i>	nearly Zero Energy Buildings
<i>PCM</i>	Phase Change Materials
SSPCMs	Shape-stabilised Phase Change Materials
™	Marca
<i>U</i>	Coeficiente de transmissão térmica [W/(m ² °C)]
<i>UA</i>	Universidade de Aveiro
<i>UE</i>	União Europeia
δ	Espessura [m]
λ	Coeficiente de condutibilidade térmica [W/(m°°C)]

Capítulo 1

Introdução

Capítulo 1. Introdução

- 1.1. Enquadramento e motivação
- 1.2. Objetivos
- 1.3. Estrutura da dissertação

Capítulo 1. Introdução

1.1. Enquadramento e motivação

Em meados da década de 70, o aparecimento da crise energética mundial, que teve por base o consumo excessivo de energia de recursos não-renováveis, pôs em causa o crescimento económico mundial, devido às necessidades ilimitadas não serem correspondidas pelos escassos recursos, e motivou preocupações relacionadas com a eficiência energética dos edifícios. Assim, é crucial reduzir o consumo de energia nos edifícios e, se possível, começar a utilizar energia proveniente de recursos renováveis, a fim de reduzir a emissão de gases do efeito de estufa. O Conselho Europeu de Março de 2007 sublinhou a necessidade de aumentar a eficiência energética dos edifícios, com o intuito de reduzir em 20% o consumo de energia até 2020 [1]. Surgiu então a necessidade de encontrar melhores formas de utilizar a energia: na produção, na transmissão, na distribuição, no consumo e principalmente, no armazenamento.

Desde a Revolução Industrial, o sector construtivo, vem sofrendo enormes mudanças tecnológicas, que vão desde o aparecimento da eletricidade, até invenções como o ar condicionado e os sistemas de aquecimento. Estas inovações induziram nos utilizadores uma alteração significativa em termos de expectativas, que conduziu a um aumento progressivo da procura por mais conforto térmico, o que conjugado com um bem-estar económico superior, acabou por exponenciar as necessidades energéticas [2].

A procura de abordagens alternativas à construção atual e o necessário equilíbrio entre conforto e consumo energético resulta na necessidade do estudo da aplicabilidade de soluções passivas alternativas, como os materiais de mudança de fase (designados em inglês por Phase Change Materials - PCM).

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal quantificar o impacto sobre o comportamento térmico e energético de edifícios resultante da utilização de materiais de mudança de fase (PCMs) nas soluções construtivas. Para tal, foram delineadas campanhas experimentais de modo a atingir as seguintes metas:

- Estudar o efeito da incorporação de BioPCM em soluções construtivas para controlo do sobreaquecimento e armazenamento de energia;

- Estudar e avaliar a eficiência da solução BioPCM, mediante a determinação do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação divide-se em seis capítulos. Após um primeiro capítulo de descrição e enquadramento da dissertação bem como da definição dos objetivos, motivação e organização do trabalho, segue-se um segundo capítulo onde é feita uma apresentação detalhada dos materiais de mudança de fase, apresentando a sua caracterização e classificação, descrevendo o método de funcionamento e, exibindo alguns exemplos de aplicações em soluções construtivas.

No terceiro capítulo apresenta-se e descreve-se o módulo de teste, desde a sua localização, à caracterização dos materiais constituintes, incluindo o PCM utilizado. Posteriormente são apresentados e comentados os resultados obtidos decorrentes da monitorização executada no módulo de teste. Descrevem-se ainda outros ensaios complementares que foram realizados no módulo.

O quarto capítulo é dedicado ao ensaio *HotBox* onde é feita uma breve explicação deste tipo de ensaio, descrevendo os elementos do equipamento, são apresentados os provetes em estudo, sendo descrito todo o processo de construção dos mesmos. Por último, é referido todo o procedimento de ensaio que antecede a instrumentação.

No capítulo 5 é feita a apresentação e análise dos resultados dos ensaios *HotBox*. Na primeira parte são apresentados os resultados obtidos para cada provete, sendo depois realizada uma análise comparativa dos resultados.

No sexto e último capítulo, expõem-se as principais conclusões da dissertação e propõem-se trabalhos a serem desenvolvidos futuramente e que poderão complementar este estudo.

Por último, apresentam-se os anexos, onde são apresentados resultados complementares obtidos nas campanhas experimentais.

Capítulo 2

Materiais de mudança de fase

Capítulo 2. Materiais de mudança de fase

2.1. Considerações gerais

2.1.1. Caracterização do PCM

2.1.2. Classificação dos PCMs

2.1.3. Formas de incorporação de PCMs

2.1.3.1. Microencapsulamento

2.1.3.2. Macroencapsulamento

2.1.3.3. Imersão, incorporação direta e SSPCMs

2.2. Incorporação em soluções construtivas

2.2.1. Paredes

2.2.2. Pavimentos

2.2.3. Coberturas

2.2.4. Envidraçados

2.3. Desafio dos nZEB com PCMs

2.4. Síntese do capítulo

Capítulo 2. Materiais de mudança de fase

2.1. Considerações gerais

O presente capítulo faz uma introdução ao conceito de material de mudança de fase (PCM), fazendo a sua caracterização e classificação. São apresentadas algumas aplicações possíveis, quer por inclusão em soluções construtivas, quer em aplicações estruturais. É ainda abordada a relação entre os edifícios NZEB (edifícios de balanço energético quase nulo – Net Zero Energy Buildings) e os PCMs.

2.1.1. Caracterização de PCMs

Atualmente, na conceção de edifícios, existe uma grande preocupação em projetar edifícios cada vez mais independentes a nível energético, denominados por “Low Energy Buildings”. A base para esta evolução reside, essencialmente, no aproveitamento da radiação solar, quer por sistemas ativos, como coletores e painéis solares, quer por sistemas passivos, através de soluções construtivas concebidas para a acumulação de energia. Os PCMs surgem como uma alternativa aos materiais tradicionais na composição de edifícios com maior autonomia energética. Estes, são materiais com elevada capacidade de armazenamento de energia térmica na forma de calor latente. Os PCMs podem ser definidos como materiais dotados da capacidade de alterar o seu estado físico num determinado intervalo de temperaturas através da absorção ou libertação de energia. Quando a temperatura ambiente aumenta, o material muda do estado sólido para líquido. Esta mudança de fase é um processo endotérmico, que resulta numa absorção de energia na forma de calor latente por parte do material quando atinge à temperatura de fusão, Figura 2.1. Esse calor é posteriormente libertado quando estes materiais regressam ao estado sólido (reação exotérmica). Durante este processo de mudança de fase, a temperatura do PCM mantém-se praticamente constante [3].

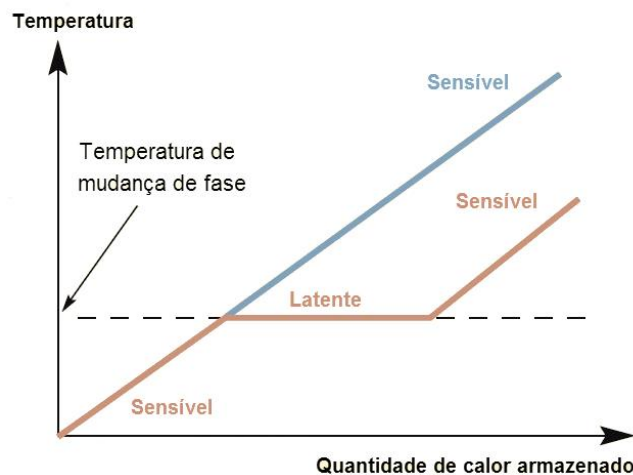


Figura 2.1 - Temperatura em função da quantidade de calor armazenado, no caso de armazenamento de calor sensível e calor latente (adaptado de [4])

Comparativamente com outros materiais mais convencionais como o betão ou a alvenaria, os PCMs permitem armazenar uma maior percentagem de calor para uma mesma quantidade. A Figura 2.2 ilustra a comparação entre a capacidade de armazenamento de calor para cada material usado na construção de um edifício [5]. Constata-se da necessidade de uma menor espessura recorrendo aos PCMs, comparativamente a outros materiais para a mesma quantidade de armazenamento térmico.

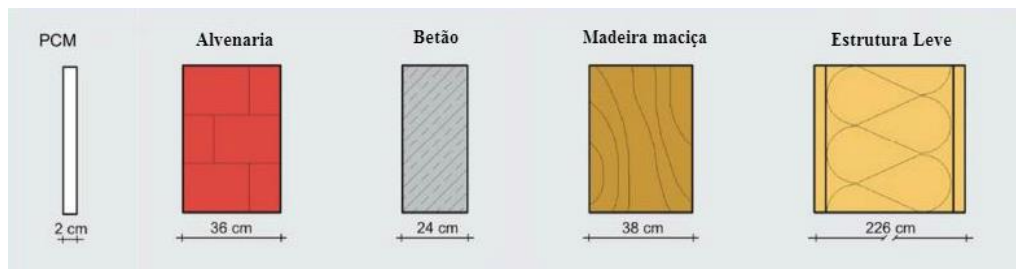


Figura 2.2 - Comparação da espessura entre o PCM e outros materiais mais convencionais (adaptado de [5])

Estes sistemas fornecem uma maior inércia térmica ao edifício que, combinado com o isolamento térmico, reduz o seu consumo energético, absorvendo os ganhos de calor e reduzindo o fluxo de calor. Durante o dia, o PCM pode absorver parte do calor através do

processo de fusão, sendo, durante a noite o calor libertado pela solidificação do PCM, permitindo assim a redução das flutuações de temperatura [6]. Na Figura 2.3 apresenta-se em esquema o funcionamento de um PCM [7].

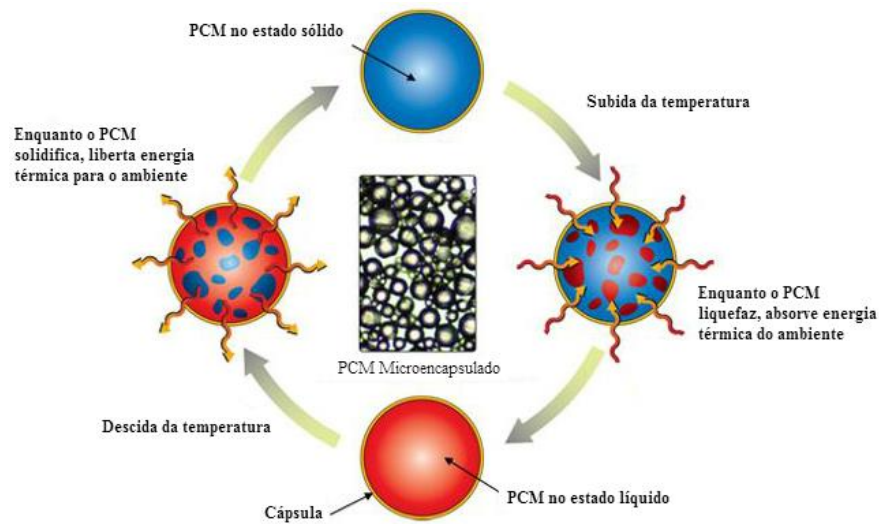


Figura 2.3 - Esquema de funcionamento de um material de armazenamento térmico (adaptado de [7])

O resultado do funcionamento dos PCMs anteriormente descrito encontra-se graficamente exemplificado na Figura 2.4. A incorporação da solução com PCM provoca a termo regulação do espaço interior, originando temperaturas intervaladas na zona de conforto.

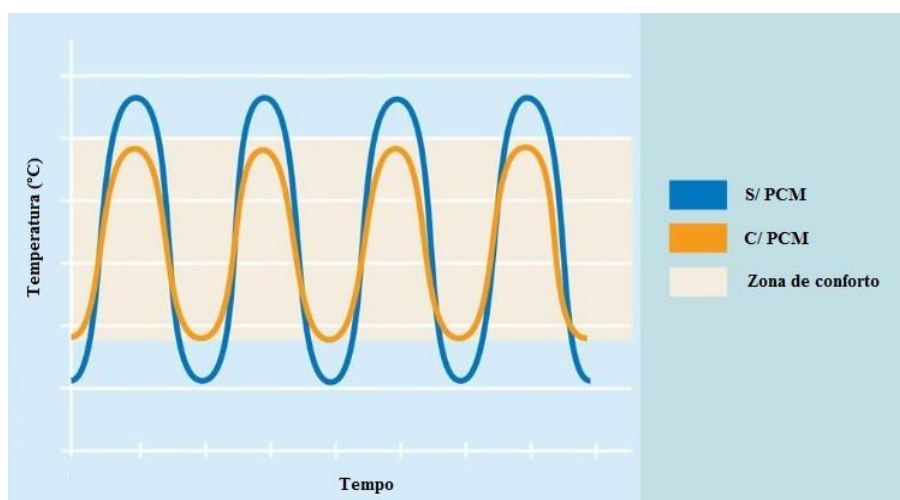


Figura 2.4 -Exemplificação gráfica do funcionamento do PCM (adaptado de [27])

2.1.2. Classificação de PCMs

Os PCMs podem ser agrupados em diferentes subcategorias, consoante a sua composição química: orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas. Os compostos orgânicos subdividem-se em parafínicos e não-parafínicos, enquanto os compostos inorgânicos repartem-se em sais hidratados e metálicos. Uma mistura eutética é composta por dois ou mais componentes, que fundem e cristalizam de forma consonante, formando uma mistura de cristais compostos, Figura 2.5. Os diferentes grupos são caracterizados pela sua gama de temperaturas e entalpias de fusão, Figura 2.6.

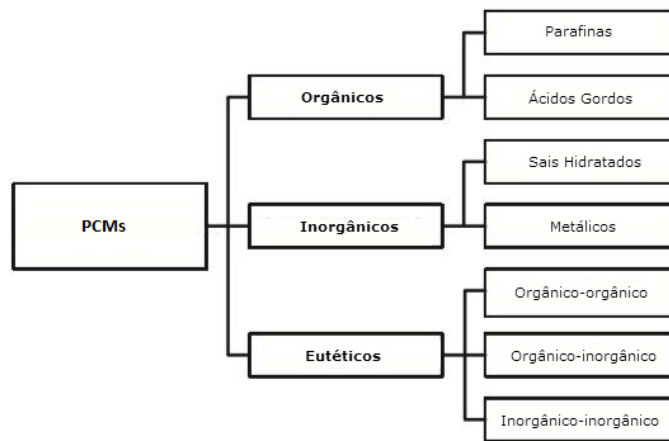


Figura 2.5 - Classificação dos PCMs (adaptado de [8])

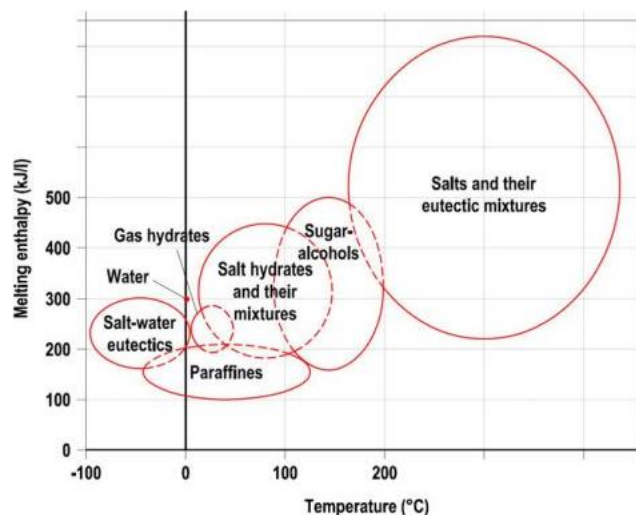


Figura 2.6 - Temperatura de fusão e entalpia para os diferentes grupos de PCMs [3]

Os PCMs devem possuir determinadas propriedades térmicas, cinéticas e químicas para que possam ser usados como materiais de armazenamento de energia [9], conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades dos PCMs [9]

Propriedades dos PCMs	
Propriedades térmicas	Temperatura de transição de fase adequada à aplicação
	Elevado calor latente
	Boa condutibilidade térmica
Propriedades cinéticas	Não ocorrência de sobrefusão
	Elevada taxa de cristalização
Propriedades químicas	Estabilidade química
	Compatibilidade com materiais de construção
	Não tóxico
	Não inflamável

2.1.3. Formas de incorporação de PCM

Os PCMs podem ser aplicados em tecidos, em várias aplicações eletrônicas (computadores, equipamentos de laboratório, dispositivos móveis), em aplicações biomédicas, em aplicações automóveis, em diversos produtos de consumo (calçado, vestuário e mobiliário), além do mais relevante, e que será abordado nesta dissertação, que é a utilização em edifícios e na construção [10].

Além de saber como, interessa também saber onde é que a implementação de soluções construtivas integrando PCM se revela mais benéfica, não só no aspeto térmico, mas também no aspeto de viabilidade económica, racionalizando o uso destes materiais.

Uma utilização bem-sucedida do PCM depende da existência de uma cápsula que o envolva. O encapsulamento pode ser realizado de duas formas, microencapsulamento ou

macroencapsulamento. Uma das razões de encapsular o PCM deve-se à necessidade de cumprir os requisitos de resistência mecânica, de flexibilidade, de resistência à corrosão e de estabilidade térmica. A cápsula que envolve o material atua como uma barreira para proteger o PCM de interações nocivas com o ambiente. Por último, o encapsulamento garante uma área de transferência de calor suficiente, além de garantir estabilidade estrutural e fácil manuseamento do produto [11].

2.1.3.1. Microencapsulamento

A microencapsulação é definida como sendo um processo em que pequenas partículas são rodeadas por um revestimento, na generalidade dos casos, polimérico, ou incorporado numa matriz homogénea ou heterogénea, de onde resultam pequenas cápsulas com muitas propriedades úteis. Todos os três estados de matéria (sólido, líquido e gasoso) podem ser microencapsulados. O microencapsulamento permitem produzir microcápsulas de PCM de tamanho reduzido, proporcionando uma troca de calor rápida com a envolvente [12]. Atualmente, o custo do sistema de microencapsulação é alto quando comparado com outros métodos de armazenamento, pelo que apenas é usado em aplicações de controlo térmico [11]. A Figura 2.7 ilustra a aplicação de PCM microencapsulado numa placa de gesso cartonado ThermalCORE™ da National Gypsum, onde é possível observar entre os cristais de gesso a microcápsula de PCM.

2.1.3.2. Macroencapsulamento

O macroencapsulamento consiste na integração do PCM em sistemas de contenção, tais como tubos ou bolsas dispostas em matriz, em placas ou painéis, Figura 2.8. O dimensionamento da cápsula deve ser adequado à aplicação pretendida, pois as suas características térmicas e geométricas têm influência direta no comportamento térmico do PCM, nomeadamente, na duração da mudança de fase [12]. A incorporação do PCM em soluções construtivas, colocando-o como uma camada, em vez de se encontrar presente no interior de um dos materiais, evita eventuais problemas de fugas devido à fusão do material,

assim como consequências nefastas nas propriedades mecânicas do material de construção. Porém, a macroencapsulação pode apresentar irregularidades na condutividade térmica, visto que tende a criar depósitos na cápsula levando à falta de fusão do PCM aí presente [8].

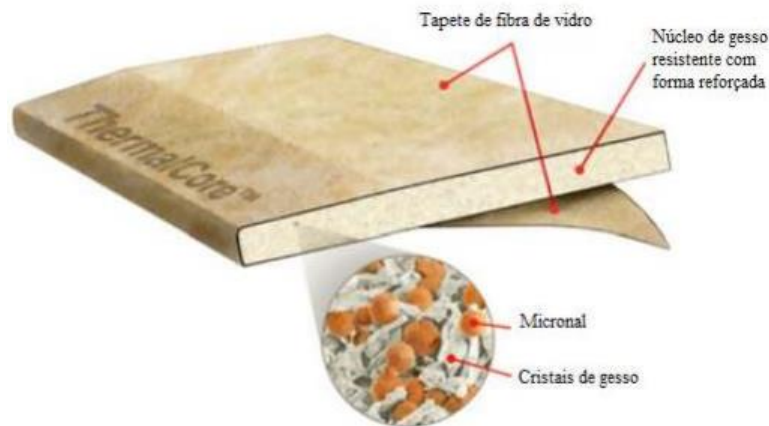


Figura 2.7 - Placa de gesso cartonado impregnada com microcápsulas de PCM (adaptado de [8])



Figura 2.8 - Placa de BioPCM™ [13]

2.1.3.3. Imersão, incorporação direta e SSPCMs

Além das formas de encapsulamento, os PCMs podem ser incorporados nos materiais de construção através dos métodos de imersão e de incorporação direta. O primeiro método consiste na imersão do material poroso, como por exemplo, tijolo ou placa de gesso, no PCM líquido para que este seja absorvido por ação capilar. O método de incorporação direta baseia-se na mistura de PCM líquido ou em pó com materiais, tais como, o gesso, betão ou argamassa, durante a produção. Os dois métodos tendem, a longo prazo, a gerar problemas de derrame do PCM e de incompatibilidade com alguns materiais utilizados. Recentemente a formação de PCMs de forma estabilizada (*Shape-stabilised* PCMs – SSPCMs), método semelhante à incorporação direta, tem vindo a atrair atenções [14]. Neste método, espalha-se PCM num material de fase diferente, por exemplo HDPE, formando um compósito térmico e estruturalmente estável, com condutibilidade térmica apropriada e resistente à degradação após um elevado número de ciclos térmicos de funcionamento [8].

2.2. Incorporação em soluções construtivas

Os PCMs podem ser aplicados em edifícios através de duas configurações, sendo integrados na estrutura do edifício ou introduzidos no sistema de climatização. Os elementos de PCM quando inseridos na estrutura do edifício estão em contacto com o ambiente climatizado e reagem em função da temperatura interior. Por outro lado, quando integrados no sistema de climatização, os sistemas ativos encontram-se onde a energia térmica está isolada termicamente do local a climatizar, sendo armazenada em tanques. O frio e o calor armazenados são fornecidos consoante as necessidades e não de forma automática. [15].

O recurso a materiais com PCM revela-se viável apenas para posicionamentos específicos, uma vez que o edifício se encontra sujeito a cargas solares durante mais horas ao longo do dia, exponenciando a sua utilidade quanto ao armazenamento de calor latente. Mediante a análise de cada caso, os locais onde geralmente são retiradas mais vantagens dos PCMs são as paredes exteriores orientadas a sul, este e oeste, estando as paredes orientadas a sul expostas à radiação solar durante todo o dia. A aplicação do PCM em pavimentos interiores em compartimentos com uma alta percentagem de envidraçado revela-se benéfica, assim como a sua utilização em telhados e coberturas. Por último, a incorporação dos PCMs em envidraçados também se apresenta como um ponto relevante na aplicação do material na estrutura dos edifícios.

2.2.1. **Paredes**

A envolvente vertical dos edifícios é um dos elementos construtivos preferenciais para a análise das potencialidades dos PCMs na construção, particularmente a incorporação em painéis de gesso cartonado e revestimentos. Os painéis de gesso com PCMs podem ser instalados no lugar dos painéis comuns durante a construção nova, ou durante a reabilitação de edifícios, Figura 2.9, resultando num aumento significativo das áreas de armazenamento térmico, para o aquecimento e arrefecimento solar passivo, permitindo a redução da utilização de soluções mecânicas. A instalação de painéis com PCMs, ao invés do recorrente gesso comum, implica pouco ou nenhum custo adicional. A aplicação de PCM reduz o

sobreaquecimento e as flutuações de temperatura interior e a temperatura superficial das paredes também diminui devido à aplicação do PCM, aumentando o conforto térmico através de efeitos radiativos [15].



Figura 2.9 - Aplicação de PCMs numa parede pelo interior [15]

2.2.2. Pavimentos

O armazenamento da radiação solar reduz em cerca de 30% as necessidades de aquecimento. Céron *et al.* [16] desenvolveram um pavimento que, em combinação com PCM, atua como um sistema passivo de climatização possibilitando a estabilização da temperatura interior e a diminuição da energia despendida no aquecimento durante a noite, no inverno. No verão, o pavimento atua como dissipador de calor através do armazenamento da radiação solar direta, impedindo o sobreaquecimento. A imagem do protótipo e a secção transversal encontram-se ilustradas na Figura 2.10 e Figura 2.11, respetivamente.

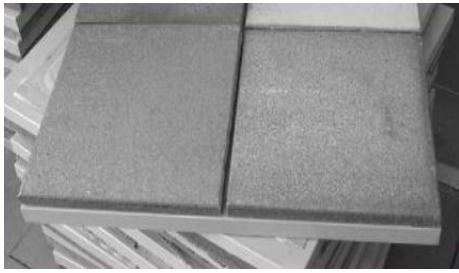


Figura 2.10 – Protótipo do pavimento com incorporação de PCMs [16]

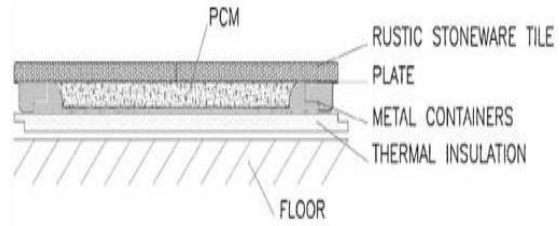


Figura 2.11 – Secção transversal do protótipo [16]

2.2.3. Coberturas

Os PCMs quando instalados em coberturas, Figura 2.12, reduzem significativamente o fluxo de calor e o consumo de energia necessário quer na refrigeração. quer no aquecimento. O seu uso gera ganhos económicos significativos em várias zonas climáticas. [17]

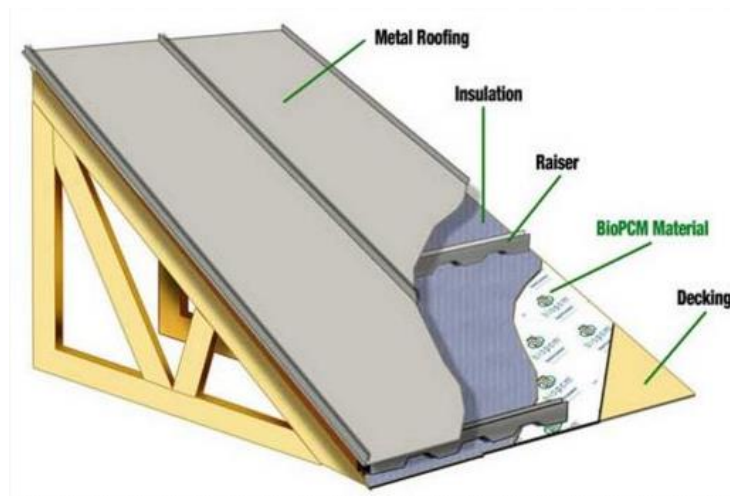


Figura 2.12 - Ilustração da aplicação de PCMs numa cobertura metálica [17]

2.2.4. Envidraçados

Os vãos envidraçados, devido à passagem das cargas solares, são elementos de enorme responsabilidade na passagem de calor entre o exterior e o interior do edifício, sendo de

superior interesse potenciar estes componentes do ponto de vista térmico. Em vãos orientados a sul, a eficiência desta solução é tanto maior quanto maior for a radiação solar incidente, ao invés de períodos encobertos em que os seus resultados são análogos a envidraçados sem PCM. Conclui-se, portanto, que para climas solarengos apresenta-se como uma solução bastante interessante, perdendo relevância para climas nublados, Figura 2.13.



Figura 2.13 - Aplicação de PCMs nos envidraçados de um edifício [18]

Em suma, a introdução aos materiais mudança de fase permitiu compreender as suas bases e respetivas classificações, propriedades e aplicações. Constatou-se que a utilização de sistemas de armazenamento de energia sob a forma de calor latente para a regulação térmica no interior dos edifícios tem-se tornado numa tecnologia cada vez mais atrativa dadas as suas vantagens. A incorporação dos PCMs na estrutura dos edifícios aumenta significativamente as áreas de armazenamento e transferência de energia em todas as zonas do edifício, sendo esta uma das vantagens evidentes deste uso. Além das vantagens, perceberam-se as exigências e limitações dos PCMs do ponto de vista térmico.

Assim, a utilização dos PCMs como mecanismo de armazenamento de energia pode diminuir as variações da temperatura interior, contribuindo para o aumento do nível de conforto.

2.3. Desafio dos nZEB com PCMs

Como já referido, é crucial reduzir o consumo de energia nos edifícios. Assim, a União Europeia criou uma diretiva, a EPBD, em que determina metas a atingir na redução dos consumos energéticos e emissão de gases de estufa. Esta estabelece como objetivo que a partir de 2020 todos os novos edifícios sejam nZEB (nearly Zero Energy Buildings) mediante o incentivo da procura de soluções passivas para os sistemas AVAC [1]. Os critérios estabelecidos na diretiva para que um edifício seja considerado um nZEB não são muito concretos, deixando que cada país defina essa questão consoante as suas condicionantes. A definição generalista para um ZEB é um edifício que tem um balanço energético zero, ou seja, produz tanta energia como aquela que consome [24].

Um edifício em que os níveis de energia produzidos sejam superiores às suas necessidades energéticas é considerado excedentário (“positivo”), ao invés, se a produção for inferior às necessidades energéticas, o edifício é deficitário (“negativo”), conforme ilustrado na Figura 2.14.

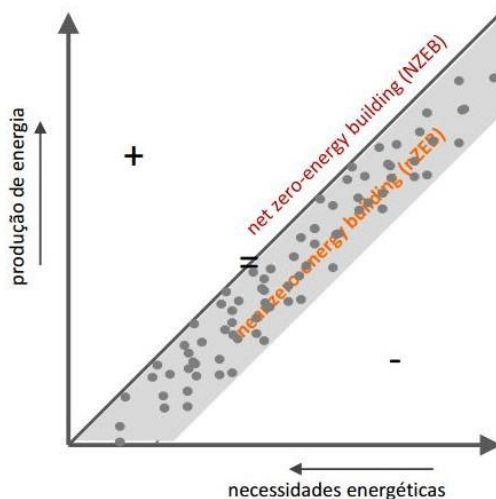


Figura 2.14 - Representação esquemática de NZEB e Nearly Zero Energy Buildings [25]

Uma vez que a utilização dos PCMs se tem revelado muito eficaz para reduzir as necessidades energéticas, principalmente em edifícios de baixa inércia, a sua aplicação na procura do edifício nZEB tem crescido exponencialmente. Ainda assim os meios e técnicas

para atingir as metas propostas têm divergido de país para país devido, em grande parte, às diferentes realidades climáticas de cada um deles, não sendo adequado por isso definir um modelo genérico. As exigências no caso de um edifício a construir no Norte da Europa são obviamente diferentes de as de um edifício no Sul da Europa.

Assim, o uso de PCM apresenta-se como crucial na tentativa de cumprir a diretiva da União Europeia, não só em edifícios novos, como também na reabilitação do edificado existente.

2.4. Síntese do capítulo

Neste segundo capítulo realizou-se a introdução teórica aos PCMs, permitindo perceber o funcionamento e respetivas classificações e propriedades. Numa segunda fase são resumidamente descritas as diferentes formas de incorporação de PCM em soluções construtivas. Ficou assim demonstrado que o funcionamento dos PCMs é simples, embora a avaliação da sua eficácia na contribuição para o armazenamento de calor latente, e consequente aumento da performance energética de um edifício, pode ser um desafio.

No que concerne à aplicação de PCM na construção, foram enumeradas as várias formas de aplicação em materiais e componentes construtivos, demonstrando a possibilidade de incorporar PCM em qualquer parte de um edifício, desde a aplicação em envidraçados a aplicação em pavimentos.

Por fim, é sumariamente analisado o desafio atual dos nZEB (nearly Zero Energy Buildings) com os materiais de mudança de fase (PCM).

Capítulo 3

Módulo de teste

Capítulo 3. Módulo de teste

- 3.1. Localização do módulo de teste
- 3.2. Caracterização do módulo de teste
- 3.3. Caracterização da solução PCM utilizada
- 3.4. Monitorização termo higrométrica do módulo de teste
 - 3.4.1. Semana estudo 1 – Estação de aquecimento
 - 3.4.2. Semana estudo 2 – Estação de arrefecimento
- 3.5. Estimativa da taxa de infiltração
- 3.6. Síntese do capítulo

Capítulo 3. Módulo de teste

Neste capítulo pretende-se fazer uma caracterização global do módulo de teste usado nos ensaios, como a localização, as características dos elementos constituintes, bem como o tipo de PCM utilizado. Posteriormente são apresentados e comentados os resultados provenientes das monitorizações realizadas no módulo, como também outras medições executadas.

3.1. Localização do módulo de teste

O módulo de teste encontra-se localizado no Campus de Santiago, na Universidade de Aveiro, em Aveiro, como apresentado na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Localização do módulo de teste

3.2. Caracterização do módulo de teste

O módulo de teste considerado é constituído por duas células iguais, com dimensões gerais de 7,0 m de comprimento, 2,35 m de largura e 2,58 m de altura, idêntico ao ilustrado na Figura 3.2. Com o intuito de potenciar o rendimento do PCM a fachada orientada a sul é envidraçada, uma vez que o comportamento de elementos PCM beneficia de uma maior exposição à radiação solar.

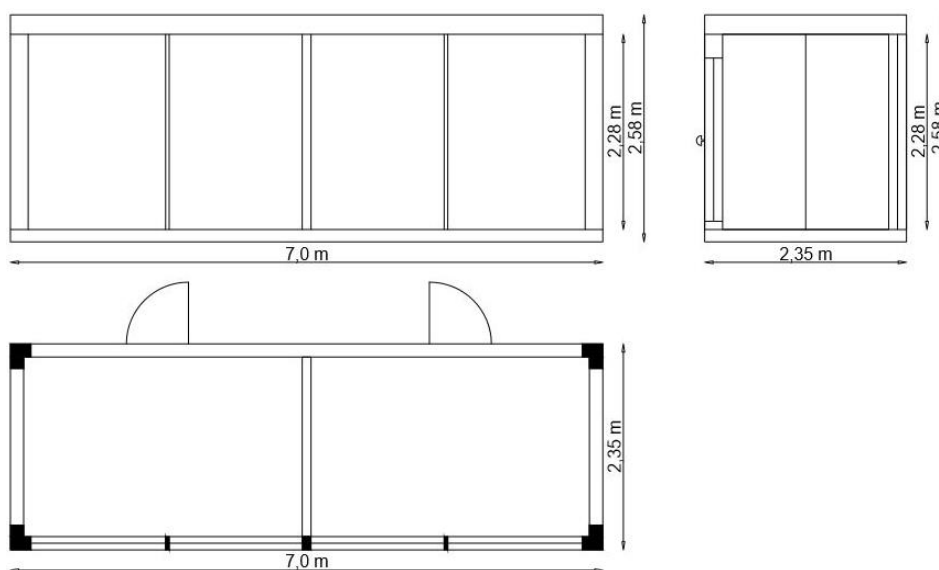


Figura 3.2 - Geometria do módulo de teste

No que respeita à envolvente do edifício, esta encontra-se caracterizada na Tabela 2. Os envidraçados são do tipo duplo com 5 mm de espessura e com uma caixa-de-ar de 12 mm de espessura.

Tabela 2 - Caracterização do módulo de teste

Elemento de envolvente	Materiais	Espessuras [mm]
Paredes	Painel <i>sandwich</i>	40
	PCM ⁽¹⁾	15 ⁽²⁾
Envidraçados	Vidro duplo	5+12+5

Pavimento elevado	Chapa galvanizada	2
	Isolamento fenólico	18
	Isolamento linóleo	2.5
Cobertura plana	Chapa galvanizada	3
	Chapa perfilada HT-30	0,6
	Isolamento fibra de vidro	8

- (1) No caso da célula de referência o PCM não é considerado.
 (2) Retirado da ficha de produto fornecida pelo fabricante

As células de teste foram desenhadas virtualmente com recurso ao programa *SketchUp* para possibilitar uma melhor perceção das suas características, conforme ilustrado na Figura 3.3 e Figura 3.4.

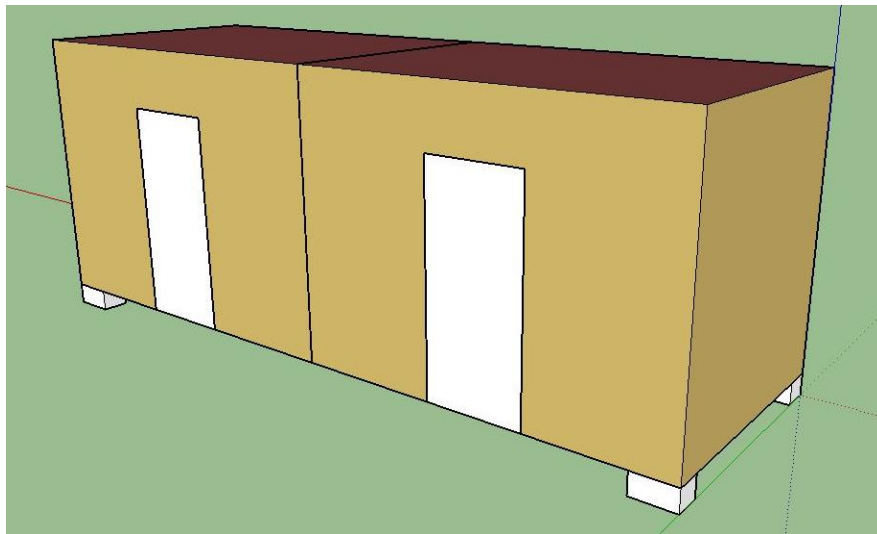


Figura 3.3 - Módulo de teste, alçado norte

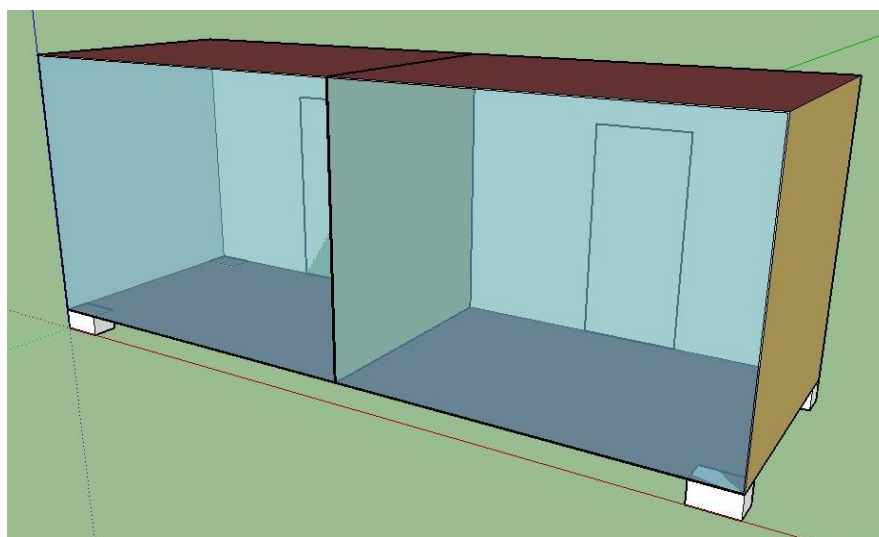


Figura 3.4 - Módulo de teste, alçado sul

3.3. Caracterização da solução PCM utilizada

No módulo de teste, com a finalidade de averiguar as alterações do comportamento térmico, ou seja, uma diminuição das necessidades de aquecimento ou arrefecimento do espaço, aplicou-se BioPCM® M51/Q25. O PCM aplicado no módulo de teste é do tipo macroencapsulado, sendo aplicados painéis que revestem por completo o pavimento e as paredes laterais, com exceção do lado envidraçado.

Geralmente as características térmicas dos PCMs são avaliadas através da calorimetria diferencial de varrimento (DSC). Este método permite uma determinação rigorosa das bandas de temperatura de transição do PCM e da sua energia latente, mediante a medição da energia libertada/absorvida durante o processo de aquecimento/arrefecimento de uma amostra do material a caracterizar [3]. As curvas do ensaio DSC apresentadas nesta dissertação foram fornecidas pelo fabricante do material, conforme exibido na Figura 3.5, assim como a curva temperatura-entalpia, representada na Figura 3.6.

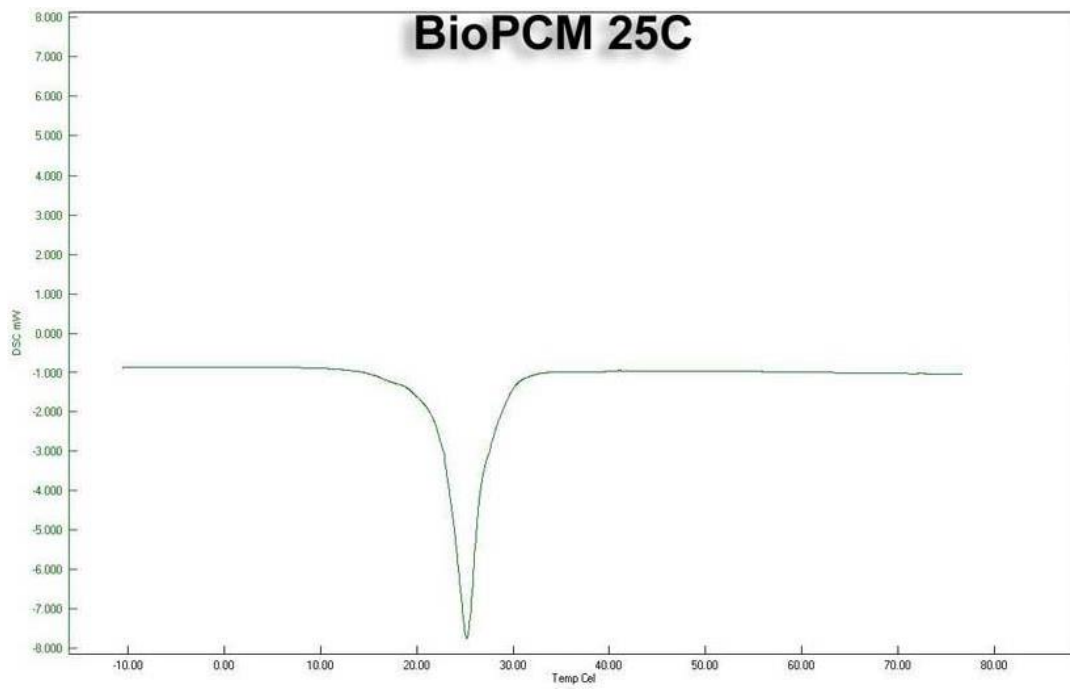


Figura 3.5 - Curva do ensaio DSC do BioPCM M51/Q25, fornecido pelo fabricante

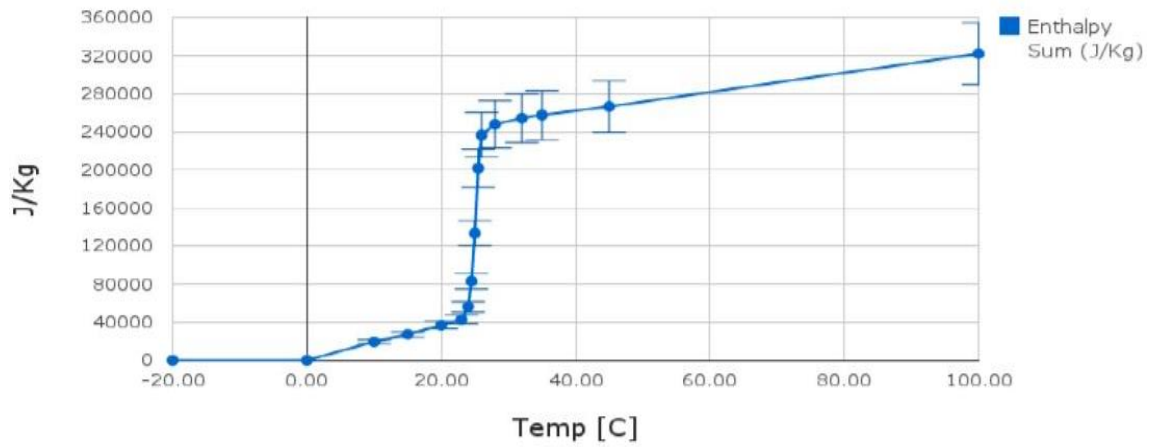


Figura 3.6 - Curva temperatura-entalpia do BioPCM M51/Q25, fornecido pelo fabricante

3.4. Monitorização termo higrométrica do módulo de teste

A fim de apurar a eficiência da solução proposta procedeu-se à monitorização do módulo de teste apresentado previamente. O módulo possui duas células iguais. Numa delas, as faces interiores das paredes e o pavimento foram revestidos com PCM.

A monitorização nos dois espaços foi realizada durante cerca de seis meses. Neste período foi registada a temperatura e a humidade relativa do ar, com recurso a três data-logger, um na célula de referência e dois na célula com PCM, sendo posteriormente utilizada a média dos dois data-logger colocados na célula com PCM. Os três data-logger são instalados no centro das células a meia altura.

Para realizar a análise foi feita ainda a recolha dos dados climáticos da estação meteorológica existente no Departamento de Física, no Campus da Universidade de Aveiro. A estação meteorológica recolhe dados relativos à temperatura do ar, humidade relativa do ar, intensidade da radiação solar, intensidade e direção do vento. A estação é constituída por um sensor de temperatura e humidade relativa, um sensor de velocidade e direção do vento e um sensor de radiação solar. Os dados foram recolhidos e armazenados por intermédio de um data-logger e um computador.

Na Figura 3.7 encontram-se confrontadas as temperaturas registadas no interior das duas células ao longo dos seis meses de monitorização, bem como a temperatura do ar exterior. Durante o período de monitorização a temperatura do ar exterior variou entre um mínimo de 2,80 °C e um máximo de 25,30 °C, apresentando uma temperatura média de 13,60 °C. No mesmo intervalo de tempo o data-logger registou na célula de referência o valor mínimo de 3,40 °C, o máximo de 84,80 °C e a temperatura média foi de 22,52 °C, enquanto na célula com PCM atingiu-se o valor mínimo de 4,25 °C, o máximo de 82,20 °C e a temperatura média foi de 24,33 °C, conforme apresentado na Tabela 3.

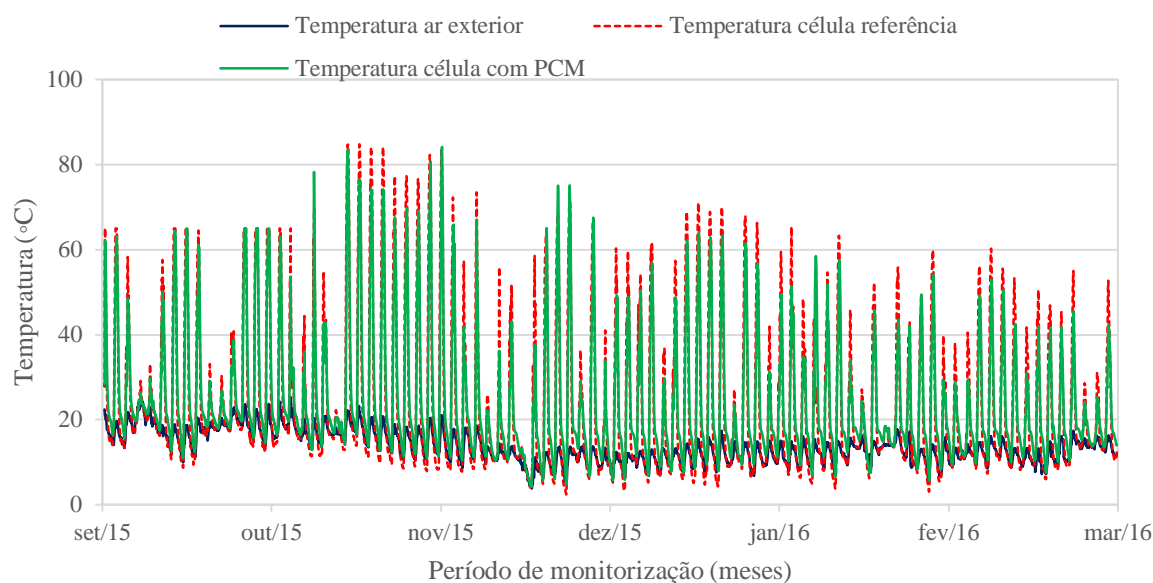


Figura 3.7 - Variação de temperatura medida nas duas células

Tabela 3 - Temperaturas mínima, máxima e média registadas nas duas células de teste e no exterior

	Temperatura mínima	Temperatura máxima	Temperatura média
Temperatura ar exterior	2,80	25,30	13,60
Célula de referência	3,40	84,80	22,52
Célula com PCM	4,25	82,20	24,33

Para comparar os registos das duas células, durante o período de monitorização, torna-se relevante perceber as duas fases de funcionamento do PCM. Em temperaturas mais elevadas o PCM absorve calor, para depois, quando a temperatura baixa, libertar o calor armazenado. Relativamente às temperaturas mais elevadas a diferença máxima de temperatura atenuada (diferença entre 58,65 °C na célula de referência e 36,92 °C na célula com PCM) cifrou-se em 21,73 °C, com uma média de 6,05 °C no total do intervalo de medição. Por outro lado, nas temperaturas mais baixas, o PCM atenuou uma média de 3,82 °C, com um máximo de 33,95 °C, (diferença entre 24,10 °C na célula de referência e 58,05 °C na célula com PCM).

Analisou-se ainda a eficiência do PCM em termos percentuais para se possuir uma noção mais concreta do seu efeito. Assim, o PCM durante o período de monitorização atenuou em média 14% da temperatura máxima atingida na célula de referência. Em relação à temperatura mínima, a atenuação foi de cerca de 32% em média, conforme ilustrado na Figura 3.8.

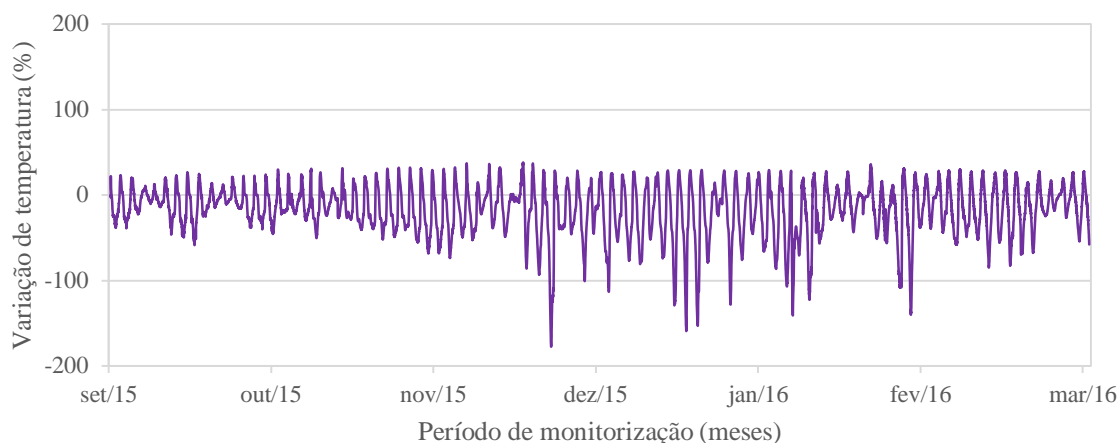


Figura 3.8 – Variação percentual da temperatura entre células de teste

Adicionalmente, com a informação recolhida da estação meteorológica é possível estudar a relação entre a variação da temperatura nas duas células e a intensidade da radiação solar durante o período de monitorização, como representado na Figura 3.9 e na Figura 3.10.

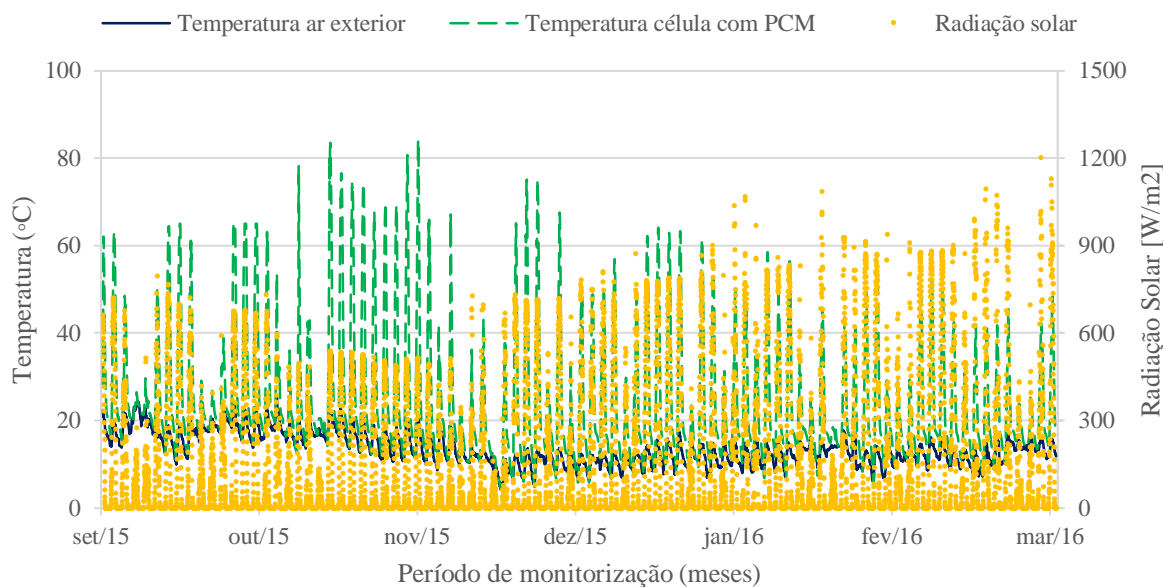


Figura 3.9 - Variação de temperatura na célula com PCM e a intensidade da radiação solar incidente

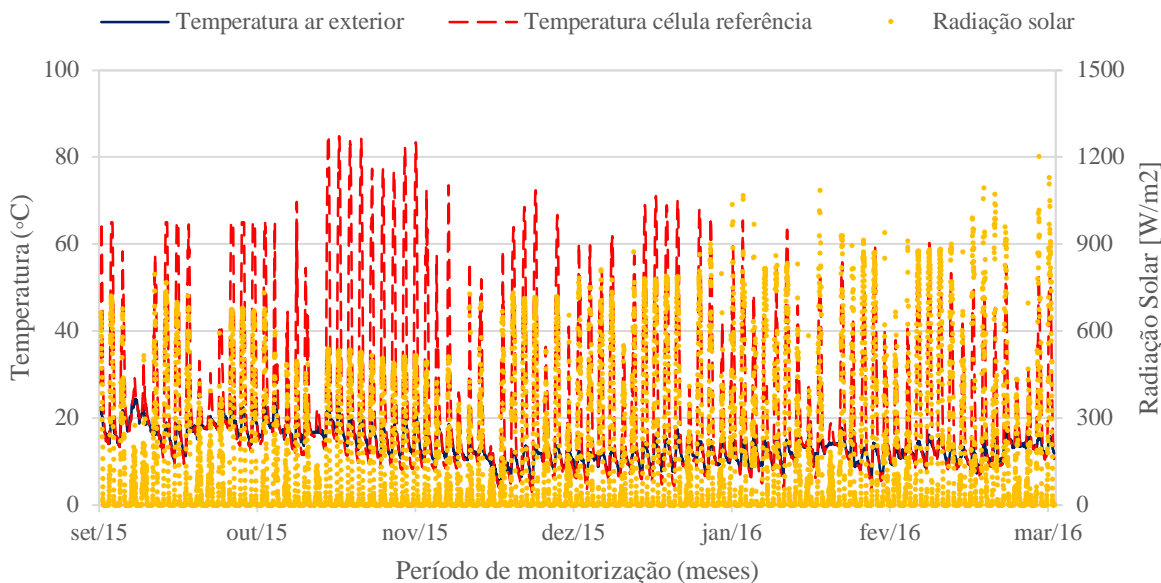


Figura 3.10 - Variação de temperatura na célula de referência e a intensidade da radiação solar incidente

Analogamente ao realizado para a radiação solar, foi feita a mesma análise para a velocidade do vento, conforme exibido na Figura 3.11 e na Figura 3.12.

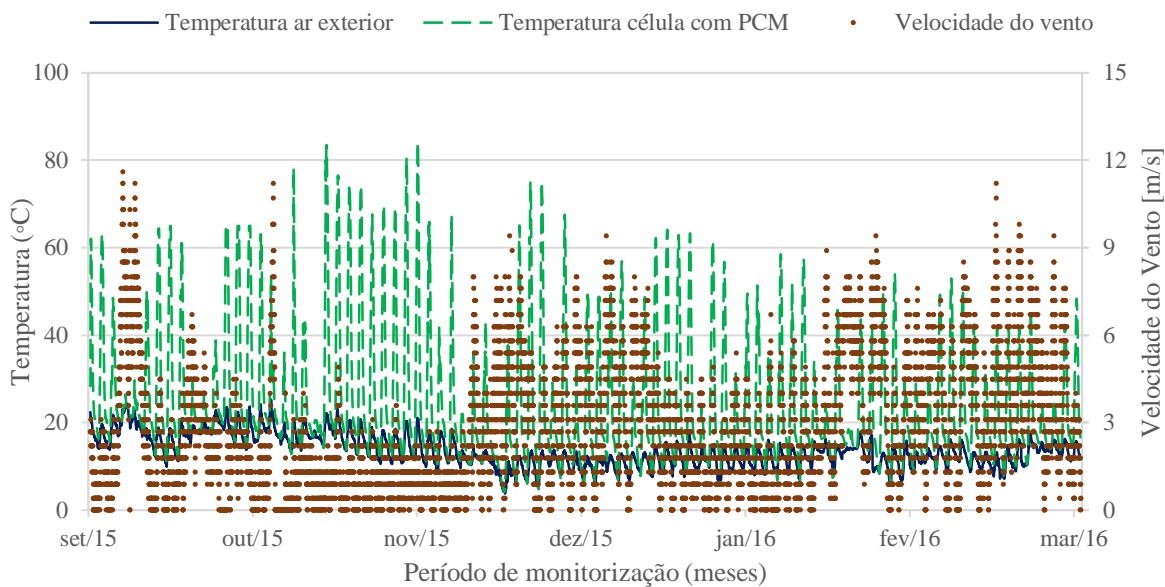


Figura 3.11 - Variação de temperatura na célula com PCM e a velocidade do vento

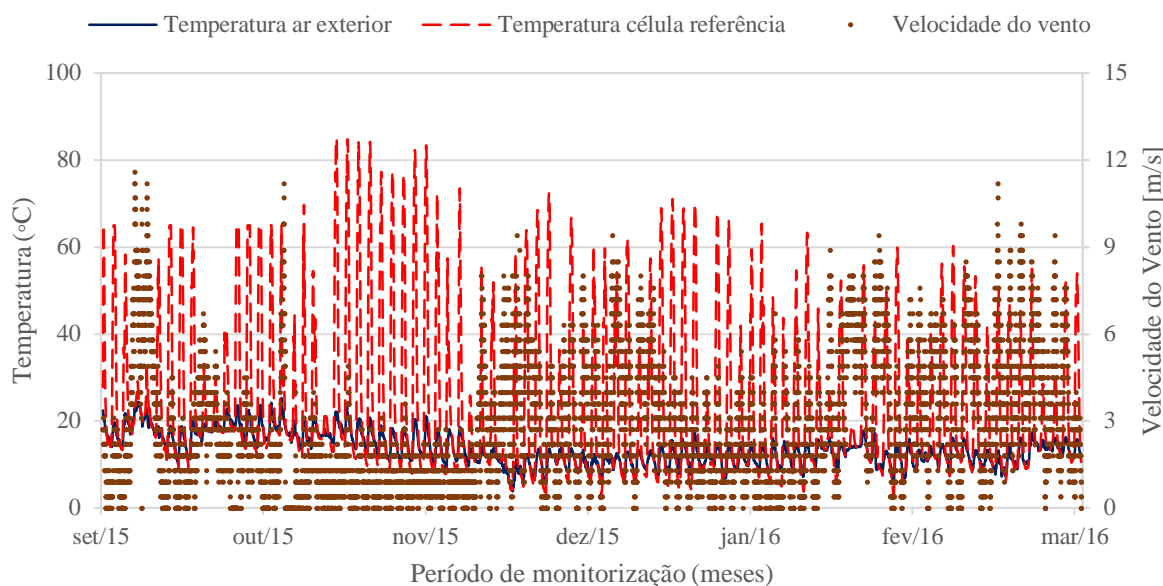


Figura 3.12 - Variação de temperatura na célula de referência e a velocidade do vento

Através das Figura 3.9 e Figura 3.10 é possível constatar em períodos de menor intensidade de radiação solar elevadas temperaturas no interior de ambas as células, verificando-se nas Figura 3.11 e Figura 3.12 nesses mesmos intervalos de tempo velocidades do vento inferiores ao normal (período entre 2/nov. e 30/nov.). De forma semelhante, em períodos de maior intensidade de radiação solar registam-se, nas células, temperaturas inferiores, e valores de velocidade do vento superiores (período entre 25/jan. e 3/mar.). Nesse caso, de certa forma, é possível verificar a existência de uma relação “causa-efeito” entre a intensidade de radiação solar e a velocidade do vento.

Ainda assim e dada a extensa coleção de dados recolhidos a retirada de ilações concretas torna-se difícil. Portanto, foram selecionados registos relativos a duas semanas de monitorização distintas. Conforme mencionado anteriormente, e na tentativa de perceber as ligações entre os dados registados, tentaram-se escolher duas semanas em que as diferenças entre temperatura nas células, intensidade de radiação solar e velocidade do vento fossem as mais díspares possíveis.

3.4.1. Semana estudo 1 – Estação de aquecimento

A primeira semana de estudo escolhida foi a semana de 14 a 21 de novembro. Analisando os registos de apenas sete dias torna-se possível ter uma noção mais concreta da atuação do PCM.

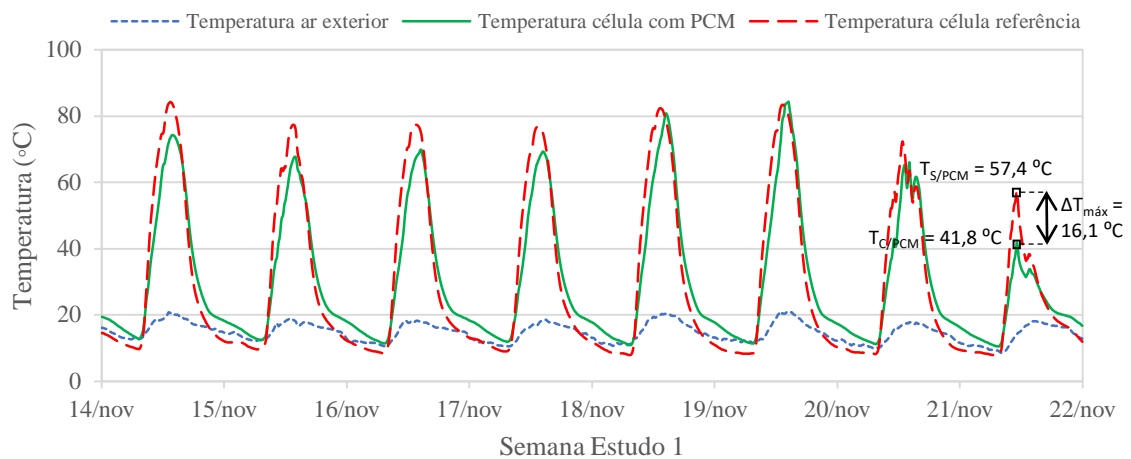


Figura 3.13 - Variação de temperatura registrada nas duas células em comparação com a temperatura exterior do ar para a semana de estudo 1

Constata-se, pela Figura 3.13, o funcionamento do PCM, atenuando as temperaturas mais baixas e absorvendo calor nas temperaturas mais elevadas, reforçando a ideia de que a solução construtiva de PCM ajuda a controlar as variações extremas de temperatura. No dia 21 de novembro, este efeito é particularmente visível, registando-se uma diferença máxima de 16,1 °C entre as células de teste. Em termos de temperaturas mínimas, na célula com PCM o menor valor registado é de 10,5 °C, tendo ocorrido no dia 21 de novembro, enquanto na célula de referência o valor mínimo é de 7,8 °C também no dia 21 de novembro, conforme ilustrado na Figura 3.13. Em termos médios, verifica-se que o PCM, atenuou 10,0 °C da temperatura máxima atingida na célula de referência e cerca de 5,0 °C da temperatura mínima.

Verifica-se que nesta semana de estudo a temperatura no interior da célula com PCM no pico noturno de arrefecimento é sempre superior à temperatura no interior da célula de referência.

Este comportamento deve-se ao calor que o PCM absorveu durante os períodos de maior incidência solar e que depois liberta gradualmente consoante a temperatura do espaço for baixando. Verifica-se ainda que a curva da temperatura da célula de referência possui um declive superior, comportamento que evidencia a presença do PCM.

Idêntico ao procedimento para todo o período de monitorização, também para a primeira semana de estudo foi calculada percentualmente a variação de temperatura entre as células de teste. Assim, durante este período, o PCM em média atenuou 35% da temperatura mínima atingida na célula de referência, atenuando cerca de 18% em média o valor máximo, conforme ilustrado na Figura 3.14.

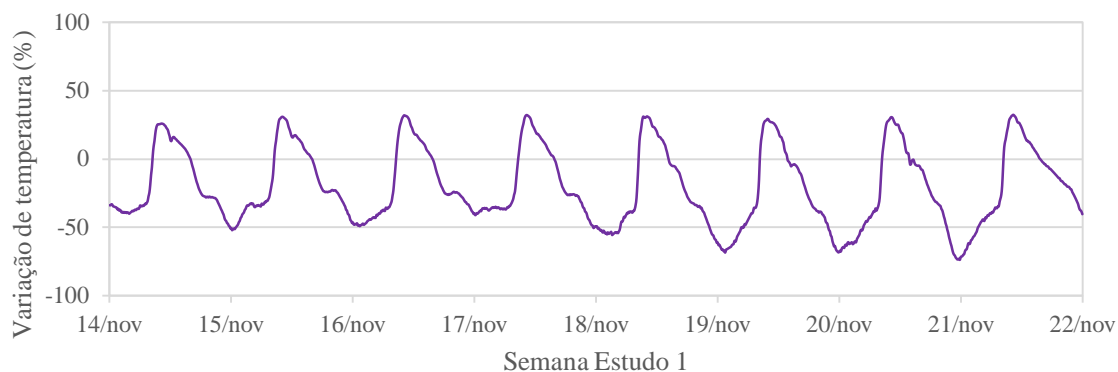


Figura 3.14 – Variação percentual da temperatura da célula de teste com PCM e de referência para a semana de estudo 1

Analisou-se ainda a possível correspondência entre a variação da temperatura nas duas células de teste e a intensidade da radiação solar durante a primeira semana de estudo, como exibido na Figura 3.15 e na Figura 3.16. O padrão da intensidade de radiação solar registado nesta semana de estudo foi quase sempre igual, apenas sofrendo ligeiros períodos de menor intensidade nos dias 20 e 21 de novembro, tendo o valor máximo cifrado-se na ordem dos 500 W/m^2 .

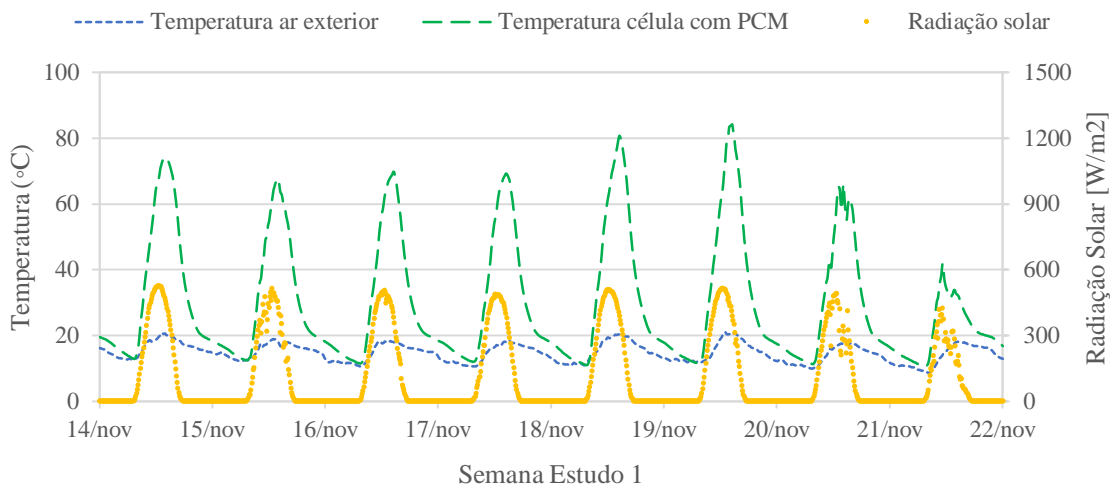


Figura 3.15 - Variação de temperatura na célula com PCM e a intensidade da radiação solar incidente para a semana de estudo 1

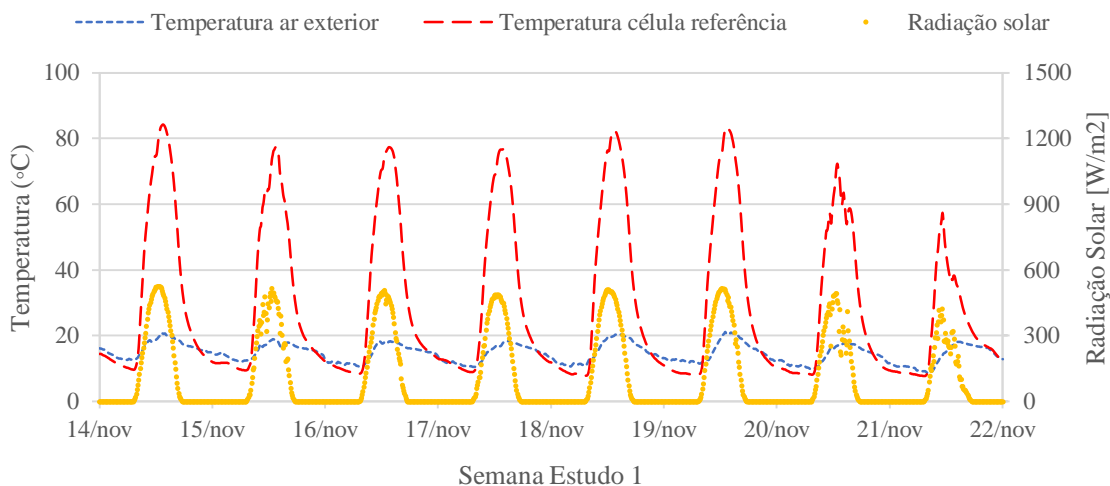


Figura 3.16 - Variação de temperatura na célula de referência e a intensidade da radiação solar incidente para a semana de estudo 1

Fez-se a mesma análise para a velocidade do vento, conforme apresentado na Figura 3.17 e na Figura 3.18. A velocidade do vento ao longo da primeira semana de estudo apresentou valores máximos diários compreendidos entre 2,0 e 4,0 m/s, tendo o máximo sido registado no dia 17 de novembro.

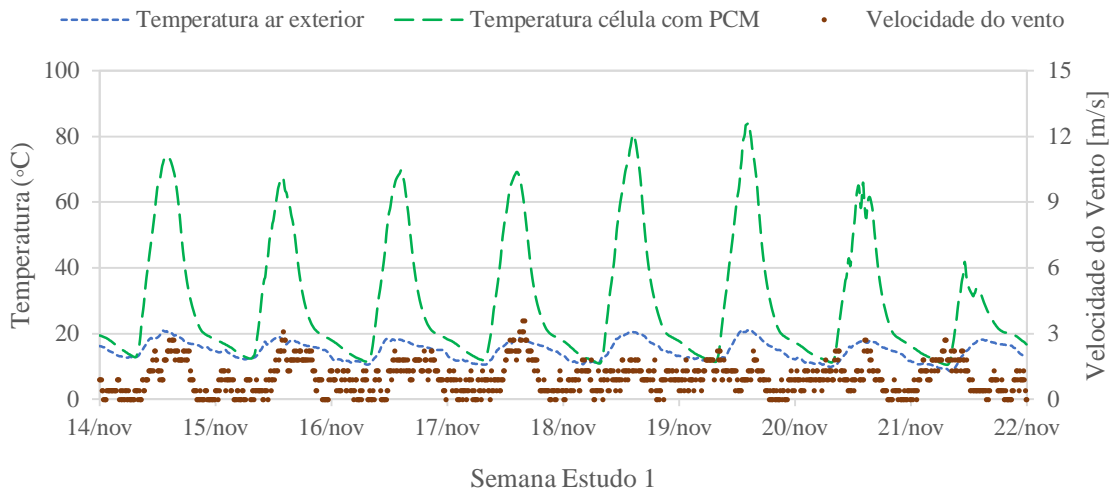


Figura 3.17 - Variação de temperatura na célula com PCM e a velocidade do vento para a semana de estudo 1

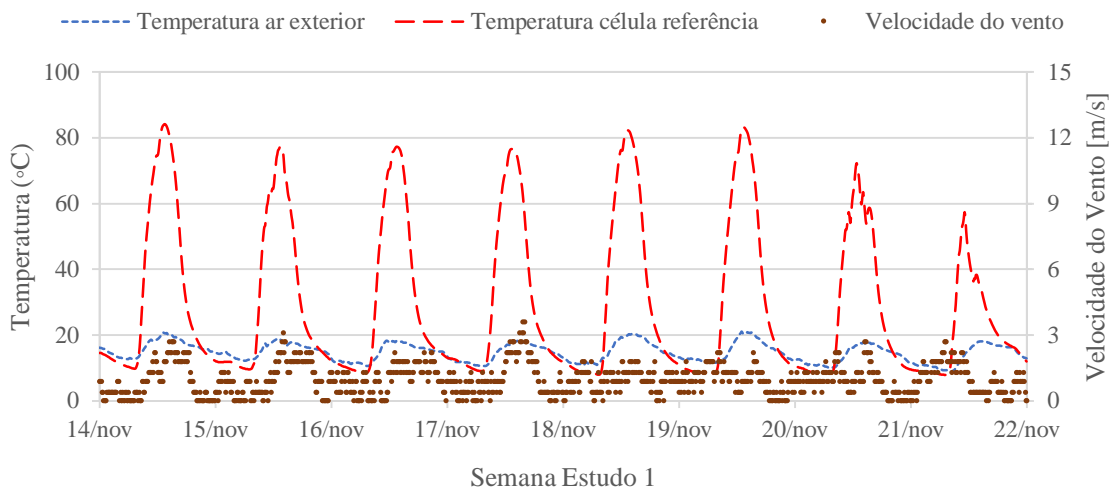


Figura 3.18 - Variação de temperatura na célula de referência e a velocidade do vento para a semana de estudo 1

Para perceber melhor a influência que resulta da presença do PCM numa das células de teste foram realizados *boxplot's* para ambas as semanas de estudo. O *boxplot* (ou diagrama de caixa) é um gráfico utilizado para avaliar a distribuição dos dados recolhidos. O *boxplot* é formado pela média e pelo primeiro e terceiro quartil, representando as barras de erro, inferiores e superiores, os mínimos e máximos absolutos, respetivamente. Em suma, o

boxplot identifica onde estão localizados 50% dos valores mais prováveis, a mediana e os valores extremos.

Na construção dos gráficos *boxplot*'s, e tendo em conta a temperatura de fusão do PCM utilizado ($T = 25^{\circ}\text{C}$), optou-se por filtrar os dados recolhidos, usando apenas os valores correspondentes ao período matutino de aquecimento em que, no intervalo de valores selecionados, a temperatura de fusão fosse central. Assim, no *boxplot* da primeira semana de estudo foram consideradas duas horas, entre as 8h e as 10h, todos os dias.

Torna-se possível através do *boxplot* representado na Figura 3.19 verificar as diferenças de temperaturas nas duas células devido à presença do PCM. Em média o diferencial de temperatura entre a mediana nas duas séries é cerca de $6,0^{\circ}\text{C}$, atenuando em média $14,35^{\circ}\text{C}$ da temperatura máxima e cerca de $3,0^{\circ}\text{C}$ do valor mínimo.

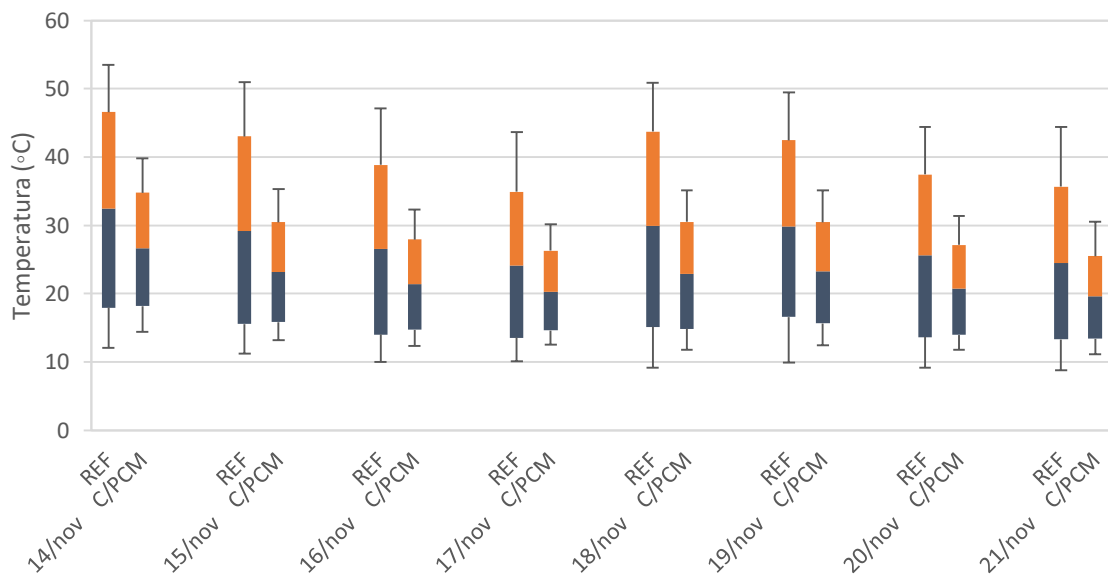


Figura 3.19 - *Boxplot* representativo da variação de temperatura nas duas células para a semana de estudo 1

3.4.2. Semana estudo 2 – Estação de arrefecimento

Para segunda semana de estudo foi escolhida a semana de 21 a 28 de fevereiro. O gráfico da Figura 3.20 mostra a evolução, da temperatura dentro das células de teste, bem como da

temperatura do ar exterior. Referira-se novamente que a análise se cinge a apenas sete dias para permitir uma interpretação mais clara dos gráficos.

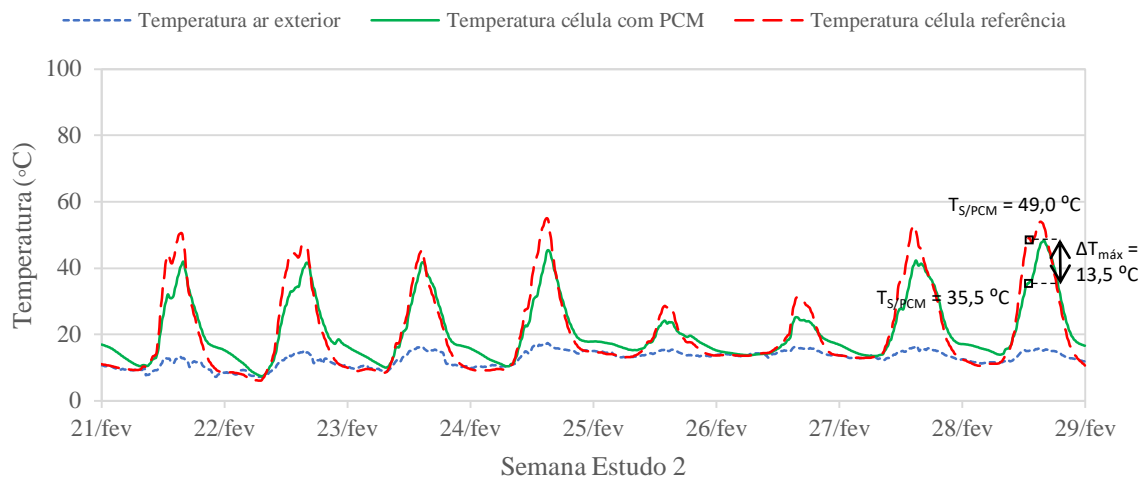


Figura 3.20 - Variação da temperatura registrada nas duas células em comparação com a temperatura exterior do ar para a semana de estudo 2

A temperatura máxima atingida na célula com PCM é de 48,4 °C e ocorre no dia 28 de fevereiro. Nessa mesma célula a temperatura mínima registrada ocorreu no dia 22 de fevereiro tendo o valor de 7,5 °C. Por outro lado, na célula de referência a temperatura máxima assinalada foi de 55,0 °C tendo ocorrido no dia 24 de fevereiro. Em termos de temperaturas mínimas, o menor valor é de 6,0 °C registado no dia 22 de fevereiro. A eficiência do PCM é acentuada pela máxima diferença registada entre as células de teste, no valor de 13,5 °C no dia 28 de fevereiro, conforme ilustrado na figura anterior. Durante a segunda semana de estudo escolhida do período monitorização, o PCM em média atenuou 13% da temperatura máxima atingida na célula de referência, atenuando em média cerca de 27% da temperatura mínima registada, como mostrado na Figura 3.21.

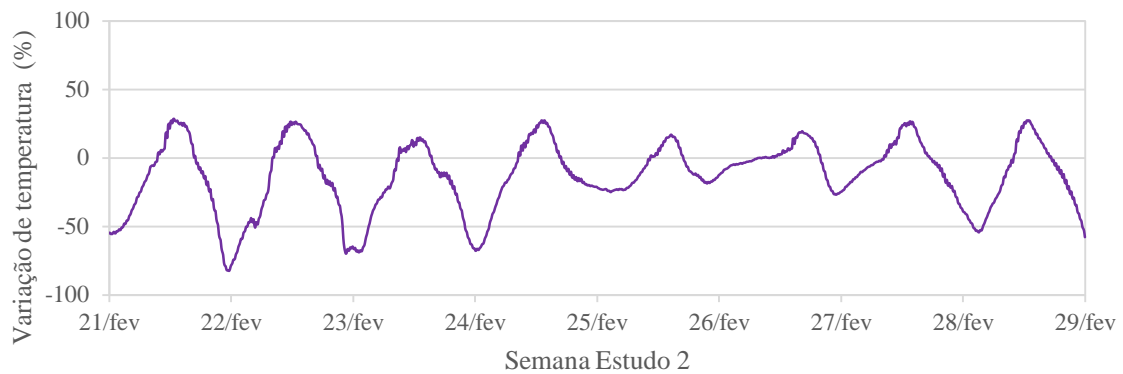


Figura 3.21 - Variação percentual da temperatura da célula de teste com PCM e de referência para a semana de estudo 2

Também para o segundo período de estudo analisou-se a relação entre a variação da temperatura nas duas células de teste e a intensidade da radiação solar. A intensidade de radiação solar registrada nesta semana de estudo não teve um padrão tão regular como no primeiro período. No intervalo de tempo examinado tanto houveram dias de maior intensidade de radiação solar como dias de menores valores. Mesmo no decorrer de um mesmo dia torna-se possível constatar uma grande dispersão dos valores medidos, conforme o exibido nas Figura 3.22 e Figura 3.23. O máximo valor da intensidade da radiação solar ocorreu no dia 27 de fevereiro, registrando-se 1200 W/m^2 .

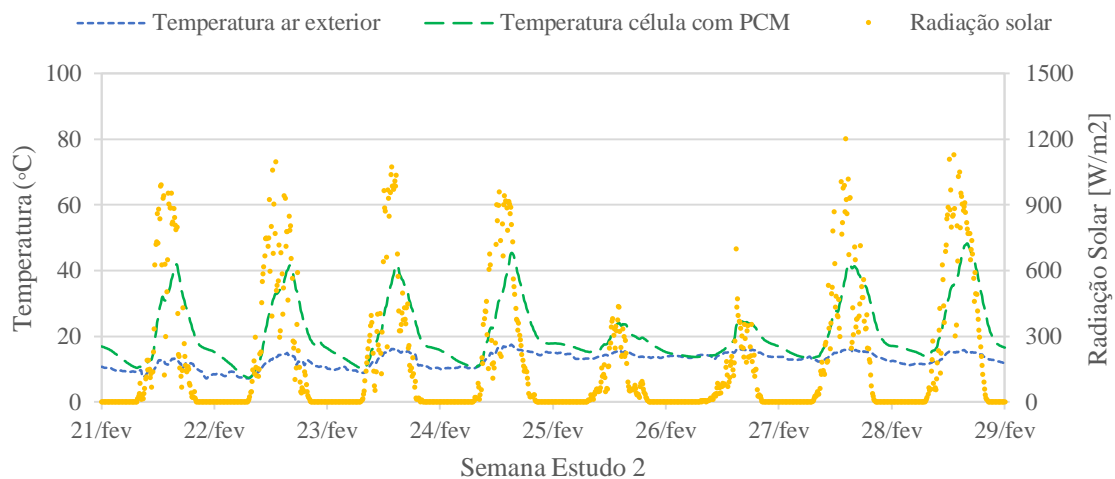


Figura 3.22 - Variação de temperatura na célula com PCM e a intensidade da radiação solar incidente para a semana de estudo 2

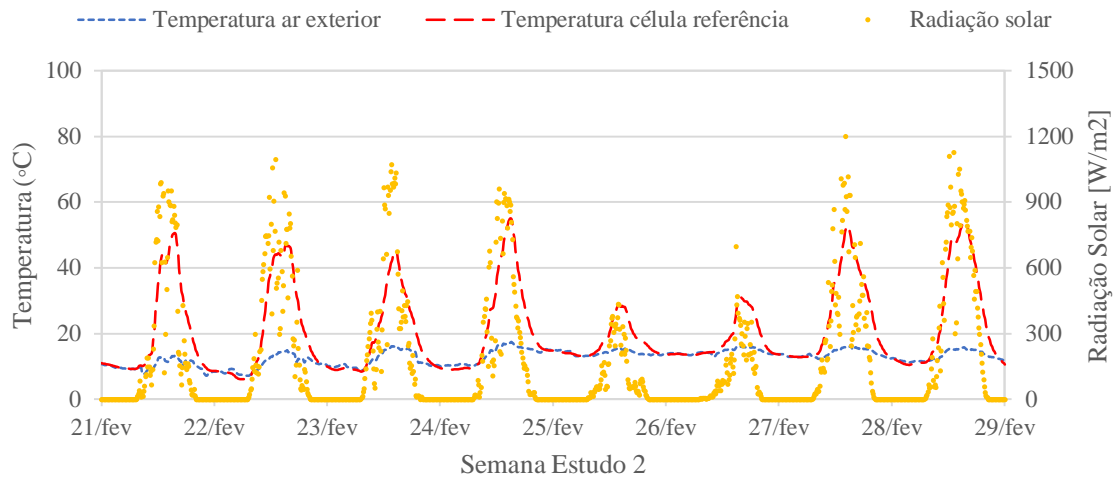


Figura 3.23 - Variação de temperatura na célula de referência e a intensidade da radiação solar incidente para a semana de estudo 2

Posteriormente, e do mesmo modo ao realizado anteriormente, analisou-se a relação entre a intensidade da radiação solar e a velocidade do vento, Figura 3.24 e Figura 3.25. A segunda semana de estudo foi mais ventosa do que a primeira, registrando na quase totalidade dos dias analisados valores máximos diários superiores a 8,0 m/s, tendo o máximo registo da velocidade do vento ocorrido no dia 21 de fevereiro, com o valor de 11,2 m/s.

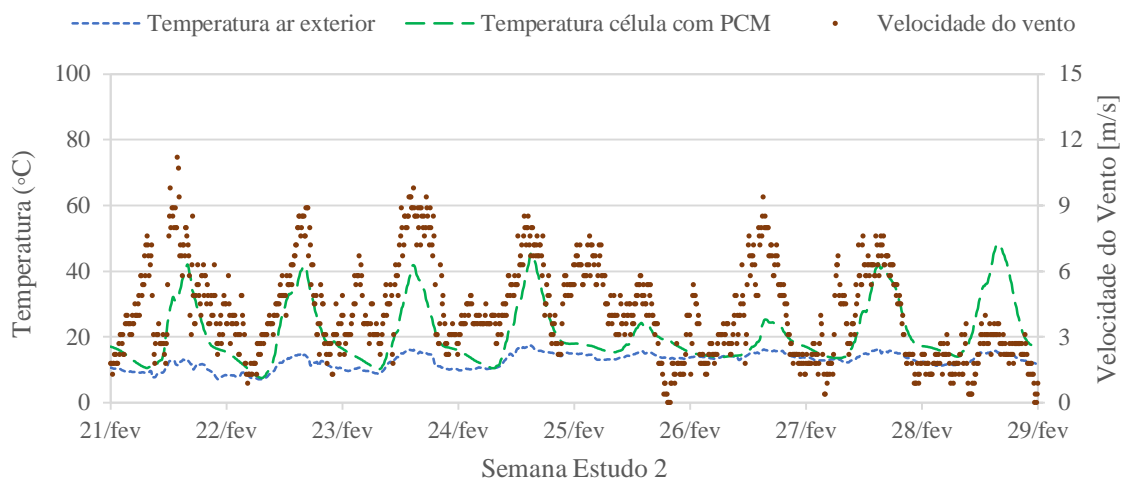


Figura 3.24 - Variação de temperatura na célula com PCM e a velocidade do vento para a semana de estudo 2

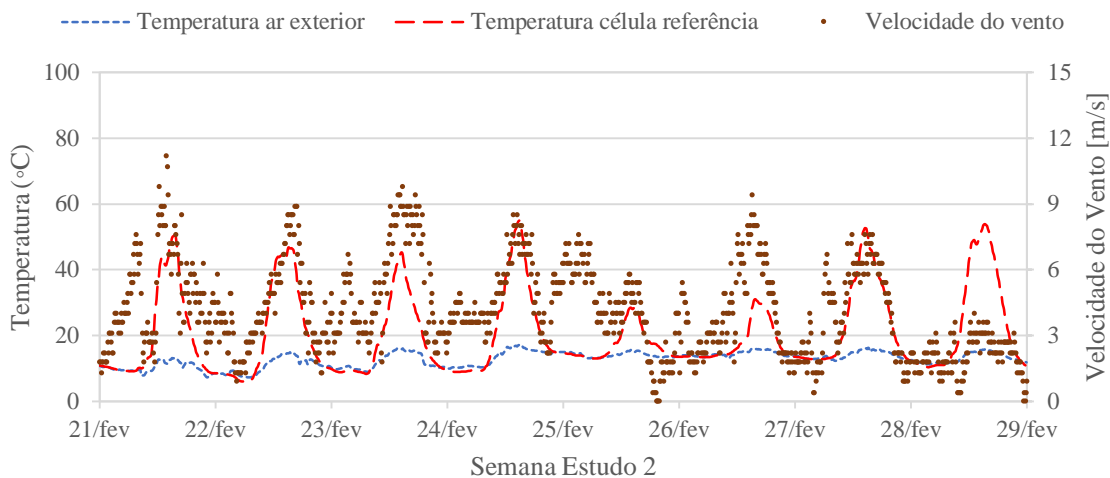


Figura 3.25 - Variação de temperatura na célula de referência e a velocidade do vento para a semana de estudo 2

De igual modo ao efetuado para o primeiro período analisado, depois da filtragem dos dados e calculados os parâmetros necessários, desenhou-se o segundo *boxplot*. Para o *boxplot* da segunda semana de estudo foi considerado o intervalo entre as 8h e as 14h, todos os dias. A diferença de horas utilizadas no *boxplot* da segunda semana de estudo comparativamente com a primeira deve-se às temperaturas terem sido mais baixas nesta semana.

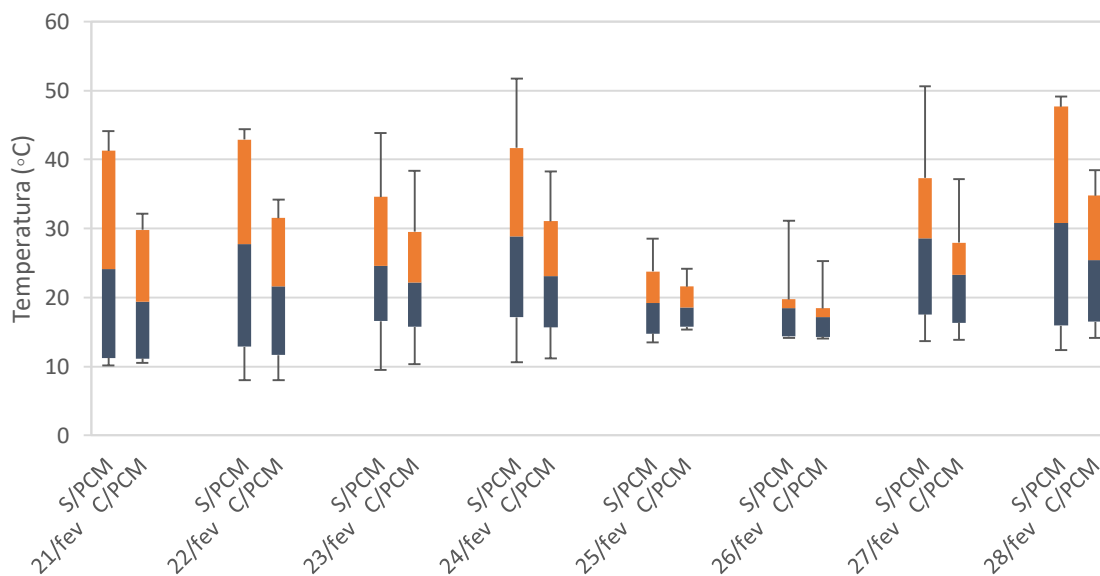


Figura 3.26 - *Boxplot* representativo da variação de temperatura nas duas células para a semana de estudo 2

Através do *boxplot* ilustrado na figura anterior verificam-se as diferenças de temperatura nas duas células devido à presença do PCM. Em média, a diferença entre a mediana das temperaturas registadas nas células de teste cifrou-se em cerca de 4,0 °C, atenuando em média 1,0 °C da temperatura mínima e cerca de 9,4 °C do máximo registado.

3.5. Estimativa da taxa de infiltração

No módulo de teste, além da medição da temperatura, foram também realizadas estimativas da taxa de infiltração com o intuito de quantificar a infiltração de ar em cada célula. Os ensaios foram realizados com recurso a um equipamento Datalogger Wohler CDL 210, conforme ilustrado na Figura 3.27, tendo sido utilizado o método do gás traçador e a técnica do declive. Este método consiste em introduzir, dentro do espaço de teste, uma certa quantidade de um gás traçador, neste caso o CO₂, até atingir a concentração desejada. Atingida essa concentração, começa-se a registar a sua evolução temporal dentro do espaço de teste [28]. Ao seleccionar-se o método do declive para estimar a taxa de infiltração do espaço apenas é necessário injetar uma certa quantidade de CO₂ para que a concentração deste gás dentro do espaço de teste aumente até a um determinado valor inicial (C_0). A norma ASTM E 741, [29], não estipula qual o valor que C_0 deve adotar em cada situação, podendo este apenas ser obtido empiricamente. Por este motivo realizaram-se ensaios preliminares para verificar a funcionalidade dos equipamentos e ter uma sensibilidade da grandeza da taxa de renovações de ar de cada célula.



Figura 3.27 - Equipamento Datalogger Wohler CDL 210 utilizado

Durante a fase de decaimento dos ensaios não há injeção/produção de mais CO₂, podendo-se utilizar para o cálculo da taxa de infiltração a equação:

$$C(t) = C_a + (C_0 - C_a) \times e^{-\frac{\dot{V}}{V}t} \quad (3.1)$$

Uma vez que de acordo com a equação anterior a evolução temporal da concentração de gás evolui segundo uma cinética de primeira ordem, esta pode ser linearizada aplicando logaritmos a ambos os lados e fazendo uma substituição $\frac{\dot{V}}{V} = \lambda$ em que λ diz respeito ao número de renovações de ar por unidade de tempo (normalmente λ expressa-se em (h⁻¹)) a evolução da concentração é dada por:

$$\ln[C(t) - C_a] = -\lambda \cdot t + \ln(C_0 - C_a) \quad (3.2)$$

Depois de realizados os ensaios preliminares e obtidos valores da taxa de infiltração, optou-se por em ambas as células elevar a concentração de CO₂ a valores superiores a 2500 ppm. De seguida decorre o período de decaimento até ser atingida a concentração de CO₂ da atmosfera (mais ou menos 400 ppm). Assim, com o registo da concentração inicial e com o período de decaimento é possível estimar a taxa de infiltração da célula. A evolução temporal da concentração de CO₂ durante os ensaios permite obter as regressões lineares e as respetivas estimativas da taxa de infiltração. Na Figura 3.28 é apresentada a regressão linear resultante do primeiro ensaio realizado na célula de referência.

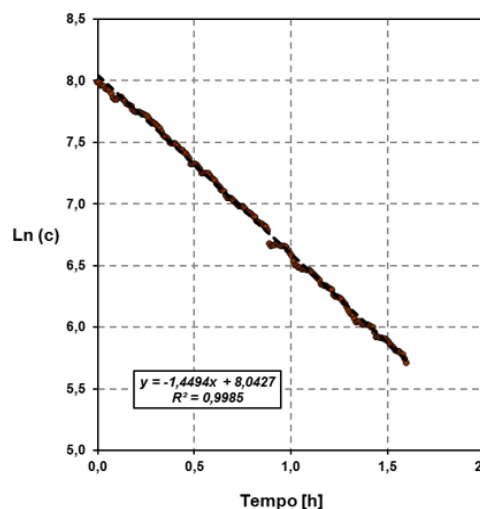


Figura 3.28 – Regressão linear feita aos resultados experimentais do 1º ensaio realizado na célula de referência

Através de uma rápida análise da equação 3.2 verifica-se que o declive da reta λ é equivalente ao número de renovações horárias de ar dentro do espaço de teste. No total foram realizados seis ensaios de infiltração, três em cada célula de teste. Na Tabela 4 encontram-se representados todos os valores de RPH determinados.

Tabela 4 – Valor de RPH estimados da taxa de infiltração nas células de teste

	Valor de RPH		
	<i>1º Ensaio</i>	<i>2º Ensaio</i>	<i>3º Ensaio</i>
Célula com PCM	0,36 h ⁻¹	0,66 h ⁻¹	0,52 h ⁻¹
Célula de referência	1,45 h ⁻¹	1,66 h ⁻¹	1,31 h ⁻¹

Os resultados dos diferentes ensaios mostram uma diferença entre os dois espaços com algum significado. Esta diferença ocorre provavelmente devido à possível existência de alguma fuga. As desigualdades existentes entre valores obtidos para as duas células ou para a mesma célula podem ser explicadas, por exemplo, pela velocidade do vento registada no dia em que decorreu o ensaio. Nos ensaios de estimativa da taxa de infiltração para a célula com PCM a estação meteorológica presente na UA registou durante o período de decaimento uma velocidade do vento média de 2,48 m/s, 1,65 m/s e 3,75 m/s respetivamente, enquanto nos ensaios realizados na célula de referência os valores para a velocidade do vento registados foram mais elevados, 5,65 m/s, 6,59 m/s e 7,83 m/s. Um ensaio realizado num dia mais ventoso tenderá a apresentar taxas de renovações horárias superiores aos realizados num dia mais ameno.

3.6. Síntese do capítulo

O presente capítulo tem como objetivo expor detalhadamente a metodologia adotada no módulo de teste. Inicialmente apresenta-se o módulo de teste, indicando a sua localização e descrevendo os elementos da envolvente. O edifício testado é constituído por duas células

iguais com dimensões gerais de 7,0 m de comprimento, 2,35 m de largura e 2,58 m de altura, sendo a fachada envidraçada orientada a sul com o objetivo de retirar o máximo rendimento do PCM incorporado numa das células. A solução de PCM utilizada foi caracterizada recorrendo a dados fornecidos pelo fabricante.

Posteriormente, é descrita a abordagem da monitorização levada a cabo no módulo de teste e analisados os resultados obtidos. Assim, os dados recolhidos e a análise das duas semanas de estudo possibilitaram confirmar o efeito de regulação da temperatura no ambiente onde o PCM se encontra incorporado. Os resultados obtidos permitem validar a utilização de PCM verificando-se, em ambas as semanas de estudo, temperaturas mínimas mais elevadas e temperaturas máximas mais baixas, na célula onde se integrou o PCM, registando-se como diferencial máximo atenuado o valor de 16,1°C. Ainda assim, e visto que as células em dias de elevada incidência de radiação solar e baixa velocidade do vento atingem temperaturas no seu interior muito elevadas, é também verificável que o PCM a partir de certa temperatura não apresenta tanta eficiência. O estudo das duas semanas escolhidas não permitiu a retirada de ilações muito claras acerca da relação existente entre a intensidade da radiação solar, a velocidade do vento e a temperatura no interior das células. Por outro lado, os *boxplot's* construídos evidenciam a eficiência da solução de PCM, verificando-se um diferencial de temperatura máximo da mediana nas duas células de 6,0 °C, atenuando no mínimo cerca de 10,0 °C nas temperaturas máximas.

Por fim, realizam-se estimativas da taxa de infiltração nas duas células, que permitem perceber que a célula de referência apresenta valores mais elevados o que o provoca uma diminuição das temperaturas no interior desta célula. Desta forma, com duas células em que a taxa de infiltração de ar fosse mais próxima, a eficiência do PCM seria ainda mais visível.

Capítulo 4

Ensaaios HotBox

Capítulo 4. Ensaio *HotBox*

- 4.1. Enquadramento
- 4.2. Processo de construção dos provetes de ensaio
- 4.3. Descrição do procedimento de ensaio - *HotBox*
 - 4.3.1. Colocação anel e desenho da grelha
 - 4.3.2. Colocação sensores e instrumentação dos provetes
 - 4.3.2.1. Termofluxímetros
 - 4.3.2.2. Sondas de temperatura PT100
 - 4.3.2.3. Termopares tipo k
 - 4.3.3. Programação dos ciclos de ensaio
 - 4.3.3.1. Ciclo – determinação da eficiência do uso de PCM
 - 4.3.3.2. Ciclo – determinação do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente (λ_{eq})
- 4.4. Síntese do capítulo

Capítulo 4. Ensaio *HotBox*

4.1. Enquadramento

Com o intuito de estudar o comportamento do PCM foram construídos dois provetes, um deles com PCM e outro sem PCM, para posteriormente serem analisados e caracterizados num equipamento *HotBox*. Assim, no presente capítulo, será apresentada a metodologia dos ensaios *HotBox*, a descrição do processo de construção dos provetes utilizados e descritos os procedimentos de ensaio.

Em elementos construtivos compostos somente por camadas uniformes planas e paralelas entre si, o cálculo do coeficiente de transmissão térmica (U) depende unicamente do somatório de resistências térmicas associadas a cada uma das camadas [30]. Ainda assim, grande parte das soluções construtivas possuem heterogeneidades, podendo nestes casos o coeficiente de transmissão térmica ser calculado recorrendo a métodos numéricos. A determinação do U pode ainda ser realizada mediante métodos laboratoriais, apontando a norma ISO 10456:2007 os seguintes métodos para determinar valores de condutibilidade térmica ou resistência térmica: “Guarded Hot Plate”, “Heat Flow Meter”, “*Calibrated HotBox*” e “*Guarded HotBox*”.

O equipamento *HotBox* permite a determinação direta do coeficiente de transmissão térmica de soluções construtivas. Existem dois esquemas possíveis de *HotBox*: a “*Guarded HotBox*” (GHB) e a “*Calibrated HotBox*” (CHB), estando descrita na norma EN ISO 8990 a construção e o modo de operação da *HotBox*. A instrumentação realizada no âmbito desta dissertação foi executada recorrendo ao segundo esquema. Na CHB as paredes exteriores das câmaras climáticas são construídas com uma grande resistência térmica para minimizar as perdas por condução e o fluxo de calor através dessas paredes será medido nos ensaios para uma vasta gama de temperaturas usando painéis de calibração. A determinação do coeficiente de transmissão térmica envolve fundamentalmente duas fases. Primeiramente as medições são realizadas com dois painéis de calibração com as suas propriedades térmicas conhecidas, a partir das quais são determinados os coeficientes de transferência térmica

superficiais dos dois lados do painel de calibração, e a resistência térmica do painel envolvente. Numa segunda fase coloca-se na abertura no anel de ensaio os provetes e o equipamento *HotBox* é utilizado com as mesmas configurações de ventilação como no procedimento de calibração. Um equipamento *HotBox* é constituído por duas câmaras climáticas, apresentadas na Figura 4.1, tendo no meio delas um anel de ensaio, Figura 4.2, onde são colocados os provetes de ensaio. Na Figura 4.3 apresenta-se um esquema da “*Calibrated HotBox*” utilizada na instrumentação.



Figura 4.1 – Câmara climática

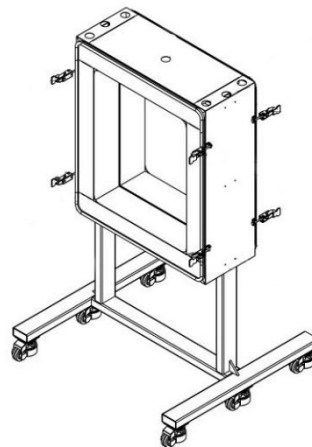


Figura 4.2 - Anel de ensaio

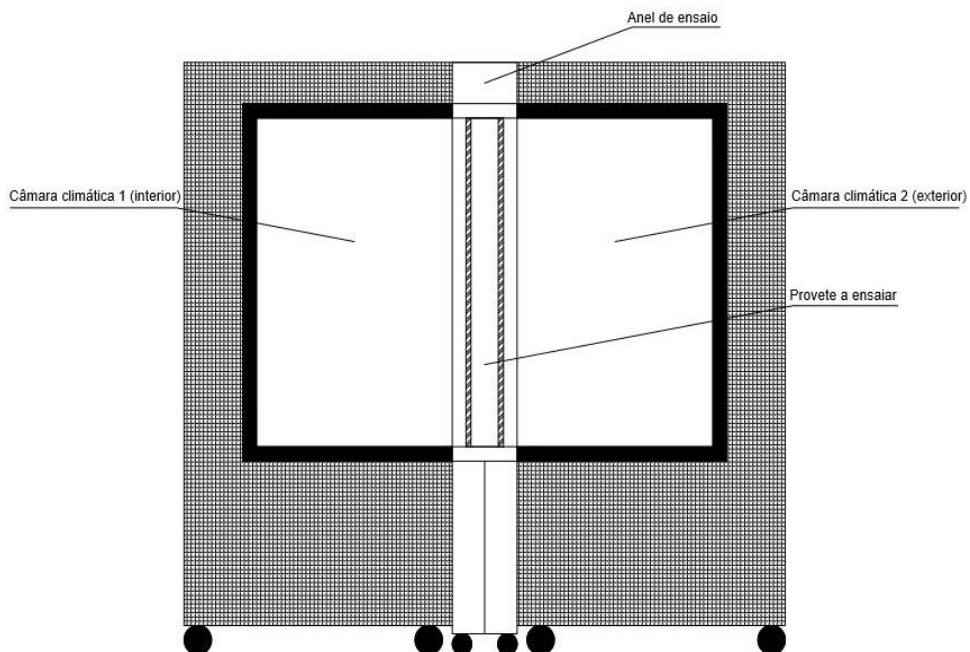


Figura 4.3 - Esquema de “Calibrated HotBox”

4.2. Processo de construção dos provetes de ensaio

Para provete de ensaio pretendeu-se um elemento de baixa inércia, que representasse uma parede com uma caixa de ar no interior, em que fosse possível aplicar o PCM. Assim, os provetes foram construídos com recurso a perfis metálicos (raia 70) para formar o “esqueleto” dos mesmos e nas faces placas de gesso cartonado de 12,5 mm. Conforme referido num dos provetes uma das faces interiores foi revestida com placas de BioPCM® M51/Q25. O interior e o aspecto final dos provetes encontra-se ilustrado na Figura 4.4, Figura 4.5 e Figura 4.6.



Figura 4.4 - Interior do provete de referência



Figura 4.5 - Interior do provete com PCM



Figura 4.6 - Aspeto final dos provetes

4.3. Descrição do procedimento de ensaio - *HotBox*

4.3.1. Colocação anel e desenho da grelha

De forma a realizar as instrumentações, os provetes de ensaio foram construídos com as dimensões adequadas de modo a ser possível incorporá-los no óculo central entre as câmaras climáticas. Depois da fixação das faces dos provetes aos perfis metálicos, realizada com recurso a parafusos, tornou-se indispensável rebocar as faces de ambos os lados para cobrir eventuais buracos resultantes desta fixação. Deste modo aplicou-se em cada face uma camada de gesso de estuque com cerca de dois milímetros de espessura. Ainda antes de colocar o provete no anel foi necessário traçar nas faces dos mesmos a grelha onde posteriormente são aplicados os sensores de temperatura, grelha essa representada na Figura 4.7.

Realça-se que após finalizada a preparação do provete, este é colocado no centro do anel de ensaio, sendo a sua fixação feita com recurso a silicone vedante, conforme mostrado na Figura 4.8.

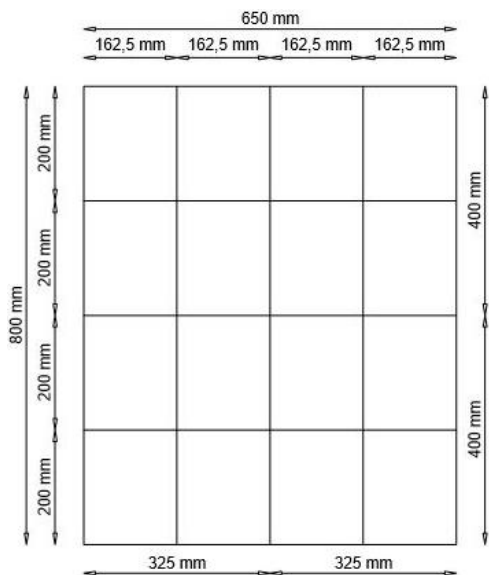


Figura 4.7 - Grelha de posicionamento de instrumentação



Figura 4.8 - Ilustração do provete de ensaio colocado no anel de ensaio

4.3.2. Colocação sensores e instrumentação dos provetes

As câmaras climáticas de um equipamento *HotBox* incluem de sistemas de aquisição e sensores de temperatura, que devem estar devidamente calibrados. Entre os vários sensores existem termofluxímetros (designado por F), sondas de temperatura PT100 (designado por T) e termopares tipo k (designado por Ts), distribuídos por diferentes posições nas duas câmaras climáticas e no provete.

4.3.2.1. Termofluxímetros

O termofluxímetro é um sensor que mede o fluxo de calor que atravessa o provete. Este é colocado no centro da face do provete, em concordância com o centro da grelha previamente efetuada. São aplicados dois termofluxímetros, um na câmara que simula as condições exteriores e outro na câmara que simula as condições interiores, de acordo com o ilustrado na Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11.

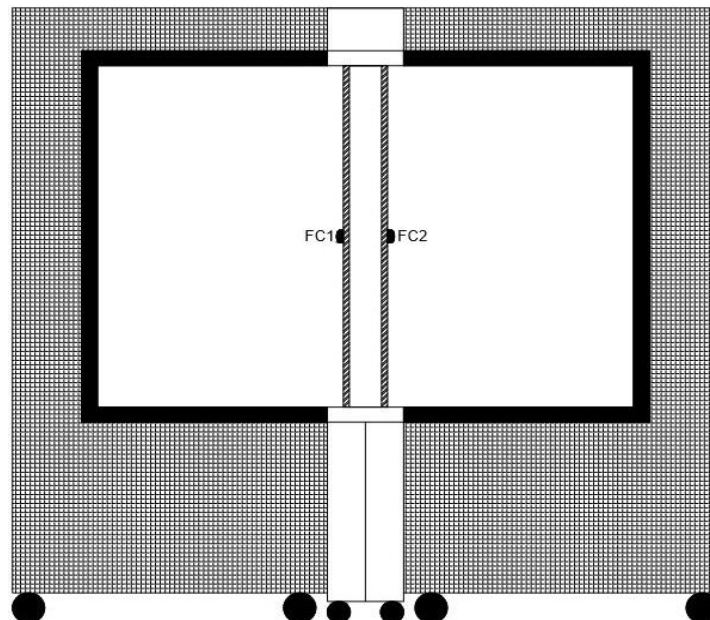


Figura 4.9 - Representação esquemática em corte das duas câmaras climáticas e do provete com os termofluxímetros aplicados

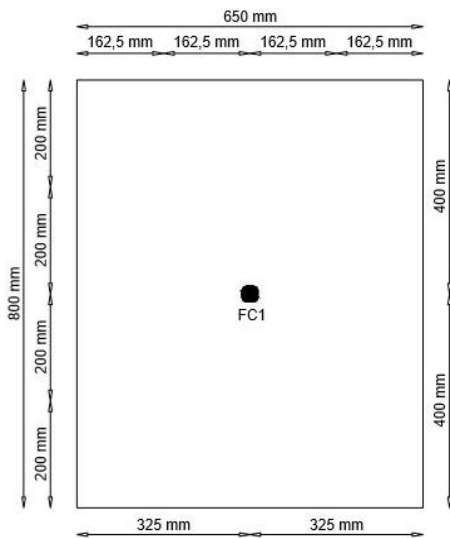


Figura 4.10 - Colocação do termofluxímetro na câmara climática 1 (interior)



Figura 4.11 – Ilustração da distribuição do termofluxímetro na câmara climática 2 (exterior)

4.3.2.2. Sondas de temperatura PT100

As sondas de temperatura PT100 são sensores que medem a temperatura do ar nas câmaras climáticas. Estas são distribuídas nas grelhas metálicas existentes no interior de ambas as câmaras climáticas. Uma das sondas é colocada na grelha do meio no centro da mesma e as restantes são colocadas em forma de cruz a cerca de onze centímetros das faces do provete. As sondas de temperatura PT100 encontram-se dispostas de forma igual nas duas câmaras climáticas, idêntico ao representado na Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14.

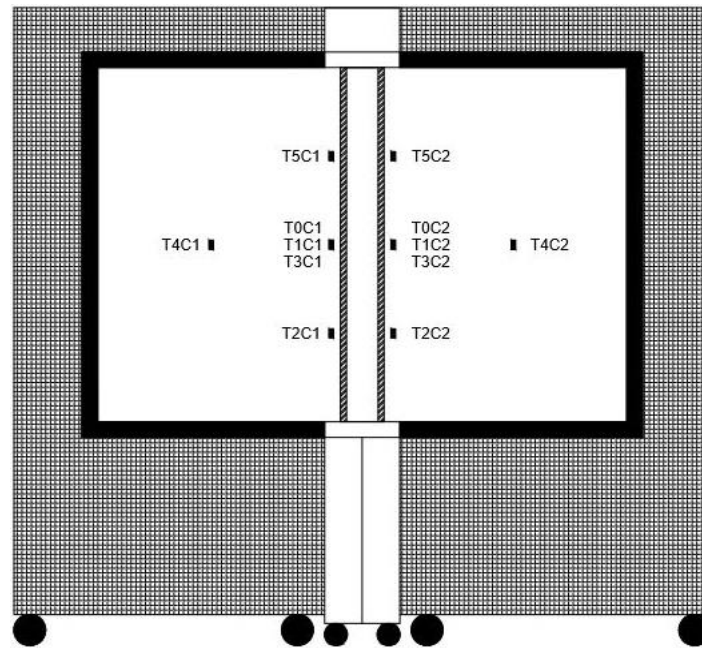


Figura 4.12 - Representação esquemática em corte das duas câmaras climáticas e do provete com as sondas de temperatura PT100 aplicadas

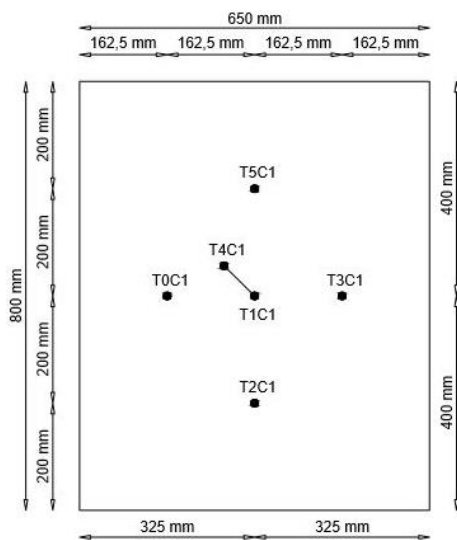


Figura 4.13 - Esquema da distribuição das sondas de temperatura PT100 na câmara climática 1 (interior)



Figura 4.14 – Ilustração da distribuição das sondas de temperatura PT100 na câmara climática 2 (exterior)

4.3.2.3. Termopares tipo k

Os termopares tipo k são sensores que medem a temperatura superficial nas faces do provete. Estes são distribuídos pela grelha desenhada nas faces do provete para assim se obterem informações de diferentes posições nas faces do provete. A aplicação dos termopares encontra-se representada na Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17.

De referir que devido à limitação das câmaras climáticas usadas nos ensaios, em que apenas existem oito termopares em cada câmara climáticas e sendo que a grelha traçada nos provetes tem nove pontos de medição, optou-se por, em primeiro lugar, garantir termopares na cruz central da grelha. Restando três termopares, num dos quatros cantos da grelha não foi aplicado nenhum, pois por simetria poder-se-á ter noção da temperatura nesse canto através do termopar aplicado no canto simétrico.

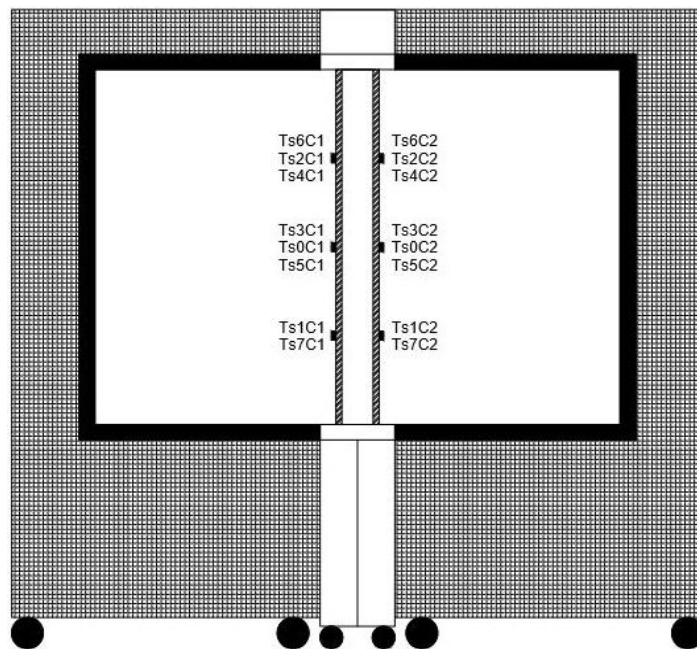


Figura 4.15 - Representação esquemática em corte das duas câmaras climáticas e do provete com os termopares aplicados

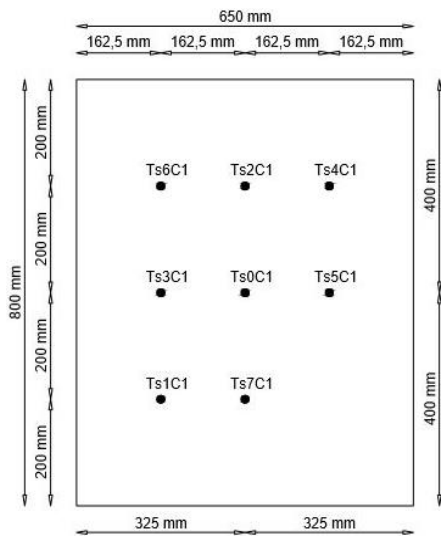


Figura 4.16 - Esquema da distribuição sobre o provete dos termopares na câmara climática 1 (interior)



Figura 4.17 - Ilustração da distribuição sobre o provete dos termopares na câmara climática 2 (exterior)

Na instrumentação dos dois provetes houve o cuidado de colocar os sensores de temperatura com a mesma distribuição para ambos os ensaios de modo a obter os resultados mais fidedignos possíveis. A fixação de todos os sensores executou-se com recurso a fita adesiva porque sendo uma solução termicamente neutra é também uma solução não intrusiva.



Figura 4.18 – Posicionamento dos sensores de temperatura superficial aplicados no provete e das sondas aplicadas na grelha metálica da câmara climática

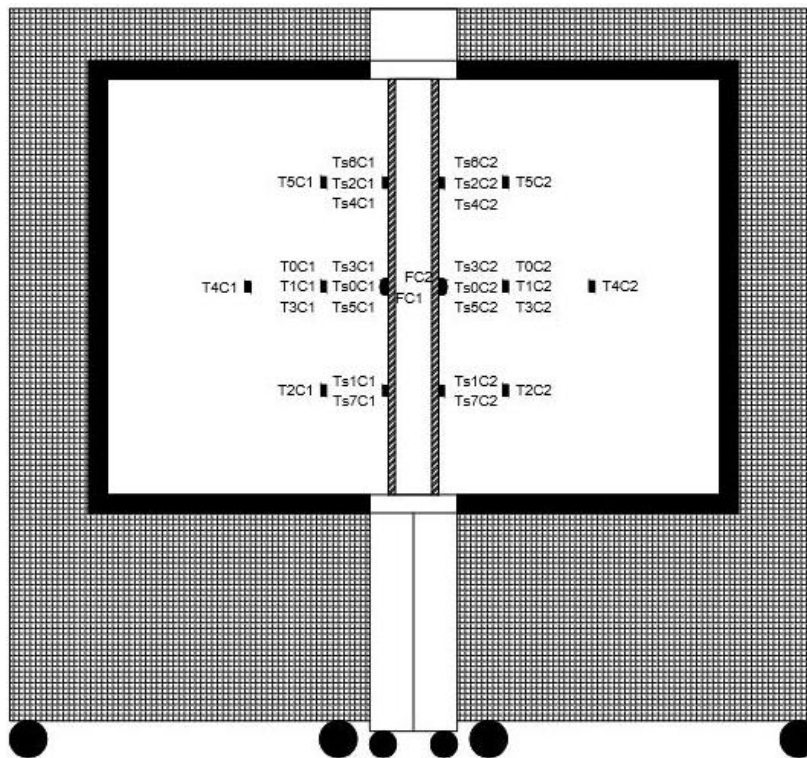


Figura 4.19 - Representação esquemática em corte do posicionamento de todos os sensores de temperatura utilizados na instrumentação

4.3.3. Programação dos ciclos de ensaio

A metodologia das campanhas experimentais consiste em programar as câmaras climáticas para instrumentar ciclos identificados com o propósito de adquirir resultados distintos. O primeiro ciclo tem a duração de três dias e o intuito de determinar qual a influência do uso de PCM num dos provetes. Posteriormente, com o segundo ciclo de ensaio pretendeu-se estimar o coeficiente de condutibilidade térmica equivalente (λ_{eq}) dos dois provetes ensaiados.

4.3.3.1. Ciclo – determinação da eficiência do uso de PCM

Com o primeiro ciclo de ensaio pretende-se averiguar o funcionamento do PCM, examinando a eficiência do mesmo. Neste ciclo de ensaio com a duração de três dias, Figura 4.21, a câmara climática 2, que simula as condições exteriores, impõe o ciclo de instrumentação e a câmara climática 1, que se encontra desligada, apenas regista as temperaturas interiores. No total o ciclo de três dias consiste na repetição do mesmo ciclo diário quatro vezes, servindo o primeiro ciclo de 24 horas para estabilização das temperaturas no interior das câmaras climáticas, representado na Figura 4.21 pela região a cinzento, sendo posteriormente filtrado da apresentação dos resultados.

A campanha experimental começa com um patamar de três horas à temperatura de 14 °C, subindo depois aos 40 °C durante seis horas, estabilizando nessa temperatura mais seis horas. De seguida a câmara climática impõe que a temperatura regresse aos 14 °C durante seis horas, mantendo-se estável aí mais três horas, conforme graficamente ilustrado na Figura 4.20. Refira-se que, durante os ensaios, a humidade relativa (HR) nas duas câmaras climáticas manteve-se constante em 50%.

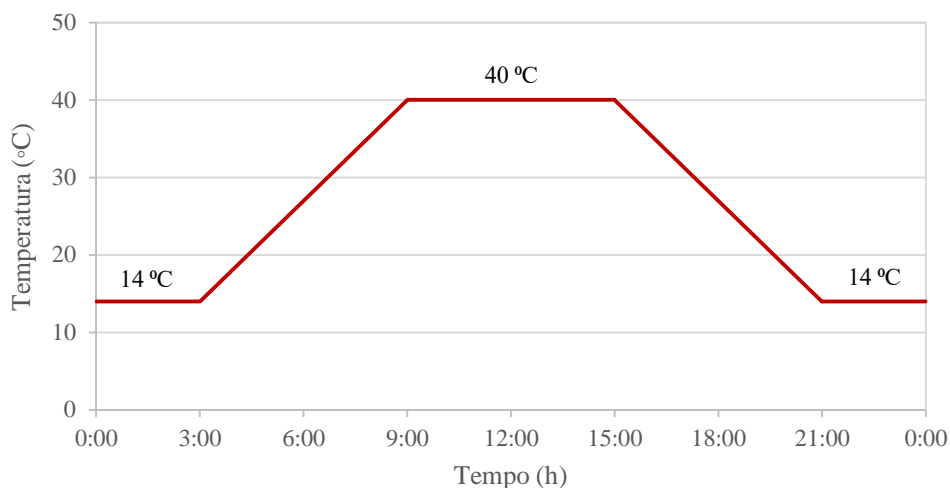


Figura 4.20 - Ciclo diário imposto pela câmara climática 2 (exterior)

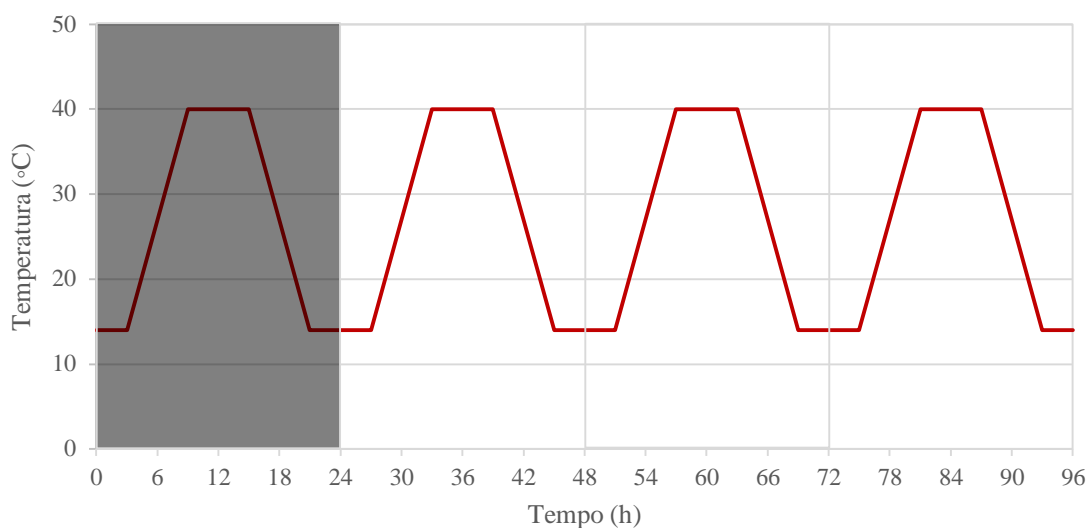


Figura 4.21 - Ciclo de instrumentação de 4 dias imposto pela câmara climática 2 (exterior)

4.3.3.2. Ciclo – determinação do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente (λ_{eq})

Com a segunda campanha de ensaios, como referido anteriormente, pretende-se determinar o valor do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente (λ_{eq}) para as duas soluções em análise. Durante este período de instrumentação ambas as câmaras climáticas encontram-se ligadas e a impor condições. A câmara climática 1 simula as condições interiores e a câmara climática 2 simula as condições exteriores. A câmara climática 2 começa nos 4 °C enquanto a câmara climática 1 impõe no início 14 °C, ambas durante quatro horas. A temperatura imposta vai sendo aumentada em 2 °C em intervalos de quatro horas, mantendo-se sempre um diferencial de temperatura no interior das câmaras climáticas de 10°C, até se atingir 30 °C na câmara climática 2 e 40 °C na câmara climática 1, tal como exibido na Figura 4.22.

Devido ao equipamento *HotBox* utilizado nas campanhas experimentais não permitir estabelecer valores para a humidade relativa (HR) de 50% para temperaturas inferiores a 10°C até ao quarto patamar as câmaras impõem 0% de HR, impondo para os restantes 50% de HR.

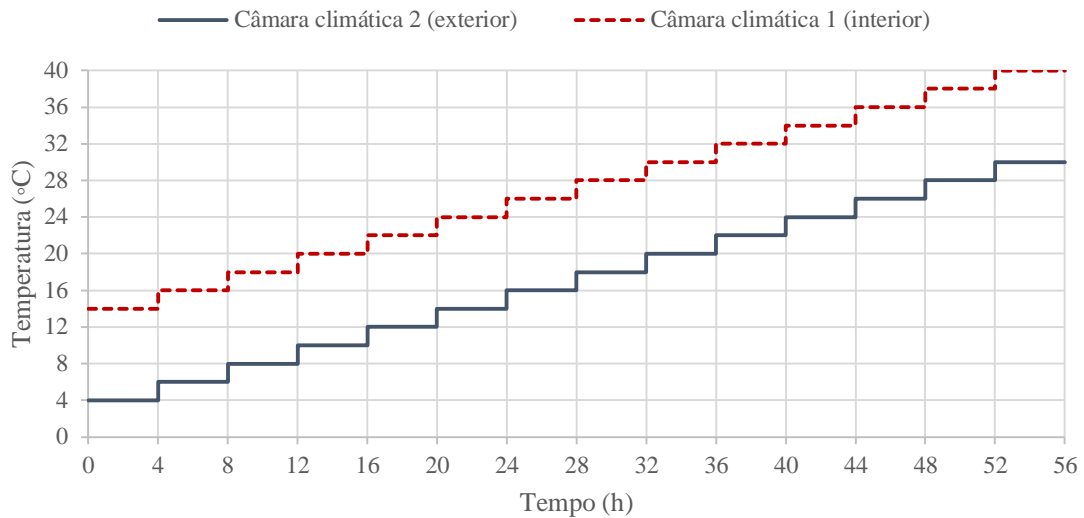


Figura 4.22 - Representação das temperaturas das câmaras climáticas na segunda campanha experimental

4.4. Síntese do capítulo

Este capítulo descreve, a metodologia adotada na instrumentação de provetes para ensaio num equipamento *HotBox*. É feito um enquadramento deste tipo de ensaios, apresenta-se o processo de construção dos provetes e é descrito todo o procedimento de ensaio, desde a colocação dos sensores à programação dos ciclos de ensaio. A programação dos ciclos divide-se em duas fases. Numa primeira fase pretende-se averiguar a eficiência do uso de uma solução de PCM, enquanto numa segunda fase deseja-se determinar o coeficiente de condutibilidade térmica equivalente para ambos os provetes.

Capítulo 5

Apresentação e análise dos resultados

Capítulo 5. Apresentação e análise dos resultados

5.1. Enquadramento

5.2. Provete de referência

5.2.1. Termofluxímetros

5.2.2. Sondas de temperatura PT100

5.2.3. Termopares tipo k

5.3. Provete com PCM

5.3.1. Termofluxímetros

5.3.2. Sondas de temperatura PT100

5.3.3. Termopares tipo k

5.4. Análise comparativa dos resultados dos provetes

5.4.1. Ciclo – determinação da eficiência do uso de PCM

5.4.1.1. Termofluxímetros

5.4.1.2. Sondas de temperatura PT100

5.4.1.3. Termopares tipo k

5.4.2. Ciclo – determinação do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente (λ_{eq})

5.4.2.1. Provete de referência

5.4.2.2. Provete com PCM

5.5. Síntese do capítulo

Capítulo 5. Apresentação e análise dos resultados

5.1. Enquadramento

Neste capítulo apresentam-se os resultados dos provetes através da análise e comparação dos resultados obtidos para os dois ciclos e para os dois provetes descritos no capítulo anterior. Primeiramente para cada provete são apresentados individualmente os registos dos vários tipos de sensores e fluxo de temperatura utilizados nas campanhas experimentais. Numa segunda faz-se a análise comparativa dos resultados obtidos da instrumentação dos dois ciclos, recolhendo os resultados em concordância com o objetivo apresentado anteriormente. Os dados adquiridos pelos sistemas de aquisição através dos sensores de temperatura são registados em intervalos de cinco minutos. Como mencionando previamente, na apresentação dos resultados da campanha experimental realizada para averiguar a eficiência do PCM, o primeiro período de 24h foi excluído, passando os resultados a ser apresentados para 3 ciclos apenas. Este intervalo de tempo tinha como objetivo a estabilização das temperaturas no interior das câmaras climáticas.

5.2. Provete de Referência

5.2.1. **Termofluxímetros**

Na Figura 5.1 encontra-se representado o registo do fluxo de calor medidos pelos termofluxímetros colocados no centro das faces do provete de referência sujeito ao ciclo de temperatura utilizado. Os registos do termofluxímetro colocado na face do lado da câmara climática 1 registou um padrão muito similar ao ciclo de temperatura imposto pela câmara climática 2. Por outro lado, o termofluxímetro instalado dentro da câmara climática 2, de igual forma ao exibido na Figura 5.1, exibe um padrão mais irregular. Esta diferença

justifica-se devido a ser esta a câmara que impõe o ciclo de temperatura originando maiores flutuações nos registos obtidos.

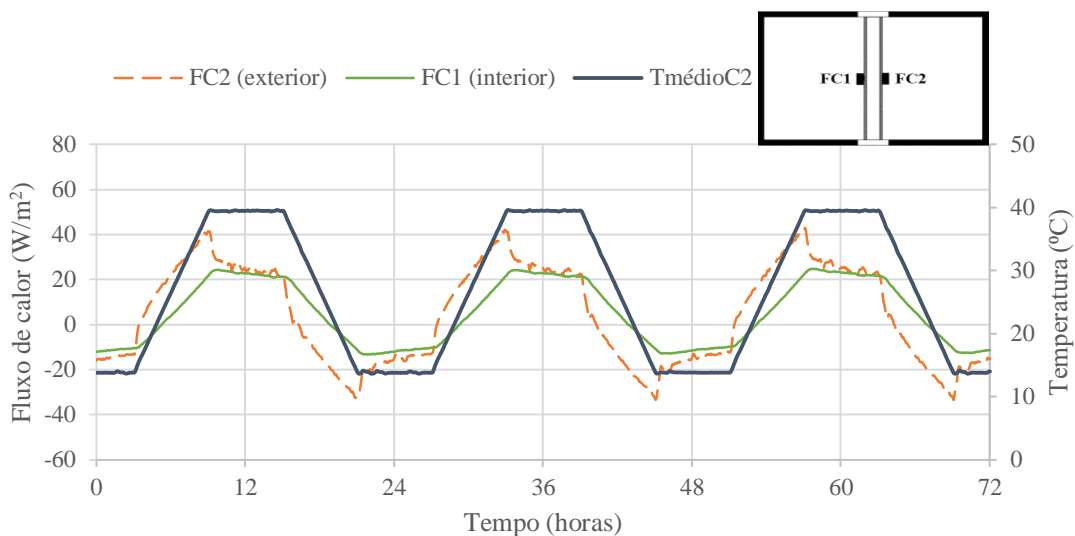


Figura 5.1 - Registo dos termofluxímetros no provete de referência e do ciclo de temperatura utilizado

5.2.2. Sondas de temperatura PT100

Em seguida é apresentado o registo das temperaturas registadas pelas sondas de temperatura PT100 fixadas no interior das câmaras climáticas durante a instrumentação do provete de referência. Os sensores de temperatura que impõem o ciclo não registam na prática nenhuma diferença entre si, enquanto que as sondas da câmara climática 2, que registam as temperaturas do lado interior, apresentam uma dispersão máxima de cerca de 2,0°C para as temperaturas de pico máximo e mínimo.

Através dos dados registados e ilustrados na Figura 5.2, foram calculadas das duas câmaras climáticas, quer das sondas que impõem o ciclo de temperatura (câmara climática 2), quer dos sensores que medem a temperatura no interior da câmara climática 1, conforme mostrado na Figura 5.3.

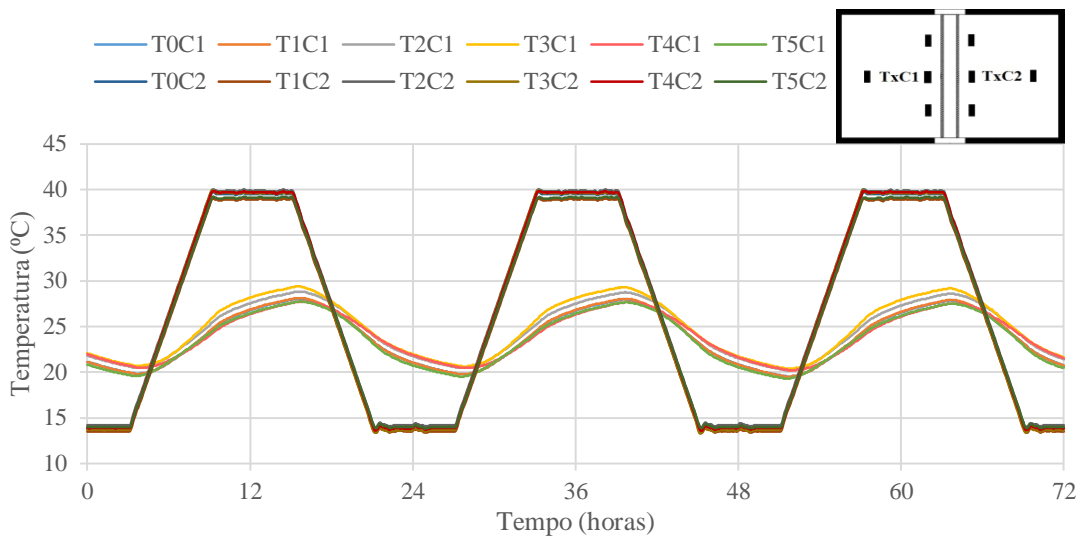


Figura 5.2 - Registo das sondas de temperatura PT100 na instrumentação do provete de referência

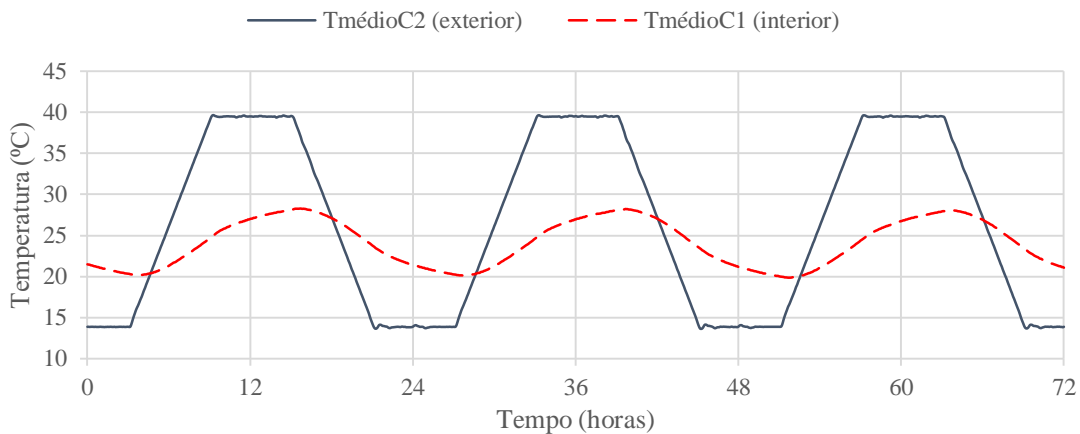


Figura 5.3 - Média das sondas de temperatura PT100 utilizadas na instrumentação do provete de referência

5.2.3. Termopares tipo k

Por último, no respeitante ao provete de referência, são graficamente ilustrados os registos dos termopares tipo k distribuídos nas faces do provete ensaiados. A generalidade destes sensores sobrepõe-se, existindo apenas uma ligeira diferença, cerca de 1,0°C, de um dos termopares, Ts1C1, colocado na câmara climática interior, como se observa na Figura 5.4.

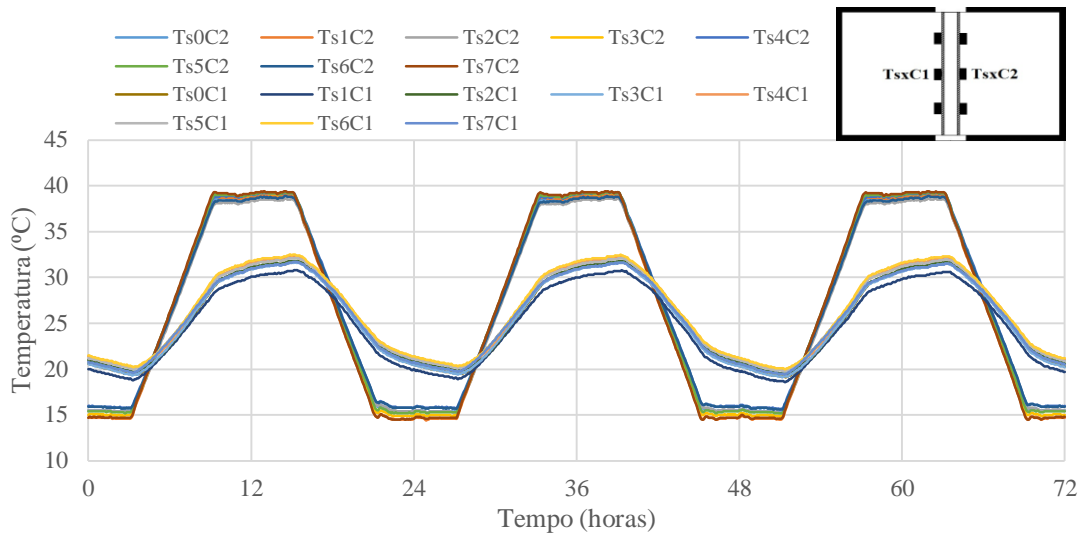


Figura 5.4 - Registro dos termopares tipo k na instrumentação do provete de referência

Na Figura 5.5 são apresentadas para as duas câmaras climáticas as médias dos registros medidos pelos termopares tipo k utilizados na instrumentação do provete de referência.

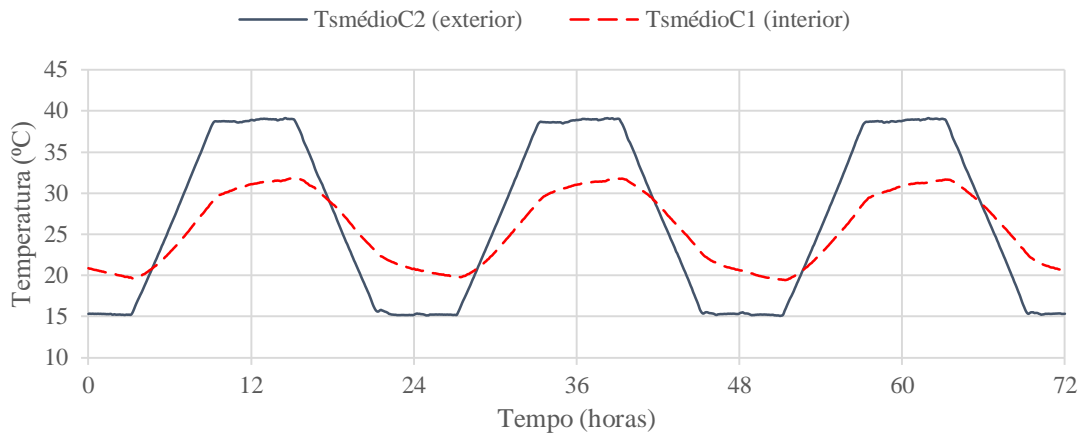


Figura 5.5 - Média dos termopares tipo k utilizados na instrumentação do provete de referência

5.3. Provete com PCM

5.3.1. Termofluxímetros

Análogo ao apresentado anteriormente, também para o provete com PCM é feita a mesma apresentação de resultados. Na Figura 5.6 encontra-se exibido o ciclo de temperatura de 3 dias imposto pela câmara climática 2 e a variação do fluxo de calor calculado pelos termofluxímetros aplicados nas faces do provete. O termofluxímetro existente na câmara climática 2 registou valores do fluxo de calor com maiores oscilações comparativamente com o termofluxímetro na face oposta. Este fenómeno ocorre devido a ser esta a câmara que impõe o ciclo de temperatura resultando em variações superiores no interior da câmara climática. Em contrapartida o termofluxímetro colocado na face do provete do lado da câmara climática 1 registou, quer em fase de aquecimento, quer em fase de arrefecimento do ciclo de temperatura imposto uma flutuação nos dados obtidos. Esta flutuação acontece devido à incorporação do PCM no provete, dado que o BioPCM vai absorvendo energia da imposição de temperatura pela câmara climática 2. A região de mudança de fase do BioPCM encontrasse destacada na Figura 5.6 pela área a cinzento.

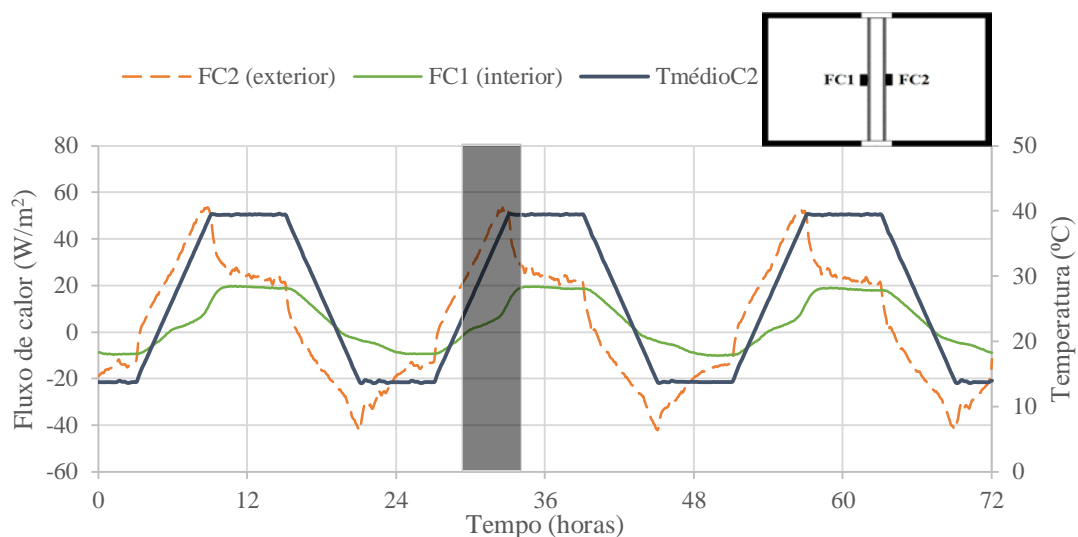


Figura 5.6 - Registo dos termofluxímetros no provete com PCM e do ciclo de temperatura utilizado

5.3.2. Sondas de temperatura PT100

Posteriormente apresenta-se registo das sondas de temperatura PT100 aplicadas no interior em ambas as câmaras climáticas para a instrumentação do provete com PCM, na Figura 5.7. Os sensores de temperatura da câmara climática 2, registaram nos picos máximos e mínimos uma dispersão máxima de cerca de 1,5°C, enquanto que os sensores da câmara climática que impõe o ciclo novamente coincidem entre si.

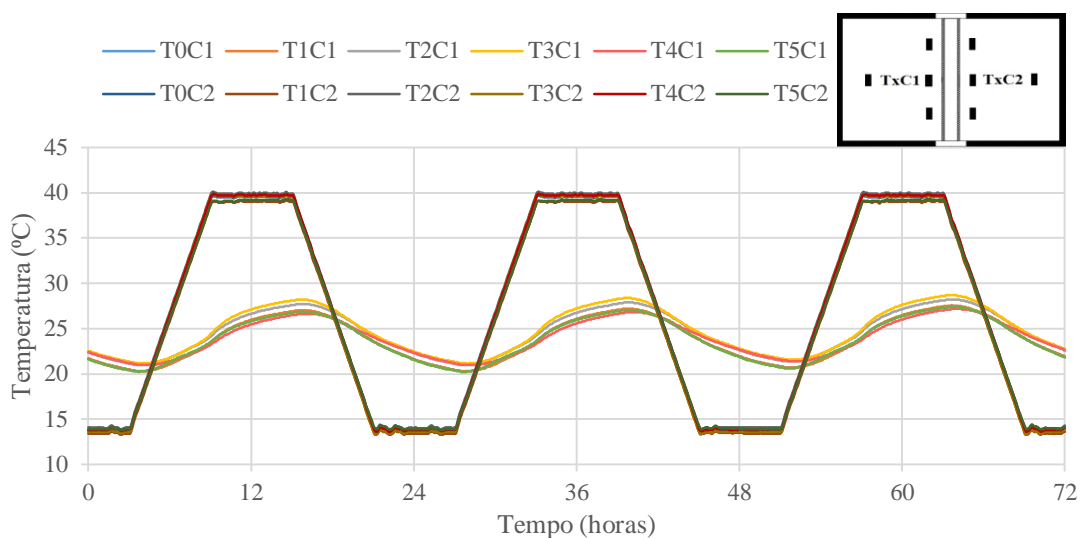


Figura 5.7 - Registo das sondas de temperatura PT100 na instrumentação do provete com PCM

Com o registo das sondas de temperatura PT100 apresentadas na figura anterior são calculadas as médias de ambas as câmaras climáticas, ilustrado na Figura 5.8.

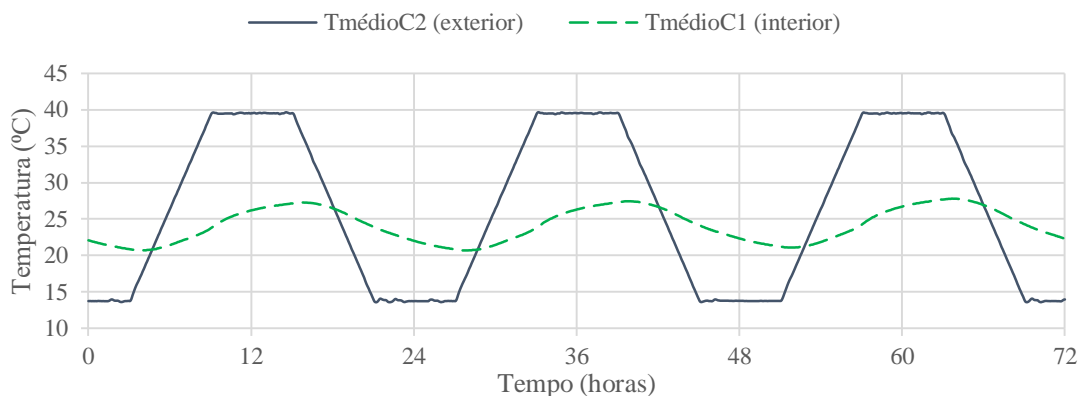


Figura 5.8 - Média das sondas de temperatura PT100 utilizadas na instrumentação do provete com PCM

5.3.3. Termopares tipo k

No final e semelhante ao realizado para os anteriores sensores de temperatura, são exibidos graficamente os registos dos termopares tipo k colocados nas faces do provete com PCM. Tal como para o provete de referência apenas o termopar, Ts1C1, apresenta um ligeiro desfasamento em relação aos restantes, cerca de 1,5°C, como aferido na Figura 5.9.

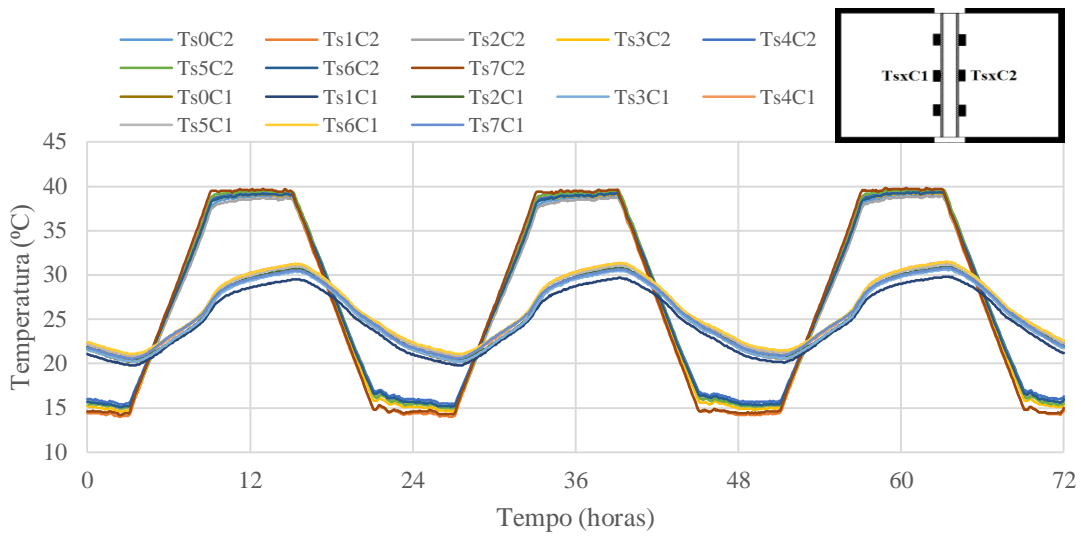


Figura 5.9 - Registo dos termopares tipo k na instrumentação do provete com PCM

Recorrendo aos dados registados e ilustrados no gráfico anterior, são calculadas as médias, quer dos termopares que impõem o ciclo de temperatura, quer dos termopares que calculam a temperatura no interior da câmara climática 1, conforme mostrado na Figura 5.10.

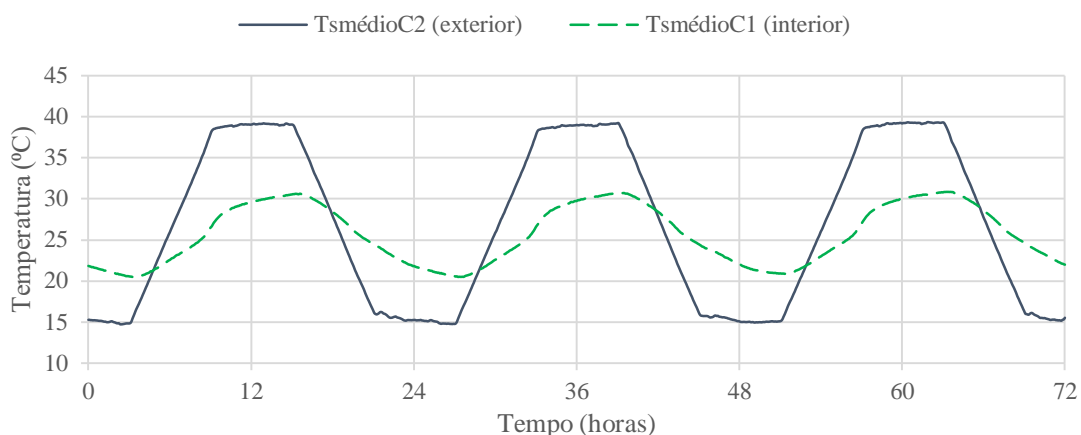


Figura 5.10 - Média dos termopares tipo k utilizados na instrumentação do provete com PCM

5.4. Análise comparativa dos resultados dos provetes

Após a apresentação dos dados resultantes da instrumentação dos dois provetes construídos, procede-se a uma análise comparativa dos resultados de ambos os provetes ensaiados. Serão também apresentadas e explicadas todas as decisões tomadas no decurso do trabalho.

5.4.1. **Ciclo – determinação da eficiência do uso de PCM**

5.4.1.1. **Termofluxímetros**

Depois de executados os gráficos dos termofluxímetros tornou-se perceptível que apenas seria relevante analisar os dados experimentais da câmara climática 1, pelo facto de ser a câmara climática 2 que impõe o ciclo de temperatura o que resulta em maiores oscilações da temperatura no interior dessa câmara. Assim, na Figura 5.11 estão representados os registos do termofluxímetros da câmara climática 1 sendo possível verificar quer em fase ascendente, quer em fase decrescente uma ligeira flutuação da curva registada. Este fenómeno ocorre devido à incorporação do PCM no provete, pois o BioPCM tende a absorver ou libertar a energia em função do intervalo de temperatura de fusão.

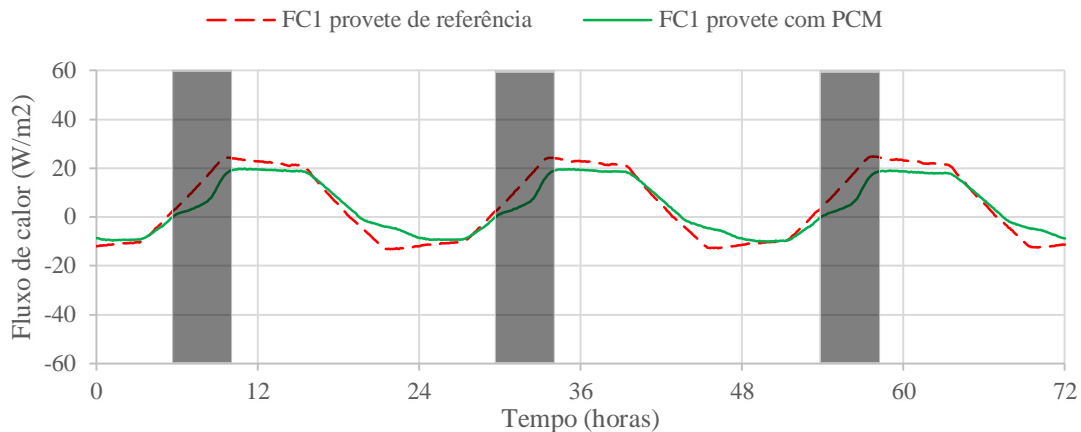


Figura 5.11 - Registo dos termofluxímetros nos dois provetes e do ciclo de temperatura utilizado

5.4.1.2. Sondas de temperatura PT100

Com recurso aos dados obtidos pelas sondas de temperatura PT100 é perceptível o funcionamento do PCM no provete onde este está incorporado. Na instrumentação do provete de referência a temperatura mínima do ar registada no interior da câmara climática 1 foi 19,85 °C e a máxima 28,30 °C, enquanto que para o provete com PCM o mínimo assinalado foi 20,67 °C, registando como temperatura mais elevada 27,77 °C. A solução construtiva com PCM controla as variações extremas de temperatura, tendo como máximo atenuado 1,10 °C em relação ao provete de referência, atenuando em média durante o período instrumentado cerca de 0,6 °C. Por outro lado, a diferença máxima atenuada pelo PCM entre as temperaturas assinaladas no interior das câmaras climáticas na instrumentação dos dois provetes registada foi de 1,25 °C, atenuando em média quase 0,7 °C durante as 72h ensaiadas, conforme se constata na Figura 5.12.

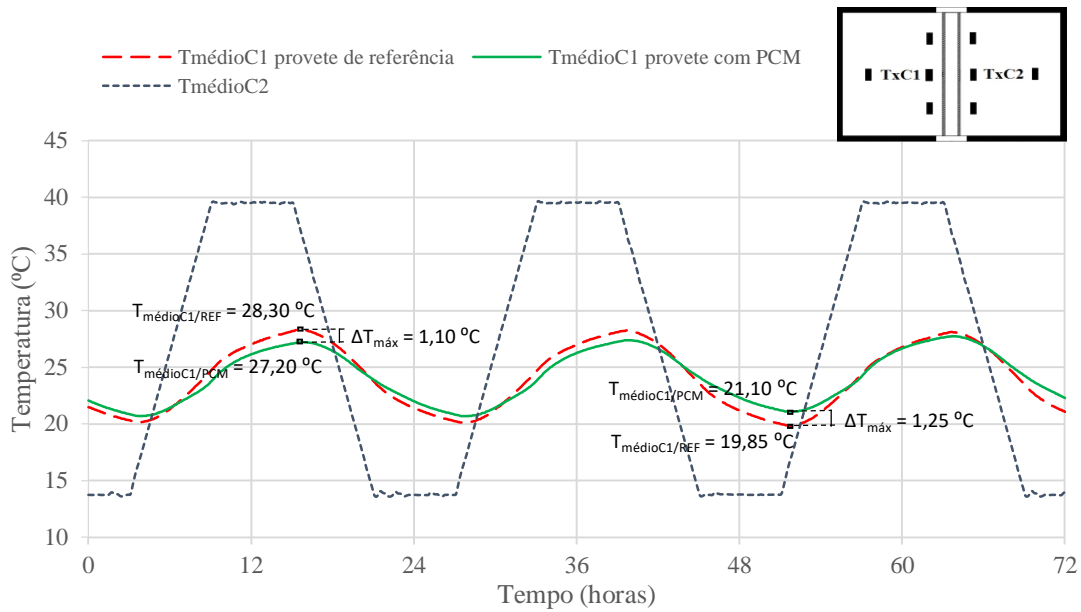


Figura 5.12 - Médias das temperaturas registadas pelas sondas de temperatura PT100 nos dois provetes instrumentados e do ciclo de temperatura utilizado

Idêntico ao procedimento realizado anteriormente também para as temperaturas registadas pelas sondas PT100 foi calculado o percentual da eficiência do PCM. Assim o PCM durante esse período em média atenuou cerca de 3% da temperatura mínima atingida no provete de referência e 2,1% em média do máximo obtido, conforme ilustrado na Figura 5.13.

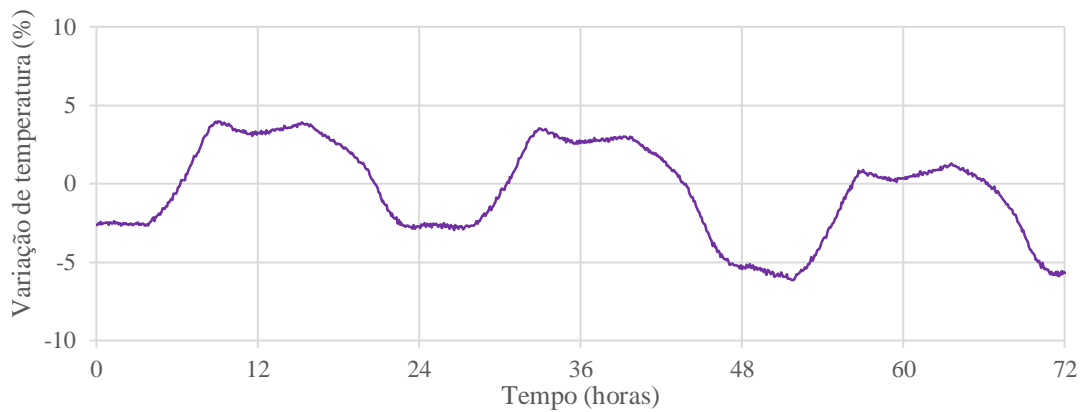


Figura 5.13 - Variação de temperaturas das sondas de temperatura PT100 entre os provetes com e sem PCM

5.4.1.3. Termopares tipo k

Também através das temperaturas registadas pelos termopares, sensores que registam a temperatura superficial nas faces dos provetes, torna-se possível interpretar a eficiência do PCM, absorvendo energia para as temperaturas mais elevadas e atenuando para as temperaturas mais baixas. Na instrumentação do provete com PCM a temperatura máxima registada na superfície do provete foi 30,88 °C e a mínima 20,50 °C, enquanto que para o provete de referência o máximo registado foi 31,83 °C, tendo como temperatura mais baixa 19,4 °C. O PCM existente num dos provetes ensaiados permite atenuar as temperaturas na fase de descarga, registando-se como valor máximo atenuado 2,05 °C em relação ao provete de referência, atenuando em média durante o ciclo de 3 dias cerca de 1,0 °C. A diferença máxima atenuada pelo PCM entre as temperaturas superficiais registadas nas faces dos dois provetes na fase de carga foi de 2,35 °C, atenuando em média durante a instrumentação, identificado na Figura 5.14.

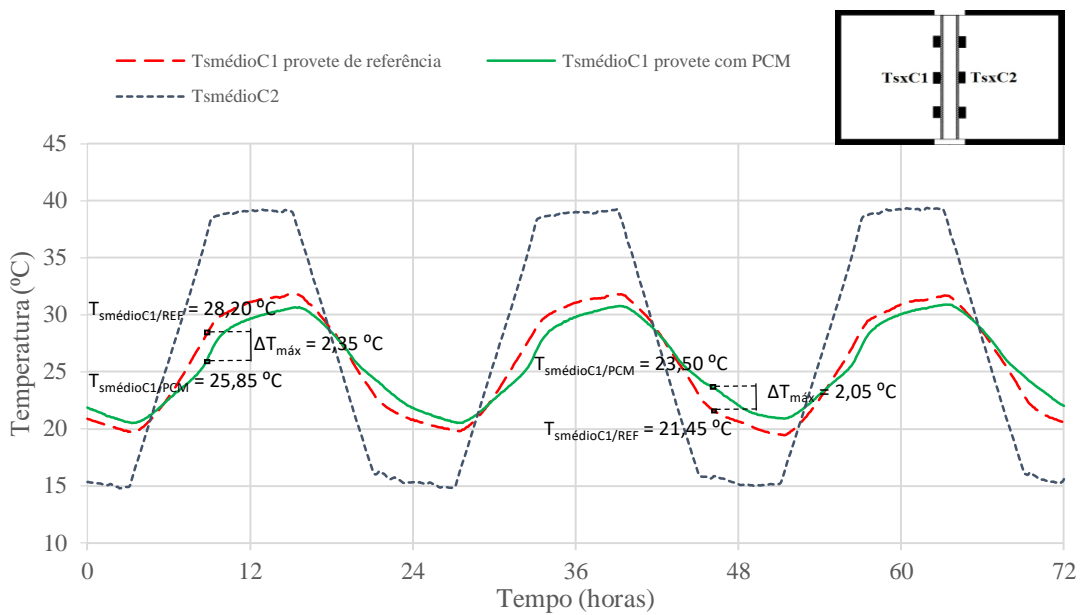


Figura 5.14 - Médias das temperaturas registadas pelos termopares tipo k nos dois provetes instrumentados e do ciclo de temperatura utilizado

Os resultados indicados na Figura 5.15 referem-se à variação da percentagem das temperaturas registadas pelos termopares nos dois provetes. Assim o PCM, durante o ciclo

ensaiado, em média atenuou cerca de 4% a temperatura máxima obtida, e quase 5% da temperatura mínima atingida na instrumentação do provete de referência.

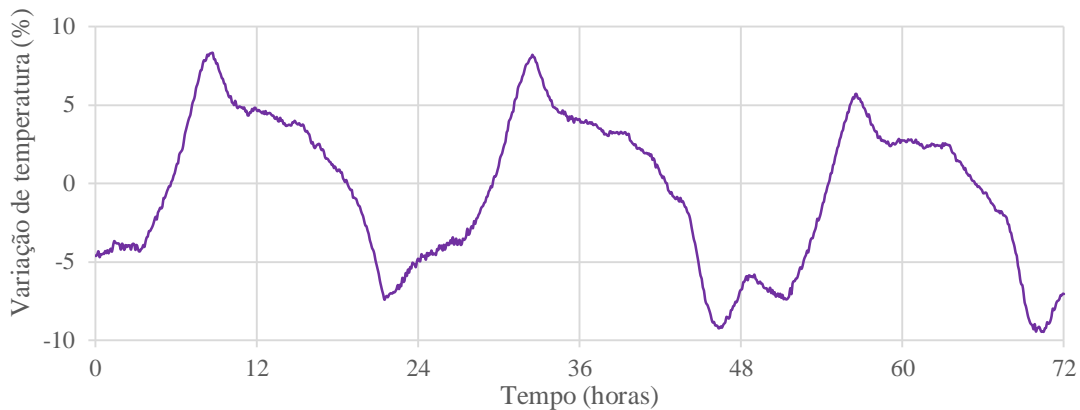


Figura 5.15 - Variação de temperaturas dos termopares tipo k entre os dois provetes instrumentados

5.4.2. Ciclo – determinação do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente (λ_{eq})

Para a determinação do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente as câmaras climáticas foram programadas separadamente para impor uma diferença de temperatura do ar constante entre câmaras climáticas (4;14), (6; 16), (8; 18) ..., (28; 38), (30;40) (valores da temperatura no interior das câmaras climáticas, em °C), no total de 14 patamares de medição. Na Figura 5.16 encontram-se representadas as médias dos registos dos termopares tipo k para o provete de referência durante a segunda campanha experimental, sendo apresentados os restantes gráficos obtidos nessa instrumentação no Anexo B.

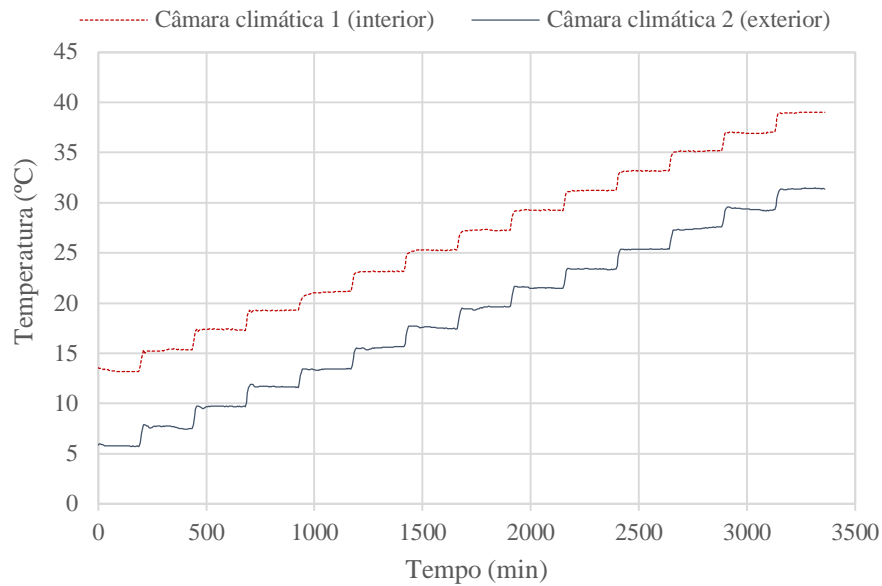


Figura 5.16 Média dos registos dos termopares tipo k utilizados na instrumentação do provete de referência

Segundo a Lei de Fourier o coeficiente de condutibilidade térmica de uma solução construtiva pode ser calculado através da equação seguinte:

$$\lambda = \frac{q}{\Delta T / \delta}$$

Sendo, q o registo do termofluxímetro colocado no centro da face do provete, W/m^2 , ΔT a diferença entre as temperaturas superficiais nas faces dos provetes, $^{\circ}C$, e δ a espessura do provete ensaiado, m.

Os resultados obtidos mostraram uma excelente concordância das medições dos vários sensores de temperatura e fluxos de calor. As câmaras climáticas utilizadas nas campanhas experimentais possuem uma elevada taxa de precisão do controlo da temperatura do ar, Figura 5.17. Esta mostra as temperaturas do ar no interior das câmaras climáticas e as temperaturas superficiais nas faces do provete de referência quando a câmara climática 1 (interior) impõe a temperatura de $30^{\circ}C$ e na câmara climática 2 (exterior) a temperatura $20^{\circ}C$. Após o pico inicial, resultante da subida da temperatura para o posterior patamar, a temperatura tende a estabilizar no interior das câmaras climáticas. Portanto, pode-se considerar que o provete entra em estado estacionário ao chegar a um equilíbrio térmico. Pela Figura 5.17 é ainda possível verificar que a diferença de temperatura do ar e da face do

proвете é cerca de 0,5°C e 1,65°C, respetivamente para a câmara climática interior e para a câmara climática exterior, respetivamente.

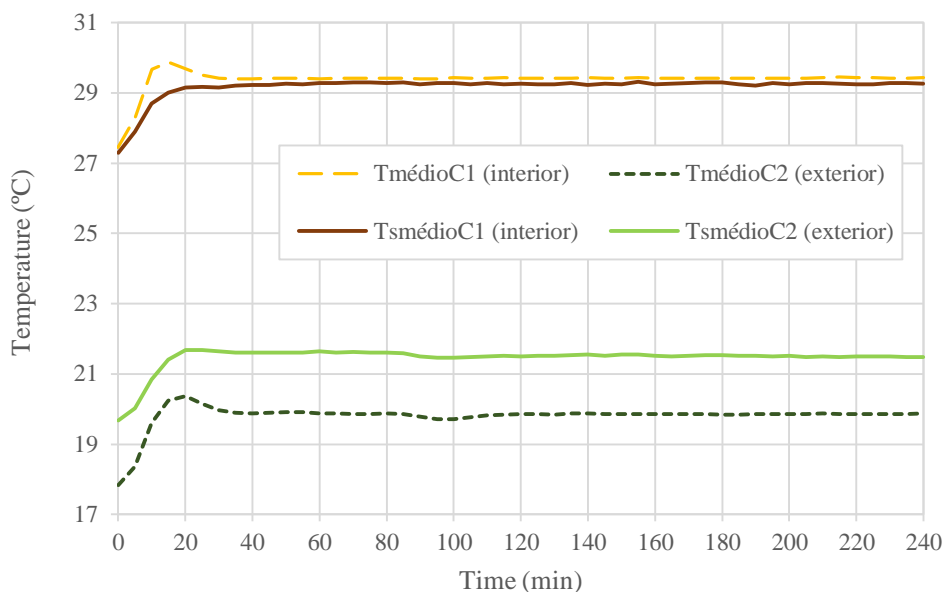


Figura 5.17 - Temperaturas interiores e superficiais nas câmaras para o patamar (20; 30) para o provete de referência

5.4.2.1. Proвете de referência

Na Tabela 5 apresentam-se os parâmetros utilizados para o cálculo do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente (λ_{eq}) para todas as diferenças de temperaturas instrumentadas.

Tabela 5 - Temperaturas e fluxos de calor utilizados para calcular λ_{REF}

Proвете de referência					
	T_{sC1} (°C)	T_{sC2} (°C)	$T_{smédia}$ (°C)	q (W/m ²)	λ_{REF}
(4; 14)	13,27	5,79	9,53	18,11	0,231
(6; 16)	15,21	7,57	11,39	19,58	0,232
(8; 18)	17,29	9,60	13,44	18,93	0,233
(10; 20)	19,18	11,61	15,40	19,05	0,236
(12; 22)	20,95	13,34	17,14	20,99	0,253
(14; 24)	23,05	15,44	19,25	20,34	0,254
(16; 26)	25,16	17,49	21,33	20,06	0,247

(18; 28)	27,17	19,44	23,30	20,05	0,247
(20; 30)	29,17	21,46	25,31	20,27	0,249
(22; 32)	31,13	23,31	27,22	20,34	0,247
(24; 34)	33,08	25,27	29,17	20,48	0,249
(26; 36)	35,05	27,32	31,19	20,68	0,255
(28; 38)	36,89	29,28	33,09	20,75	0,259
(30; 40)	38,89	31,28	35,09	20,88	0,262

A determinação dos coeficientes de condutibilidade térmica permitiu observar uma boa relação linear entre λ_{REF} e o incremento de temperatura nas câmaras climáticas, representado na Figura 5.18. Ainda assim verificou-se que para dois patamares de temperatura ((12; 22); (14; 24)) os valores determinados para o coeficiente de condutibilidade térmica equivalente eram desviantes dos restantes. Excluindo esses dois valores a regressão linear executada permite obter um coeficiente de correlação (R^2) de 0,96.

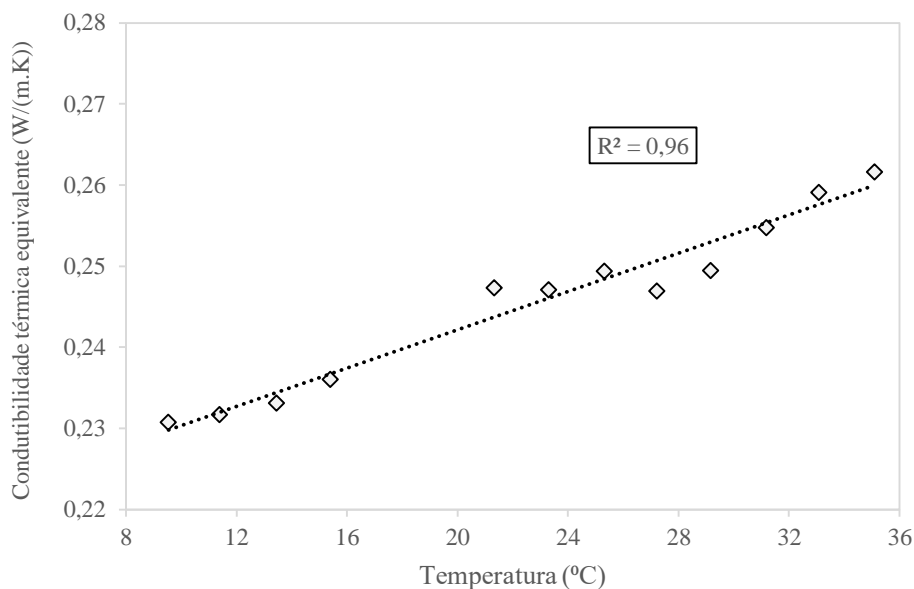


Figura 5.18 – λ_{REF} em função das temperaturas superficiais médias do provete de referência

5.4.2.2. Provete com PCM

Os parâmetros usados na determinação dos coeficientes de condutibilidade térmica equivalente para o provete com PCM, λ_{PCM} , para os diferentes casos de temperatura encontram-se apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Temperaturas e fluxos de calor utilizados para calcular λ_{PCM}

Provete de referência					
	T_{sC1} (°C)	T_{sC2} (°C)	$T_{smédia}$ (°C)	q (W/m ²)	λ_{PCM}
(4; 14)	14,04	5,91	9,97	7,49	0,088
(6; 16)	15,41	7,26	11,34	16,80	0,188
(8; 18)	17,41	9,15	13,28	16,51	0,190
(10; 20)	19,42	11,27	15,35	16,61	0,196
(12; 22)	21,14	13,12	17,13	18,52	0,218
(14; 24)	23,20	15,05	19,13	19,49	0,227
(16; 26)	25,03	16,78	20,90	22,33	0,257
(18; 28)	27,10	18,90	23,00	20,68	0,239
(20; 30)	29,11	20,87	24,99	19,99	0,230
(22; 32)	31,02	22,79	26,91	20,62	0,237
(24; 34)	33,14	24,93	29,04	17,65	0,204
(26; 36)	35,13	27,01	31,07	17,48	0,205
(28; 38)	36,96	28,98	32,97	17,67	0,210
(30; 40)	38,97	30,91	34,94	18,31	0,216

Os coeficientes de condutibilidade térmica equivalente do provete com PCM apresentaram uma diferença significativa comparativamente ao provete de referência. Por um lado, o provete com PCM apresenta uma tendência semelhante à do provete de referência quando a temperatura superficial registada nas câmaras climáticas está abaixo de (16,78; $T_{smédia} = 20,90$; 25,03) e acima de (24,93; $T_{smédia} = 29,04$; 33,14). Por outro lado, durante a fase em que a temperatura aumenta de (16,78; 25,03) para (24,93; 33,14), regista-se uma óbvia tendência decrescente. Uma vez que o PCM incorporado no provete possui temperatura de fusão igual a 25°C é constatado pelo ensaio DSC, fornecidos pelo fabricante, que é na gama de temperaturas 20-27°C que ocorre a mudança de fase sólido-líquido.

Na Figura 5.19 obtém-se a relação do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente em função das temperaturas superficiais médias do provete com PCM. Nos patamares de instrumentação em que o PCM está em estado sólido e líquido, isto é, nos intervalos em que a temperatura superficial no provete aumenta uniformemente de (7,26; $T_{smédia} = 11,34$; 15;41) para (15,05; $T_{smédia} = 19,13$; 23,20) e de (24,93; $T_{smédia} = 29,04$; 33,14) para (30,91; $T_{smédia} = 34,94$; 38,97) ocorre uma tendência crescente do λ_{PCM} com o aumento médio das temperaturas das câmaras climáticas. Analogamente ao executado para o provete de referência, aplica-se o mesmo método nos registos experimentais para os dois intervalos fora da região da mudança de fase. Realizando ambas as regressões lineares obtém-se um coeficiente de determinação (R^2) de 0,90 e 0,92, respetivamente, valores estes que indiciam uma elevada fiabilidade. As linhas de tendência apresentadas tendo inclinações diferentes permite concluir que a temperatura teve uma influência superior quando o PCM se encontrava em estado sólido comparativamente quando estava em estado líquido.

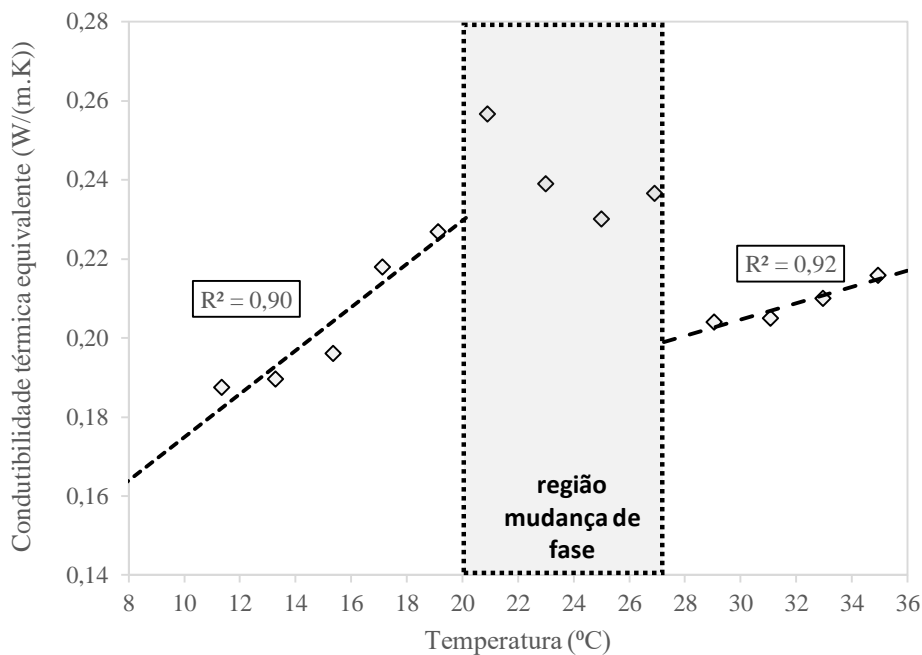


Figura 5.19 - λ_{PCM} em função das temperaturas superficiais médias do provete com PCM

5.5. Síntese do capítulo

Neste capítulo foram apresentados e discutidos os resultados dos provetes ensaiados. Para a primeira campanha experimental o PCM apresenta potencial no controlo de temperaturas máximas, aumentando o conforto térmico do espaço. Quer para as temperaturas máximas, quer para as temperaturas mínimas, o PCM atenua no mínimo 1,0°C, registando como máximo atenuado 2,35°C. Na segunda campanha experimental, que teve como objetivo determinar a relação entre a condutibilidade térmica e a temperatura. Para o provete de referência, com exceção de dois registos, os coeficientes determinados apresentam uma regressão linear com uma elevada taxa de correlação. Por um lado, para o provete com PCM quando este se encontra em estado sólido e líquido, há igualmente uma boa relação linear entre a condutibilidade térmica equivalente e a temperatura crescente nas câmaras climáticas. Na região de mudança de fase do PCM verifica-se que o coeficiente de condutibilidade térmica é reduzido, com uma tendência decrescente.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos futuros

Capítulo 6. Conclusões e trabalhos futuros

6.1. Principais conclusões

6.1.1. Monitorização módulo de teste

6.1.2. Instrumentação dos provetes de ensaio

6.1.3. Conclusões gerais

6.2. Trabalhos futuros

6.2.1. Novas campanhas de monitorização módulo de teste

6.2.2. Novas campanhas de instrumentação dos provetes de ensaio

Capítulo 6. Conclusões e trabalhos futuros

A finalização desta dissertação é feita através do presente capítulo onde após realizados os ensaios e feita a análise dos resultados, expõem-se as principais conclusões e propõem-se trabalhos a serem desenvolvidos futuramente e que poderão complementar este estudo.

6.1. Principais conclusões

A utilização de materiais de mudança de fase tem sido alvo de vários estudos como possível solução para o problema de baixa inércia térmica nas construções de materiais leves, materiais tipicamente utilizados em construções sustentáveis que são cada vez mais comuns. Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento térmico de soluções construtivas com incorporação de BIO-PCMs mediante dois tipos de campanhas experimentais distintas de forma a tornar este material uma parte integrante dos edifícios e aumentar a eficiência da sua utilização. Definiram-se duas configurações possíveis para as campanhas experimentais: monitorização de um módulo de teste e instrumentação de dois provetes com recurso ao procedimento do ensaio de *HotBox*.

6.1.1. Monitorização módulo de teste

De um modo geral, a análise dos dados recolhidos possibilitou confirmar o efeito de regulação da temperatura no ambiente onde PCM está inserido, verificando-se temperaturas mínimas mais elevadas e temperaturas máximas mais baixas, na célula em que se incorporou o PCM. A monitorização do módulo de teste permitiu verificar que o sistema PCM apresenta na estação de arrefecimento uma capacidade de atenuação de 16,1°C, atenuando 35% da temperatura mínima registada. A análise na estação de aquecimento revelou novamente vantagens na utilização do sistema PCM tendo-se verificado uma redução em média de cerca de 27% da temperatura mínima quando

comparado com a célula de referência convencional, apresentando uma diferença máxima atenuada de 13,5°C. Ainda assim, em períodos de tempo que registem condições atmosféricas extremas (elevada incidência radiação solar e fraca intensidade do vento) o tipo de módulo monitorizado regista temperaturas muito para além da zona de conforto térmica verificando-se que o PCM nessas gamas de valores de temperatura não apresenta tanta eficiência.

6.1.2. Instrumentação dos provetes de ensaio

A análise comparativa dos resultados obtidos da instrumentação dos dois provetes de ensaio, permitiu verificar novamente a eficiência do uso de PCM. Para o primeiro ciclo experimental o PCM exhibe eficiência na atenuação das temperaturas extremas. Através dos diversos sensores de temperatura utilizados é possível constatar a diferença entre os resultados dos provetes instrumentados. A presença do PCM num dos provetes, quer em fase de aquecimento, quer em fase de arrefecimento, resulta numa flutuação da curva obtida devido à energia que o PCM absorve e liberta consoante a gama de temperatura de fusão, levando a variações de temperatura entre câmaras climáticas de cerca de 5,0%. Por outro lado, para o segundo ciclo de instrumentação, verifica-se uma muito boa relação entre a condutibilidade térmica equivalente e a temperatura imposta. Os resultados obtidos para o provete com PCM demonstram durante a região de mudança de fase uma relação negativamente proporcional ao registado para os intervalos onde o PCM se encontra em estado sólido e líquido, assim como aos resultados do provete de referência.

6.1.3. Conclusões gerais

A necessidade de aumentar a eficiência energética dos edifícios com o intuito de cumprir a diretiva do Conselho Europeu de Março de 2007, origina, atualmente, uma grande preocupação em projetar edifícios cada vez mais independentes a nível energético, designados por “Low Energy Buildings”. A presente dissertação explorou duas campanhas instrumentais para perceber o potencial do BioPCM no controlo térmico de

espaços fechados de edifícios. As diferenças registadas levarão a reduções nas necessidades de aquecimento e arrefecimento dos espaços onde incorporado o PCM.

Finalmente, conclui-se que é fulcral a utilização de estratégias complementares à aplicação de PCM em soluções construtivas de edifícios.

6.2. Trabalhos Futuros

Ao longo deste trabalho foram sendo identificados algumas tarefas que poderiam ser objeto de afinação ou desenvolvimento futuro.

6.2.1. **Novas campanhas de monitorização do módulo de teste**

No que diz respeito ao módulo de teste, seria interessante estudar qual a influência da incorporação de PCM num espaço físico de ocupação real, uma sala de um departamento da universidade, por exemplo. Por outro lado, ainda no módulo de teste, seria também importante a adoção de estratégias complementares, como por exemplo a ventilação das células ou o sombreamento dos envidraçados orientados a sul

6.2.2. **Novas campanhas de instrumentação dos provetes de ensaio**

No referente aos provetes utilizados nos ensaios *HotBox* também se sugerem trabalhos futuros complementares. Sugere-se assim a instrumentação de provetes com diferentes constituições. Nomeadamente aumentar a quantidade de PCM utilizado, ou conjugar diferentes tipos de PCM com distintas temperaturas de fusão.

Referências

Bibliográficas

Referências Bibliográficas

- [1] EPBD. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. *Official Journal of the European Union*.
- [2] Ramos, A.T.V.F., Análise de R.C.C.T.E. face á utilização se sistemas solares passivos em edifícios de habitação, in Departamento de Engenharia Civil Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra. 2002, Universidade de Coimbra: Coimbra.
- [3] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. *Energy and Buildings*, 42 (2010): 1361 – 1368.
- [4] BINE Information Service. Storing heat using phase changes. Visitado em 20 de Novembro de 2015. <http://www.bine.info/en/publications/themeninfos>
- [5] Dieckmann, H. (2006). “Latent heat storage in concrete”. University of Kaiserslautern, Germany.
- [6] Castell, A., et al., Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*, 42 (2010): 534-540.
- [7] Microteklabs. How do PCMs work. Visitado em 25 de Novembro de 2015. <http://www.microteklabs.com/how-do-pcms-work.html>
- [8] D. Zhou, C. Y. Zhao, Y. Tian. Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. *Applied Energy*, 92 (2012): 593-605.
- [9] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, Feb. 2009.
-

- [10] Microteklabs. Where are PCMs used? Visitado em 26 de Novembro de 2015. <http://www.microteklabs.com/where-are-pcms-used.html>
- [11] A.F. Regin, S.C. Solanki, J.S. Saini. “Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 2438–2458.
- [12] Zhao, C. Y. and Zhang, G. H. “Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 3813-3832.
- [13] Planet Reuse. BioPCM Mat-bio-based Thermal Mass. Visitado em 2 de Dezembro de 2015. <http://planetreuse.com/products/biopcm#.Vle3q6JsiFw>
- [14] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar, and P. Santos, “Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency,” *Energy and Buildings* 59 (2013) 82 – 103.
- [15] V. V Tyagi and D. Buddhi, “PCM thermal storage in buildings: A state of art,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 1146 – 1166.
- [16] I. Cerón, J. Neila, and M. Khayet, “Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use,” *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 8, pp. 1869–1874, Aug. 2011.
- [17] Phase Change – Energy Solutions. Typical BioPCM Applications. Visitado em 3 de Dezembro de 2015. <http://www.phasechange.com/applications>
- [18] Glassx North America. Gallery. Visitado em 3 de Dezembro de 2015. <http://www.glassxpcm.com/gallery/>

- [19] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, and L.F. Cabeza. Analysis of the simulation models for the use of PCM in buildings. 11th International Conference on Thermal Energy Storage. Thermal Energy Storage for Energy Efficiency and Sustainability.
- [20] D. B. Crawley, L. K. Lawrie, F. C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. J. Huang, C. O. Pedersen, R. K. Strand, R. J. Liesen, D. E. Fisher, M. J. Witte, and J. Glazer, “EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program,” *Energy and Buildings* 33 (2001) 319 – 331.
- [21] F. Almeida, D. Zhang, A. Fung, and W. Leong. “Validation of a TRNSYS simulation model for PCM energy storage and PCM Wall construction elements”. In International High Performance Buildings Conference 2010.
- [22] Energy.Gov. Buildings. EnergyPlus Energy Simulation Software. Visitado em 5 de Dezembro de 2015. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [23] M. Ibanez, A. Lázaro, B. Zalba, and L. F. Cabeza. An approach to the simulation of PCMs in building applications using TRNSYS. *Applied Thermal Engineering*. 25 (2005) 1796 – 1807.
- [24] European Commission, “Low Energy Buildings in Europe : Current State of Play, Definitions and Best practice.” 2009.
- [25] Aelenei, L. (2012). Nearly Zero Energy Visitado em 9 de Dezembro de 2015. http://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/1589/1/nZEB_FigueiraFoz_LAelenei.pdf
- [26] Hand, J.W., Arch, M. (2008), *The ESP-r Cookbook – Strategies for Deploying Virtual Representations of the Build Environment*, Energy Systems Research Unit.
-

[27] Micronal. How phase change materials work. Visitado em 7 de Dezembro de 2015. http://www.micronal.de/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_290814

[28] Clito Afonso. Uma metodologia para a determinação de uxos de ar multizona em edifícios. PhD thesis, Universidade do Porto, 1989.

[29] Astm E 741. Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution. 00(Reapproved 2006):17, 2006.

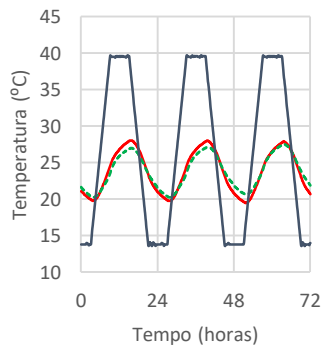
[30] EN 1745 - “Masonry and masonry products – Methods for determining design thermal values”, Ed. 2002, CEN, Bruxelas. 2002.

Anexos

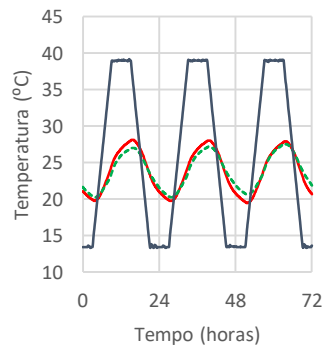
Anexos

Anexo A

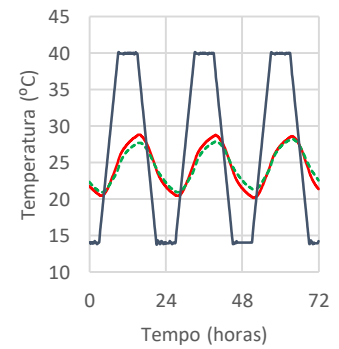
Comparação da temperatura registada pela mesma sonda de temperatura PT100 (TxC1) para os dois provetes e do ciclo de temperatura utilizado (TxC2).



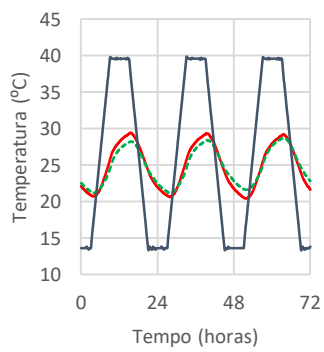
— T0C1 REF
- - T0C1 PCM
— T0C2



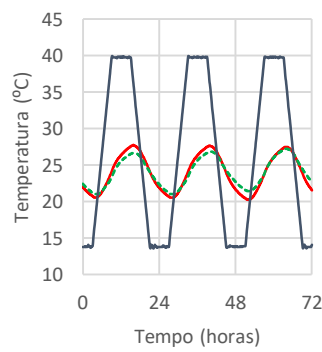
— T1C1 REF
- - T1C1 PCM
— T1C2



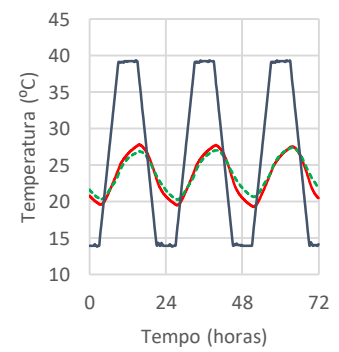
— T2C1 REF
- - T2C1 PCM
— T2C2



— T3C1 REF
- - T3C1 PCM
— T3C2

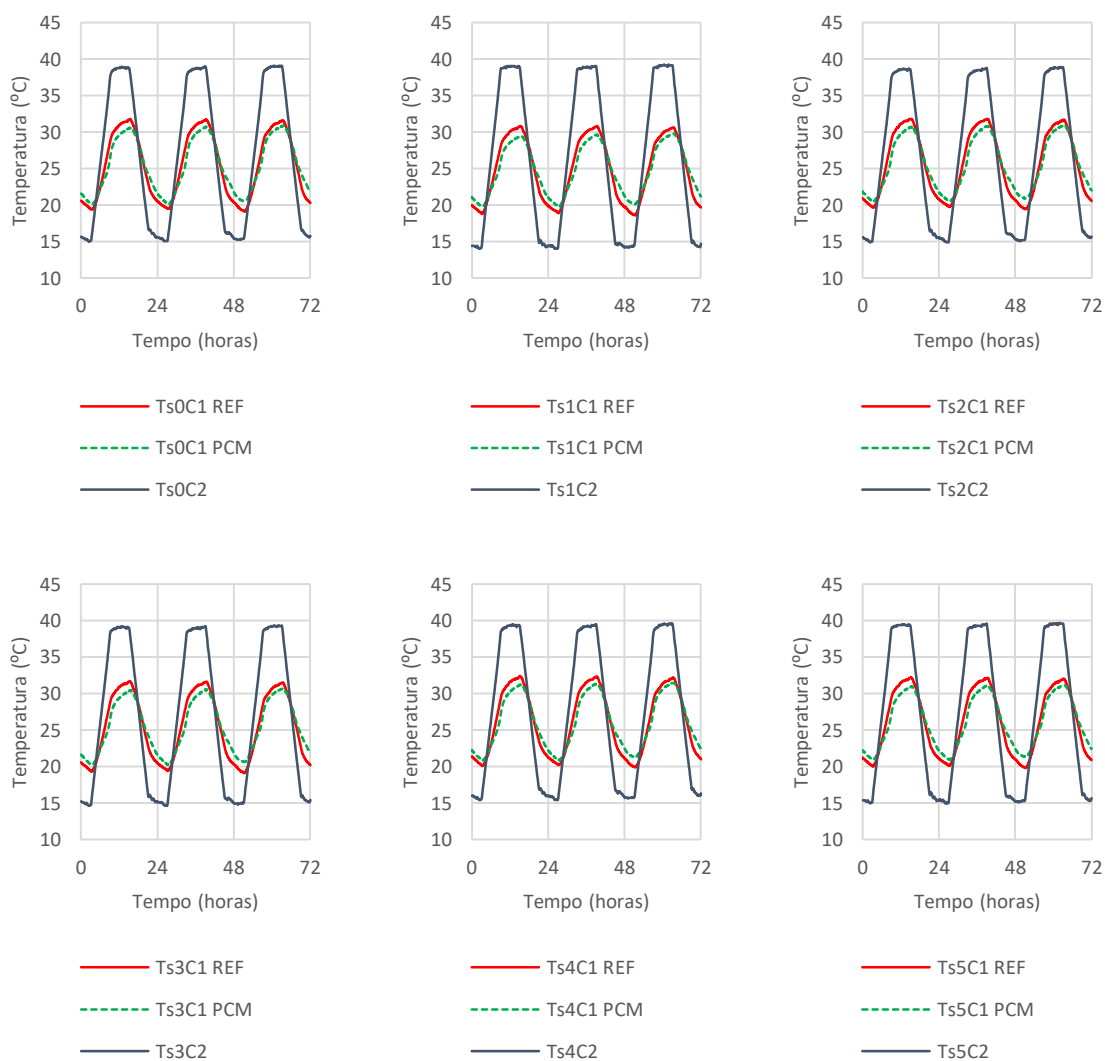


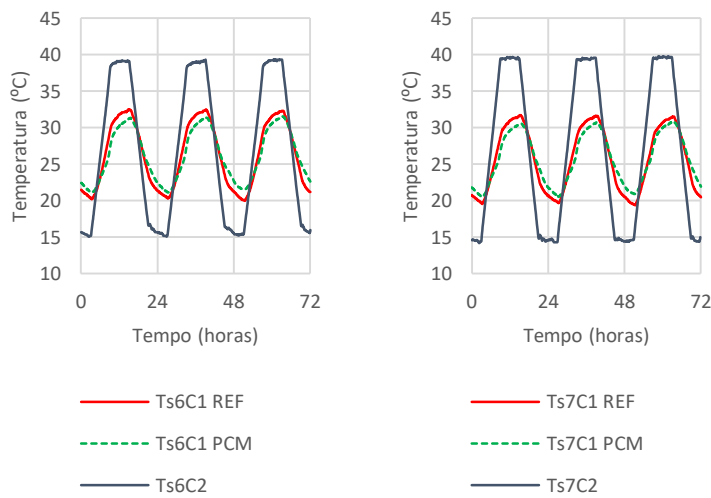
— T4C1 REF
- - T4C1 PCM
— T4C2



— T5C1 REF
- - T5C1 PCM
— T5C2

Comparação da temperatura registada pelo mesmo termopar tipo k (TsxC1) para os dois provetes e do ciclo de temperatura utilizado (TsxC2).





Anexo B

Média das temperaturas registadas pelos sensores de temperatura (sondas de temperatura PT100, termopares tipo k e termofluxímetros) na instrumentação dos provetes para a determinação do coeficiente de condutibilidade térmica equivalente.

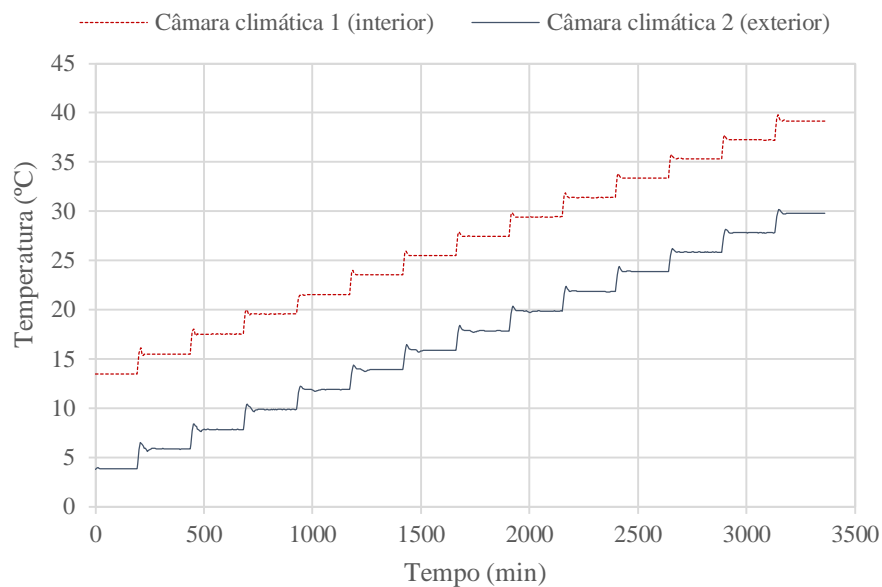


Figura 0.1 - Média dos registos das sondas de temperatura PT100 utilizados na instrumentação do provete de referência

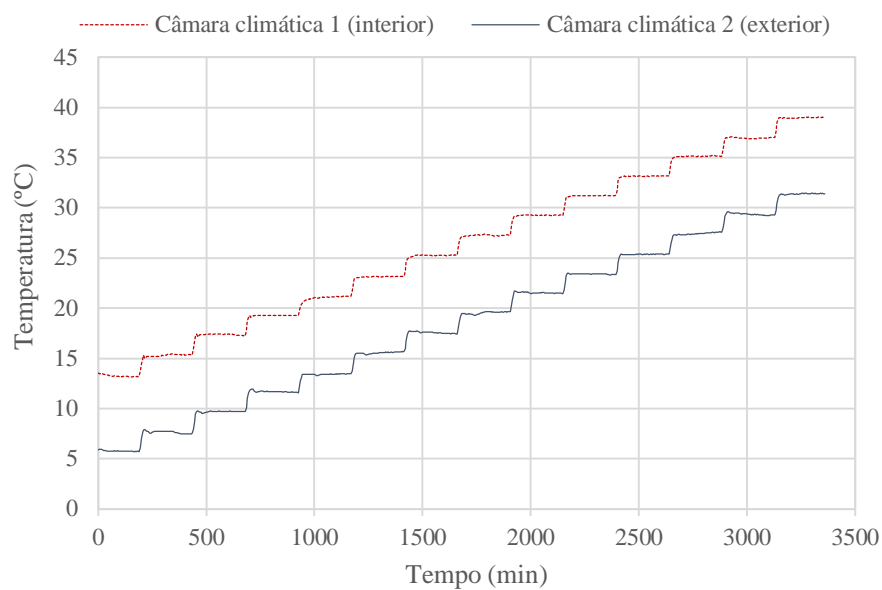


Figura 0.2 Média dos registos dos termopares tipo k utilizados na instrumentação do provete de referência

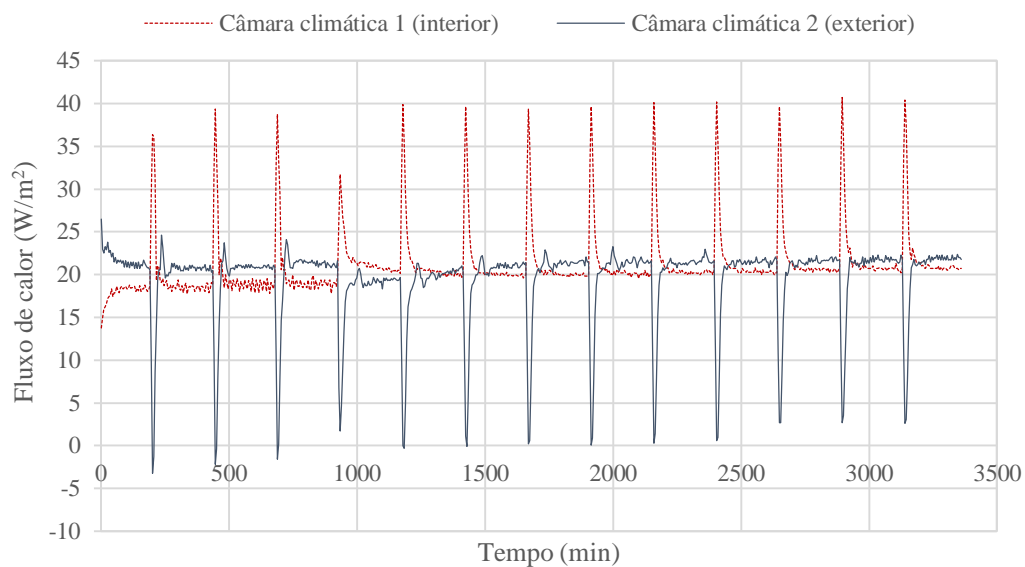


Figura 0.3 Registos dos termofluxímetros utilizados na instrumentação do provete de referência

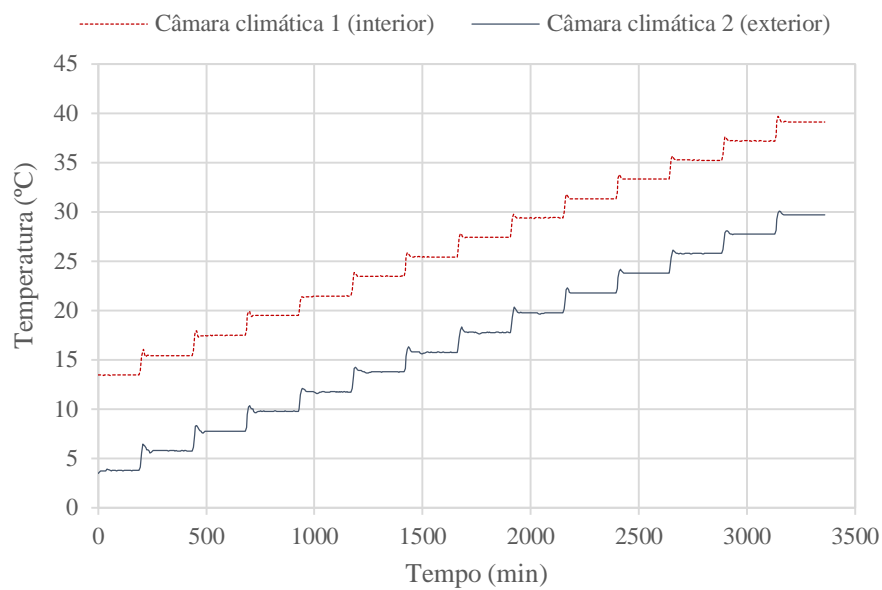


Figura 0.4 Média dos registos das sondas de temperatura PT100 utilizados na instrumentação do provete com PCM

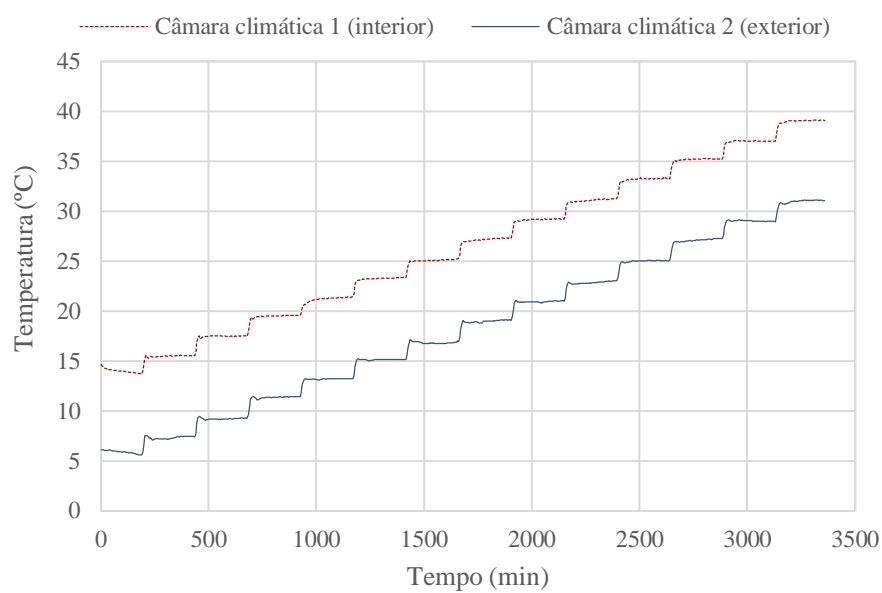


Figura 0.5 Média dos registos dos termopares tipo k utilizados na instrumentação do provete com PCM

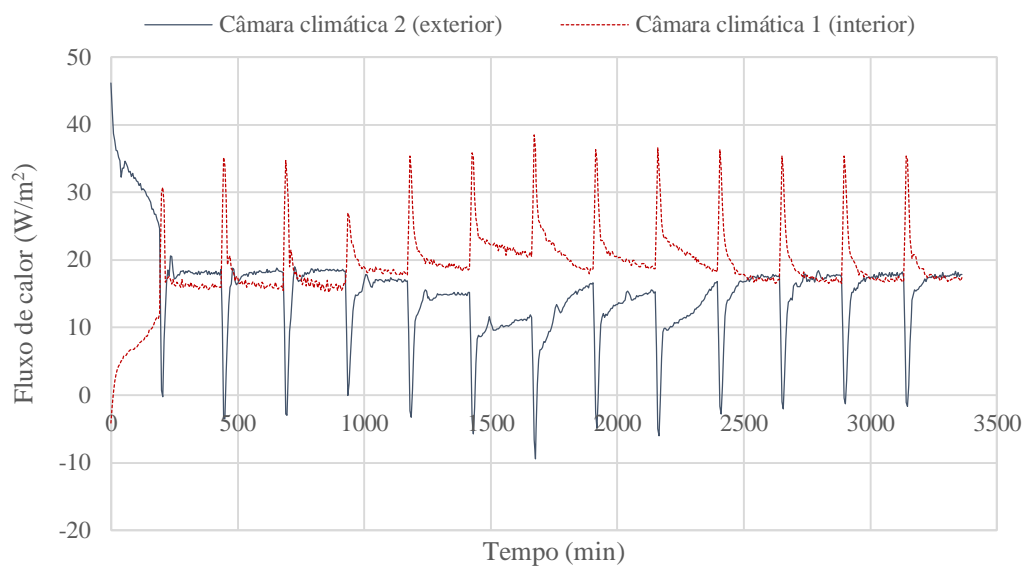


Figura 0.6 Registos dos termofluxímetros utilizados na instrumentação do provete com PCM