



Universidade de Aveiro
2021

**DIANA MARGARIDA
FERREIRA PINHO**

**AVALIAÇÃO DO CONTRIBUTO DE PCM
MACROENCAPSULADOS PARA AUMENTAR A
INÉRCIA TÉRMICA DE CONSTRUÇÕES 'LEVES'**



**DIANA MARGARIDA
FERREIRA PINHO**

**AVALIAÇÃO DO CONTRIBUTO DE PCM
MACROENCAPSULADOS PARA AUMENTAR A
INÉRCIA TÉRMICA DE CONSTRUÇÕES ‘LEVES’**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Vítor António Ferreira da Costa, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Este trabalho teve o apoio financeiro dos projetos UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020 - FCT - Fundação para Ciência e Tecnologia; e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), no âmbito do Acordo de Parceria Portugal 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

o júri

presidente

Prof. Doutor Fernando José Neto da Silva
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar
Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Vítor António Ferreira da Costa
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Vítor António Ferreira da Costa, pelo apoio, encorajamento e presença em todas as etapas deste trabalho.

A todos os professores que fizeram parte do meu percurso académico-escolar, contribuindo para a minha formação.

Aos meus colegas de curso que me acompanharam ao longo desta caminhada.

Aos meus pais, por todo o apoio e por me proporcionarem, desde sempre, as melhores condições para a minha formação.

À minha irmã, por ser um exemplo para mim a todos os níveis.

palavras-chave

materiais de mudança de fase (PCM), edifícios, construções 'leves', macroencapsulamento, simulação dinâmica

resumo

A aplicação de materiais de mudança de fase (PCM) tem sido amplamente estudada nos últimos anos, revelando-se uma solução promissora particularmente no que se refere ao aumento da inércia térmica de edifícios. No presente trabalho é avaliado o contributo do *BioPCM* macroencapsulado para esse efeito quando aplicado nas fachadas de um edifício de construção 'leve', para 3 localizações portuguesas: Lisboa, Porto e Évora. O edifício consiste num módulo com iguais dimensões das fachadas Norte, Este, Sul e Oeste, com apenas uma janela correspondente a 30% da área da fachada a que pertence. As soluções construtivas consideradas foram definidas de acordo com composições de referência para construções 'leves' pré-existentes na biblioteca-padrão do *DesignBuilder*, software de simulação dinâmica de edifícios adotado para a realização deste estudo. A análise e comparação dos resultados permitiram concluir que o PCM é capaz de conduzir a reduções significativas do desconforto térmico quando aplicado junto à superfície interna do isolamento, sobretudo quando colocado na cobertura. Contrariamente, a sua integração no pavimento não apresenta grande vantagem para o conforto térmico. Estas e outras conclusões conduziram à obtenção de padrões de comportamento a partir dos quais foi elaborado e proposto um modelo de decisão, útil para a seleção das melhores configurações a usar quando se pretende incorporar PCM macroencapsulado numa construção 'leve', num clima semelhante ao de Portugal.

keywords

phase change materials (PCM), buildings, lightweight constructions, macroencapsulation, dynamic simulation

abstract

Phase change materials (PCM) applications have been widely studied in the last few years, becoming a promising solution on increasing buildings' thermal inertia and thermal comfort. In this work, it is studied the contribution to this effect of integrating macroencapsulated BioPCM into the facades of a lightweight building located in 3 Portuguese regions: Lisboa, Porto and Évora. The building consists of a module with equal dimensions of the North, East, South and West facades. It has only one window corresponding to 30% of the facade's area where it is inserted and the considered building envelope was characterized according to typical reference's templates existing on DesignBuilder, the dynamic simulation software selected for this study. The results' analysis and comparison lead to some conclusions. Integrating PCM into the building envelope allows a significant thermal discomfort reduction, especially when it is applied into the roof, next to the internal insulation's surface. Contrarily, its integration into the floor is not so advantageous regarding to the thermal comfort. These and other conclusions provided the recognition of behavioral patterns that were carried out to develop a decision model, proposed in this work. This model is useful for the best configuration's selection when it is intended to integrate macroencapsulated PCM on lightweight constructions, in a climate similar to Portugal.

Índice

Índice de Figuras	i
Índice de Tabelas	v
Lista de Abreviaturas	vi
Lista de Símbolos	vii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura do Documento	2
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Integração de PCM em edifícios	4
2.2 Integração ótima do PCM na solução construtiva	5
2.3 Incorporação de PCM nas construções em Portugal	6
3 Materiais de Mudança de Fase	7
3.1 Introdução	7
3.2 Critérios de seleção	7
3.2.1 Propriedades termodinâmicas	7
3.2.2 Propriedades químicas	7
3.2.3 Propriedades cinéticas	8
3.2.4 Propriedades económicas	8
3.2.5 Outras propriedades	8
3.3 Classificação e Propriedades	8
3.3.1 Orgânicos	9
3.3.2 Inorgânicos	10
3.3.3 Eutéticos	11
3.4 Incorporação nos materiais ou elementos de construção	11
3.4.1 Incorporação direta	11
3.4.2 Imersão	11
3.4.3 Forma estabilizada	11
3.4.4 Encapsulamento	12
3.5 Formas de aumentar a transferência de calor de e para os PCM	18
4 Análise Energética de Edifícios	20
4.1 Introdução	20
4.2 Mecanismos de Transferência de Calor	20
4.2.1 Condução	20
4.2.2 Convecção	20
4.2.3 Radiação	21
4.3 Transferência de Calor em Edifícios	21
4.3.1 Inércia térmica	22
4.4 Softwares de simulação dinâmica de edifícios	22
4.4.1 IDA ICE	23

4.4.2	<i>EnergyPlus</i>	23
4.4.3	TRNSYS	23
5	Metodologia	25
5.1	Critério de comparação	25
5.1.1	Número de °C.hora de desconforto	25
5.1.2	Gama de temperaturas de conforto	26
5.1.3	Temperatura média exterior exponencialmente ponderada	26
5.2	Caracterização do edifício	27
5.2.1	Localização geográfica	27
5.2.2	Geometria	28
5.2.3	Orientação Solar	28
5.2.4	Ganhos Internos	29
5.2.5	Sistema de AVAC	29
5.2.6	Soluções construtivas	30
5.2.7	PCM Macroencapsulados utilizados	32
5.2.8	Variáveis estudadas	33
6	Resultados e Discussão	34
6.1	Efeito individual (1 fachada)	34
6.1.1	Quantidade de PCM	34
6.1.2	Orientação Solar	35
6.1.3	Localização do PCM na construção	35
6.1.4	Fachadas com PCM	36
6.1.5	Estratégia de ventilação	38
6.1.6	Temperatura de fusão do PCM	38
6.1.7	Seleção das melhores configurações	39
6.1.8	Comparação entre localizações geográficas	41
6.2	Efeito combinado (2 fachadas)	41
6.2.1	Lisboa	41
6.2.2	Porto	43
6.2.3	Évora	44
6.3	Síntese dos resultados	45
7	Considerações Finais	48
8	Referências Bibliográficas	49
	Apêndices	55
A.	Determinação do número de RPH máximo	55
B.	Tabelas de resultados	57
C.	Análise da quantidade de PCM	64
D.	Análise da localização do PCM	69
	Anexos	75
I.	Dados climáticos	75
II.	Propriedades dos materiais de construção	76
III.	Curvas de fusão/solidificação dos PCM	77

Índice de Figuras

Figura 3.1 Classificação dos materiais de mudança de fase por Abhat [36].	8
Figura 3.2 Classificação dos materiais de mudança de fase de acordo com a sua gama de temperaturas de fusão e calor latente de fusão [37].	8
Figura 3.3 Exemplos da integração de PCM microencapsulado em elementos construtivos: a) Placa de gesso integrando PCM microencapsulado da Micronal; b) Placa de gesso laminado com PCM microencapsulado da ThermalCore [38].	12
Figura 3.4 Representação esquemática da técnica de pan coating [59].	13
Figura 3.5 Representação da técnica de air suspension coating através de duas colunas cilíndricas concêntricas [60].	13
Figura 3.6 Esquema representativo da técnica de extrusão centrífuga [61].	14
Figura 3.7 Representação do processo de atomização para formar microcápsulas [62].	14
Figura 3.8 Representação das formas de coacervação simples [64].	15
Figura 3.9 Representação do processo de polimerização interfacial [68].	16
Figura 3.10 PCM macroencapsulado em placas [31].	17
Figura 3.11 PCM macroencapsulado em placas de metal – PCMTB [30].	17
Figura 3.12 Integração de PCM macroencapsulado em painéis de PVC [21].	17
Figura 3.13 PCM macroencapsulado em placas de metal [74].	17
Figura 3.14 PCM macroencapsulado em placas de alumínio integradas em elementos de construção [75].	17
Figura 3.15 PCM macroencapsulado em ripas de policarbonato [24].	17
Figura 3.16 PCM macroencapsulado em ripas de alumínio [25].	17
Figura 3.17 Bolsas de nylon contendo PCM [76].	17
Figura 3.18 Bolsas contendo PCM, também conhecidas como PCMTS [27], [29].	17
Figura 3.19 PCM macroencapsulado sob a forma de favos [77].	17
Figura 3.20 PCM macroencapsulado sob a forma de esferas [78].	17
Figura 3.21 PCM macroencapsulado em blocos translúcidos, TIM-PCM [23].	18
Figura 3.22 PCM macroencapsulado em cilindros de cobre aplicados na construção de paredes [79].	18
Figura 5.1 Divisão do país segundo a classificação de Koppen [96].	27
Figura 5.2 Representação e dimensionamento do módulo.	28

Figura 5.3 Evolução diária da potência dissipada por equipamentos domésticos.	29
Figura 5.4 Configurações das paredes verticais a) base ($U=0,369 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$), e com PCM inserido b) junto à superfície interna da camada de isolamento, c) junto à superfície externa da camada de isolamento.	31
Figura 5.5 Configurações da cobertura a) base ($U=0,261 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$), e com PCM inserido b) junto à superfície interna da camada de isolamento, c) junto à superfície externa da camada de isolamento.	31
Figura 5.6 Configurações do pavimento a) base ($U=0,336 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$); b) com PCM inserido junto à superfície interna da camada de betão; c) junto à superfície externa da camada de isolamento..	32
Figura 5.7 BioPCM macroencapsulado comercializado pela Phase Change Solutions [48].	32
Figura 6.1 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para Lisboa.	34
Figura 6.2 Comparação entre a gama de temperaturas de conforto e a evolução das temperaturas ao longo de um ano para o módulo orientado a Sul com diferentes quantidades de PCM Q25.	35
Figura 6.3 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado em Lisboa.	36
Figura 6.4 Resultados para as configurações com PCM Q21 e Q25 inseridos pelo interior do isolamento em cada fachada do módulo localizado em Lisboa.	37
Figura 6.5 Resultados para as configurações com PCM Q21 e Q25 inseridos pelo interior do isolamento em cada fachada do módulo localizado no Porto.	37
Figura 6.6 Resultados para as configurações com PCM Q21 e Q25 inseridos pelo interior do isolamento em cada fachada do módulo localizado em Évora.	38
Figura 6.7 Seleção das melhores configurações para cada fachada e orientação do módulo, para Lisboa.	39
Figura 6.8 Seleção das melhores configurações para cada fachada e orientação do módulo, para o Porto.	40
Figura 6.9 Seleção das melhores configurações para cada fachada e orientação do módulo, para Évora.	40
Figura 6.10 Resultados para a incorporação de PCM em duas fachadas, utilizando a melhor configuração (PCM e ventilação noturna) obtida individualmente para cada orientação, para Lisboa.	42
Figura 6.11 Resultados para a incorporação de PCM em duas fachadas, utilizando a melhor configuração (PCM e ventilação) obtida individualmente para cada orientação, para o Porto.	43
Figura 6.12 Resultados para a incorporação de PCM em duas fachadas, utilizando a melhor configuração (PCM e ventilação) obtida individualmente para cada orientação, para Évora.	44
Figura A. 1 Resultados gráficos obtidos para um caudal de ar de a) 60 L/s e b) 160 L/s.	56
Figura C. 1 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para Lisboa.	64

Figura C. 2 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para Lisboa.....	64
Figura C. 3 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para Lisboa.....	65
Figura C. 4 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para o Porto.....	65
Figura C. 5 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para o Porto.....	66
Figura C. 6 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para o Porto.....	66
Figura C. 7 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para o Porto.....	67
Figura C. 8 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para Évora.....	67
Figura C. 9 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para Évora.....	68
Figura C. 10 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para Évora.....	68
Figura C. 11 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para Évora.....	69
Figura D. 1 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado em Lisboa.....	69
Figura D. 2 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado em Lisboa.....	70
Figura D. 3 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado em Lisboa.....	70
Figura D. 4 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado no Porto.....	71
Figura D. 5 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado no Porto.....	71
Figura D. 6 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado no Porto.....	72
Figura D. 7 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado no Porto.....	72
Figura D. 8 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado em Évora.....	73
Figura D. 9 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado em Évora.....	73

Figura D. 10 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado em Évora.	74
Figura D. 11 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado em Évora.	74
Figura I. 1 Temperatura exterior média diária ao longo de um ano em Lisboa.	75
Figura I. 2 Temperatura exterior média diária ao longo de um ano no Porto.	75
Figura I. 3 Temperatura exterior média diária ao longo de um ano em Évora.	76
Figura III. 1 Curva de fusão do BioPCM Q21, utilizada no software de simulação dinâmica (já existente na biblioteca-padrão do mesmo).	77
Figura III. 2 Curva de fusão do BioPCM Q25, utilizada no software de simulação dinâmica (já existente na biblioteca-padrão do mesmo).	77

Índice de Tabelas

Tabela 5.1 Características e classificação das localizações selecionadas para o estudo.	28
Tabela 5.2 Propriedades dos PCM utilizados.	33
Tabela 6.1 Síntese das melhores configurações e ordenação das fachadas por ordem crescente de desconforto.	41
Tabela 6.2 Ordenação das fachadas segundo o desempenho da inserção de PCM, individualmente e de modo combinado, num módulo localizado em Lisboa.	42
Tabela 6.3 Ordenação das fachadas segundo o desempenho da inserção de PCM, individualmente e de modo combinado, num módulo localizado no Porto.	44
Tabela 6.4 Ordenação das fachadas segundo o desempenho da inserção de PCM, individualmente e de modo combinado, num módulo localizado em Évora.	45
Tabela 6.5 Seleção das fachadas para inserção de PCM, segundo uma escala de '+' (atente-se o diferente tamanho dos sinais '+').	46
Tabela 6.6 Seleção das fachadas para inserção de PCM em função da orientação do edifício. ...	47
Tabela A. 1 Parâmetros de definição da simulação em CFD no DesignBuilder.	55
Tabela A. 2 Resultados obtidos quando se faz a variação do caudal de ar de entrada e seu efeito na velocidade dentro do módulo.	55
Tabela B. 1 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito individual da inserção de PCM para o módulo localizado em Lisboa (apresentação em escala de cores).	57
Tabela B. 2 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito individual da inserção de PCM para o módulo localizado no Porto (apresentação em escala de cores).	59
Tabela B. 3 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito individual da inserção de PCM para o módulo localizado em Évora (apresentação em escala de cores).	61
Tabela B. 4 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito combinado da inserção de PCM em duas fachadas para o módulo localizado em Lisboa (apresentação em escala de cores).	63
Tabela B. 5 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito combinado da inserção de PCM em duas fachadas para o módulo localizado no Porto (apresentação em escala de cores).	63
Tabela B. 6 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito combinado da inserção de PCM em duas fachadas para o módulo localizado em Évora (apresentação em escala de cores).	63
Tabela II. 1 Principais propriedades utilizadas para os cálculos do software (propriedades existentes na biblioteca-padrão do DesignBuilder).	76

Lista de Abreviaturas

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
CIBSE	<i>Chartered Institution of Building Services Engineers</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i> (Polietileno de alta densidade)
IDA ICE	<i>IDA Indoor Climate Energy</i>
IMI	Imposto Municipal sobre Imóveis
PCM	<i>Phase Change Materials</i> (Materiais de Mudança de Fase)
PCMTB	<i>PCM Thermal Board</i> (placas de metal contendo PCM)
PCMTS	<i>PCM Thermal Shield</i> (invólucro térmico contendo PCM)
PPW	<i>Plug-and-Play Walls</i> (método experimental modular para análise térmica de soluções construtivas)
PVC	<i>Polyvinyl Chloride</i> (policloreto de vinilo)
RPH	Renovações (de ar) por hora
TIM-PCM	<i>Translucent Insulation Material – PCM</i> (material de isolamento translúcido contendo PCM)
XPS	<i>Extruded Polystyrene</i> (poliestireno extrudido)

Lista de Símbolos

A_p	Área do pavimento	m^2
c_p	Calor específico a pressão constante	$\frac{J}{kg \cdot ^\circ C}$
E	Fluxo térmico emitido por uma superfície real	$\frac{W}{m^2}$
G	Irradiação, taxa na qual a energia radiante chega a uma superfície	$\frac{W}{m^2}$
G_{abs}	Taxa na qual a energia radiante é absorvida	$\frac{W}{m^2}$
h	Entalpia específica	$\frac{J}{kg}$
h_{conv}	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$
I_t	Inércia térmica	$\frac{kg}{m^2}$
k	Condutividade térmica	$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$
m	Massa total	kg
\dot{m}	Caudal mássico	$\frac{kg}{s}$
M_{s_i}	Massa superficial útil do elemento i	$\frac{kg}{m^2}$
N	Número de dias	dias
\dot{Q}	Energia transferida do ou para o sistema por unidade de tempo	W
$q''_{cond,x}$	Fluxo de energia térmica transferida por condução na direção x	$\frac{W}{m^2}$
q''_{conv}	Fluxo de energia térmica transferida por convecção	$\frac{W}{m^2}$
q''_{rad}	Fluxo de energia térmica transferida por radiação	$\frac{W}{m^2}$
r	Fator de redução da massa superficial útil	
S_i	Área da superfície interior do elemento útil	m^2
T	Temperatura do sistema	$^\circ C$

T_s	Temperatura da superfície	°C
T_{viz}	Temperatura da vizinhança	°C
T_∞	Temperatura do fluido	°C
wf	Fator de quantificação do desconforto em cada momento	
α	Absortividade	
α	Constante de ponderação das temperaturas médias diárias	
Δt	Intervalo de tempo	s
ΔT	Diferença de temperaturas	°C
ε	Emissividade	
θ_o	Temperatura operativa	°C
θ_{ed-i}	Temperatura média exterior i dias antes do dia considerado	°C
$\theta_{o,max}$	Temperatura operativa máxima de conforto	°C
$\theta_{o,min}$	Temperatura operativa mínima de conforto	°C
θ_{rm}	Temperatura média exterior exponencialmente ponderada	°C
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Na União Europeia, 26,1% da energia final é consumida pelo setor residencial [1]. Da energia consumida neste setor, 63,6% destina-se a aquecimento ambiente e 0,4% a arrefecimento [2], o que totaliza uma parcela de 64% da fatura energética destinada a climatizar residências. Em Portugal, as estatísticas apontam para números inferiores. Em 2018, o setor doméstico correspondia a 17,7% da energia final consumida [3], sendo apenas 22% destes destinados a climatização [4]. No entanto, assiste-se, em Portugal, a um cenário em que as famílias, por questões culturais e financeiras, evitam gastar recursos em climatização, preferindo outras formas de manutenção da temperatura corporal, como o uso de agasalhos [5]. Em 2019, cerca de 18,9% dos portugueses não tinha condições financeiras para climatizar as suas casas, valor este significativamente mais elevado que a média europeia, estimada ser de 7% [6]. De facto, pelo tipo de construção adotado, as habitações portuguesas correspondem a sistemas muito pouco eficientes [5]. Mais de metade das habitações portuguesas têm classificação energética C ou inferior [7]. Além disso, Portugal é dos países europeus onde o preço da eletricidade é mais elevado e onde mais de metade da fatura elétrica corresponde a taxas e impostos [8], o que leva os portugueses a optar por evitar gastos de energia adicionais na climatização.

Ao longo do último ano, assistiu-se a um aumento do consumo de eletricidade e de gás de 6,5% e de 5,3%, respetivamente, no setor doméstico em Portugal [9]. Este aumento do consumo energético pode estar relacionado com o contexto pandémico que se vive atualmente. As medidas de contenção tomadas pelo governo, como o teletrabalho, o ensino à distância e o encerramento de grande parte dos estabelecimentos públicos, levaram a população a permanecer mais tempo em casa, tendo esta, naturalmente, aumentado as suas despesas domésticas, mas também procurado por melhores condições de conforto térmico na habitação. Ainda assim, o custo da energia em Portugal face às condições de vida da população continua elevado, pelo que são necessárias estratégias de melhoria do conforto térmico que não prejudiquem o rendimento dos portugueses.

A inércia térmica das construções tem grandes implicações no conforto térmico. A definição de soluções construtivas que contribuam para a aumentar poderá ser um passo importante para a melhoria das condições de conforto das habitações portuguesas.

Os PCM (*Phase Change Materials* - Materiais de Mudança de Fase) apresentam características muito interessantes nesse sentido. O facto de absorverem grandes quantidades de energia térmica numa gama de temperaturas restrita, em que ocorre a sua mudança de fase, permite o armazenamento ou a libertação de grandes quantidades de energia térmica, eventualmente de origem renovável, como a energia solar, sem sobreaquecer ou subarrefecer o sistema.

Em particular, quando integrados num edifício, os PCM são capazes de armazenar energia térmica, proveniente dos diversos modos de transferência de calor – condução, convecção e radiação -, libertando essa mesma energia durante a noite para o seu interior, quando este tende a arrefecer. Este ciclo permite que o interior do edifício não sobreaqueça durante as horas de maior calor, além de permitir que a energia acumulada seja libertada durante a noite, evitando também que este subarrefeça. Deste modo, a amplitude térmica no interior é reduzida, e o desfasamento temporal entre os picos de temperatura no exterior e no interior é maior, fazendo aumentar a inércia térmica do edifício e, inerentemente, o conforto térmico no espaço.

Os PCM podem ser integrados de diversas formas nas construções, sendo o macroencapsulamento uma boa solução do ponto de vista da integridade e da preservação do PCM, bem como da sua integração na construção.

Em edifícios que, por si só, tenham uma inércia térmica reduzida, este efeito será mais notório, sendo esse o caso das construções 'leves', nomeadamente as *tiny houses*. A procura por este tipo

de construções tem vindo a crescer desde 2008 [10], quer pela facilidade e rapidez na sua produção, quer pelos menores custos que apresentam. Por serem mais pequenas, os custos associados a impostos, como o IMI (Imposto Municipal sobre Imóveis), e à fatura energética são mais reduzidos [11]. Efetivamente, estas construções são conhecidas pela sustentabilidade, não só por estarem associadas a menores consumos de recursos, mas também pela possibilidade de optar por materiais de reduzido impacto ambiental na sua construção [10]. A maior procura por estilos de vida mais simples, minimalistas e nómadas é outro dos pontos que contribui para o seu crescimento [10]–[12]. Ao longo do último ano, a procura por estas construções cresceu de forma notável, atingindo, segundo o relatório *Global Tiny Homes Market 2020*, o recorde de vendas destas habitações [12]. De facto, a crise pandémica levou à instalação do teletrabalho e do ensino a partir de casa, que exigiram a adaptação do espaço doméstico a um espaço de trabalho/estudo. Começaram a surgir novas tendências e as *tiny houses*, anteriormente definidas como habitações de tamanho reduzido construídas com materiais leves, passaram a ser vistas como possíveis escritórios a integrar no jardim de casa [13] ou até mesmo em parques públicos [14], criando espaços de trabalho seguros e viáveis do ponto de vista económico.

A previsão até 2024 é de que a procura por este tipo de construções continue a crescer significativamente [15].

O presente trabalho faz uma quantificação do contributo dos PCM para conferir inércia térmica às construções 'leves', apresentando conclusões úteis para a decisão sobre a integração de PCM macroencapsulados nas soluções construtivas de edifícios deste tipo.

1.2 Objetivos

Os objetivos desta dissertação passam, em primeira instância, pelo desenvolvimento, ou estabelecimento, de modelos de simulação dinâmica do comportamento de materiais de mudança de fase, simulando o comportamento dos PCM macroencapsulados quando integrados nas construções e/ou elementos de construção, com a finalidade de obter informação que permita quantificar em que medida a sua aplicação pode contribuir para melhorar as condições de conforto térmico das construções 'leves'.

Sumariamente, o objetivo do presente trabalho consiste em obter resultados globais que permitam extrair conclusões que possam ser úteis na tomada de decisões sobre a incorporação de PCM macroencapsulados em construções 'leves'.

1.3 Estrutura do Documento

O documento encontra-se estruturado começando com uma revisão bibliográfica (Capítulo 2), onde são enumerados diversos estudos já realizados sobre a integração de PCM em edifícios.

O Capítulo 3 faz uma apresentação dos PCM, abordando, além dos critérios de seleção e propriedades, a sua classificação e métodos de incorporação nas construções. Ainda neste capítulo, são referidas algumas formas de melhorar a transferência de calor de e para estes materiais.

No Capítulo 4 apresentam-se os principais mecanismos de transferência de calor, evidenciando-se o caso particular de sistemas correspondentes a edifícios. Nesse mesmo capítulo, são descritas as principais características de alguns *softwares* de simulação dinâmica de edifícios.

De seguida, no Capítulo 5 descreve-se toda a metodologia seguida para a elaboração do presente estudo, incluindo o âmbito e descrição do método de cálculo do critério de comparação utilizado, bem como a definição de todas as variáveis associadas à caracterização térmica do edifício.

No Capítulo 6 apresentam-se, analisam-se e discutem-se os resultados. Este capítulo encontra-se dividido em 3 partes. A primeira (Secção 6.1) refere-se ao estudo da inserção de PCM em cada fachada de forma individual, retirando conclusões que permitem ir retirando variáveis da

análise realizada e selecionando as melhores configurações para cada localização do módulo de construção estudado. Já na segunda parte (Secção 6.2) expõem-se os resultados e respetivas conclusões obtidos para o efeito combinado da inserção de PCM em duas fachadas do módulo de construção estudado. Na terceira parte (Secção 6.3) faz-se uma síntese dos resultados, e apresenta-se uma metodologia para a decisão sobre a melhor orientação da construção, o PCM e a estratégia de ventilação mais adequados, e a fachada em que o PCM deve ser, preferencialmente, inserido.

Por fim, o Capítulo 7 corresponde à conclusão do trabalho, onde se salientam os seus principais contributos e se propõem estudos que podem ser efetuados no futuro sobre esta temática.

2 Revisão Bibliográfica

A aplicação de PCM tem despertado, nos últimos anos, bastante interesse na comunidade científica e até mesmo na própria sociedade. De facto, estes materiais têm mostrado bastante potencial para melhorar a eficiência de sistemas energéticos, desde painéis solares, termoacumuladores e sistemas de climatização, ou na construção de edifícios. Particularmente neste último, estes materiais são capazes de melhorar consideravelmente o conforto térmico além de permitirem uma redução significativa no consumo energético para climatização, reduzindo, inerentemente, as indesejáveis emissões de dióxido de carbono.

2.1 Integração de PCM em edifícios

São diversas as formas como os PCM podem ser integrados nas construções, sendo o macroencapsulamento uma das técnicas preferenciais, pela facilidade no manuseamento e produção, bem como pelo custo reduzido que, geralmente, apresenta. Além disso, a aplicação pode ser feita tanto nas paredes do edifício, como na cobertura, laje ou, até mesmo, na envolvente envidraçada translúcida.

Zwanzig *et al.* [16] estudaram a aplicação de PCM nas paredes e na cobertura de edifícios residenciais localizados em três cidades dos Estados Unidos com diferentes climas, Minneapolis, Louisville e Miami. Em qualquer um dos casos, a aplicação de PCM contribuiu para uma redução do consumo energético tanto no verão como no inverno, e uma redução dos picos de consumo no inverno. Zwanzig *et al.* [16] concluíram, ainda, haver uma dependência do desempenho dos PCM em edifícios com as condições climáticas, sendo desejáveis PCM com diferentes temperaturas de fusão para cada clima.

Já Zhou e Pang [17] avaliaram o contributo da aplicação de ripas com PCM na superfície interna das paredes de um módulo instalado em Beijing (China), tendo observado um longo período para o descarregamento (solidificação) do PCM, o que permitiu manter a temperatura no interior do módulo dentro das condições de conforto desejadas por várias horas.

Para a mesma localização, Xiang e Zhou [18] propuseram a integração de PCM num edifício, complementando esta solução com a utilização de uma unidade de ventilação noturna. Segundo simulações dinâmicas efetuadas, este sistema contribui para uma melhoria no conforto térmico e uma redução do consumo e das emissões de dióxido de carbono, além de reduzir os picos de temperatura em 3,3 °C.

A. Medina *et al.* [19] estudaram o comportamento de duas construções leves, localizadas na cidade de Lawrence (Estados Unidos), contendo 10% e 20% de PCM em base mássica macroencapsulado em tubos integrados horizontalmente na camada de isolamento da solução construtiva. Os resultados mostraram uma redução dos picos de fluxo de calor de 37% e 62% e uma redução do fluxo de calor médio diário de 33% e 38%, para as construções com 10% e 20% de PCM, respetivamente.

Ahangari e Maerefat [20] investigaram a integração de duas camadas de PCM com diferentes temperaturas de fusão, para quatro regiões do Irão, com climas distintos. Os resultados mostraram que a melhor temperatura de fusão para o PCM deve ser muito próxima da temperatura de conforto no edifício, cerca de 1 °C abaixo da temperatura de *setpoint* inferior (inverno) para uma das camadas e de 2-3 °C acima da temperatura de *setpoint* superior (verão). Observou-se um aumento na percentagem de tempo em que o edifício se encontra sob condições de conforto segundo o modelo de Fanger de cerca de 73% para 93% para um clima seco, tendo o consumo energético sido reduzido em 17,5% relativamente à solução sem PCM.

Ahmad *et al.* [21] monitoraram duas células de teste instaladas numa localização francesa, uma delas contendo PCM no interior de painéis de PVC, utilizados na sua construção. Os resultados obtidos experimentalmente, bem como os adquiridos através de simulação dinâmica, permitiram

concluir que a aplicação de PCM, nesta localização e para esta solução construtiva, é capaz de reduzir a amplitude térmica em aproximadamente 20 °C no verão, e de prevenir temperaturas negativas no inverno.

Castell *et al.* [22] demonstraram, experimentalmente, que a aplicação de PCM em unidades instaladas em Puigverd de Lleida (Espanha) permite reduzir o pico de temperaturas em 1 °C e atenuar as flutuações térmicas diárias. Também o consumo elétrico foi reduzido em cerca 15% para a unidade com PCM, reduzindo as emissões de dióxido de carbono em 1-1,5 kg/(ano.m²).

A aplicação de PCM em edifícios tem também sido avaliada em envidraçados. Berthou *et al.* [23] estudaram o comportamento térmico de um edifício no Sul de França com uma parede construída em blocos translúcidos contendo PCM no interior (TIM-PCM - *Transparent Insulation Material-PCM*). Esta solução permite, além dos benefícios da integração de PCM nas paredes, um bom isolamento térmico e a entrada de iluminação natural, mostrando-se eficaz para um clima frio e ensolarado; no entanto, pode causar sobreaquecimento no verão.

Os PCM têm sido, ainda, analisados enquanto materiais constituintes de proteções solares. Weinlaeder *et al.* [24] avaliaram um sistema de proteção solar interna consistindo em ripas contendo PCM aplicado num módulo em Karlsruhe (Alemanha). Este módulo foi monitorado durante dois anos, assim como outro com persianas convencionais. No módulo com as proteções solares de PCM, o pico de temperatura foi menor em 2 °C, melhorando consideravelmente o conforto térmico relativamente à outra solução. Concluiu-se, ainda, que a energia armazenada deve ser dissipada durante a noite, sendo que em climas com temperaturas noturnas suficientemente baixas. Isso pode ser conseguido com ventilação natural. Particularmente em Portugal, dois edifícios orientados a Sul foram monitorizados na cidade de Aveiro [25]. Um dos edifícios continha persianas convencionais e outro ripas de alumínio contendo PCM no interior. Os resultados do estudo efetuado por Silva *et al.* demonstraram uma redução dos picos de temperatura até 11% e, ainda, um atraso desses mesmos picos.

2.2 Integração ótima do PCM na solução construtiva

Quanto à integração do PCM na solução construtiva, foram, também, realizadas diversas investigações, apontando, em geral, para um melhor desempenho do edifício quando o PCM é colocado mais próximo da sua face interna.

Imghoure *et al.* [26] avaliaram os efeitos da incorporação de diversos PCM nas fachadas de um edifício em Marrakech (Marrocos), aplicando-os, individualmente, nas superfícies interna e externa. Segundo o estudo realizado, o melhor PCM para esta localização corresponde a uma temperatura de fusão de 23 °C, devendo ser aplicado junto à face interna do isolamento.

Xing Jin *et al.* [27] estudaram em laboratório o desempenho de uma parede com PCMTS (PCM *Thermal Shield* – Invólucro contendo pequenas bolsas de polietileno preenchidas com PCM entre duas camadas de folha de alumínio), concluindo sobre a sua dependência quanto à sua integração na solução construtiva. Segundo os resultados obtidos, o PCM deve ser colocado a uma distância de 1,5L da superfície interna da camada de isolamento, em que L corresponde à espessura da camada de isolamento. Para esta localização, Xing Jin *et al.* [27] obtiveram uma redução do pico de fluxo de calor de 41%, e um desfasamento dos picos de temperatura de 2 h relativamente à solução sem PCM.

Os mesmos investigadores avaliaram experimentalmente o desempenho dos PCMTS num módulo localizado na América do Norte [28], obtendo uma redução dos picos de fluxo de calor de 11% quando estes são colocados junto à face mais interna da parede.

Também Lee *et al.* [29] estudaram o mesmo material quando aplicado nas paredes de um edifício em Lawrence (Estados Unidos), tendo determinado a melhor localização do PCM como sendo a uma distância de 2,54 cm da superfície interna da camada de isolamento para a fachada voltada a Sul, e de 1,27 cm para a fachada voltada a Oeste. Para estas localizações, a redução do

pico de fluxo de calor corresponde a 51,3% e 29,7%, respetivamente, relativamente à solução sem PCM. Também foi observado um atraso destes picos em 6,3 h e 2,3 h, respetivamente.

Os mesmos autores testaram, para a mesma cidade, o desempenho de PCMTB (PCM *Thermal Boards* – PCM macroencapsulado em placas) através de um método de testagem conhecido como PPW (*Plug-and-Play Walls*) [30], método que permite testar experimentalmente o desempenho de vários tipos de solução construtiva com grande flexibilidade, substituindo as placas correspondentes a cada solução construtiva de forma bastante fácil e rápida. Os resultados apontam para uma redução da transferência média diária de calor em 27,4% para a fachada voltada a Sul e de 10,5% para a fachada voltada a Oeste, e uma redução dos picos de fluxo de calor em 67% e 80,2% respetivamente. Os picos de transferência de calor foram também atrasados em 3 h, em média, com a adição da placa de PCM.

Kong *et al.* [31] desenvolveram e validaram experimentalmente um modelo numérico para prever o comportamento térmico de edifícios habitacionais com PCM incorporado. Kong *et al.* [31] avaliaram o desempenho do edifício quando painéis contendo PCM são aplicados nas superfícies interna e externa de um edifício na cidade de Tianjin (China), tendo a primeira solução obtido melhores resultados, quer nas paredes, quer na cobertura, reduzindo e atrasando os picos de temperatura.

2.3 Incorporação de PCM nas construções em Portugal

Muitos são os estudos realizados até ao momento sobre a integração de PCM nas construções. A este respeito, destacam-se alguns estudos realizados tendo em conta o clima português, tendo estes por base a avaliação das necessidades de aquecimento e arrefecimento.

Garcia [32] fez um estudo sobre a incorporação de PCM nas fachadas de edifícios localizados em quatro distritos portugueses, Lisboa, Porto, Faro e Bragança, analisando o número de °C.dia de aquecimento e arrefecimento para cada uma das soluções estudadas. O edifício estudado tem janelas de maior dimensão na fachada voltada a Sul e janelas menores na fachada voltada a Norte, não tendo sido a orientação solar uma das variáveis em estudo. Para as localizações estudadas, a temperatura de fusão do PCM que permite uma maior redução das necessidades de arrefecimento é sempre de 25 °C, enquanto que a temperatura de fusão ótima quando considerando as necessidades de aquecimento se encontra entre os 18 °C e os 21 °C, ou seja, sempre muito próxima das temperaturas limite da zona de conforto. Garcia mostrou, ainda, a importância da adoção de estratégias de ventilação adequadas, destacando a ventilação noturna, natural, aproveitando as condições exteriores favoráveis ao descarregamento do PCM, ou forçada. Também a utilização de proteções solares ou estratégias de sombreamento se mostrou relevante na redução das cargas solares no edifício, evitando o sobreaquecimento durante o período diurno.

Coerentemente, Roque [33] determinou as temperaturas de fusão dos PCM com melhor desempenho para sete localizações portuguesas, tendo obtido como melhores soluções os PCM com temperaturas de fusão de 21 °C e 25 °C na redução do consumo energético nas estações de aquecimento e de arrefecimento, respetivamente. No que se refere à redução do consumo total de energia para climatização, o PCM com uma temperatura de fusão de 23 °C mostrou-se mais eficaz em algumas localizações. Roque evidenciou, mais uma vez, a importância da adoção de estratégias de ventilação e limitação de ganhos solares adequadas. Através da análise de resultados após variação da área da envolvente envidraçada, Roque concluiu que, em termos de necessidades energéticas, a opção com envidraçados ocupando 30% da área da fachada Sul e 15% da área nas fachadas Este e Oeste é a melhor. Também o estudo da localização do PCM na solução construtiva permitiu concluir que este deve ser aplicado o mais próximo possível da superfície interior das paredes e da cobertura.

3 Materiais de Mudança de Fase

3.1 Introdução

Os PCM (*Phase Change Materials* – Materiais de mudança de fase) são compostos capazes de absorver e armazenar grandes quantidades de energia durante a sua mudança de fase ascendente e de a libertar durante a mudança de fase descendente.

Analisando a fusão destes materiais, é transferido calor sensível para o PCM até ser atingida a sua temperatura de fusão. Durante a mudança de fase, esta temperatura mantém-se essencialmente constante, absorvendo uma grande quantidade de energia, correspondente à entalpia de fusão ou calor latente de fusão, sem que a sua temperatura aumente significativamente. Após a fusão, se continuar a ser fornecido calor ao PCM, este deverá aumentar a sua temperatura acima da sua temperatura de fusão, absorvendo, calor sensível, na fase líquida. O inverso ocorre quando o PCM liberta energia, regressando ao estado sólido [34].

A integração de PCM na construção de edifícios pode constituir uma vantagem, dadas as suas propriedades térmicas. De facto, durante o dia, o interior do edifício aquece devido à radiação solar que incide sobre ele. Dado o aumento da temperatura no interior do espaço, começa a ser transferido calor para o PCM. Após ser atingida a sua temperatura de mudança de fase, continua a ser recebida energia; no entanto, o PCM mantém a sua temperatura. Isto leva a que a temperatura do espaço se mantenha mais ou menos constante e próxima da temperatura de fusão do PCM. Durante a noite, o espaço tende a arrefecer e o calor armazenado no PCM é libertado, também a uma temperatura essencialmente constante, contribuindo para uma menor amplitude da temperatura do espaço e evitando tanto o sobreaquecimento durante o dia, como o subarrefecimento durante a noite [34].

3.2 Critérios de seleção

De acordo com o efeito pretendido, tanto o PCM como a forma da sua integração na construção devem ser tidos em consideração [35]. De seguida, descrevem-se as propriedades que devem estar na base desta seleção.

3.2.1 Propriedades termodinâmicas

No que se refere às propriedades termodinâmicas, deve-se seleccionar um PCM com uma temperatura de fusão adequada ao efeito pretendido. O PCM deve apresentar pouca segregação de fase, pouca variação de volume e reduzida pressão de vapor, ter elevada entalpia de fusão por unidade de volume e elevado calor específico. A condutividade térmica também deve ser o mais elevada possível, promovendo as transferências de calor que possibilitam a sua mudança de fase [35].

3.2.2 Propriedades químicas

O PCM não deve ser tóxico, inflamável, explosivo ou corrosivo e deve apresentar grande estabilidade química a longo prazo, mesmo após muitos ciclos térmicos. Tanto o processo de fusão, como de solidificação, devem ser totalmente reversíveis e o PCM, ou o respetivo material do invólucro (encapsulamento), deve ser compatível com os materiais de construção [35].

3.2.3 Propriedades cinéticas

Quanto às propriedades cinéticas, o PCM deve apresentar elevada taxa de nucleação¹, de modo a evitar o fenómeno de subarrefecimento² [35].

3.2.4 Propriedades económicas

Deve ser tida em conta a disponibilidade comercial e o custo do PCM, e da sua forma de integração na construção.

3.2.5 Outras propriedades

Outras propriedades devem ser consideradas, nomeadamente as propriedades relacionadas com o custo ambiental do PCM. De modo a reduzir o seu impacto ambiental, o PCM não deverá ser poluente, ter uma vida útil o mais longa possível, ser facilmente separável dos restantes elementos das construções e, de preferência, ser reciclável. Também os eventuais materiais que possam fazer parte da sua integração na construção devem ter estas características.

3.3 Classificação e Propriedades

A classificação dos materiais de mudança de fase em orgânicos, inorgânicos e misturas eutécticas (Figura 3.1) foi inicialmente proposta, em 1980, por Abhat [36]. Em 1997, Mehling e Cabeza [37] propuseram uma nova classificação, subdividindo os materiais de mudança de fase de acordo com a sua gama de temperaturas e entalpias de fusão (Figura 3.2) [38]–[41].

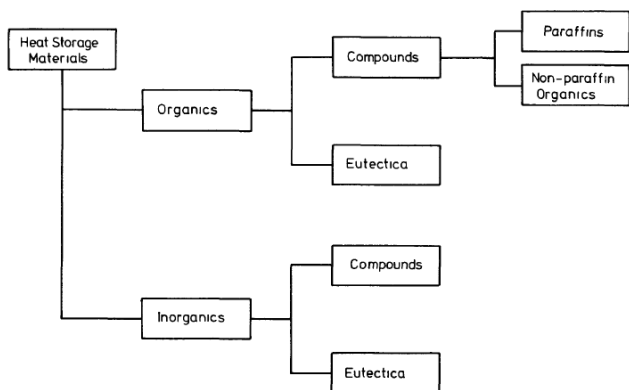


Figura 3.1 Classificação dos materiais de mudança de fase por Abhat [36].

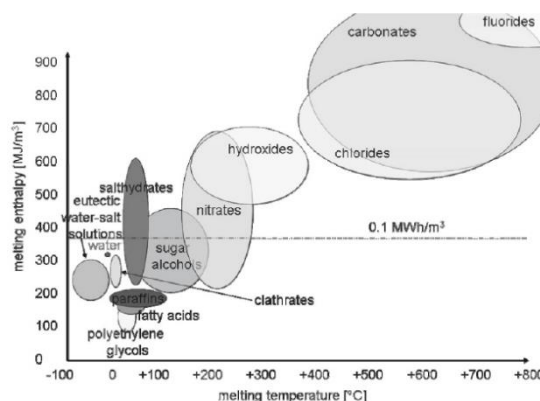


Figura 3.2 Classificação dos materiais de mudança de fase de acordo com a sua gama de temperaturas de fusão e calor latente de fusão [37].

De seguida, descrevem-se as principais características de cada tipo de material de mudança de fase.

¹ A taxa de nucleação pode ser definida como o número de núcleos formados por unidade de tempo e de volume [42]. Esta taxa é comumente baixa nos PCM durante a mudança de fase líquido-sólido [43]. Para a formação de uma partícula sólida, um núcleo, é necessário libertar energia para haver mudança de fase, mas também absorver energia, já que a reação de formação da interface entre as duas fases corresponde a um processo endotérmico. Assim, o fenómeno da nucleação está dependente de flutuações térmicas que possam dar origem a essas trocas de energia, tornando este um fenómeno estocástico, dependente de eventos imprevisíveis. Esta limitação tem como principal efeito o subarrefecimento do PCM [44].

² O subarrefecimento é um fenómeno que decorre da necessidade de subarrefecer o PCM a temperaturas abaixo da temperatura de fusão para que a taxa de nucleação seja aumentada e o PCM inicie a sua mudança de fase líquido-sólido [44].

3.3.1 Orgânicos

Em geral, os materiais orgânicos, além de recicláveis, não são corrosivos e são habitualmente estáveis, não sofrendo variações nas propriedades ao longo dos múltiplos ciclos térmicos. Apenas quando sujeitos a temperaturas elevadas, podem tornar-se instáveis dada a natureza covalente das suas moléculas. Estes PCM são compatíveis com a generalidade dos materiais, inclusive com materiais de construção, têm um custo relativamente baixo e estão disponíveis numa grande gama de temperaturas de fusão. Além disso, os PCM orgânicos não sofrem fenómenos de separação de fases³ ou subarrefecimento. A mudança de fase dá-se, tipicamente, de forma congruente. Por outro lado, são inflamáveis e apresentam, em geral, uma reduzida condutividade térmica. Comparativamente aos PCM inorgânicos, e à exceção dos álcoois açucarados, apresentam menor densidade, o que resulta numa entalpia de fusão por unidade de volume também menor [37]–[39], [45], [46].

A gama de PCM orgânicos é composta por materiais parafínicos e não parafínicos, sendo que dentro deste último grupo se podem destacar os ácidos gordos e os álcoois açucarados [37], [39].

3.3.1.1 Parafínicos

Parafina é o nome técnico usado para alcanos lineares, cadeias lineares de carbono e hidrogénio, cuja fórmula geral corresponde a C_nH_{2n+2} . A sua temperatura de fusão é tanto maior quanto maior for o número de átomos de carbono [37].

Estes materiais tem uma boa densidade mássica de armazenamento de energia, são disponibilizados numa vasta gama de temperaturas de fusão e exigem muito poucos requisitos de segurança, apesar de inflamáveis. De facto, a parafina não reage com a maior parte dos reagentes químicos, apresenta uma pressão de vapor desprezável e uma expansão de volume de cerca de 10%, revelando grande estabilidade quando encapsulada. Além disso, a parafina não sofre subarrefecimento significativo e a sua mudança de fase ocorre de forma congruente [37].

Apesar das múltiplas vantagens, a parafina apresenta reduzida condutividade térmica e, quando sujeita a temperaturas elevadas, as longas cadeias de carbono e hidrogénio podem fragmentar, levando a que as cadeias mais reduzidas resultantes tendam a evaporar [37].

3.3.1.2 Não parafínicos

Ácidos gordos

Os ácidos gordos são compostos orgânicos constituídos por átomos de hidrogénio, carbono e oxigénio. A sua estrutura molecular é genericamente definida como $CH_3(CH_2)_{2n}COOH$ e, à semelhança da parafina, a sua temperatura de fusão é proporcional ao tamanho da sua cadeia molecular [37].

Os ácidos gordos são bastante estáveis ao longo dos ciclos térmicos e são caracterizados por uma entalpia de fusão próxima da das parafinas. No entanto, ao contrário destas, têm um carácter ácido, sendo tipicamente corrosivos para alguns materiais. Por serem constituídos por um único composto, não há separação de fases, não apresentando subarrefecimento. Além disso, têm uma condutividade térmica reduzida [37].

³ A segregação ou separação de fases ocorre quando o PCM é constituído por mais do que um composto. Os dois ou mais compostos terão pontos de fusão diferentes, levando a que se formem duas fases da mistura, com temperaturas de fusão diferentes. Isso leva a que a fase com maior densidade se deposite no fundo do invólucro ou recipiente em que o PCM está armazenado, levando à separação entre as fases envolvidas [37], [47].

BioPCM

Os *BioPCM* são um exemplo de PCM orgânicos, resultantes da sintetização de resíduos de processos de fabrico utilizados para remover ácidos gordos de alimentos. Estes materiais apresentam diversas vantagens relativamente a outros PCM comercializados, entre as quais, a durabilidade, o reduzido impacto ambiental, o baixo custo de produção, o facto de não sofrerem subarrefecimento, de não serem tóxicos, corrosivos ou inflamáveis, e de abrangerem uma larga gama de temperaturas de mudança de fase [48], [49].

Álcoois açucarados

Os álcoois açucarados, conhecidos como adoçantes, são carboidratos na forma hidrogenada, isto é, contendo hidrogénio. A sua estrutura molecular pode ser definida como $HOCH_2[CH(OH)]_nCH_2OH$ [37].

A sua entalpia de fusão por unidade de massa é bastante elevada na maior parte dos casos e apresentam, também, elevada densidade, levando a que a entalpia de fusão por unidade volúmica destes materiais seja bastante elevada. Os álcoois açucarados são, como a maior parte dos PCM orgânicos, bastante seguros e não apresentam subarrefecimento [37].

3.3.2 Inorgânicos

Os PCM inorgânicos encontram-se disponíveis numa gama de temperaturas de fusão bastante diversificada e destacam-se por ter, em geral, uma maior entalpia de fusão por unidade de volume, e uma condutividade térmica mais elevada comparativamente aos PCM orgânicos [37], [38], [45], [46]. Além disso, não são inflamáveis, sofrem reduzida variação de volume e são disponibilizados comercialmente de forma variada [38], [46]. Em contrapartida, são corrosivos, não fundem congruentemente e sofrem subarrefecimento e segregação de fase, sendo, por isso, mais instáveis [38], [45], [46].

Os PCM inorgânicos são tipicamente divididos em sais hidratados e metais [39].

3.3.2.1 Sais hidratados

Sais são compostos iónicos que se incorporam, facilmente, em moléculas de água. As moléculas resultantes dessa ligação correspondem a sais hidratados.

A estrutura cristalina dos sais hidratados confere-lhes, normalmente, grande estabilidade. Apesar disso, devido ao facto de o ponto de fusão dos sais ser mais elevado que o da água, a gama de temperaturas de fusão dos sais hidratados é mais elevada. Assim, quando estes são aquecidos, as moléculas de água separam-se sob a forma de vapor, restando apenas o sal, resultando uma entalpia de fusão bastante elevada, quer em termos mássicos quer em termos volúmicos, dada a elevada densidade destes materiais. No entanto, do processo que decorre durante o aquecimento, resultam outros fenómenos inconvenientes como a separação de fases⁴, inevitável neste caso, e uma pressão de vapor elevada durante a fusão, o que leva a perdas de água e grande instabilidade ao longo dos ciclos térmicos. A grande maioria dos sais hidratados são potencialmente corrosivos, particularmente para os metais, e sofrem subarrefecimento. O custo dos sais hidratados é normalmente, reduzido, a menos que os mesmos estejam na sua forma pura [37], [39].

⁴No caso dos sais hidratados, a separação de fases decorre da alteração da temperatura de mudança de fase conforme a concentração de sal. Quando a temperatura sobe, apenas a água inicia o seu processo de mudança de fase, levando a que a água que permanece sob o seu estado inicial aumente a sua concentração em sal. É a chamada mudança de fase incongruente. Deste modo, a temperatura de mudança de fase da água com maior concentração altera-se, levando à formação de duas fases com densidades diferentes. A água com maior concentração irá depositar-se, levando à separação entre os compostos, enquanto que a água "pura" evaporada irá voltar a condensar, permanecendo no topo do invólucro [37].

3.3.2.2 Metálicos

Os metais, ou ligas metálicas, têm uma elevada capacidade de armazenamento de energia por unidade de volume, dada a sua elevada massa volúmica. Além disso, a sua condutividade térmica é significativamente mais elevada que a de outros PCM. No entanto, estes materiais não são muito explorados ao nível do armazenamento de calor latente. As causas disso estão associadas ao facto de estes materiais sofrerem subarrefecimento e segregação de fases, alteração das propriedades térmicas e variações ao nível da composição e da microestrutura ao longo dos ciclos. A sensibilidade à corrosão é outra das desvantagens que a maior parte destes materiais apresenta [50].

3.3.3 Eutéticos

Os PCM classificados como eutéticos consistem em misturas de dois ou mais constituintes [37]. Estes materiais são caracterizados por um elevado armazenamento térmico por unidade de volume e por a gama de temperaturas em que ocorre a mudança de fase ser mais restrita comparativamente a outros materiais [38], [39], [46]. Além disso, por exemplo, as parafinas podem ser misturadas com outros alcanos com cadeias de comprimento diferente, de modo a obter PCM com uma temperatura de fusão diferente da original. O mesmo efeito pode ser conseguido ao misturar diferentes ácidos gordos [37]. Por outro lado, apresentam um custo mais elevado, e a disponibilidade de dados relativos às suas propriedades pode ser limitada [39], [40], [46].

Os PCM eutéticos podem ser, ainda, subdivididos em orgânico-orgânico, inorgânico-inorgânico ou inorgânico-orgânico, consoante a natureza dos materiais que os compõem [38].

3.4 Incorporação nos materiais ou elementos de construção

Os materiais de mudança de fase podem ser incorporados nos materiais ou elementos de construção através de incorporação direta, por imersão, por meio de compósitos sob a forma estabilizada ou por encapsulamento [39].

3.4.1 Incorporação direta

Este método é o mais simples e económico, em que o PCM é diretamente misturado com os materiais de construção, como, por exemplo, no gesso ou na pasta de cimento [51], [52]. No entanto, a integração de PCM desta forma pode afetar a coesão e homogeneidade da mistura, prejudicando as propriedades mecânicas e a durabilidade do material de construção [39], [51].

3.4.2 Imersão

À semelhança da incorporação direta, a técnica de imersão também integra os PCM de forma direta nos materiais de construção [39]. A diferença é que, na técnica de imersão, os materiais de construção, como tijolos, blocos de cimento e placas, são mergulhados no PCM líquido, sendo este absorvido por ação capilar, isto é, o PCM infiltra-se pelos pequenos capilares existentes nestes materiais [39], [51]. Existem, contudo, alguns problemas associados a esta técnica. De facto, a integração de PCM por ação capilar pode afetar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos materiais de construção, além de que, quando submetidos a um elevado número de ciclos térmicos, os PCM podem vaziar [53].

3.4.3 Forma estabilizada

Na técnica de estabilização de forma, o PCM é misturado com um polímero, como o HDPE (polietileno de alta densidade), estireno ou butadieno, sendo posteriormente arrefecido até à temperatura de transição do termoplástico. Esta técnica permite obter, além de uma proporção de massa de PCM até 80%, elevado calor específico e uma condutividade térmica adequada. Os PCM integrados desta forma não necessitam de um invólucro ou recipiente e são termicamente confiáveis a longo prazo, isto é, mostram-se estáveis ao longo dos ciclos térmicos [39], [54]–[56].

3.4.4 Encapsulamento

A técnica de encapsulamento consiste no armazenamento do PCM dentro de um recipiente ou invólucro que se integra na construção de paredes, pavimentos, coberturas, telhados, ou, ainda, envidraçados. Assim, torna-se importante que o PCM seja compatível com o material do invólucro, bem como este com os materiais de construção [37]. Além disso, o invólucro deve ser estruturalmente estável, isto é, ter uma espessura e resistência adequadas e ter elevada estabilidade térmica de modo a garantir a sua estanquidade, acomodando variações de volume e, deste modo, aumentando a sua durabilidade e evitando vazamentos [37], [39], [46], [57]. O cumprimento destes critérios permite que esta técnica de incorporação dos PCM tenha algumas vantagens relativamente às outras. De facto, o invólucro funciona como barreira às interações que possam ocorrer com o ambiente exterior, reduzindo o risco de contaminação quer do PCM quer do exterior, e evitando a ocorrência de fugas [39], [46], [58].

São considerados, tipicamente, dois tipos de encapsulamento, classificados de acordo com o tamanho dos invólucros: o microencapsulamento e o macroencapsulamento [37].

3.4.4.1 Microencapsulamento

Mehling e Cabeza [37] definem como microencapsulamento o encapsulamento de partículas com diâmetros entre 1 μm e 1000 μm , apesar de existirem outras definições que divergem ligeiramente desta [35].

O microencapsulamento é possível através de diversas técnicas e permite que os PCM sejam integrados aquando da produção dos materiais ou elementos de construção, tal como exemplificado na Figura 3.3.

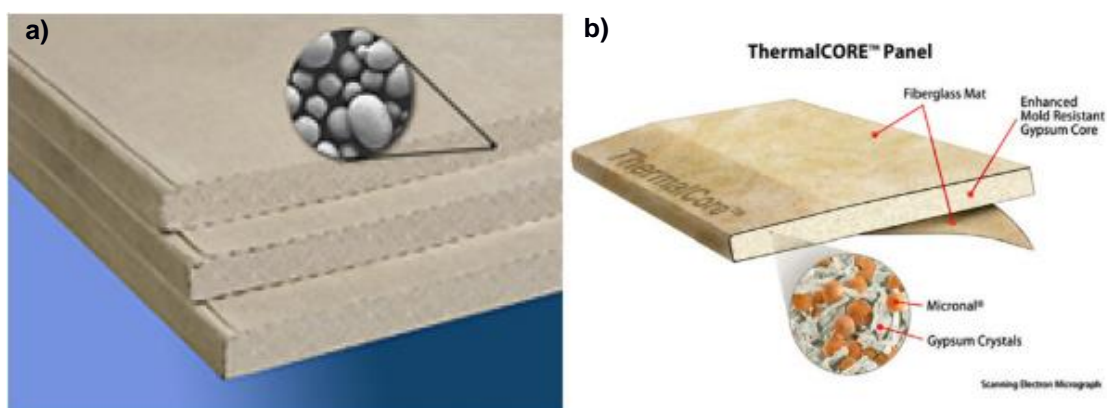


Figura 3.3 Exemplos da integração de PCM microencapsulado em elementos construtivos: a) Placa de gesso integrando PCM microencapsulado da Micronal; b) Placa de gesso laminado com PCM microencapsulado da ThermalCore [38].

Os principais processos utilizados para o microencapsulamento de PCM dividem-se em processos físicos e químicos [39].

3.4.4.1.1 Processos físicos

Entre os processos físicos destacam-se os a seguir descritos [39], [59].

Pan coating

O *pan coating* é uma das técnicas de microencapsulamento mais antigas e das mais usadas na indústria farmacêutica. O processo consiste na adição lenta do material de revestimento às partículas de material do núcleo (PCM) colocadas em movimento através da rotação do recipiente onde se encontram. O revestimento pode ser aplicado sob a forma de solução ou por meio de spray atomizado, dependendo do material de revestimento utilizado [59].

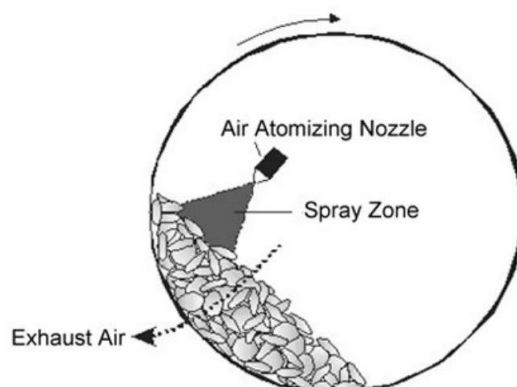


Figura 3.4 Representação esquemática da técnica de pan coating [59].

Air suspension coating

Neste processo as partículas são colocadas em suspensão numa corrente de ar. Quando passam num orifício são pulverizadas com o material do revestimento, continuando a sua ascensão por meio da corrente de ar. Esta corrente origina a evaporação do solvente, promovendo o endurecimento do material de revestimento. As partículas são levadas novamente ao início do processo, que se repete várias vezes até estar formada uma camada contínua em volta da partícula de PCM. Esta técnica possibilita a utilização de uma grande variedade de materiais de revestimento, além de permitir um grande controlo no que se refere ao tamanho das partículas, e à espessura do revestimento, entre outros fatores [59].

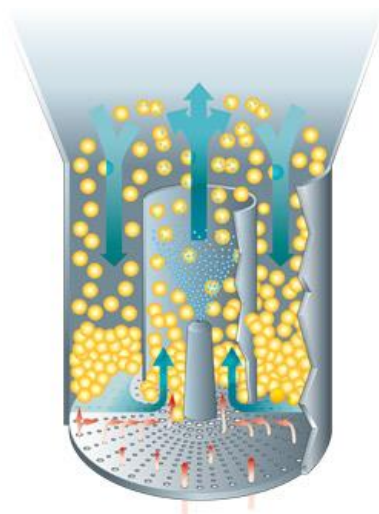


Figura 3.5 Representação da técnica de air suspension coating através de duas colunas cilíndricas concêntricas [60].

Extrusão centrífuga

Na extrusão centrífuga é utilizada uma extrusora cuja cabeça é constituída por dois tubos concêntricos. No cilindro de diâmetro menor passa o material do núcleo, enquanto que entre os dois cilindros passa o material do revestimento. Isto permite que o material do núcleo seja extrudido envolvido pelo material do revestimento. Ao contactar com o ar, formam-se esferas de PCM envolvido pelo revestimento. O material solidifica posteriormente por contacto com o ar ou por imersão numa solução gelificante – gelificação.

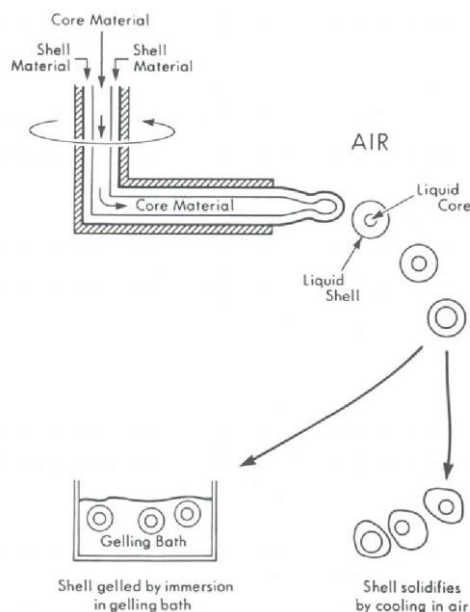


Figura 3.6 Esquema representativo da técnica de extrusão centrífuga [61].

Atomização – *Spray Drying*

Na atomização, mais conhecida como *spray drying*, o PCM é disperso num fluido, quando é pulverizado com o material de revestimento. Uma alteração das condições ambientais, como a redução da temperatura, leva à secagem do revestimento por evaporação do solvente, promovendo a solidificação do revestimento [62]. Este é um processo bastante económico comparativamente aos outros métodos de microencapsulamento e, por isso, também muito utilizado.

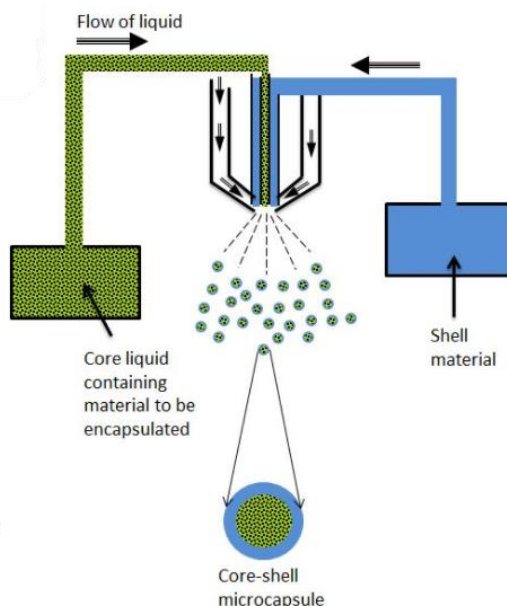


Figura 3.7 Representação do processo de atomização para formar microcápsulas [62].

Atomização – *Spray Congealing*

O *spray congealing* ou *spray cooling* é uma variante do método anterior, com a diferença de que a solidificação do material do revestimento é promovida exclusivamente pelo arrefecimento rápido do material, e não da sua secagem.

3.4.4.1.2 Processos químicos

No que se refere aos processos químicos para o microencapsulamento de PCM, destacam-se os que se referem de seguida [39].

Coacervação

Para este processo são formadas 3 fases imiscíveis: uma fase contínua (tipicamente água) e os materiais do núcleo e de revestimento. Quando é adicionada uma solução ácida é diminuído o pH da solução, promovendo a redução da solubilidade das fases dispersas. O revestimento acumula-se junto das partículas de material do núcleo e começa a precipitar formando um invólucro em volta do mesmo. Inicia-se o arrefecimento da solução e o revestimento solidifica, formando-se as microcápsulas finais. A redução da solubilidade pode ser conseguida também de outras formas, como a alteração da temperatura ou a dissolução de outros compostos [59], [63].

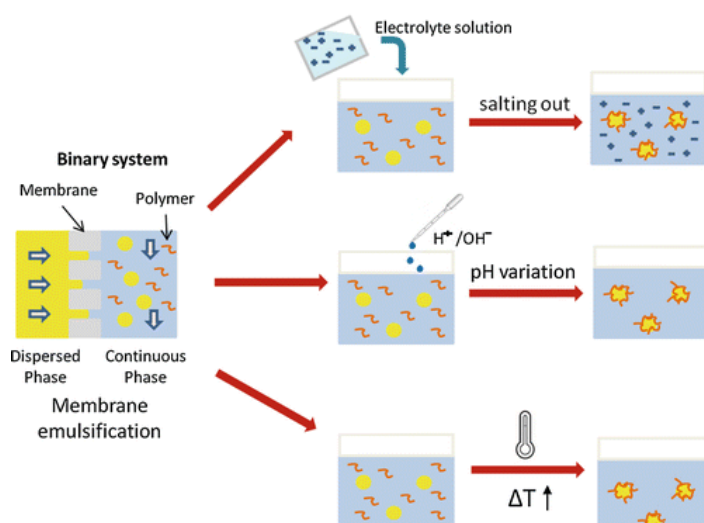


Figura 3.8 Representação das formas de coacervação simples [64].

Coacervação complexa

A grande diferença da coacervação simples para a coacervação complexa reside no número de polímeros envolvidos. Na coacervação complexa são usados dois polímeros com cargas superficiais de sinal oposto, um catiónico (geralmente gelatina) e um aniónico. Inicialmente, dispersa-se o material do núcleo na solução aquosa contendo o polímero catiónico. Adiciona-se o segundo polímero e faz-se um ajuste do pH para que ambos os polímeros fiquem carregados. Começa, então, a formação de aglomerados, chamados de coacervados complexos. O composto é arrefecido, podendo passar por processos de endurecimento da camada de revestimento e secagem [63], [65].

Polimerização interfacial

Na polimerização interfacial, o material do núcleo é fundido ou dissolvido numa solução aquosa contendo um monómero. Esta mistura é agitada a alta velocidade e é adicionado um segundo monómero que irá reagir com o primeiro através da superfície de cada gota de material do núcleo. Forma-se, então, uma camada de polímero na superfície de cada gotícula, constituindo-se o invólucro [66], [67].

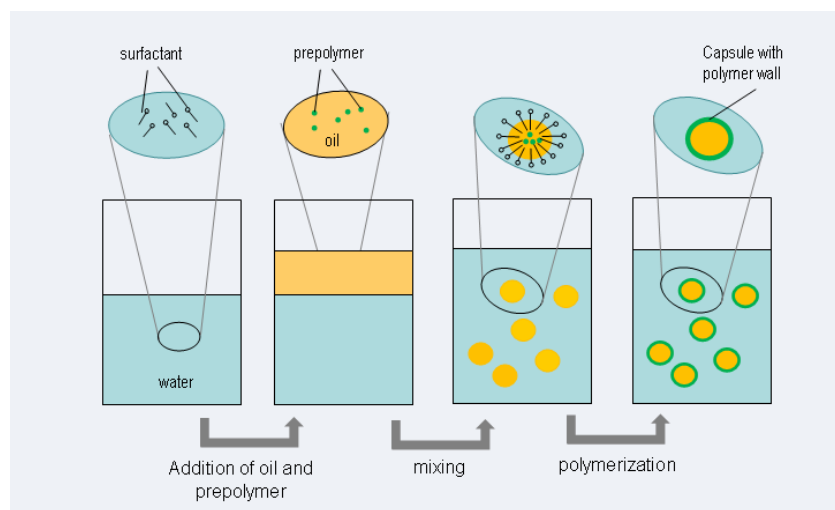


Figura 3.9 Representação do processo de polimerização interfacial [68].

3.4.4.1.3 Vantagens

O microencapsulamento tem como vantagens uma maior área de superfície por unidade de volume relativamente ao macroencapsulamento, promovendo a transferência de calor e uma maior prevenção de fenómenos como a separação de fases que fica limitada a distâncias microscópicas [37], [39], [58], [69]. É também relatada uma boa estabilidade química ao longo dos ciclos térmicos [70], [71].

3.4.4.1.4 Desvantagens

Em termos de desvantagens, o microencapsulamento requer técnicas e métodos especializados, podendo este aspeto encarecer esta solução. Além disso, pode afetar as propriedades mecânicas dos materiais de construção, e existe maior probabilidade de ocorrerem danos durante o seu manuseamento e aplicação, levando a perdas ou fugas de PCM que, em alguns casos, pode promover a degradação dos materiais de construção [39], [46], [72].

3.4.4.2 Macroencapsulamento

O macroencapsulamento corresponde ao encapsulamento de PCM num invólucro ou recipiente de dimensões macroscópicas. O armazenamento pode ir desde alguns mililitros até vários litros de PCM [37].

3.4.4.2.1 Formas de macroencapsulamento

Existe uma grande variedade de formas através das quais o PCM pode ser macroencapsulado para integrar a construção de edifícios, desde invólucros retangulares, cilíndricos ou esféricos, sob a forma de painéis, placas, ripas, lâminas, bolsas, dentro de tijolos, esferas ou tubos, não existindo uma definição única de cada um deles [35], [39], [73]. De entre as formas mais usuais destacam-se as placas ou painéis, por serem bastante convenientes para a integração nas soluções construtivas. Já as bolsas são também uma forma muito prática quanto à sua colocação nos elementos construtivos, além de terem um custo de produção bastante reduzido [35].

A seguir apresentam-se alguns exemplos de macroencapsulamento de PCM.



Figura 3.10 PCM macroencapsulado em placas [31].

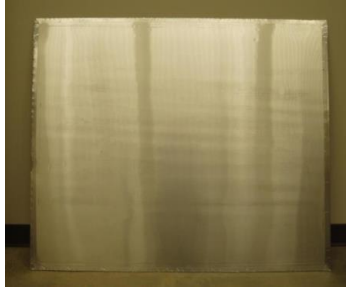


Figura 3.11 PCM macroencapsulado em placas de metal – PCMTB [30].

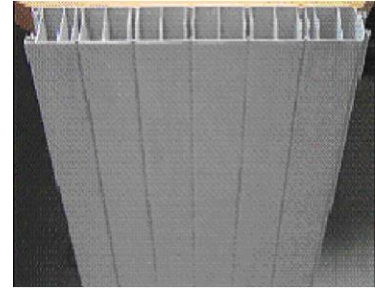


Figura 3.12 Integração de PCM macroencapsulado em painéis de PVC [21].

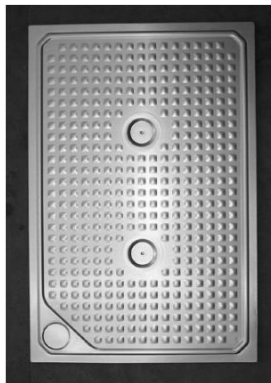


Figura 3.13 PCM macroencapsulado em placas de metal [74].



Figura 3.14 PCM macroencapsulado em placas de alumínio integradas em elementos de construção [75].

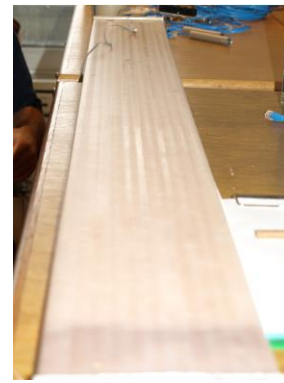


Figura 3.15 PCM macroencapsulado em ripas de policarbonato [24].



Figura 3.16 PCM macroencapsulado em ripas de alumínio [25].

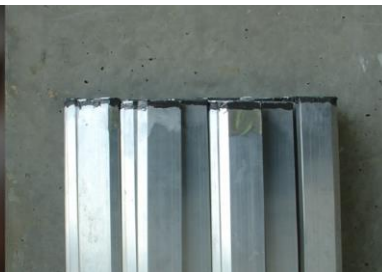


Figura 3.17 Bolsas de nylon contendo PCM [76].



Figura 3.18 Bolsas contendo PCM, também conhecidas como PCMTS [27], [29].



Figura 3.19 PCM macroencapsulado sob a forma de favos [77].



Figura 3.20 PCM macroencapsulado sob a forma de esferas [78].



Figura 3.21 PCM macroencapsulado em blocos translúcidos, TIM-PCM [23].



Figura 3.22 PCM macroencapsulado em cilindros de cobre aplicados na construção de paredes [79].

3.4.4.2.2 Vantagens

A variedade de soluções possíveis para o macroencapsulamento de PCM faz deste tipo de incorporação o mais versátil, podendo ser desenhado de acordo com a sua aplicação final. Além disso, é fácil de manusear e o seu processo de produção é bastante simples, constituindo uma solução mais económica que o microencapsulamento. O macroencapsulamento permite, ainda, o armazenamento de uma quantidade de PCM significativamente maior [35], [37], [39], [46].

No caso de serem usados metais como material do invólucro, é oferecida maior resistência mecânica e estabilidade estrutural à solução construtiva. No entanto, há que ter sempre em consideração a compatibilidade entre o PCM utilizado e o material do invólucro [35], [37].

3.4.4.2.3 Desvantagens

Comparativamente ao microencapsulamento, o macroencapsulamento apresenta menor área de superfície por unidade de volume, pelo que a transferência de calor é menos eficaz. Além disso, devido ao facto de o PCM não se encontrar restringido a um pequeno volume, podem surgir problemas como a mudança de fase não homogénea e a separação de fases. Nesses casos, a utilização de cápsulas muito volumosas pode tornar-se um problema [35], [37], [39].

Quando são utilizados invólucros ou recipientes de plástico para o macroencapsulamento, a condutividade térmica resultante é reduzida, inibindo a transferência de energia [37]. No entanto, existem técnicas capazes de aumentar essa mesma transferência.

3.5 Formas de aumentar a transferência de calor de e para os PCM

A grande maioria dos PCM apresenta baixa condutividade térmica ou outros problemas associados a fenómenos já mencionados, como a segregação de fase ou o subarrefecimento, prejudicando a transferência de calor [35]. Além disso, também o modo de incorporação do PCM na construção pode contribuir, no mesmo sentido, para a redução da sua eficácia. Assim, em algumas situações, torna-se importante considerar técnicas que permitam aumentar a transferência de calor de e para os PCM.

Existem diversos métodos para o efeito [35], [80]. A adição de agentes nucleantes tem por objetivo o aumento da taxa de nucleação, evitando a ocorrência do fenómeno de subarrefecimento. Já a seleção de configurações geométricas incorporando alhetas permite aumentar a área de contacto e, consequentemente, a taxa de transferência de calor. Por outro lado, existem diversas

formas de aumentar a transferência de calor através da incorporação de materiais com elevada condutividade térmica. Além da seleção de um material metálico para o invólucro do PCM, podem ser adicionadas partículas metálicas de diversas dimensões (de alumínio, cobre, níquel, aço inoxidável, entre outras), pós metálicos (como a grafite), ou estruturas metálicas, desde matrizes a espumas, adequadas apenas para invólucros de grandes dimensões. A adição de fibra de carbono é uma das técnicas mais eficazes por corresponder a um material de reduzida densidade, pelo que, ao contrário da grafite, não se deposita no fundo do invólucro ao longo dos ciclos térmicos. Além disso, não contribui, contrariamente à integração de estruturas metálicas ou à adição de alhetas, para um aumento significativo da massa do conjunto, o qual pode dificultar tanto o transporte como o manuseamento da macrocápsula.

O aumento da transferência de calor de e para os PCM é muito importante em alguns sistemas, como em termoacumuladores. No entanto, no que concerne aos edifícios, esta questão não assume especial relevância uma vez que as transferências de calor se dão de forma lenta [69].

4 Análise Energética de Edifícios

4.1 Introdução

A análise energética de edifícios é um processo importante na medida em que permite avaliar e comparar o comportamento térmico de edifícios, permitindo prever o seu comportamento quando lhe são aplicadas alterações que possam ser significativas na redução de consumos energéticos e na melhoria do conforto térmico dos ocupantes.

A análise energética pode ser realizada de forma estática, como é o caso das metodologias de cálculo apresentadas no Despacho 15793-I/2013 [81], ou dinâmica, que usa tipicamente *softwares* especializados para o cálculo das diversas variáveis em cada ponto, ao longo de uma semana, mês ou ano. Estes últimos permitem avaliar com grande detalhe o desempenho dos edifícios, sendo esse o principal aspeto que os leva a ser o foco deste trabalho. Em qualquer um dos casos, são tidos por base os mecanismos de transferência de calor que ocorrem nos edifícios, bem como o balanço energético [82].

4.2 Mecanismos de Transferência de Calor

Entre os principais modos de transferência de calor estão a condução, a convecção e a radiação [83]. De seguida faz-se uma breve descrição de cada um desses mecanismos.

4.2.1 Condução

A temperatura de um material relaciona-se com a energia cinética que as suas partículas (átomos ou moléculas) apresentam. Quando existe um gradiente de temperatura no material significa que existem moléculas com diferentes níveis de energia cinética. O movimento aleatório das mesmas origina interações (choques) que levam à transferência de energia cinética e, por isso, também térmica, entre elas, promovendo a transferência de calor por condução.

Ao nível macroscópico, este mecanismo é descrito pela Lei de Fourier, que estabelece o fluxo de calor por condução ao longo da direção perpendicular de uma parede plana e é quantificado como

$$q''_{cond,x} = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

A condutividade térmica, k , é uma propriedade do material e está relacionada com a maior ou menor interação entre as suas partículas elementares [83].

4.2.2 Convecção

A convecção abrange dois mecanismos de transferência de calor. A difusão assemelha-se à condução e ocorre devido ao movimento aleatório das partículas constituintes do material. Já a advecção corresponde à energia transferida através do movimento macroscópico do fluido, isto é, devido ao movimento de agregados de partículas numa corrente líquida ou gasosa. Na presença de um gradiente de temperatura, a combinação destes dois mecanismos promove a transferência de calor por convecção.

Um caso particular da convecção amplamente estudado e importante em grande parte dos sistemas corresponde a ter uma superfície estática e um escoamento de um fluido junto dessa mesma superfície a temperaturas diferentes. Neste caso, o fluido terá um gradiente de temperatura que varia desde a temperatura da superfície à temperatura da região do escoamento afastada da superfície, definida como a camada-limite térmica, cuja espessura varia ao longo da direção em que escoo o fluido.

A convecção pode ser forçada ou natural. Na primeira, o escoamento é originado por um meio externo, como um ventilador ou uma bomba. Já na segunda, a velocidade do escoamento é induzida por diferenças de densidades no fluido causadas por variações de temperatura.

O fluxo de calor transferido por convecção é quantificado através da Lei do Arrefecimento de Newton.

$$q''_{conv} = h_{conv} \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (2)$$

O coeficiente de transferência de calor por convecção, h_{conv} , depende fortemente das condições da camada-limite que, por sua vez, dependem da geometria da superfície, da natureza do escoamento e das propriedades termodinâmicas e cinéticas do fluido [83].

4.2.3 Radiação

A radiação térmica está associada à energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura absoluta não nula. A emissão de radiação deve-se a alterações nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas do material e é realizada através de ondas eletromagnéticas, não sendo necessário um meio material para a transferência de calor.

Para a contabilização deste modo de transferência de calor é considerado o poder emissivo, taxa à qual a energia térmica radiante é emitida por unidade de área, definido a partir da Lei de Stefan-Boltzmann, que para uma superfície real de emissividade ϵ estabelece que

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (3)$$

A taxa à qual a energia transferida por radiação é absorvida por unidade de área é definida pela equação (4), dependendo da irradiação, G , a que a superfície considerada está exposta.

$$G_{abs} = \alpha \cdot G \quad (4)$$

No caso particular em que se tem uma superfície pequena e uma superfície isotérmica muito maior que a envolve completamente, pode ser considerada a seguinte equação para o fluxo de energia térmica trocada por radiação entre duas superfícies [83].

$$q''_{rad} = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad (5)$$

4.3 Transferência de Calor em Edifícios

Nos edifícios ocorrem os três mecanismos de transferência de calor descritos. A exposição solar do edifício, permite que este tenha ganhos solares que decorrem, em grande parte, da radiação absorvida através da envolvente envidraçada, mas também pelo aumento da temperatura dos materiais que constituem a envolvente opaca. O processo de convecção é observado entre o ar exterior e a envolvente e entre esta e o ar interior. O processo de condução é também observado ao longo da espessura da envolvente.

Os sentidos dos fluxos de calor são definidos consoante a diferença de temperatura entre o ar exterior e o ar interior, e devem ser tidos em conta na análise energética do edifício. Além desses, são considerados ganhos internos, devido à taxa metabólica dos ocupantes e da energia térmica produzida por equipamentos, e os ganhos ou perdas devido à ventilação, isto é, devido às interações mássicas que ocorrem entre o edifício e o exterior.

A realização de balanços energéticos e mássicos, bem como as igualdades que definem condições-fronteira, é o que permite aos *softwares* de simulação calcular as condições de temperatura e humidade e, a partir destas, a quantificação do conforto térmico. A equação genérica do balanço energético utilizado para o cálculo da temperatura em cada ponto i assume a forma

$$\sum_{in} \dot{Q} - \sum_{out} \dot{Q} + \sum_{in} \dot{m} \cdot h - \sum_{out} \dot{m} \cdot h = m \cdot c_p \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (6)$$

Na avaliação do desempenho energético dos edifícios é, ainda, muito relevante uma outra propriedade, a inércia térmica.

4.3.1 Inércia térmica

A inércia térmica pode ser definida como a capacidade de armazenar e libertar energia térmica por parte dos materiais de construção do edifício [84]. De facto, durante o dia, parte da energia térmica transferida para o edifício é armazenada nos materiais que constituem a sua envolvente, impedindo o aumento drástico da sua temperatura. Já durante a noite, quando a temperatura diminui, a energia acumulada nos materiais de construção pode ser libertada para o interior, permitindo não só um atraso entre os picos de calor no exterior e no interior, mas também uma diminuição da amplitude térmica no interior. Este efeito tem benefícios ao nível do controlo da temperatura no interior e do conforto térmico, permitindo, ainda, uma redução dos consumos energéticos para climatizar o espaço [85].

Segundo o Despacho 15793-K/2013 [86], a inércia térmica, I_t , corresponde à massa superficial útil por metro quadrado de área de pavimento, quantificada a partir da equação

$$I_t = \frac{\sum_i M_{s_i} \cdot r \cdot S_i}{A_p} \quad (7)$$

Onde M_{s_i} refere-se à massa superficial útil do elemento i , dependente da sua localização no edifício e da sua constituição; r corresponde a um fator de redução da massa superficial útil, relacionado com a resistência térmica do revestimento superficial interior; S_i é a área da superfície interior do elemento i , e A_p a área interior útil do pavimento.

4.4 Softwares de simulação dinâmica de edifícios

Os *softwares* de simulação dinâmica de edifícios são cada vez mais utilizados, quer em investigação quer em projeto ou em auditoria energética, pois permitem avaliar o comportamento térmico de edifícios de forma bastante precisa e rápida. Estes *softwares* são particularmente importantes para o estudo do potencial de novas tecnologias, sendo possível retirar conclusões importantes a partir dos resultados obtidos, antes de as implementar.

Nos últimos 50 anos foram desenvolvidas muitas ferramentas de simulação dinâmica de edifícios [87], [88], sendo que as principais diferenças entre elas estão no modelo matemático usado para o cálculo de cada uma das variáveis mencionadas no subcapítulo anterior e no método de convergência dos resultados [82].

A decisão sobre o *software* a utilizar leva, normalmente, em linha de conta a precisão dos modelos usados, a flexibilidade na modelação, incluindo a possibilidade de acesso ao código-fonte, a extensão da biblioteca-padrão, a velocidade de execução e a facilidade na aprendizagem e no uso do *software*. Tendo em conta estes critérios, destacam-se entre as ferramentas atualmente disponíveis o IDA ICE, o TRNSYS e o *EnergyPlus* [82]. De seguida, apresenta-se uma pequena descrição de cada um destes *softwares*.

4.4.1 IDA ICE

O IDA ICE (*IDA Indoor Climate Energy*) é um *software* de simulação dinâmica de edifícios que permite modelar, simular e otimizar o comportamento térmico de edifícios com grande precisão. Foi desenvolvido na Suécia e lançado em 1998 pela *Simulation AB* [89]. É um *software* flexível, trabalhando com equações simbólicas que permitem ao utilizador ver e alterar o modo de como os diversos parâmetros são calculados, contendo, também, uma interface gráfica [82], [89].

Em 2015, a *EQUA Simulation AB* implementou no *software* a “*PCM Wall*”, que passou a permitir simular o comportamento dos PCM tendo em conta o fenómeno de histerese dos mesmos [82].

O IDA ICE não tem em consideração os efeitos da direccionalidade da radiação solar. No entanto, do ponto de vista prático, é o *software* que apresenta maior precisão aquando da inserção de PCM nas soluções construtivas, ainda que com um acréscimo no custo computacional [82].

4.4.2 EnergyPlus

O *EnergyPlus* é um *software* de cálculo desenvolvido e fundado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (U.S DOE – *Department of Energy*). É um programa de simulação térmica sistémico, direccionado apenas à simulação dinâmica de edifícios, e com uma estrutura modular. É amplamente usado por engenheiros, arquitetos e investigadores, para análise energética, cálculo de cargas térmicas e consumos de água [90].

Apesar de permitir grande flexibilidade por parte do utilizador no que se refere a métodos de cálculo, exige alguma familiarização com linhas de comando para a produção do ficheiro de entrada e leitura do ficheiro de saída [91]. Por isso, foram desenvolvidos alguns *softwares* que funcionam como interfaces gráficas do *EnergyPlus*, como é o caso do *DesignBuilder*. Este *software* tem uma interface mais intuitiva que outros programas de simulação, é amplamente utilizado por estudantes e, à semelhança do *EnergyPlus*, usado por engenheiros e arquitetos [92]. Não permite grande flexibilidade em termos de acesso e alteração das equações utilizadas no cálculo, mas permite a definição do método de cálculo pretendido [82].

Apenas a partir da versão 3 (2013), o *DesignBuilder* passou a incorporar a modelação do comportamento de mudança de fase dos PCM, tendo em consideração as suas curvas de calor específico em função da temperatura [92], [93]. Só na versão 6 (2019) o fenómeno de histerese passou a ser ponderado, sendo para isso necessária a inserção das duas curvas, de fusão e de solidificação, do PCM [92].

Uma das vantagens do *DesignBuilder* é o facto de ter integrada uma vasta biblioteca de dados, desde condições climáticas, materiais de construção e respetivas propriedades, a sistemas de climatização e estratégias de controlo [92].

4.4.3 TRNSYS

O TRNSYS é um *software* flexível e elementar, isto é, permite analisar sistema a sistema. Foi desenvolvido pelo *Solar Energy Laboratory* (Laboratório de Energia Solar) da Universidade de Wisconsin-Madison e é usado para simular o comportamento de sistemas transientes, não só em termos de desempenho de sistemas energéticos, mas também elétricos ou outros sistemas dinâmicos como o fluxo de tráfego e processos biológicos. Este *software* é caracterizado por subdividir problemas em subproblemas sucessivamente, contendo uma vasta biblioteca de componentes destinados a solucionar cada um deles. O TRNSYS permite a adição de novos componentes através de ficheiros escritos na linguagem Fortran, C+, C++ ou outras [82], [94].

O *TRNBuild* é uma interface mais gráfica, específica para a definição e simulação de edifícios [82], [94]. Quanto à modelação do comportamento de PCM, são apenas tidas em conta a temperatura de fusão e a entalpia específica de fusão, não sendo considerada uma gama de

temperaturas na qual ocorre a mudança de fase. Ao contrário do que acontece com os outros *softwares* supramencionados, não são modelados os fenómenos de subarrefecimento nem de histerese [82], [94].

O *software TRNSYS* é o que apresenta menor custo computacional e, tipicamente, maior precisão. No entanto, quando são integrados PCM na solução construtiva, os outros *softwares* tornam-se mais fiáveis na sua previsão, o que poderá dever-se ao facto de a modelação não ter em conta alguns fenómenos que ocorrem na prática [82].

5 Metodologia

Para a realização do objetivo proposto foi avaliado o comportamento térmico de um edifício de construção 'leve' com *BioPCM* macroencapsulado em bolsas embaladas num filme polimérico não inflamável, sendo este incorporado nas suas fachadas. A análise foi elaborada através de simulações efetuadas usando a versão 6.1.7.007 do *DesignBuilder*, tendo sido escolhido este *software* pela disponibilidade da versão estudante e por ter uma interface intuitiva. Uma vez que o fenómeno de histerese, ou subarrefecimento, dos *BioPCM* não é crítico, e de modo a reduzir o custo computacional associado às simulações efetuadas, foi considerado o método de modelação dos PCM básico, isto é, considerando apenas as curvas de fusão dos PCM e tomando as curvas de solidificação como idênticas.

Primeiramente, para cada localização e orientação do edifício, incorporou-se *BioPCM* com duas temperaturas de fusão distintas em cada uma das fachadas individualmente, estudando, ainda, a melhor localização dentro da solução construtiva e o contributo da ventilação noturna durante o verão.

Numa segunda fase, selecionaram-se as melhores configurações para cada orientação e localização, introduzindo-se o PCM com melhor desempenho nas duas fachadas, obtendo a relação entre a inserção individual e combinada do mesmo.

Para comparação entre as diversas soluções estudadas definiu-se um critério capaz de quantificar a inércia térmica do edifício. O cálculo desta propriedade segundo o Despacho 15793-K/2013 [86] não leva em consideração a capacidade de armazenamento de cada material, estando dependente apenas da massa da solução construtiva. Assim, para quantificar o aumento da inércia térmica, selecionou-se um critério associado aos seus efeitos. De facto, os efeitos da inércia térmica fazem-se sentir nas curvas de temperatura, tendo efeito no conforto térmico. Considerando uma gama de temperaturas de conforto é possível definir o diferencial que a temperatura no interior do edifício tem relativamente a essa gama. Multiplicando essa diferença de temperatura pelo tempo em que esta se verifica é possível quantificar tanto a duração como a intensidade do desconforto térmico. Assim, o critério de comparação corresponde ao número de °C.hora a mais ou a menos relativamente à gama de temperaturas de conforto.

Neste capítulo é estabelecido o cálculo do critério referido segundo a Norma prEN 15251:2006:E [95] e caracterizado o edifício estudado.

5.1 Critério de comparação

A Norma prEN 15251:2006:E [95] define o número de °C.hora de desconforto através da comparação da curva de temperaturas operativas⁵ no interior do edifício com uma gama de temperaturas considerada confortável, definida de acordo com o tipo de edifício e as temperaturas médias exteriores diárias, através de uma variável denominada temperatura média exterior exponencialmente ponderada.

5.1.1 Número de °C.hora de desconforto

O número de °C.hora corresponde ao tempo durante o qual a temperatura operativa excede a gama de temperaturas de conforto ponderado por um fator dependente dessa diferença de temperaturas. Esse fator é definido, para cada ponto avaliado, de acordo com a seguinte igualdade.

⁵ A temperatura operativa corresponde à média entre a temperatura nominal (temperatura de bolbo seco) no interior do edifício com a temperatura radiante, também importante no conforto térmico e determinada tendo em consideração a radiação solar. Para o edifício considerado, a temperatura nominal é bastante próxima da temperatura operativa, pelo que é razoável considerá-la neste estudo.

$$wf = \begin{cases} 0, & \theta_{o,min} \leq \theta_o \leq \theta_{o,max} \\ \theta_{o,min} - \theta_o, & \theta_o < \theta_{o,min} \\ \theta_o - \theta_{o,max}, & \theta_o > \theta_{o,max} \end{cases} \quad (8)$$

Considerando um período de tempo, o número de °C.hora pode ser calculado como

$$^{\circ}\text{C.hora} = \sum_i wf_i \cdot \Delta t \quad (9)$$

No presente caso, foram realizadas simulações anuais, sendo avaliados os resultados horários para a temperatura operativa, sendo o intervalo de tempo, Δt , considerado correspondente a uma hora.

5.1.2 Gama de temperaturas de conforto

As temperaturas de conforto foram calculadas tendo por base a norma referida [95]. Esta norma tem em consideração 4 categorias de edifícios, definidas de acordo com o nível de expectativa do ocupante.

- A categoria I é utilizada para edifícios com um nível de expectativa bastante elevado. É particularmente recomendada quando os ocupantes são pessoas mais sensíveis e vulneráveis, como idosos, crianças pequenas ou pessoas doentes;
- A categoria II corresponde a um nível de expectativa normal, sendo utilizada para novos edifícios e renovações;
- A categoria III deve ser usada para edifícios já existentes com um nível de expectativa moderado;
- Já a categoria IV é recomendada apenas em edifícios que não correspondem a nenhuma das categorias anteriores, e deve ser utilizada apenas para uma parte restrita do ano.

Para a definição da gama de temperaturas foi considerada a categoria II, por se adequar às características do edifício - edifício em regime de funcionamento livre (não climatizado) -, sendo estas calculadas a partir da temperatura média exterior exponencialmente ponderada, tal como descrevem as igualdades (10) e (11).

$$\theta_{o,max} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 + 3 \quad (10)$$

$$\theta_{o,min} = 0,33 \cdot \theta_{rm} + 18,8 - 3 \quad (11)$$

5.1.3 Temperatura média exterior exponencialmente ponderada

A temperatura média exterior exponencialmente ponderada corresponde, no fundo, a uma média móvel e pode ser obtida pela expressão (12), onde θ_{ed-i} corresponde à temperatura média exterior i dias antes do dia em que estão a ser calculadas as temperaturas de conforto, α corresponde a uma constante que varia entre 0 e 1, cujo valor recomendado é de 0,8, e N corresponde ao número de dias considerados no cálculo.

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \sum_{i=1}^N \alpha^{i-1} \cdot \theta_{ed-i} \quad (12)$$

$$\theta_{rm} = (1 - \alpha) \cdot \{ \theta_{ed-1} + \alpha \cdot \theta_{ed-2} + \alpha^2 \cdot \theta_{ed-3} + \dots \}$$

Para o cálculo das temperaturas médias exteriores exponencialmente ponderadas para cada localização foram tidos em conta os 28 dias anteriores ao dia em questão, tendo por base os dados climáticos de 2002 existentes na biblioteca do *DesignBuilder*.

5.2 Caracterização do edifício

Existe uma grande quantidade de variáveis que influenciam o comportamento térmico de um edifício, e os próprios processos de carregamento e descarregamento dos PCM. Sendo impossível fazer uma avaliação tendo em conta todos os parâmetros, fixaram-se alguns deles, limitando o número de variáveis.

5.2.1 Localização geográfica

As características climáticas, tais como as temperaturas exteriores e a exposição solar, do local são bastante importantes no comportamento térmico do edifício. Assim, tendo por base a classificação de *Koppen*, selecionaram-se três localizações que representam a diversidade de condições climáticas em Portugal.

Koppen divide o país em duas zonas, *Csa*, com um clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e quente, e *Csb*, com um clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e pouco quente [96].

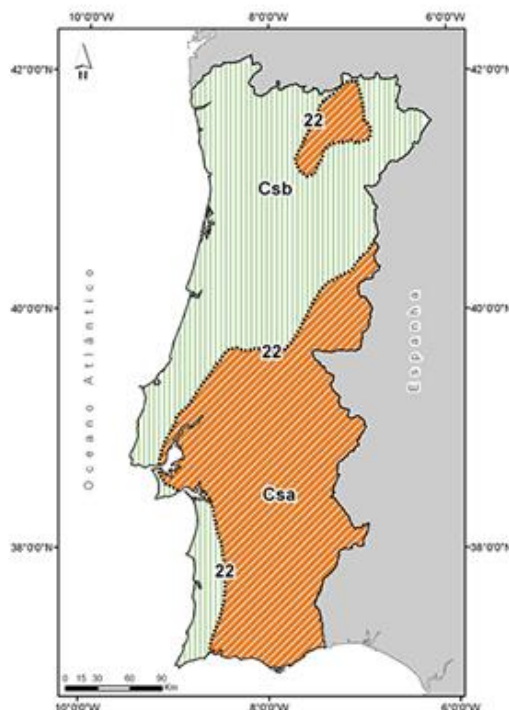


Figura 5.1 Divisão do país segundo a classificação de Köppen [96].

A Figura 5.1 representa esta divisão, percebendo-se claramente que o distrito do Porto pertence à região *Csb* e o distrito de Évora à região *Csa*. Além destas duas, foi selecionado o distrito de Lisboa por abranger as duas regiões climáticas e por se tratar, à semelhança da cidade do Porto, de uma das zonas com maior densidade populacional do país [97]. Efetivamente, a utilização de construções ‘leves’ justifica-se mais em aglomerados densos, onde as habitações têm um custo por metro quadrado mais elevado, quer para venda, quer para arrendamento [98].

As características das localizações selecionadas encontram-se descritas na Tabela 5.1. Os dados climáticos utilizados em cada uma das cidades apresentam-se no Anexo I.

Tabela 5.1 Características e classificação das localizações selecionadas para o estudo.

Localização	Lisboa	Porto	Évora	
Coordenadas	Latitude	38°43'12"N	41°13'48"N	38°34'12"N
	Longitude	9°09'00"O	8°40'48"O	7°54'0"
	Altitude [m]	95,0	77,0	321,0
Classificação <i>Koppen</i>	Csa	Csb	Csa	
Classificação segundo o Despacho 15793-F/2013 [99]	I1/V3	I1/V2	I1/V3	

5.2.2 Geometria

A geometria do módulo da construção a estudar foi definida tendo em vista o estudo da influência de cada fachada, em particular, no comportamento térmico do edifício. Assim, o módulo, de área útil 4,5 m x 4,5 m e pé direito de 3,5 m (medidas internas), tem todas as paredes laterais com igual área. Também a cobertura e o pavimento têm iguais áreas.

A geometria encontra-se representada na Figura 5.2.

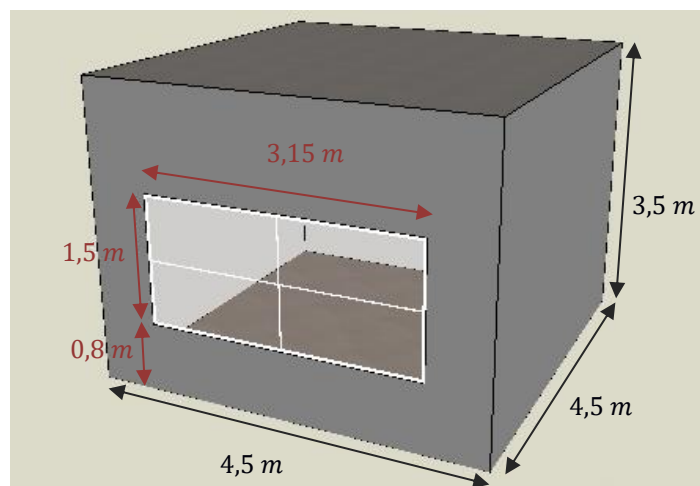


Figura 5.2 Representação e dimensionamento do módulo.

A janela foi posicionada a 0,80 m do solo, e tem 1,5 m de altura e 3,15 m de largura, correspondendo as suas dimensões a 30% da área da parede onde está inserida.

5.2.3 Orientação Solar

Os ganhos solares são diferentes consoante a orientação da fachada com envidraçado. Embora empiricamente se saiba que a orientação a Sul seja a que maximiza os ganhos solares, promovendo o carregamento do PCM, tiveram-se sempre em consideração as quatro situações possíveis (envidraçado orientado a Norte, a Este, a Sul e a Oeste), pois em certas localizações poderá não ser possível optar por essa solução.

Também a fachada ou fachadas com PCM inserido influenciarão os ganhos solares através dela/delas, sendo que foram tidas em conta as fachadas Norte, Este, Sul e Oeste, bem como a cobertura e o pavimento, avaliando-se independente e combinadamente o seu contributo para o conforto térmico do edifício.

5.2.4 Ganhos Internos

Os ganhos internos não correspondem ao fator com maior influência no desempenho térmico de um edifício do tipo residencial. No entanto, esses ganhos são contabilizados no edifício considerado neste trabalho, tendo sido definidos de acordo com o documento de padronização da CIBSE (*Chartered Institution of Building Services Engineers*). Este documento define uma metodologia de avaliação do sobreaquecimento em edifícios residenciais, definindo perfis de ocupação para o efeito. Esses perfis foram definidos forçando a ocupação dos espaços comuns – sala de estar e cozinha –, nas horas de maior calor – ao meio-dia e ao início da tarde –, e durante a noite apenas nos quartos, já que a metodologia do CIBSE apenas avalia o conforto térmico durante as horas de ocupação.

5.2.4.1 Ocupação e Taxa Metabólica

No que se refere aos ganhos internos devido à ocupação, estes são bastante mais significativos durante o dia, quando a taxa metabólica dos ocupantes é mais elevada. Nesse sentido, para o módulo em causa, considerou-se razoável assumir um perfil de ocupação por duas pessoas das 9h às 22 h, não sendo contabilizados ganhos internos no restante horário, dado a taxa metabólica no período noturno ser, previsivelmente, bastante menor.

A taxa metabólica considerada corresponde a 130 W por pessoa.

5.2.4.2 Iluminação

A iluminação é ligada entre as 18 h e as 23 h, com uma iluminância de 100 lux. A densidade de potência corresponde a 2,5 W/m².

5.2.4.3 Equipamentos

Os equipamentos correspondem a uma potência dissipada máxima de 450 W que atua das 18 h às 20 h. A potência dissipada nas restantes horas do dia encontra-se definida através do gráfico da Figura 5.3.

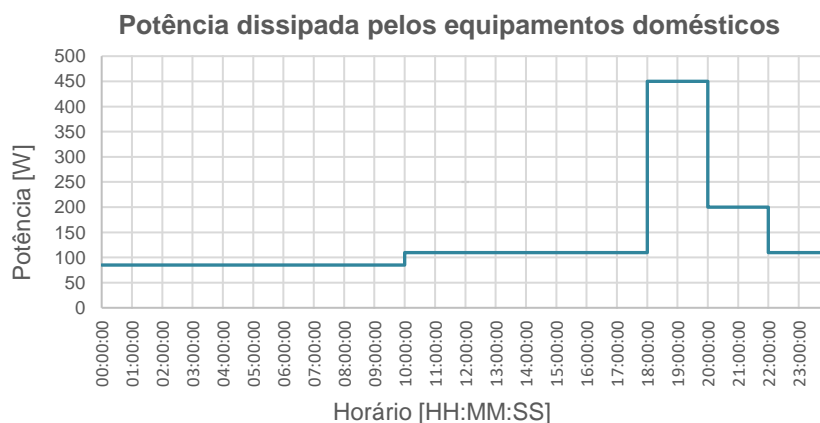


Figura 5.3 Evolução diária da potência dissipada por equipamentos domésticos.

5.2.5 Sistema de AVAC

Não foi introduzido qualquer sistema de aquecimento ou arrefecimento, com o objetivo de avaliar o efeito isolado dos PCM no controlo da temperatura interior e, inerentemente, na inércia térmica do edifício. No entanto, teve-se em consideração a análise do edifício quando lhe é introduzida ventilação noturna no verão.

5.2.5.1 Estratégias de ventilação

Foi simulado o comportamento térmico do módulo quando não existe qualquer tipo de estratégia de ventilação, além da entrada de ar por infiltrações, e quando lhe é introduzida ventilação noturna durante o verão, por ser esta a estação onde será mais provável o sobreaquecimento durante o dia.

As infiltrações foram definidas como sendo de 0,3 renovações por hora, valor padrão para este parâmetro no *DesignBuilder*.

O PCM é efetivo quando se dão as excitações térmicas necessárias para a sua carga e descarga completas durante os períodos diurno e noturno, respetivamente. Assim, para promover a solidificação do PCM durante a estação de arrefecimento, analisou-se também o efeito da ventilação natural noturna durante este período, aproveitando as temperaturas mais baixas no exterior e possibilitando o seu recarregamento no dia seguinte.

Para as simulações em que se introduziu ventilação noturna ativou-se a mesma apenas para os meses de verão, de junho a setembro, e apenas entre as 22 h e as 8 h, sendo que esta é desativada sempre que é atingida no interior uma temperatura inferior em 3 °C à temperatura de fusão do PCM considerado, garantindo, assim, a sua descarga. O número de renovações por hora foi definido como 8 RPH, sendo este o valor máximo aceitável definido através de simulações realizadas em *CFD (Computational Fluid Dynamics)*, cujos resultados e respetivas conclusões se apresentam no Apêndice A.

As simulações realizadas para o módulo sem PCM não incluem ventilação noturna no verão.

5.2.6 Soluções construtivas

Dado que são muitos os parâmetros que definem o edifício, alguns tiveram de ser fixados, como o tipo de construção, sendo apenas o PCM, a sua espessura e a sua localização as únicas variáveis inerentes às soluções construtivas.

5.2.6.1 Envolvente opaca

A envolvente opaca é constituída pelas paredes verticais, cobertura (envolvente em contacto com o exterior) e pavimento (envolvente em contacto com o solo), sendo as suas soluções construtivas definidas selecionando constituições de referência para construções 'leves' já existentes no *software*.

5.2.6.1.1 Paredes verticais

As paredes verticais têm por base a seguinte solução construtiva, descrita de fora para dentro.

- 6 mm revestimento metálico leve;
- 89,70 mm XPS (Poliestireno extrudido);
- 13 mm gesso cartonado.

Para as paredes em que foi incorporado PCM, este foi colocado junto à face interna e externa da camada de isolamento, conforme mostram as imagens b) e c) da Figura 5.4.

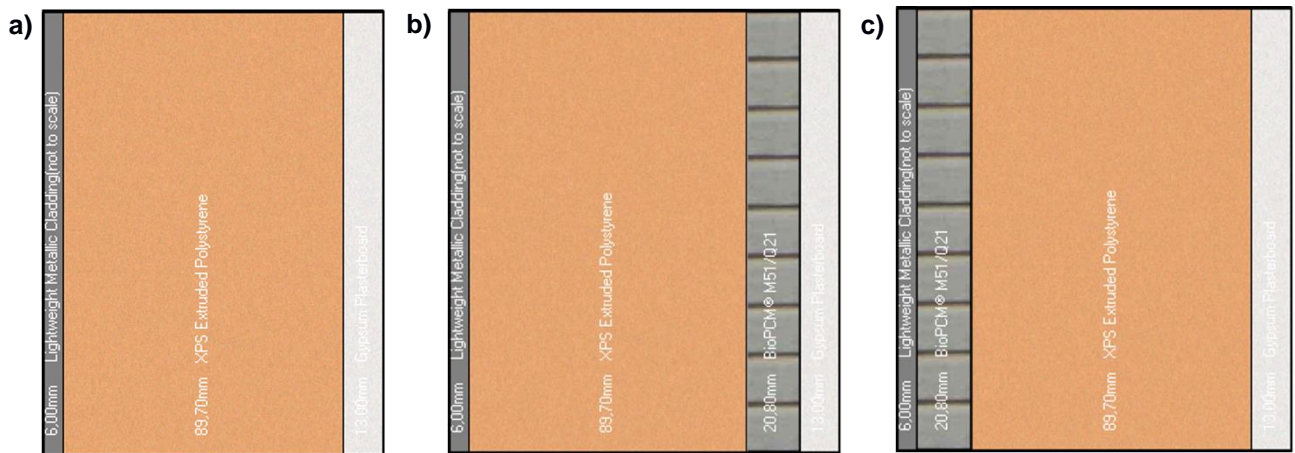


Figura 5.4 Configurações das paredes verticais a) base ($U=0,369 W/(m^2.K)$), e com PCM inserido b) junto à superfície interna da camada de isolamento, c) junto à superfície externa da camada de isolamento.

5.2.6.1.2 Cobertura

A cobertura é, à partida, constituída por 3 camadas, a seguir enumeradas de fora para dentro, às quais pode ser adicionada uma camada de PCM junto às faces interna ou externa do isolamento.

- 19 mm asfalto;
- 13 mm painel de fibra de madeira;
- 122 mm XPS (Poliestireno extrudido).

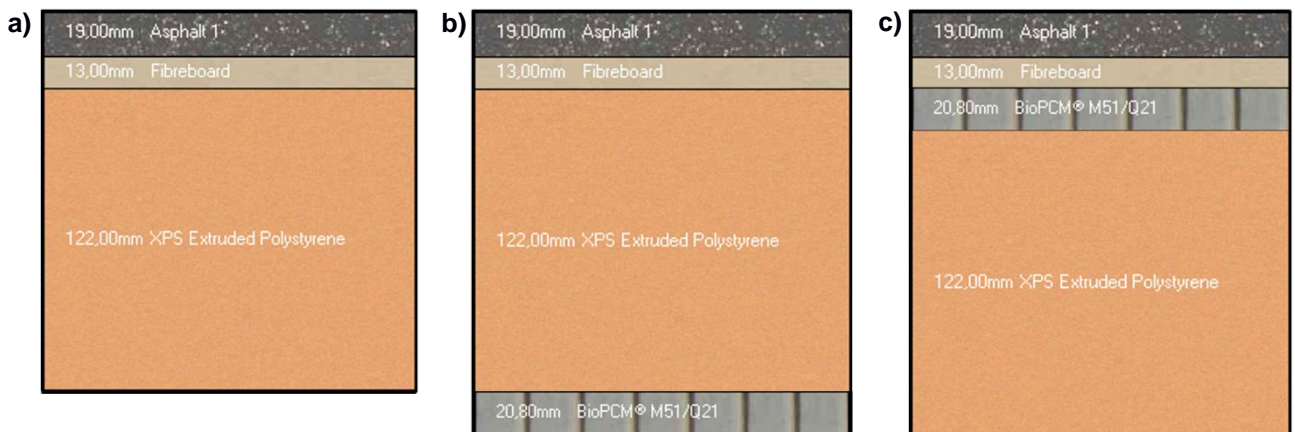


Figura 5.5 Configurações da cobertura a) base ($U=0,261 W/(m^2.K)$), e com PCM inserido b) junto à superfície interna da camada de isolamento, c) junto à superfície externa da camada de isolamento.

5.2.6.1.3 Pavimento

Já o pavimento é, à partida, constituído por 4 camadas dispostas de dentro para fora da seguinte forma.

- 30 mm soalho de madeira;
- 70 mm betonilha de regularização;
- 100 mm painel de betão;
- 100 mm espuma de ureia-formaldeído.

A camada de PCM foi colocada entre as camadas de betonilha e betão, e junto à superfície externa da camada de isolamento, conforme ilustrado nas imagens b) e c) da Figura 5.6.

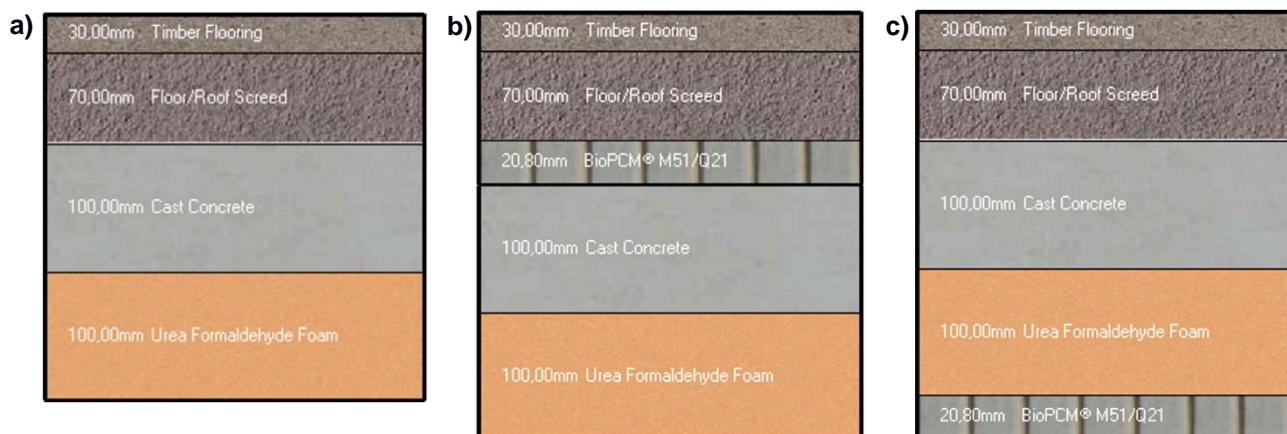


Figura 5.6 Configurações do pavimento a) base ($U=0,336 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$); b) com PCM inserido junto à superfície interna da camada de betão; c) junto à superfície externa da camada de isolamento.

5.2.6.2 Envolvente envidraçada

O módulo possui apenas uma janela, sendo esta constituída por vidro duplo incolor com caixilharia em madeira ($U=3,094 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$).

5.2.6.2.1 Proteções solares

Devido à importância do controlo dos ganhos solares referida em estudos anteriores, introduziram-se no modelo persianas interiores convencionais com refletividade média. Estas proteções podem ser ativadas apenas entre as 8 h e as 22 h, sempre que a temperatura no interior do edifício exceda os 25 °C.

5.2.7 PCM Macroencapsulados utilizados

Foram selecionados para este estudo os *BioPCM*, não só por as suas propriedades já constarem na biblioteca padrão do *DesignBuilder* mas também pelas vantagens que apresentam relativamente a outros PCM comercializados, como já referido.

Os *BioPCM* são comercializados pela *Phase Change Solutions*, e o seu invólucro (idêntico aos PCMTS) constituído por bolsas onde são armazenados os PCM, encontra-se ilustrado na Figura 5.7. Para o mesmo PCM existem invólucros com espessuras diferentes, tendo sido considerados os que se encontram caracterizados na Tabela 5.2.



Figura 5.7 *BioPCM* macroencapsulado comercializado pela *Phase Change Solutions* [48].

Tabela 5.2 Propriedades dos PCM utilizados.

PCM	Designação comercial do PCM ⁶	Espessura ⁷ [m]	Temperatura de fusão [°C]	Entalpia específica de fusão [kJ/kg]	Condutividade térmica ⁷ $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$	Calor específico ⁷ $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	Massa volúmica ⁷ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Q21	M51 Q21	0,0208	21	210 – 250	0,2000	1970,00	235,00
	M91 Q21	0,0371					
	M182 Q21	0,0742					
Q25	M51 Q21	0,0208	25	210 – 250	0,2000	1970,00	235,00
	M91 Q21	0,0371					
	M182 Q21	0,0742					

As curvas de fusão/solidificação dos PCM considerados apresentam-se no Anexo III.

Estes PCM foram selecionados por se esperar terem uma melhor efetividade, já que apresentam uma temperatura de fusão próxima das temperaturas desejáveis no interior do edifício nas estações de aquecimento (21°C) e arrefecimento (25°C).

5.2.8 Variáveis estudadas

De acordo com o referido anteriormente, têm-se como variáveis neste estudo os seguintes parâmetros:

- Orientação do edifício: fachada com janela voltada a Norte, Este, Sul e Oeste;
- Localização da camada de PCM relativamente à camada de isolamento: junto à face interna ou externa da camada de isolamento;
- Localização do PCM quanto à orientação da fachada em que está integrado: fachadas Norte, Este, Sul e Oeste, cobertura e/ou pavimento;

Fez-se, ainda, variar a temperatura de fusão e a quantidade de PCM e estudou-se a introdução de uma estratégia de ventilação noturna durante a estação de arrefecimento.

⁶ Os PCM são comercialmente designados como Mx Qy, sendo x referente à capacidade térmica do PCM por unidade de área em BTU/ft², e y à temperatura de mudança de fase do PCM em °C. Os PCM Mx Q21 correspondem sempre ao PCM com uma temperatura de mudança de fase de 21°C, no entanto, com diferentes massas.

⁷ Propriedades usadas nas simulações e já definidas no *software* de simulação *DesignBuilder*.

6 Resultados e Discussão

Como descrito no Capítulo 5, a análise foi dividida em duas partes. Na primeira, fez-se um estudo do efeito do PCM no comportamento térmico do módulo quando aplicado individualmente em cada fachada, cobertura ou pavimento. Posteriormente, retiraram-se de análise algumas configurações, por não se terem mostrado eficazes, e estudou-se o efeito combinado da aplicação do PCM em duas fachadas. Assim, este capítulo encontra-se dividido em dois tópicos referentes a cada uma dessas partes. Para simplificação da leitura dos dados, cada um destes tópicos encontra-se subdividido, apresentando as principais conclusões relativamente a cada variável estudada.

6.1 Efeito individual (1 fachada)

6.1.1 Quantidade de PCM

Na Figura 6.1⁸ é possível observar os resultados gerais obtidos para a configuração em que se insere o PCM junto da superfície interna da camada de isolamento em cada uma das fachadas e para cada uma das orientações. A cor verde indica a configuração sem qualquer PCM inserido, enquanto que as colunas azuis e laranja indicam o uso dos PCM Q21 e Q25, respetivamente. Quanto mais escura a coluna, maior a quantidade de PCM.

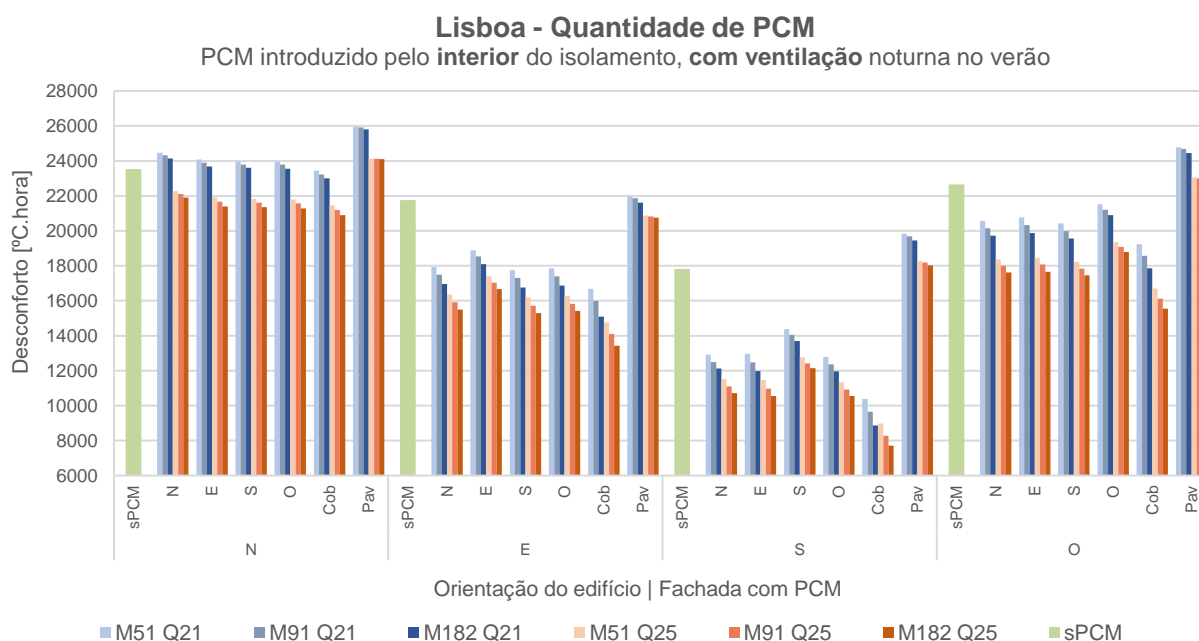


Figura 6.1 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para Lisboa.

Verifica-se que, para esta configuração, localização, e para qualquer uma das orientações do edifício, quer para o PCM Q21 quer para o PCM Q25, o desconforto diminui quando é aumentada a sua quantidade. De facto, uma maior quantidade de PCM permite armazenar uma quantidade maior de energia térmica, sendo maior a quantidade de energia libertada quando a temperatura exterior diminui. Tal leva a uma menor amplitude térmica no interior do edifício e, conseqüentemente, a uma melhoria no conforto térmico.

⁸ Na Figura 6.1 e nas figuras apresentadas em apêndice, o eixo horizontal refere-se à orientação do edifício e às fachadas em que é inserido o PCM, identificadas pelas suas iniciais. Exemplificando, N corresponde à incorporação de PCM na fachada Norte. Já Cob refere-se à incorporação de PCM na cobertura.

A título de exemplo, e para verificação deste comportamento, apresenta-se a seguir a comparação entre a evolução das temperaturas no interior do edifício orientado a Sul para a configuração em questão, sem PCM e com duas quantidades de PCM distintas inseridas na cobertura.

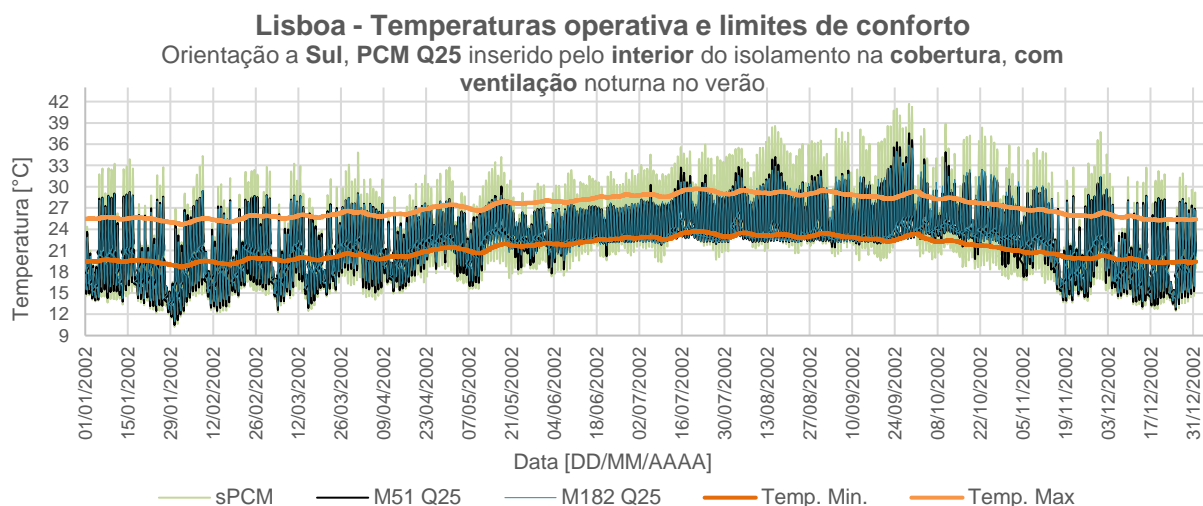


Figura 6.2 Comparação entre a gama de temperaturas de conforto e a evolução das temperaturas ao longo de um ano para o módulo orientado a Sul com diferentes quantidades de PCM Q25.

Tal como referido, a incorporação de PCM faz diminuir a amplitude térmica levando a que os picos de temperatura se aproximem da gama de temperaturas de conforto, sendo esse efeito mais significativo quando se aumenta a quantidade de PCM.

A partir da Figura 6.1, é, ainda, possível perceber que nem sempre a incorporação de PCM é benéfica, levando, em alguns casos, a um maior número de °C.hora de desconforto, como é o caso da inserção de PCM Q21 nas fachadas do módulo orientado a Norte com ventilação noturna no verão para Lisboa.

As restantes configurações e localizações, cujos resultados são apresentados no Apêndice C, mostraram tendências semelhantes quanto à quantidade de PCM inserido na fachada, pelo que, para simplificação da leitura de resultados a seguir descritos, se apresentarão apenas os resultados obtidos para a inserção do *BioPCM* com maior espessura, designado comercialmente como M182.

6.1.2 Orientação Solar

Ainda através da Figura 6.1, e à semelhança das figuras apresentadas no Apêndice C, pode-se, desde já, verificar qual a orientação solar que conduz aos melhores resultados. Efetivamente, quando orientado a Sul, o edifício consegue ter uma maior exposição solar, sendo mais eficaz a excitação térmica necessária para o carregamento dos PCM. Esta, além de ser a orientação com um número de °C.hora de desconforto mais reduzido, é também a que conduz a uma redução maior deste parâmetro quando são incorporados os PCM. Apesar disso, as quatro orientações solares são consideradas no sentido de retirar conclusões que abranjam habitações que não possam ser construídas segundo essa orientação.

6.1.3 Localização do PCM na construção

Na Figura 6.3 apresenta-se a comparação entre o efeito no número de °C.hora de desconforto quando o PCM é aplicado junto à superfície externa (colunas cinzentas) e à superfície interna (colunas azuis) da camada de isolamento, tendo sempre como referência o caso-base, sem PCM (a verde).

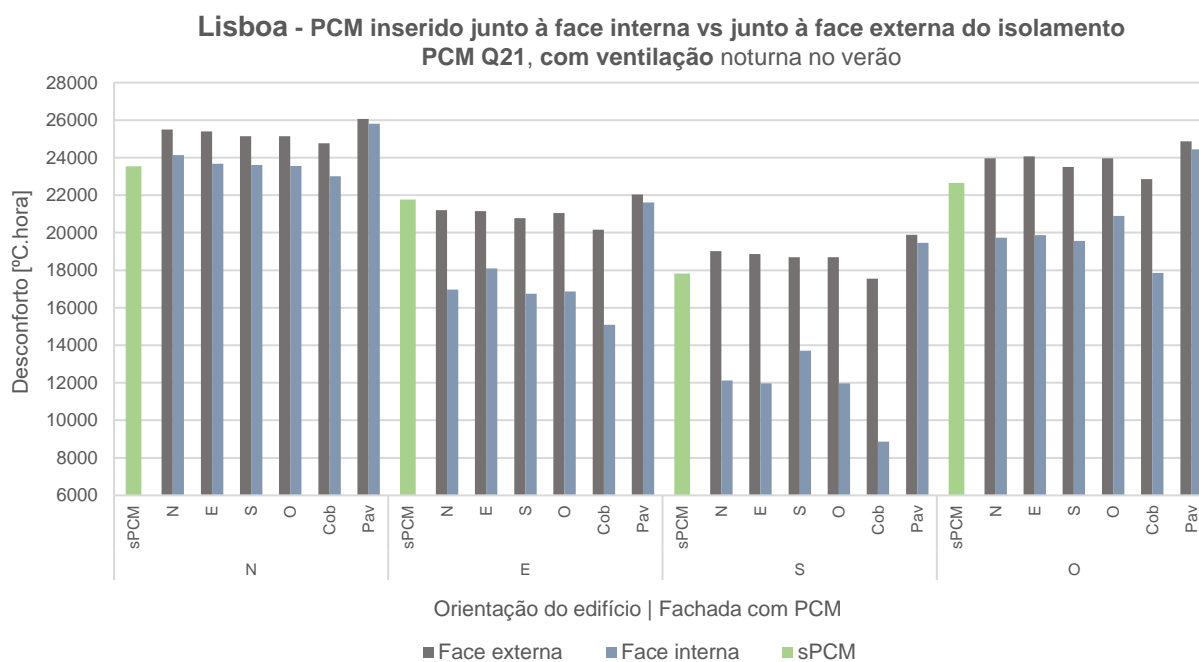


Figura 6.3 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado em Lisboa.

O PCM mostra ser mais eficaz quando aplicado junto à superfície interna do isolamento. Pelo contrário, a aplicação de PCM junto à face externa do isolamento mostra-se, muitas vezes, inconveniente, levando a um número de °C.hora de desconforto mais elevado que o módulo sem PCM. Este comportamento é coerente com as conclusões retiradas por outros autores, através de outros critérios de comparação e para outras localizações, e pode dever-se ao facto de, quando colocado junto à face externa do isolamento, o PCM evoluir para o estado líquido mais rapidamente durante o dia, uma vez que há menor resistência térmica condutiva do exterior até este, e, pelo mesmo motivo, solidificar mais rapidamente durante a noite, dando-se a transferência de calor entre o PCM e o exterior e não entre o interior e o PCM.

Os resultados das restantes configurações e localizações encontram-se resumidos no Apêndice D, tendo-se revelado coerentes com os aqui apresentados. Os resultados seguintes referem-se, por isso, apenas à aplicação de PCM junto da superfície interna da camada de isolamento.

6.1.4 Fachadas com PCM

A Figura 6.4 permite comparar as configurações com aplicação dos PCM Q21 e Q25 em cada fachada, com ou sem ventilação noturna no verão.

É possível verificar que, para cada orientação, há uma das fachadas com PCM que se destaca, sendo essa fachada, para os 4 casos, a cobertura. Existem duas razões que podem explicar esta observação. No módulo estudado, são a cobertura e o pavimento que têm maior área e, portanto, correspondem aos elementos capazes de albergar maior quantidade de PCM. Por outro lado, é a cobertura que tem maior tempo de exposição solar, mesmo que a radiação não incida sempre de forma direta. O maior tempo de exposição permite que maior quantidade de energia térmica radiante possa ser absorvida, levando a que o efeito na redução do número de °C.hora de desconforto seja mais expressivo.

Ao contrário da cobertura, a aplicação de PCM no pavimento mostra-se muito pouco eficaz, prejudicando o conforto, em termos de °C.hora de desconforto, relativamente ao caso-base, na maior parte dos casos. Tal pode dever-se ao facto de, nas soluções construtivas estudadas para o

pavimento, o PCM nunca ser colocado junto à face mais interna possível, isto é, exatamente abaixo da camada de soalho de madeira. Como a transferência de calor relevante para a mudança de fase do PCM se dá do interior do edifício para o PCM e deste para o interior do edifício, a interposição das camadas (de betonilha de regularização, num caso, ou de betonilha de regularização, de betão e de espuma de ureia-formaldeído, no outro caso) entre o interior do edifício e o PCM inibe essa transferência de calor, e, por isso, não se dão as excitações térmicas necessárias ao carregamento (durante o dia) e descarga (durante a noite) do PCM, contrariamente ao que acontece com a cobertura.

O mesmo se verifica para as restantes localizações analisadas: Porto (Figura 6.5) e Évora (Figura 6.6).

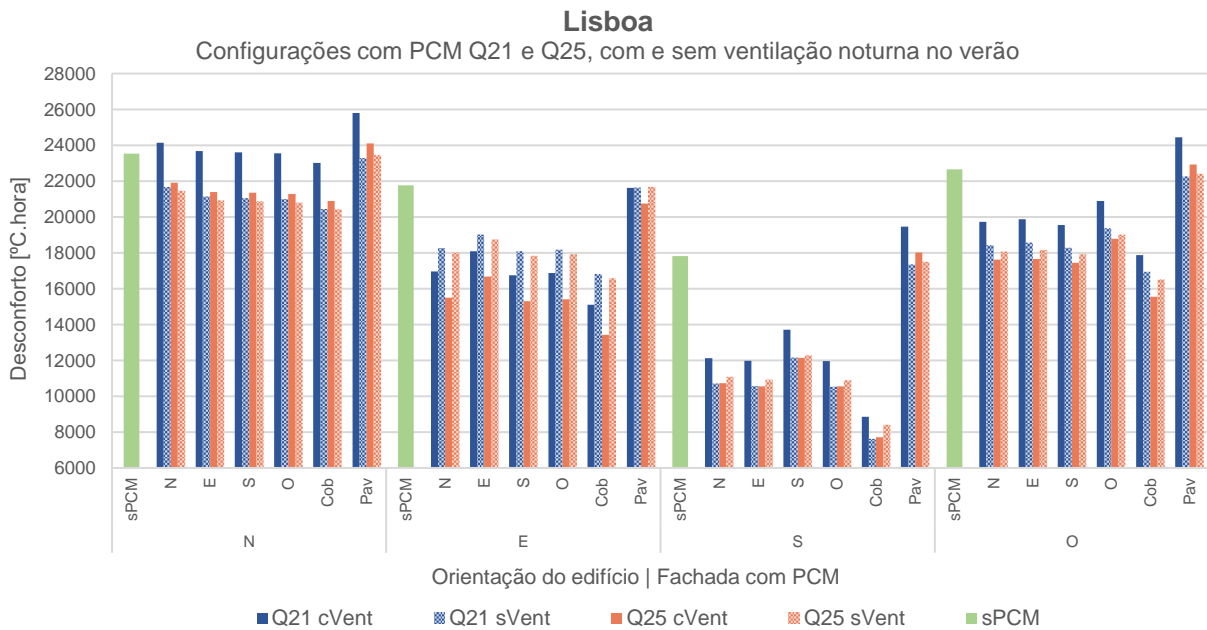


Figura 6.4 Resultados para as configurações com PCM Q21 e Q25 inseridos pelo interior do isolamento em cada fachada do módulo localizado em Lisboa.

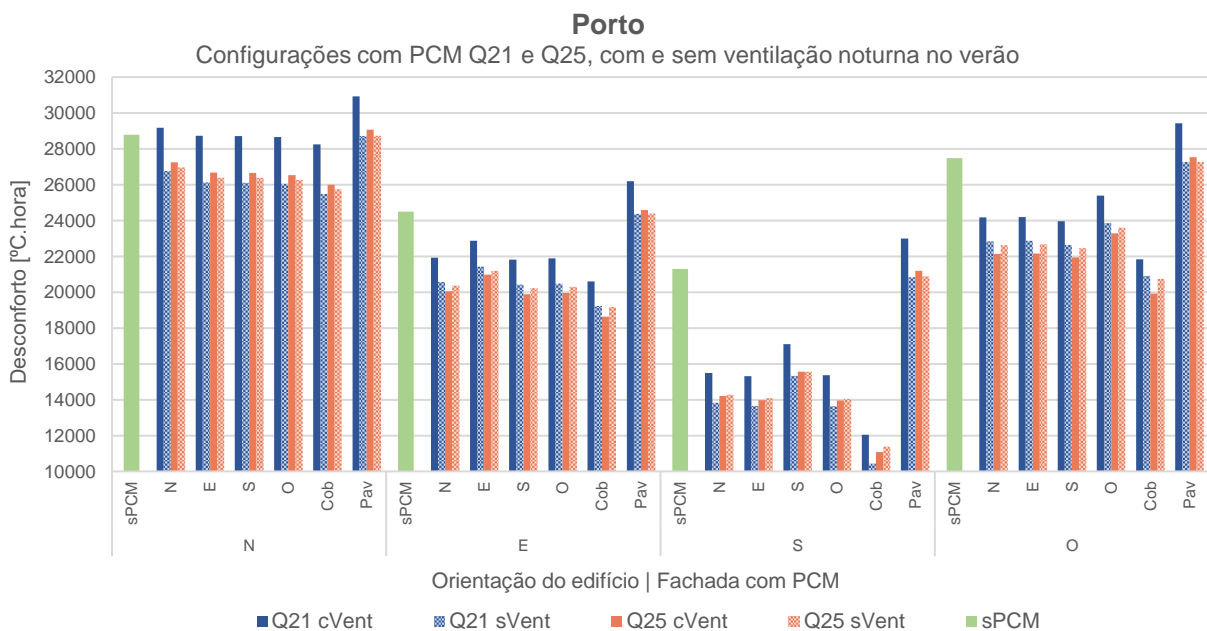


Figura 6.5 Resultados para as configurações com PCM Q21 e Q25 inseridos pelo interior do isolamento em cada fachada do módulo localizado no Porto.

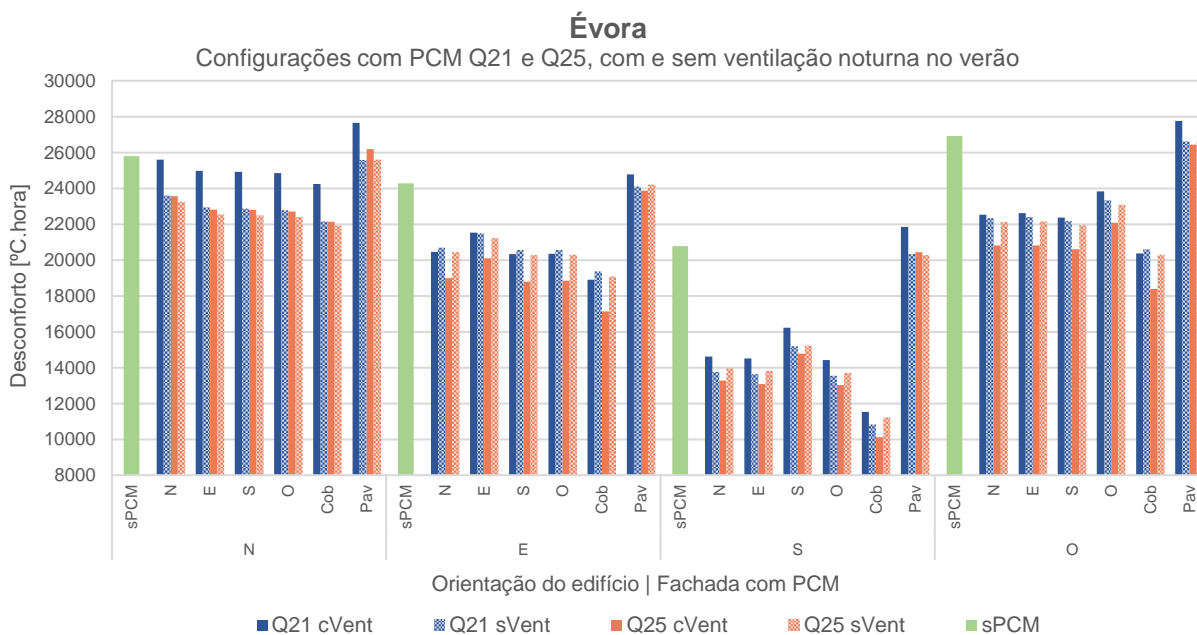


Figura 6.6 Resultados para as configurações com PCM Q21 e Q25 inseridos pelo interior do isolamento em cada fachada do módulo localizado em Évora.

6.1.5 Estratégia de ventilação

Para Lisboa (Figura 6.4), a ventilação noturna no verão apresenta-se favorável quando o módulo está orientado a Este, não sendo apropriada quando este está orientado a Norte. Por outro lado, no caso de este ser orientado a Sul ou a Oeste, a ventilação noturna no verão é benéfica apenas quando é incorporado o PCM com uma temperatura de fusão de 25 °C (Q25).

De facto, a ventilação noturna no verão é desativada quando é atingida uma temperatura inferior em 3 °C à temperatura de fusão do PCM no interior do módulo. Assim, quando se incorpora o PCM Q21, a ventilação noturna no verão é desativada apenas quando são atingidos 18 °C, temperatura esta abaixo da temperatura mínima de conforto neste período, levando a um número de °C.hora de desconforto mais elevado. Desta forma, para a localização de Lisboa com o edifício orientado a Sul ou a Oeste, no caso de se usar o PCM Q21, não se deve considerar o uso de ventilação noturna no verão, ou, por outro lado, seleccionar estratégias de ventilação menos penalizantes do conforto térmico.

Para o Porto e para Évora, o comportamento é idêntico. A ventilação noturna no verão é benéfica quando o edifício é orientado a Este e inconveniente quando este é orientado a Norte. Para as orientações a Sul e a Oeste, apenas quando é utilizado PCM Q25, a ventilação noturna no verão deve ser considerada.

6.1.6 Temperatura de fusão do PCM

No que se refere à temperatura de fusão do PCM, os resultados divergem consoante a localização da construção, pelo que a sua análise é realizada de forma individual para cada uma das 3 localizações consideradas.

6.1.6.1 Lisboa

Para Lisboa, a inserção do PCM Q25 é conveniente na maior parte dos casos. Quando o edifício é orientado a Norte, a melhor opção é inserir PCM Q25, sem ativar a ventilação noturna no verão. Já quando o edifício se encontra orientado a Este ou a Oeste, a inserção deste PCM deve ser conjugada com ventilação noturna no verão. Quando o edifício é orientado a Sul, o PCM Q25

com ventilação noturna e o PCM Q21 sem ventilação noturna levam a efeitos idênticos, sendo a melhor solução o uso do PCM Q21 na cobertura sem ventilação noturna.

6.1.6.2 Porto

No Porto, o PCM Q25 é adequado apenas para o edifício orientado a Este ou a Oeste, ativando a ventilação noturna no verão. Para as restantes orientações, o PCM Q21 é o mais adequado, sem ventilação noturna. De facto, por ter um clima ligeiramente mais frio que as restantes localizações consideradas, era de esperar que para o Porto, fossem preferíveis temperaturas de fusão do PCM mais reduzidas, de modo a serem possíveis as excitações térmicas necessárias para tornar o PCM efetivo.

6.1.6.3 Évora

Por outro lado, para Évora, onde as temperaturas médias são ligeiramente mais elevadas, o PCM Q25 torna-se mais efetivo, sendo que para as orientações do edifício a Este, Sul e Oeste, deve ser ativada a ventilação noturna no verão. Pelo contrário, quando o edifício é orientado a Norte, a ventilação noturna no verão não deve ser ativada.

6.1.7 Seleção das melhores configurações

Para cada localização, orientação do edifício e fachada em que é inserido o PCM, foi selecionada a melhor configuração, tendo em consideração que:

- O PCM é inserido junto à face interna da camada de isolamento;
- A espessura de PCM é de 74,2 mm.

Nas figuras seguintes estão representados os resultados correspondentes às melhores soluções para as 3 localizações.

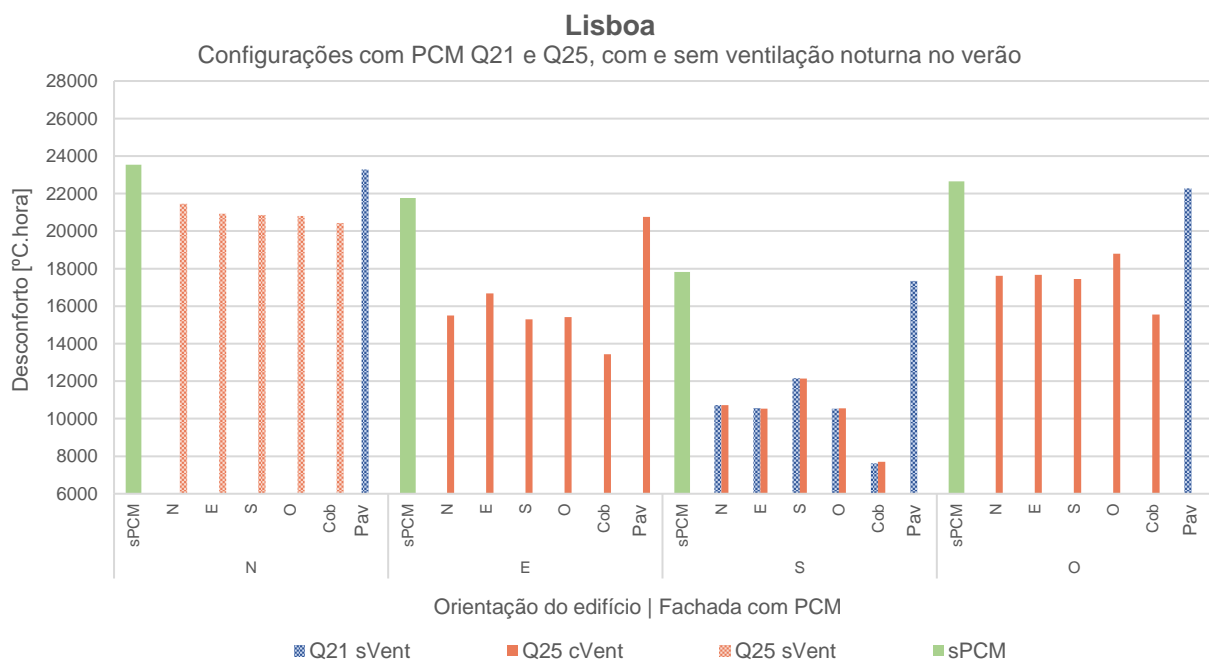


Figura 6.7 Seleção das melhores configurações para cada fachada e orientação do módulo, para Lisboa.

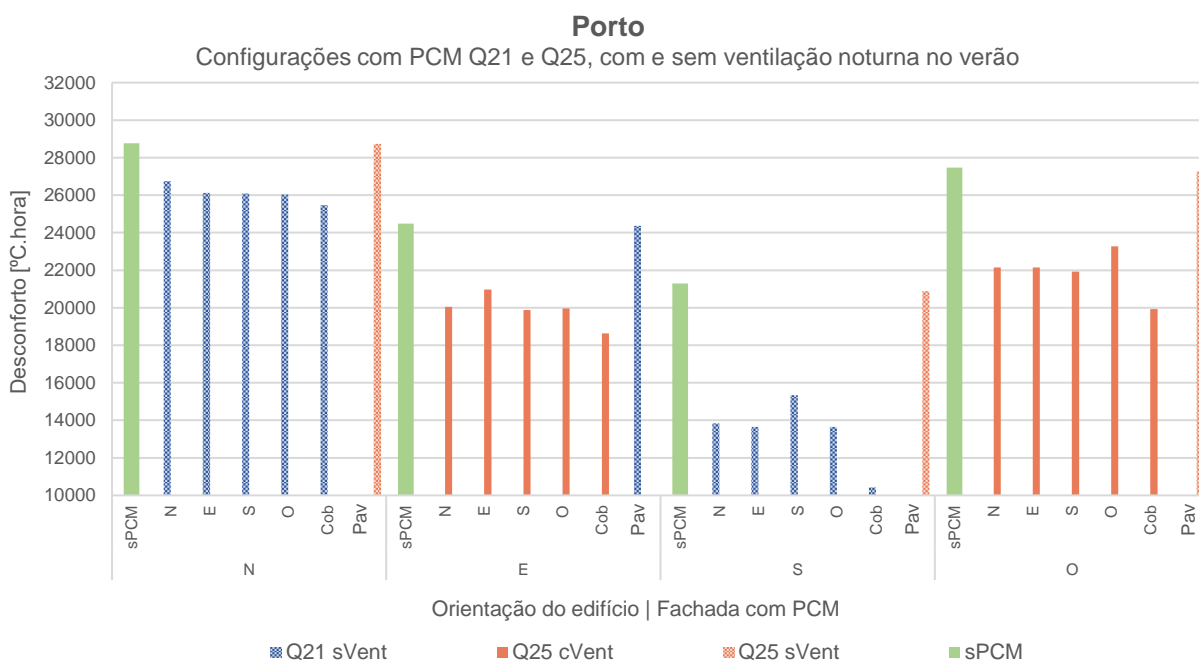


Figura 6.8 Seleção das melhores configurações para cada fachada e orientação do módulo, para o Porto.

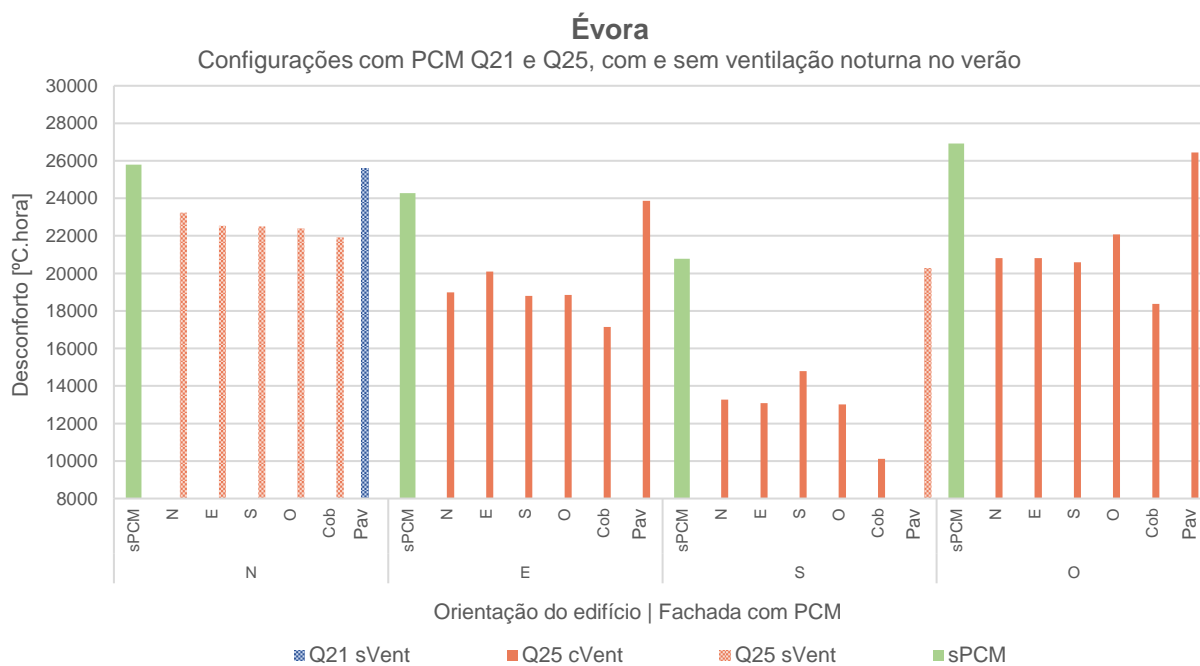


Figura 6.9 Seleção das melhores configurações para cada fachada e orientação do módulo, para Évora.

6.1.8 Comparação entre localizações geográficas

Na Tabela 6.1, apresentam-se, por ordem crescente de desconforto, as fachadas onde é mais benéfico inserir PCM, para as duas melhores configurações de cada localização e orientação. Note-se que foi excluída a opção de inserir PCM no pavimento por esta solução se ter mostrado muito pouco eficaz, ou até mesmo inconveniente, em todos os casos anteriormente analisados.

Tabela 6.1 Síntese das melhores configurações e ordenação das fachadas por ordem crescente de desconforto.

		Orientação							
		N		E		S		O	
		PCM Estratégia de Ventilação	Fachadas	PCM Estratégia de Ventilação	Fachadas	PCM Estratégia de Ventilação	Fachadas	PCM Estratégia de Ventilação	Fachadas
Localização	Lisboa	Q25 sem ventilação	Cob, O, S, E, N	Q25 com ventilação	Cob, S, O, N, E	Q25 com ventilação	Cob, O, E, N, S	Q25 com ventilação	Cob, S, N, E, O
		Q21 sem ventilação	Cob, O, S, E, N	Q21 sem ventilação	Cob, S, O, N, E	Q21 sem ventilação	Cob, O, E, N, S	Q21 sem ventilação	Cob, S, N, E, O
	Porto	Q21 sem ventilação	Cob, O, S, E, N	Q25 com ventilação	Cob, S, O, N, E	Q21 sem ventilação	Cob, O, E, N, S	Q25 com ventilação	Cob, S, N, E, O
		Q25 sem ventilação	Cob, O, S, E, N	Q21 sem ventilação	Cob, S, O, N, E	Q25 com ventilação	Cob, O, E, N, S	Q21 sem ventilação	Cob, S, N, E, O
	Évora	Q25 sem ventilação	Cob, O, S, E, N	Q25 sem ventilação	Cob, S, O, N, E	Q25 com ventilação	Cob, O, E, N, S	Q25 com ventilação	Cob, S, N, E, O
		Q21 sem ventilação	Cob, O, S, E, N	Q21 sem ventilação	Cob, S, O, N, E	Q21 sem ventilação	Cob, O, E, N, S	Q21 com ventilação	Cob, S, N, E, O

É possível perceber um padrão na Tabela 6.1. Para cada orientação, e independentemente da localização e configuração, a ordenação das fachadas por ordem crescente de desconforto é sempre a mesma. Neste caso, as fachadas têm todas a mesma área à exceção da cobertura e da fachada correspondente à orientação do edifício, sendo a primeira a que conduz aos melhores resultados, pelos motivos já mencionados, e a segunda aos piores, por ser onde o PCM é aplicado menor área e, portanto, em menor quantidade.

6.2 Efeito combinado (2 fachadas)

A partir da seleção anterior foi possível determinar qual o melhor PCM a utilizar, bem como se é adequado incluir a ventilação noturna natural no verão. A partir dessa seleção estudou-se o efeito combinado do PCM, isto é, quando este é inserido em mais que uma fachada em simultâneo.

Assim, estudou-se o efeito da inserção de PCM em duas fachadas apenas para a melhor configuração, selecionada na análise anterior, e excluindo a sua inserção no pavimento. De seguida, expõem-se os resultados obtidos e respetivas conclusões para cada localização.

6.2.1 Lisboa

No caso de Lisboa, uma vez que para a orientação Sul a utilização dos PCM Q21 e Q25 levou a resultados muito idênticos, ambas as soluções foram consideradas. Para as restantes orientações considerou-se a configuração que, geralmente, apresenta melhores resultados.

Os resultados obtidos para esta localização apresentam-se na Figura 6.10⁹.

⁹ Na Figura 6.10 e seguintes, o eixo horizontal refere-se à orientação do edifício e às duas fachadas em que é inserido o PCM, identificadas pelas suas iniciais. Exemplificando, NE corresponde à incorporação de PCM nas fachadas Norte e Este. Já Ncob refere-se à incorporação de PCM na fachada Norte e na cobertura. As restantes combinações seguem a mesma nomenclatura.

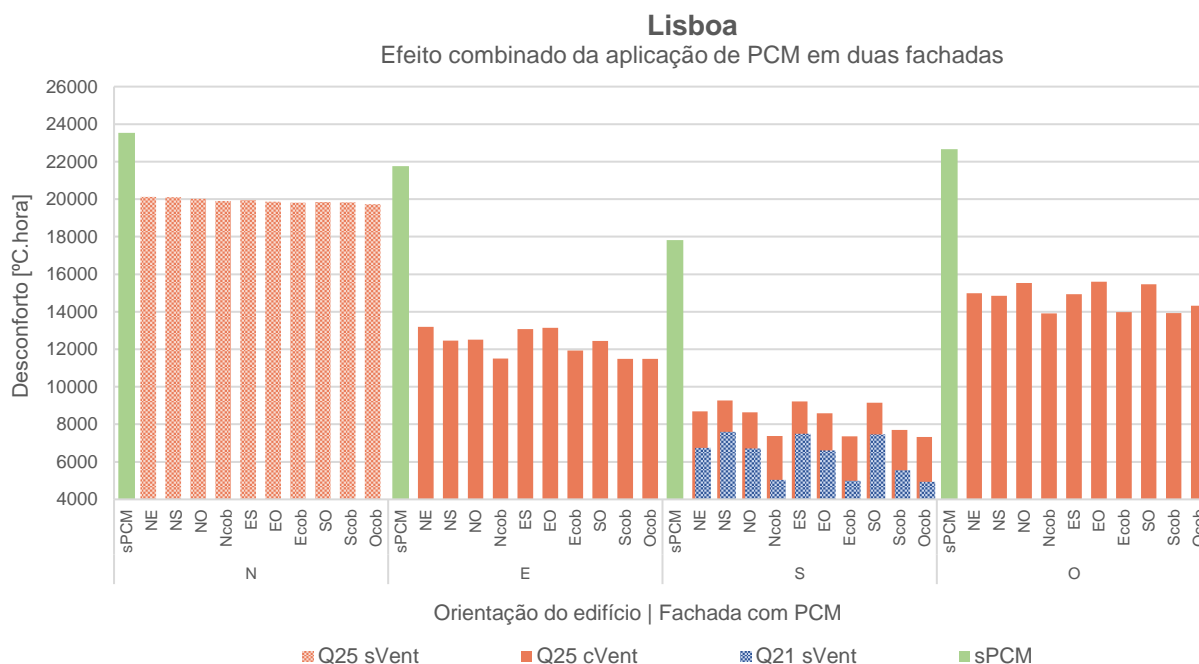


Figura 6.10 Resultados para a incorporação de PCM em duas fachadas, utilizando a melhor configuração (PCM e ventilação noturna) obtida individualmente para cada orientação, para Lisboa.

Efetivamente, os resultados mostram a tendência já verificada no estudo individual da inserção de PCM para edifícios em Lisboa. Em primeiro lugar, é notório um melhor desempenho em edifícios orientados a Sul, sendo sempre preferível esta orientação. Por outro lado, edifícios orientados a Norte mostram sempre um número de °C.hora de desconforto significativamente mais elevado que as restantes localizações, sendo também a orientação para a qual os PCM não são capazes de conduzir a reduções neste parâmetro de forma tão acentuada.

Relativamente à melhor combinação, esta corresponde, tipicamente, à inserção de PCM nas duas fachadas com melhor desempenho no estudo individual. Para ilustração desse efeito, apresentam-se na Tabela 6.2 as fachadas e suas combinações, ordenadas segundo o seu desempenho, destacando a negrito as duas conducentes ao melhor efeito individual e a melhor combinação. Nos casos em que a melhor combinação não corresponde às duas fachadas com melhor desempenho individual, os valores obtidos para o número de °C.hora de desconforto são muito próximos.

Tabela 6.2 Ordenação das fachadas segundo o desempenho da inserção de PCM, individualmente e de modo combinado, num módulo localizado em Lisboa.

Fachadas por ordem de desempenho decrescente	
N	Efeito individual Cob, O, S, E, N
	Efeito combinado OCob, ECob, SCob, SO, EO, NCob, ES, NO, NS, NE
E	Efeito individual Cob, S, O, N, E
	Efeito combinado OCob, SCob, NCob, ECob, SO, NS, NO, ES, EO, NE
S	Efeito individual Cob, O, E, N, S
	Efeito combinado OCob, ECob, NCob, SCob, EO, NO, NE, SO, ES, NS
O	Efeito individual Cob, S, N, E, O
	Efeito combinado NCob, SCob, ECob, OCob, NS, ES, NE, SO, NO, EO

Outra conclusão pode ser retirada dos resultados obtidos. Considerando o caso em que o edifício é orientado a Sul, pode-se verificar que, correspondendo a cobertura à melhor solução individual, as combinações desta com as restantes fachadas correspondem também às melhores soluções combinadas. No caso de não se optar pela inserção de PCM na cobertura, a melhor solução combinada passa pela combinação das fachadas Sul e Oeste, fachadas estas correspondentes às melhores soluções individuais a seguir à cobertura. O raciocínio repete-se no caso de não ser possível a inserção de PCM na fachada Oeste, e assim sucessivamente. Para as restantes orientações do edifício este efeito é igualmente verificado, ainda que com algumas nuances. Ainda assim, a decisão sobre em que fachadas inserir PCM pode ser tomada seguindo este raciocínio, seleccionando as fachadas, sucessivamente, segundo esta ordem.

6.2.2 Porto

Os resultados obtidos para o Porto encontram-se sintetizados da Figura 6.11.

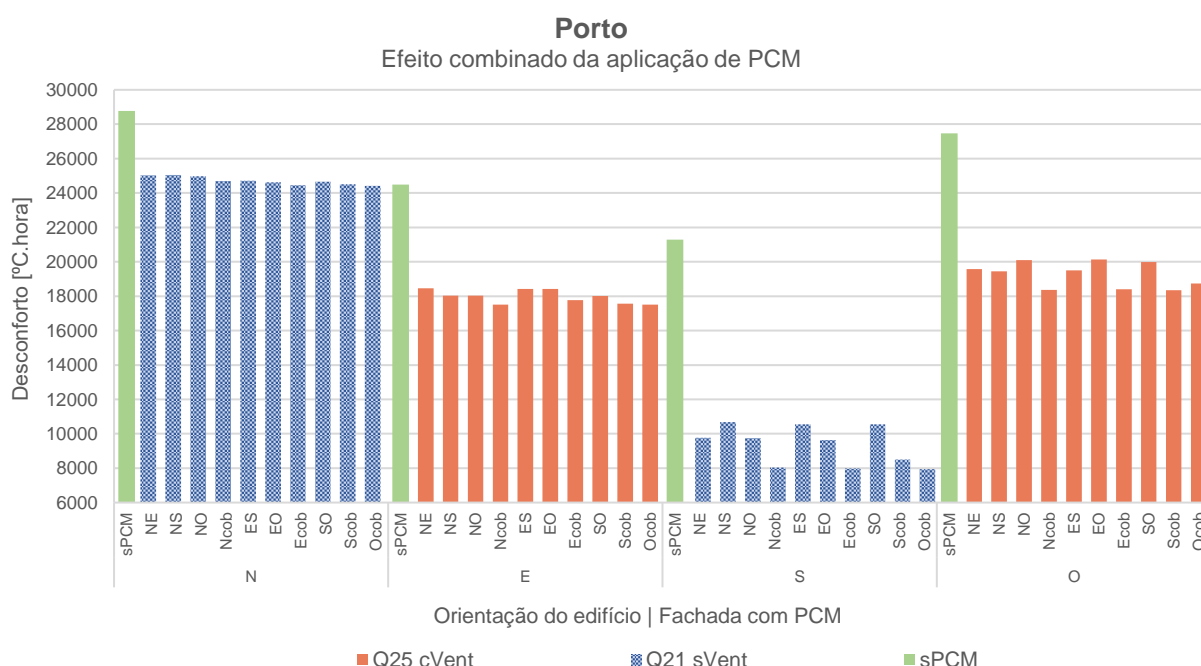


Figura 6.11 Resultados para a incorporação de PCM em duas fachadas, utilizando a melhor configuração (PCM e ventilação) obtida individualmente para cada orientação, para o Porto.

Para o Porto, verifica-se, à semelhança do observado para Lisboa e dos resultados do estudo individual, uma melhoria mais significativa quando o edifício é orientado a Sul, sendo, mais uma vez, esta a orientação que deve ser preferida. Pelo contrário, a orientação a Norte apresenta as menores reduções, não havendo uma diferença significativa entre a inserção de PCM em cada combinação de fachadas.

Através da Tabela 6.3 é possível perceber o efeito anteriormente descrito, em particular nas fachadas Sul e Oeste, embora no caso da orientação Norte esse comportamento não ser tão linear, dado a diferença no desconforto de cada uma das opções ser relativamente reduzida. No entanto, à semelhança de Lisboa, este mostra ser um raciocínio viável para a decisão sobre em que fachadas inserir o PCM: seleccionar sucessivamente, e sempre que possível, as fachadas onde a inserção individual de PCM se mostrou mais benéfica.

Tabela 6.3 Ordenação das fachadas segundo o desempenho da inserção de PCM, individualmente e de modo combinado, num módulo localizado no Porto.

Fachadas por ordem de desempenho decrescente		
N	Efeito individual	Cob, O, S, E, N
	Efeito combinado	OCob, ECob, SCob, EO, SO, NCob, ES, NO, NE, NS
E	Efeito individual	Cob, S, O, N, E
	Efeito combinado	NCob, OCob, SCob, ECob, SO, NS, NO, ES, EO, NE
S	Efeito individual	Cob, O, E, N, S
	Efeito combinado	OCob, ECob, NCob, SCob, EO, NO, NE, ES, SO, NS
O	Efeito individual	Cob, S, N, E, O
	Efeito combinado	SCob, NCob, ECob, OCob, NS, ES, NE, SO, NO, EO

6.2.3 Évora

Na Figura 6.12 apresentam-se os resultados para o módulo em Évora.

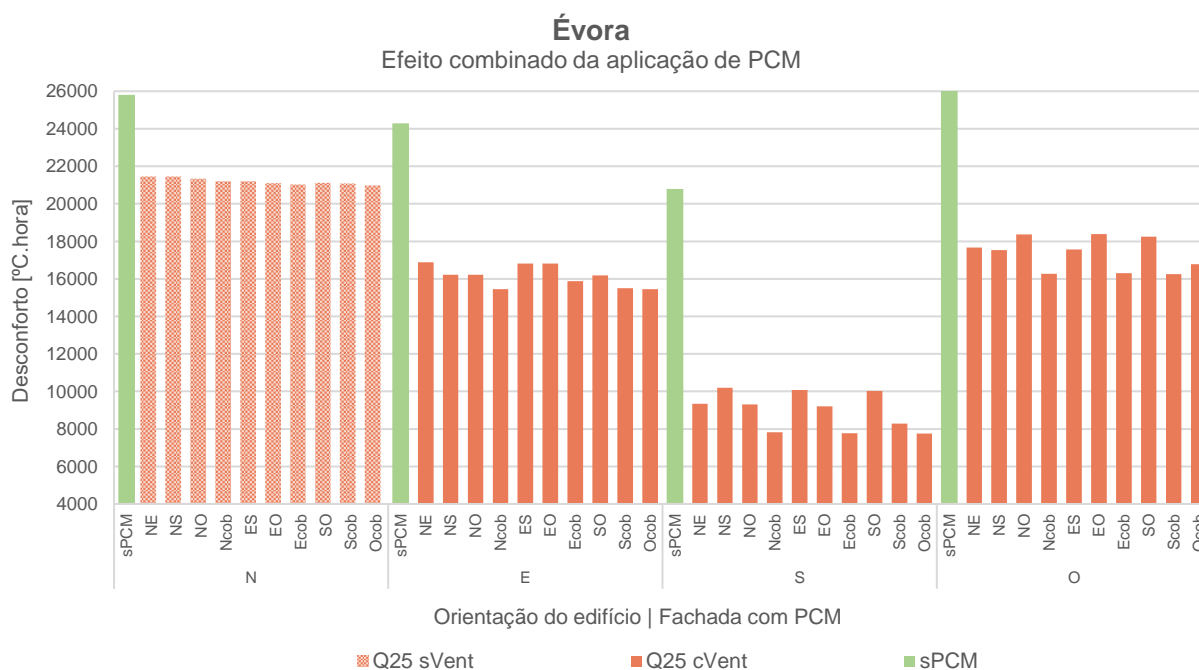


Figura 6.12 Resultados para a incorporação de PCM em duas fachadas, utilizando a melhor configuração (PCM e ventilação) obtida individualmente para cada orientação, para Évora.

Para Évora, a orientação Sul é, mais uma vez, a melhor, seguida das orientações Este e Oeste. As maiores reduções em termos de desconforto observam-se, à semelhança dos casos anteriores, para as combinações que incluem a cobertura, sendo essa a opção correspondente a uma melhoria mais significativa também no estudo individual.

Mais uma vez se verifica o efeito anteriormente mencionado, correspondendo a melhor combinação ao conjunto das fachadas onde a inserção individual de PCM é mais benéfica, à exceção de quando o edifício é orientado a Este, situação em que a inserção isolada de PCM nas fachadas Norte, Sul e Oeste mostrou reduções muito próximas. Em todo o caso, a abordagem descrita pode ser seguida de forma razoável também para o módulo localizado em Évora.

Tabela 6.4 Ordenação das fachadas segundo o desempenho da inserção de PCM, individualmente e de modo combinado, num módulo localizado em Évora.

Fachadas por ordem de desempenho decrescente		
N	Efeito individual	Cob, O, S, E, N
	Efeito combinado	OCob, ECob, SCob, EO, SO, NCob, ES, NO, NS, NE
E	Efeito individual	Cob, S, O, N, E
	Efeito combinado	OCob, NCob, SCob, ECob, SO, NO, NS, ES, EO, NE
S	Efeito individual	Cob, O, E, N, S
	Efeito combinado	OCob, ECob, NCob, SCob, EO, NO, NE, SO, ES, NS
O	Efeito individual	Cob, S, N, E, O
	Efeito combinado	SCob, NCob, ECob, OCob, NS, ES, NE, SO, NO, EO

6.3 Síntese dos resultados

A análise de resultados anterior conduz a algumas conclusões gerais que podem ser usadas na tomada de decisões para a integração de PCM em construções 'leves', as quais se descrevem de seguida.

- Para qualquer localização estudada, é sempre preferível orientar o edifício a Sul, por ser a orientação com maior exposição solar, devendo ser evitada a orientação a Norte;
- O PCM deve ser integrado junto à superfície interna da camada de isolamento, isto é, o mais próximo possível da superfície interna do edifício;
- A inserção de PCM na cobertura mostrou-se a opção mais eficaz, pelo que esta e as fachadas com maior área devem ser aquelas às quais se deve dar prioridade na decisão sobre a inserção de PCM;
- A inserção de PCM no pavimento não é eficaz para a solução construtiva adotada;
- Geralmente, a melhor configuração corresponde àquela em que a cobertura mostra o melhor resultado.

Através destas conclusões gerais, e de outras referidas ao longo do texto, é possível definir uma metodologia simplificada que permite selecionar as melhores configurações para uma construção 'leve'.

1. Selecionar uma orientação possível, preferindo a orientação Sul, seguida das orientações Este e Oeste e, apenas em último caso, Norte;
2. Simular o efeito da inserção dos tipos de PCM considerados na cobertura e estratégias de ventilação;
3. Selecionar o PCM e a estratégia de ventilação que conduzem a um menor desconforto;
4. Caso as fachadas tenham dimensões diferentes, para a orientação, PCM e estratégia de ventilação selecionados, simular o comportamento do edifício quando lhe é inserido PCM em cada fachada individualmente, excluindo a opção de inserir PCM no pavimento, ordenando as mesmas de forma decrescente quanto ao desconforto. No caso de as dimensões das fachadas serem todas iguais, seguir a ordenação definida na Tabela 6.5, através de uma escala de '+', ou da Tabela 6.6, definida pelo padrão observado anteriormente;
5. A inserção de PCM nas fachadas do edifício devem seguir a ordem de preferência definida.

Nota: No caso de se pretender inserir PCM em todas as fachadas do edifício, a metodologia deve ser seguida apenas até ao ponto 3, devendo ser excluída a inserção de PCM apenas no pavimento.

No caso de não ser possível a realização de simulações, pode-se, através da Tabela 6.5, seleccionar o PCM e respetiva estratégia de ventilação noturna no verão mais adequados, tendo por base a localização cujo clima é mais próximo da localização em questão. De seguida, devem ser seleccionadas as fachadas com maior área ou, caso estas tenham a mesma área, seguir a ordem de preferência apresentada na Tabela 6.6, ou de forma coerente com a Tabela 6.5.

Tabela 6.5 Seleção das fachadas para inserção de PCM, segundo uma escala de '+' (atente-se o diferente tamanho dos sinais '+').

Localização	Orientação	PCM e estratégia de ventilação	Ordenação das fachadas					
			N	E	S	O	Cob	
Lisboa	Sul	Q21 sem ventilação	+	+	+	+	+	
		Q25 com ventilação	+	+	+	+	+	
	Este	Q25 sem ventilação	+	+	+	+	+	
		Q21 sem ventilação	+	+	+	+	+	
	Oeste	Q25 com ventilação	+	+	+	+	+	
		Q21 sem ventilação	+	+	+	+	+	
	Norte	Q21 sem ventilação	+	+	+	+	+	
		Q25 com ventilação	+	+	+	+	+	
	Porto	Sul	Q21 sem ventilação	+	+	+	+	+
			Q25 com ventilação	+	+	+	+	+
Este		Q25 com ventilação	+	+	+	+	+	
		Q21 sem ventilação	+	+	+	+	+	
Oeste		Q25 com ventilação	+	+	+	+	+	
		Q21 sem ventilação	+	+	+	+	+	
Norte		Q21 sem ventilação	+	+	+	+	+	
		Q25 sem ventilação	+	+	+	+	+	
Évora		Sul	Q25 com ventilação	+	+	+	+	+
			Q21 sem ventilação	+	+	+	+	+
	Este	Q25 sem ventilação	+	+	+	+	+	
		Q21 sem ventilação	+	+	+	+	+	
	Oeste	Q25 com ventilação	+	+	+	+	+	
		Q21 com ventilação	+	+	+	+	+	
	Norte	Q25 sem ventilação	+	+	+	+	+	
		Q21 sem ventilação	+	+	+	+	+	

Tabela 6.6 Seleção das fachadas para inserção de PCM em função da orientação do edifício.

	Orientação			
	N	E	S	O
Ordenação das fachadas	Cob, O, S, E, N	Cob, S, O, N, E	Cob, O, E, N, S	Cob, S, N, E, O

7 Considerações Finais

O presente trabalho tem como objetivo a avaliação do contributo dos PCM macroencapsulados no comportamento térmico de construções 'leves', particularmente no aumento da sua inércia térmica e, como resultado, na melhoria das condições de conforto térmico no seu interior. Nesse sentido, foi definida uma metodologia de avaliação do desconforto térmico através de um critério que tem por base a evolução da temperatura operativa no interior de um módulo de construção 'leve' e respetiva comparação com uma gama de temperaturas de conforto.

Usando este critério foi possível encontrar, para três localizações distintas, a orientação preferencial do edifício, as fachadas em que deve ser inserido o PCM, bem como a sua localização, quantidade e temperatura de mudança de fase mais convenientes, e estratégias de ventilação a usar para promover a descarga do PCM durante a noite.

A comparação entre as diversas configurações permitiu a obtenção de conclusões importantes e úteis para a decisão sobre a integração de PCM em construções 'leves', e a perceção de padrões que, do mesmo modo, auxiliam na exclusão ou preferência por determinadas soluções.

A informação obtida através da análise realizada permitiu, ainda, a definição de uma estratégia de decisão a utilizar em edifícios 'leves', quanto à orientação do edifício, o PCM e a estratégia de ventilação a adotar, e as fachadas em que este terá maior ou menor efeito no conforto térmico.

A presente dissertação apresenta como contributo relevante uma metodologia para a tomada de decisão sobre a integração de PCM em edifícios 'leves' na medida em que estabelece um conjunto de critérios que permitem a decisão fácil e rápida sobre a melhor configuração a adotar.

A estratégia definida pode, ainda, ser utilizada no estudo de novas configurações com menos variáveis e, portanto, requerendo um menor número de simulações. Será particularmente interessante o estudo de diferentes estratégias de ventilação e de utilização de PCM com temperaturas de mudança de fase entre os 21°C e os 25°C (temperaturas de fusão que foram objeto de estudo neste trabalho) e diferentes entalpias de mudança de fase. Um outro estudo importante neste âmbito será a análise do custo de cada solução e o cálculo do retorno da mesma em termos do custo da energia consumida para climatização, permitindo não só a escolha da melhor solução a nível energético, mas também a ponderação da mesma no que se refere ao seu custo.

A metodologia seguida para a obtenção dos padrões identificados pode, igualmente, ser utilizada noutras localizações, permitindo a definição de padrões para outros climas e a obtenção dos correspondentes critérios de tomada de decisão.

8 Referências Bibliográficas

- [1] Eurostat, *Energy data 2020 edition*. 2020.
- [2] Eurostat, “Energy consumption in households,” 2018. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households#Context. [Accessed: 15-Mar-2021].
- [3] Observatório da Energia, DGE – Direção Geral de Energia e Geologia - Direção de Serviços de Planeamento Energético e Estatística, and ADENE – Agência para a Energia - Unidade de Informação, *Energia em Números - Edição 2020*. Lisboa, 2020.
- [4] Instituto Nacional de Estatística e Direcção-Geral de Energia e Geologia, *Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico 2010*. Lisboa-Portugal, 2011.
- [5] A. Horta, “Pobreza energética: por que está Portugal entre os piores da UE?,” *Público*, 2020. [Online]. Available: <https://www.publico.pt/2020/12/13/sociedade/noticia/pobreza-energetica-portugal-piores-ue-1942219>. [Accessed: 14-May-2021].
- [6] Eurostat, “Inability to keep home adequately warm - EU-SILC survey,” 2021. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ilc_mdcs01/default/table?lang=en. [Accessed: 14-May-2021].
- [7] ADENE – Agência para a Energia, “Estatística do Sistema de Certificação Energética dos Edifícios,” 2021. [Online]. Available: <https://www.sce.pt/estatisticas/>. [Accessed: 14-May-2021].
- [8] Eurostat, “Household energy prices in the EU increased compared compared with 2017,” no. May, pp. 1–6, 2019.
- [9] Direção Geral de Energia e Geologia (DGE), “Estimativas rápidas de consumo energético - Monitorização do impacto da COVID-19 no consumo energético,” 2020.
- [10] “Tiny Houses: a tendência de viver numa casa mais pequena,” *Contas Connosco - Cofidis*, 2021. .
- [11] A. Araújo, “Crise e pandemia fazem disparar procura por casas minimalistas,” *Expresso*, 2020. [Online]. Available: <https://expresso.pt/economia/2020-09-18-Crise-e-pandemia-fazem-disparar-procura-por-casas-minimalistas>. [Accessed: 14-May-2021].
- [12] D. Braff, “Tiny houses: a moda das casas compactas combina com a pandemia?,” *Exame*, 2021. [Online]. Available: <https://exame.com/casual/tiny-houses-a-moda-das-casas-compactas-combina-com-a-pandemia/>. [Accessed: 14-May-2021].
- [13] idealista Copyright © 2000-2021, “O escritório à porta de casa: a cabine perfeita para trabalhar no jardim (e relaxar nos intervalos),” *idealista/news*, 2020. [Online]. Available: <https://www.idealista.pt/news/imobiliario/habitacao/2020/08/26/44405-ter-o-escritorio-a-porta-de-casa-a-cabine-perfeita-para-teletrabalhar-no-jardim-e>. [Accessed: 14-May-2021].
- [14] C. Carlson, “Dutch Invertuals designs Tiny Offices from corrugated aluminium plates,” 2020. [Online]. Available: <https://www.dezeen.com/2020/09/01/dutch-invertual-tiny-offices-corrugated-aluminium-droomparken/>. [Accessed: 14-May-2021].
- [15] “Tiny Homes Market by Product and Geography - Forecast and Analysis 2021-2025,” *technavio*, 2021. [Online]. Available: <https://www.technavio.com/report/tiny-homes-market-industry-analysis>. [Accessed: 15-May-2021].
- [16] S. D. Zwanzig, Y. Lian, and E. G. Brehob, “Numerical simulation of phase change material composite wallboard in a multi-layered building envelope,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 69, pp. 27–40, 2013.
- [17] G. Zhou and M. Pang, “Experimental investigations on the performance of a collector-storage wall system using phase change materials,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 105, pp. 178–188, 2015.

- [18] Y. Xiang and G. Zhou, "Thermal performance of a window-based cooling unit using phase change materials combined with night ventilation," *Energy Build.*, vol. 108, pp. 267–278, 2015.
- [19] M. A. Medina, J. B. King, and M. Zhang, "On the heat transfer rate reduction of structural insulated panels (SIPs) outfitted with phase change materials (PCMs)," *Energy*, vol. 33, no. 4, pp. 667–678, 2008.
- [20] M. Ahangari and M. Maerefat, "An innovative PCM system for thermal comfort improvement and energy demand reduction in building under different climate conditions," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 44, no. September 2018, pp. 120–129, 2019.
- [21] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, and D. Quenard, "Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material," *Energy Build.*, vol. 38, no. 6, pp. 673–681, 2006.
- [22] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, and L. F. Cabeza, "Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling," *Energy Build.*, vol. 42, no. 4, pp. 534–540, 2010.
- [23] Y. Berthou, P. H. Biwole, P. Achard, H. Sallée, M. Tantot-Neirac, and F. Jay, "Full scale experimentation on a new translucent passive solar wall combining silica aerogels and phase change materials," *Sol. Energy*, vol. 115, pp. 733–742, 2015.
- [24] H. Weinlaeder, W. Koerner, and M. Heidenfelder, "Monitoring results of an interior sun protection system with integrated latent heat storage," *Energy Build.*, vol. 43, no. 9, pp. 2468–2475, 2011.
- [25] T. Silva, R. Vicente, F. Rodrigues, A. Samagaio, and C. Cardoso, "Performance of a window shutter with phase change material under summer Mediterranean climate conditions," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 84, pp. 246–256, 2015.
- [26] O. Imghoure, N. Belouaggadia, M. Ezzine, R. Lbibb, and Z. Younsi, "Performance evaluation of phase change materials for thermal comfort in a hot climate region," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 186, no. December 2020, p. 116509, 2021.
- [27] X. Jin, M. A. Medina, and X. Zhang, "On the importance of the location of PCMs in building walls for enhanced thermal performance," *Appl. Energy*, vol. 106, pp. 72–78, 2013.
- [28] X. Jin, M. A. Medina, and X. Zhang, "On the placement of a phase change material thermal shield within the cavity of buildings walls for heat transfer rate reduction," *Energy*, vol. 73, pp. 780–786, 2014.
- [29] K. O. Lee, M. A. Medina, E. Raith, and X. Sun, "Assessing the integration of a thin phase change material (PCM) layer in a residential building wall for heat transfer reduction and management," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 699–706, 2015.
- [30] K. O. Lee, M. A. Medina, and X. Sun, "On the use of plug-and-play walls (PPW) for evaluating thermal enhancement technologies for building enclosures: Evaluation of a thin phase change material (PCM) layer," *Energy Build.*, vol. 86, pp. 86–92, 2015.
- [31] X. Kong, S. Lu, Y. Li, J. Huang, and S. Liu, "Numerical study on the thermal performance of building wall and roof incorporating phase change material panel for passive cooling application," *Energy Build.*, vol. 81, pp. 404–415, 2014.
- [32] M. C. S. Garcia, "Simulação dinâmica de edifícios com componentes integrando PCM," Universidade de Aveiro, 2013.
- [33] P. M. T. Roque, "Utilização de materiais de mudança de fase na melhoria do comportamento térmico de edifícios," Universidade de Aveiro, 2015.
- [34] L. Yang, X. Jin, Y. Zhang, and K. Du, "Recent development on heat transfer and various applications of phase-change materials," *J. Clean. Prod.*, vol. 287, p. 124432, 2021.
- [35] Z. Liu, Z. Yu, T. Yang, D. Qin, S. Li, G. Zhang, F. Haghighat, and M. M. Joybari, "A review on macro-encapsulated phase change material for building envelope applications," *Build. Environ.*, vol. 144, no. August, pp. 281–294, 2018.

- [36] A. Abhat, "Short term thermal energy storage," vol. 15, no. 3, pp. 477–501, 1980.
- [37] H. Mehling and L. F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM*, vol. 11, no. 3. 2000.
- [38] D. Zhou, C. Y. Zhao, and Y. Tian, "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications," *Appl. Energy*, vol. 92, pp. 593–605, 2012.
- [39] S. A. Memon, "Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 870–906, 2014.
- [40] T. Khadiran, M. Z. Hussein, Z. Zainal, and R. Rusli, "Advanced energy storage materials for building applications and their thermal performance characterization: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 916–928, 2016.
- [41] E. Oró, A. de Gracia, A. Castell, M. M. Farid, and L. F. Cabeza, "Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications," *Appl. Energy*, vol. 99, pp. 513–533, 2012.
- [42] S. Manrich, E. D. Zanotto, and E. H. Jr., "Aplicabilidade da Teoria Clássica de Nucleação Modificada (CO-CNT) à Cristalização de Polímeros," pp. 15–20, 1992.
- [43] J. F. Mendes, A. Joyce, P. Horta, and M. J. Brites, "Armazenamento de energia solar térmica," 2009.
- [44] C. Rathgeber, H. Schmit, L. Miró, L. F. Cabeza, and A. Gutierrez, "Analysis of supercooling of phase change materials with increased sample size – Comparison of measurements via DSC , T-History and at pilot plant scale," *13th Int. Energy Agency Energy Storage Greenstock Conf. 2015*, 2015.
- [45] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *J. Fluid Mech.*, 2002.
- [46] P. K. S. Rathore and S. K. Shukla, "Potential of macroencapsulated pcm for thermal energy storage in buildings: A comprehensive review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 225, pp. 723–744, 2019.
- [47] A. Bland, M. Khzouz, T. Statheros, and E. I. Gkanas, "PCMs for residential building applications: A short review focused on disadvantages and proposals for future development," *Buildings*, vol. 7, no. 3, 2017.
- [48] Arvio Australia, "Beyond Insulation™," 2020. [Online]. Available: <http://arvio.com.au/wp-content/uploads/2020/05/BioPCM-Brochure.pdf>.
- [49] Phase Change Solutions, "BioPCM®," 2020. [Online]. Available: <https://phasechange.com/biopcm/>. [Accessed: 07-Jun-2021].
- [50] A. I. Fernández, C. Barreneche, M. Belusko, M. Segarra, F. Bruno, and L. F. Cabeza, "Considerations for the use of metal alloys as phase change materials for high temperature applications," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2017.
- [51] D. W. Hawes, D. Banu, and D. Feldman, "Latent heat storage in concrete," *Sol. Energy Mater.*, vol. 19, no. 3–5, pp. 335–348, Nov. 1989.
- [52] D. Feldman, D. Banu, D. Hawes, and E. Ghanbari, "Obtaining an energy storing building material by direct incorporation of an organic phase change material in gypsum wallboard," *Sol. Energy Mater.*, vol. 22, no. 2–3, pp. 231–242, Jul. 1991.
- [53] P. Schossig, H. M. Henning, S. Gschwander, and T. Haussmann, "Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 89, no. 2–3, pp. 297–306, 2005.
- [54] Y. P. Zhang, K. P. Lin, R. Yang, H. F. Di, and Y. Jiang, "Preparation , thermal performance and application of shape-stabilized PCM in energy efficient buildings," vol. 38, pp. 1262–1269, 2006.
- [55] A. Sari, "Form-stable paraffin / high density polyethylene composites as solid – liquid phase change material for thermal energy storage : preparation and thermal properties," vol. 45, pp. 2033–2042, 2004.

- [56] M. Xiao, B. Feng, and K. Gong, "Preparation and performance of shape stabilized phase change thermal storage materials with high thermal conductivity," vol. 43, pp. 103–108, 2002.
- [57] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. De Gracia, and A. I. Fernández, "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, 2011.
- [58] A. F. Regin, S. C. Solanki, and J. S. Saini, "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 9, pp. 2438–2458, 2008.
- [59] S. S. Bansode, S. K. Banarjee, D. D. Gaikwad, S. L. Jadhav, and R. M. Thorat, "Microencapsulation: A review," *Int. J. Pharma Bio Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. P509–P531, 2012.
- [60] "Wurster Fluid Bed Coating," *Coating Place Inc.*, 2021. [Online]. Available: <https://www.coatingplace.com/services/wurster-fluid-bed-coating.html>. [Accessed: 31-May-2021].
- [61] S. Y. Cheng, C. Yuen, C. Kan, and K. Cheuk, "Development of Cosmetic Textiles Using Microencapsulation Technology," *Res. J. Text.*, vol. 12, pp. 41–51, 2008.
- [62] M. Whelehan, P. John, and N. T. Dunford, "Spray drying with a three channel nozzle," *Scientist Live*, 2013. [Online]. Available: <https://www.scientistlive.com/content/spray-drying-three-channel-nozzle>. [Accessed: 31-May-2021].
- [63] L. S. Jackson and K. Lee, "Microencapsulation in the food industry," *Lebensmittel-Wissenschaft+Technologie*, vol. 2, no. 2, pp. 245–265, 1991.
- [64] A. Imbrogno and E. Piacentini, "Membrane Emulsification in Phase Separation for Microcapsule Preparation," in *Encyclopedia of Membranes*, E. Drioli and L. Giorno, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016, pp. 1223–1226.
- [65] A. S. M. Trino, "Estudo sistemático da formação de estrutura em processos de microencapsulação por evaporação de solvente," Universidade de Coimbra, 2012.
- [66] S. Benita, *Microencapsulation - Methods and Industrial Applications*, 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2006.
- [67] Y. Srivastava, A. D. Semwal, and G. K. Sharma, "Application of Various Chemical and Mechanical Microencapsulation techniques in Food Sector-A Review," *Int. J. Food Ferment. Technol.*, 2013.
- [68] W. Li, P. Hintze, L. M. Calle, J. Buhrow, and J. Curran, "Smart coating for corrosion indication and prevention: Recent progress," *NACE - Int. Corros. Conf. Ser.*, no. October 2015, 2009.
- [69] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. De Gracia, and A. I. Fernández, "Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, 2011.
- [70] Y. Özonur, M. Mazman, H. Ö. Paksoy, and H. Evliya, "Microencapsulation of coco fatty acid mixture for thermal energy storage with phase change material," *Int. J. Energy Res.*, vol. 30, no. 10, pp. 741–749, 2006.
- [71] C. Alkan, A. Sari, A. Karaipekli, and O. Uzun, "Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 93, no. 1, pp. 143–147, 2009.
- [72] A. M. Khudhair and M. M. Farid, "A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials," *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 2, pp. 263–275, 2004.
- [73] A. Waqas and Z. U. Din, "Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 18, pp. 607–625, 2013.

- [74] H. Weinläder, W. Körner, and B. Strieder, "A ventilated cooling ceiling with integrated latent heat storage - Monitoring results," *Energy Build.*, vol. 82, pp. 65–72, 2014.
- [75] N. Soares, A. R. Gaspar, P. Santos, and J. J. Costa, "Experimental evaluation of the heat transfer through small PCM-based thermal energy storage units for building applications," *Energy Build.*, vol. 116, pp. 18–34, 2016.
- [76] S. J. Chang, S. Wi, S. G. Jeong, and S. Kim, "Thermal performance evaluation of macro-packed phase change materials (PCMs) using heat transfer analysis device," *Energy Build.*, vol. 117, pp. 120–127, 2016.
- [77] C. Hasse, M. Grenet, A. Bontemps, R. Dendievel, and H. Sallée, "Realization, test and modelling of honeycomb wallboards containing a Phase Change Material," *Energy Build.*, vol. 43, no. 1, pp. 232–238, 2011.
- [78] C. Arkar, B. Vidrih, and S. Medved, "Efficiency of free cooling using latent heat storage integrated into the ventilation system of a low energy building," *Int. J. Refrig.*, vol. 30, no. 1, pp. 134–143, 2007.
- [79] Y. Fang, "A Comprehensive Study of Phase Change Materials (PCMs) for Building Walls Applications," p. 240, 2009.
- [80] S. R. L. da Cunha and J. L. B. de Aguiar, "Phase change materials and energy efficiency of buildings: A review of knowledge," *J. Energy Storage*, vol. 27, no. September 2019, 2020.
- [81] "Diário da República n.º 234/2013, 3º Suplemento, Série II de 2013-12-03, Despacho (extrato) n.º 15793-I/2013." Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia - Direção-Geral de Energia e Geologia, pp. 35088-(41) a 35088-(54), 2013.
- [82] D. Mazzeo, N. Matera, C. Cornaro, G. Oliveti, P. Romagnoni, and L. De Santoli, "EnergyPlus, IDA ICE and TRNSYS predictive simulation accuracy for building thermal behaviour evaluation by using an experimental campaign in solar test boxes with and without a PCM module," *Energy Build.*, vol. 212, 2020.
- [83] F. P. Incropera and D. P. Dewitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, 7th ed. New York, 2002.
- [84] "Inércia térmica," *Amorim Cork Insulation*, 2021. [Online]. Available: <https://www.amorimcorkinsulation.com/vantagens/inercia-termica/>. [Accessed: 25-May-2021].
- [85] "Inércia térmica de edifícios," *EngenhariaCivil.com*, 2021. [Online]. Available: <https://www.engenhariacivil.com/inercia-termica-edificios>. [Accessed: 25-May-2021].
- [86] "Diário da República n.º 234/2013, 3º Suplemento, Série II de 2013-12-03, Despacho (extrato) n.º 15793-K/2013." Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia - Direção-Geral de Energia e Geologia, pp. 35088-(58) a 35088-(87), 2013.
- [87] M. Saffari, A. de Gracia, S. Ushak, and L. F. Cabeza, "Passive cooling of buildings with phase change materials using whole-building energy simulation tools: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 80, no. January, pp. 1239–1255, 2017.
- [88] V. S. K. V. Harish and A. Kumar, "A review on modeling and simulation of building energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1272–1292, 2016.
- [89] "IDA Indoor Climate and Energy," *EQUA Simulation AB*, 2020. [Online]. Available: <https://www.equa.se/en/ida-ice>. [Accessed: 23-May-2021].
- [90] "EnergyPlus," *EnergyPlus*, 2021. [Online]. Available: <https://energyplus.net/>. [Accessed: 23-May-2021].
- [91] "QuickStart," *EnergyPlus*. [Online]. Available: <https://energyplus.net/quickstart>. [Accessed: 23-May-2021].
- [92] "DesignBuilder," *DesignBuilder Software Ltd.* [Online]. Available: <https://designbuilder.co.uk/>. [Accessed: 23-May-2021].

- [93] L. Sousa, "Program Help for previous versions," *Kayako*, 2019. [Online]. Available: <https://support.designbuilder.co.uk/index.php?/Knowledgebase/Article/View/175/0/program-help-for-previous-versions>. [Accessed: 23-May-2021].
- [94] "TRNSYS - Transient System Simulation Tool," *TRNSYS*, 2019. [Online]. Available: <http://www.trnsys.com/index.html>. [Accessed: 23-May-2021].
- [95] European Committee for Standardization, "Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics," 2006.
- [96] Copyright © Instituto Português do Mar e da Atmosfera 2021, "Área educativa - CLIMA DE PORTUGAL CONTINENTAL," 2021. [Online]. Available: <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/>. [Accessed: 23-Mar-2021].
- [97] Copyright © Fundação Francisco Manuel dos Santos, "Densidade populacional," *Pordata*, 2021. [Online]. Available: <https://www.pordata.pt/Municipios/Densidade+populacional-452>. [Accessed: 07-Jun-2021].
- [98] idealista Copyright © 2000-2021, "Evolução do preço das casas à venda, Portugal," 2021. [Online]. Available: <https://www.idealista.pt/media/relatorios-preco-habitacao/>. [Accessed: 23-Mar-2021].
- [99] "Diário da República n.º 234/2013, 3º Suplemento, Série II de 2013-12-03, Despacho (extrato) n.º 15793-F/2013." Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia - Direção-Geral de Energia e Geologia, 2013.
- [100] N. Brelih and O. Seppänen, "Ventilation Rates and Iaq in European," no. October, 2011.

A. Determinação do número de RPH máximo

Para determinação do número de RPH máximo aceitável para o edifício em questão fez-se a análise CFD (*Computational Fluid Dynamics*) do *DesignBuilder* para determinar a velocidade do ar dentro do módulo quando se fazem variar os caudais de entrada, sabendo-se que esta não deve ultrapassar os 0,3 m/s [100].

Para tal definiram-se a malha e as temperaturas das superfícies de acordo com os valores padrão do *software*, listados na Tabela A. 1.

Tabela A. 1 Parâmetros de definição da simulação em CFD no *DesignBuilder*.

Malha	Distância padrão entre nós	0,3 m
	Tolerância	0,03 m
	Número de elementos em x	14
	Número de elementos em y	15
	Número de elementos em z	13
	Temperatura das superfícies opacas	20 °C
	Temperatura das superfícies envidraçadas	10 °C

A apresentação de resultados é bastante gráfica, estando representadas na Figura A. 1 as malhas obtidas para os caudais de ar de 60 L/s e 160 L/s. Dos resultados gráficos foram retiradas a velocidade máxima do ar, observada junto da abertura da janela e representada a vermelho, e a velocidade máxima do ar na zona de ocupação, aqui estipulada como até 2,5 m de altura. Estas variáveis encontram-se na Tabela A. 2 para cada caudal de ar simulado.

Tabela A. 2 Resultados obtidos quando se faz a variação do caudal de ar de entrada e seu efeito na velocidade dentro do módulo.

Caudal de ar [$\frac{L}{s}$]	RPH	Velocidade máxima (entrada) [$\frac{m}{s}$]	Velocidade máxima na zona de ocupação (até 2,5 m de altura) [$\frac{m}{s}$]
60	3,05	0,39	0,11
80	4,06	0,52	0,14
100	5,08	0,65	0,18
120	6,09	0,78	0,21
140	7,10	0,92	0,25
160	8,12	1,03	0,28

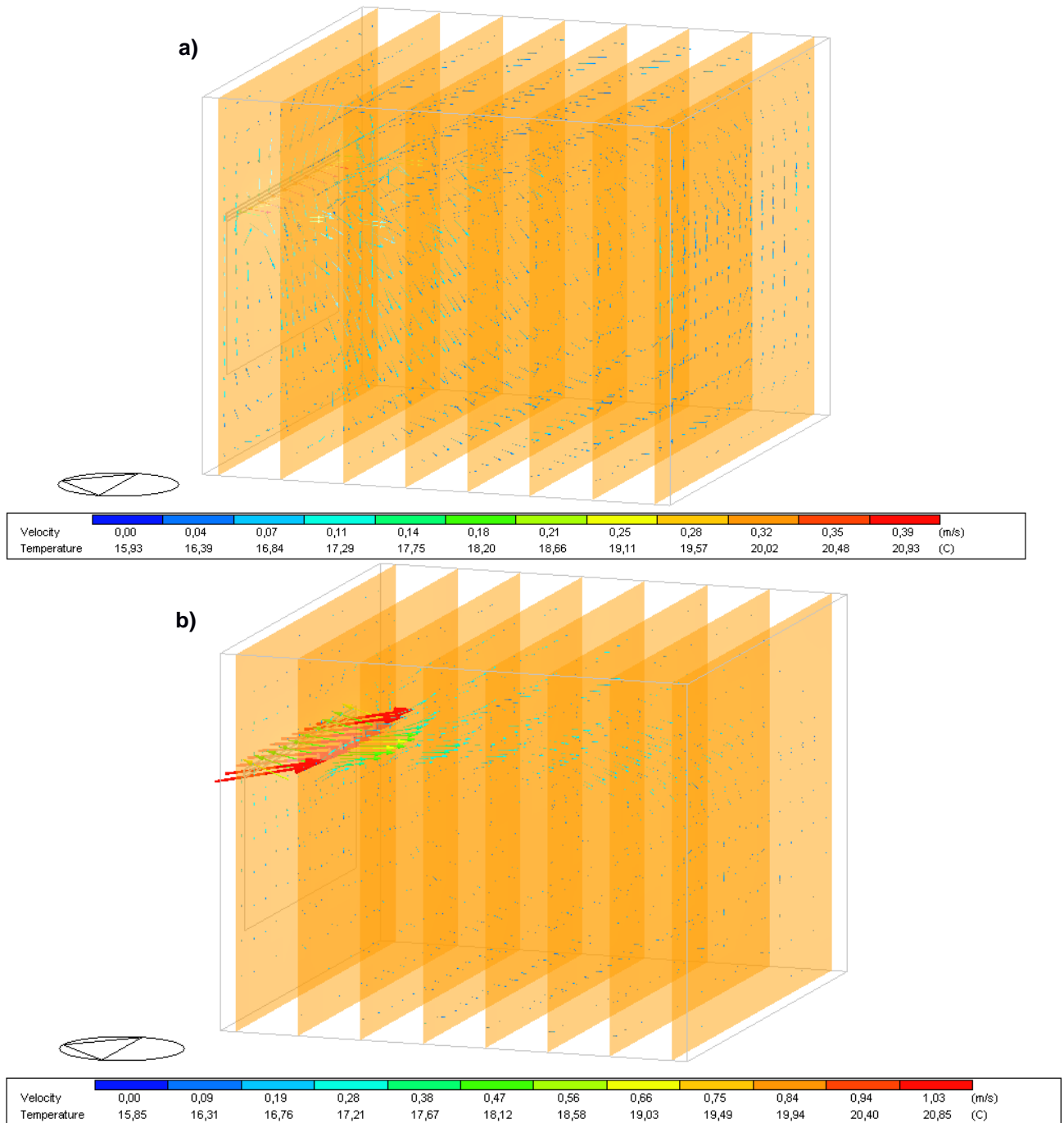


Figura A. 1 Resultados gráficos obtidos para um caudal de ar de a) 60 L/s e b) 160 L/s.

Verificam-se, por um lado, velocidades extremamente mais elevadas que a de referência, 0,3 m/s, junto à janela. Por outro lado, as velocidades na zona ocupada não excedem este valor. Tal deve-se ao facto de a entrada de ar se dar pela parte superior da janela, perdendo velocidade quando chega à zona mais baixa do módulo, zona esta onde estarão os ocupantes. Considerando-se que a corrente de ar que se faz sentir na entrada da janela não é sentida pelos ocupantes, mas sim a corrente de ar criada na zona mais baixa, pode-se definir como aceitável a opção em que se introduz uma taxa de renovação de ar de 8 RPH.

Note-se que, no caso, é promovida ventilação natural (noturna), mas poder-se-ia realizar a ventilação (e arrefecimento do ar) através de ventiladores que, com as configurações adequadas, seriam capazes de, do mesmo modo, direccionar a corrente de ar para as zonas onde o efeito da velocidade do ar não se faz sentir pelos ocupantes.

B. Tabelas de resultados

Tabela B. 1 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito individual da inserção de PCM para o módulo localizado em Lisboa (apresentação em escala de cores).

Lisboa			sPCM	Z	E	s	O	Cob	Pav	
N	D	cVent	23536,4	M51 Q21	24460,2	24090,3	23952,8	23959,5	23434,0	25944,6
				M91 Q21	24318,3	23908,3	23791,2	23785,6	23230,2	25921,4
				M182 Q21	24139,1	23675,6	23604,0	23556,0	23011,7	25804,3
				M51 Q25	22267,0	21896,8	21821,2	21798,7	21471,9	24132,5
				M91 Q25	22106,1	21667,6	21602,6	21567,0	21182,3	24110,6
				M182 Q25	21901,3	21388,4	21358,8	21289,7	20889,2	24096,5
		sVent		M51 Q21	22187,7	21803,0	21681,7	21674,5	21236,6	23491,5
				M91 Q21	21972,6	21531,5	21413,4	21388,0	20902,8	23446,3
				M182 Q21	21677,5	21146,8	21058,2	20992,7	20446,6	23275,3
				M51 Q25	21856,5	21501,9	21399,6	21371,3	21137,6	23518,3
				M91 Q25	21684,6	21251,1	21158,7	21122,8	20810,5	23490,6
				M182 Q25	21453,5	20928,0	20865,7	20802,7	20423,5	23465,1
	F	cVent		M51 Q21	25777,2	25814,2	25626,9	25597,2	25179,0	26002,0
				M91 Q21	25647,0	25595,1	25306,8	25328,1	24974,1	26020,6
				M182 Q21	25501,8	25390,6	25149,1	25145,6	24775,0	26058,7
				M51 Q25	23925,1	23918,7	23730,4	23710,4	23059,5	24151,9
				M91 Q25	23792,8	23586,6	23349,4	23376,9	22786,3	24168,9
				M182 Q25	23611,9	23348,9	23149,4	23160,5	22588,6	24203,4
		sVent		M51 Q21	23266,0	23255,5	23073,9	23050,2	22581,0	23560,5
				M91 Q21	23118,8	22989,0	22716,4	22756,7	22357,8	23578,5
				M182 Q21	22977,2	22769,2	22559,1	22580,6	22112,7	23616,3
				M51 Q25	23326,0	23309,2	23121,2	23110,5	22468,2	23560,7
				M91 Q25	23201,5	22986,5	22757,4	22799,2	22201,7	23579,0
				M182 Q25	23023,4	22755,6	22566,8	22590,2	22004,6	23618,7
E	D	cVent	21762,8	M51 Q21	17931,6	18890,2	17753,7	17855,8	16681,0	21953,1
				M91 Q21	17491,6	18540,5	17302,0	17403,8	15982,2	21872,3
				M182 Q21	16961,8	18092,3	16756,3	16864,8	15096,9	21617,9
				M51 Q25	16352,3	17390,5	16182,4	16276,4	14764,7	20880,5
				M91 Q25	15909,4	17030,5	15723,2	15827,6	14108,4	20825,9
				M182 Q25	15497,4	16673,9	15292,9	15413,3	13427,6	20748,4
		sVent		M51 Q21	19224,6	19803,4	19058,8	19162,1	18355,6	21796,0
				M91 Q21	18821,4	19481,7	18643,1	18746,3	17723,9	21770,1
				M182 Q21	18266,6	19018,1	18078,7	18178,8	16817,4	21637,0
				M51 Q25	18978,0	19543,2	18831,3	18912,9	18078,4	21751,7
				M91 Q25	18519,6	19177,5	18358,7	18446,0	17412,5	21716,0
				M182 Q25	18013,7	18755,3	17836,8	17929,3	16590,6	21668,5
	F	cVent		M51 Q21	21561,7	21589,4	21304,1	21448,3	20675,5	21981,7
				M91 Q21	21390,4	21351,4	20941,8	21208,4	20471,9	21999,6
				M182 Q21	21208,2	21145,7	20770,0	21039,3	20168,3	22034,9
				M51 Q25	20577,5	20558,2	20314,0	20448,6	19508,4	20926,3
				M91 Q25	20401,4	20293,1	19926,1	20151,9	19286,0	20946,7
				M182 Q25	20154,9	20089,4	19720,0	19974,9	19031,5	20991,5
		sVent		M51 Q21	21464,9	21449,2	21220,0	21359,4	20686,7	21827,8
				M91 Q21	21349,7	21265,8	20934,1	21189,6	20529,0	21876,8
				M182 Q21	21207,3	21103,4	20808,0	21060,7	20298,9	21980,4
				M51 Q25	21529,7	21491,0	21288,0	21416,9	20638,3	21827,9
				M91 Q25	21411,8	21311,7	21007,6	21226,0	20457,5	21877,2
				M182 Q25	21223,0	21134,7	20832,5	21066,6	20243,5	21982,6

S	D	cVent	M51 Q21	17821,1	12911,6	12966,7	14377,3	12775,9	10390,6	19838,0
			M91 Q21		12489,2	12474,1	14042,7	12354,6	9657,8	19687,1
			M182 Q21		12130,3	11971,0	13703,9	11969,2	8858,4	19457,3
			M51 Q25		11524,1	11458,8	12765,0	11341,8	8980,6	18276,4
			M91 Q25		11102,4	10979,1	12420,1	10911,5	8279,7	18178,3
			M182 Q25		10723,9	10543,7	12145,8	10546,6	7705,5	18022,1
		sVent	M51 Q21		11832,4	11857,0	13084,3	11694,1	9576,2	17720,3
			M91 Q21		11305,2	11285,8	12673,8	11160,8	8730,2	17571,6
			M182 Q21		10720,3	10575,6	12159,4	10539,0	7617,9	17350,5
			M51 Q25		11986,6	11970,7	12994,8	11812,5	9916,2	17790,9
			M91 Q25		11514,7	11447,1	12616,9	11328,0	9144,1	17680,5
			M182 Q25		11084,0	10928,3	12287,0	10893,1	8405,0	17497,1
	F	cVent	M51 Q21		19540,4	19618,9	19385,2	19372,4	18357,1	19924,5
			M91 Q21		19305,5	19249,2	18959,2	18997,8	17974,6	19911,7
			M182 Q21		19018,9	18867,4	18696,4	18690,5	17556,8	19882,8
			M51 Q25		17944,1	17963,5	17779,1	17764,5	16562,6	18265,2
			M91 Q25		17719,2	17526,5	17386,4	17346,1	16097,8	18251,9
			M182 Q25		17358,5	17124,2	17058,2	16977,4	15680,2	18223,6
		sVent	M51 Q21		17391,2	17439,1	17237,2	17223,0	16184,7	17812,3
			M91 Q21		17145,7	17046,0	16812,3	16844,7	15815,1	17805,9
			M182 Q21		16869,8	16679,5	16562,7	16550,0	15407,0	17793,5
			M51 Q25		17500,6	17510,3	17333,0	17326,2	16170,6	17812,4
			M91 Q25		17294,8	17108,9	16966,6	16944,0	15729,9	17806,2
			M182 Q25		16944,8	16716,9	16642,4	16580,4	15324,2	17794,6
O	D	cVent	M51 Q21	22657,6	20563,0	20770,1	20414,1	21522,3	19225,9	24780,5
			M91 Q21		20145,6	20329,2	19979,8	21209,8	18570,2	24684,0
			M182 Q21		19730,8	19866,5	19556,1	20894,4	17864,4	24441,2
			M51 Q25		18371,1	18464,3	18218,1	19360,4	16708,0	23062,5
			M91 Q25		18008,3	18075,1	17841,5	19089,0	16113,0	23000,1
			M182 Q25		17621,4	17662,9	17448,1	18787,8	15553,9	22920,1
		sVent	M51 Q21		19570,0	19689,6	19423,5	20249,5	18551,0	22597,1
			M91 Q21		19079,5	19211,9	18930,5	19876,0	17895,0	22504,9
			M182 Q21		18434,5	18562,6	18280,7	19372,3	16937,4	22271,6
			M51 Q25		19017,3	19161,8	18902,6	19730,2	17989,7	22600,8
			M91 Q25		18570,0	18700,8	18441,8	19397,2	17291,7	22521,2
			M182 Q25		18072,1	18165,5	17929,8	19012,0	16507,9	22408,6
	F	cVent	M51 Q21		24474,1	24656,7	24313,8	24464,6	23612,3	24847,7
			M91 Q21		24228,3	24356,3	23786,9	24182,0	23246,4	24854,4
			M182 Q21		23960,9	24060,6	23500,7	23972,7	22863,9	24867,2
			M51 Q25		22765,5	22885,7	22575,6	22731,0	21658,0	23086,7
			M91 Q25		22553,1	22506,4	22072,7	22430,7	21206,5	23093,0
			M182 Q25		22225,7	22196,9	21745,7	22196,0	20850,5	23105,7
		sVent	M51 Q21		22276,5	22428,7	22104,4	22270,0	21392,6	22679,9
			M91 Q21		22026,5	22110,1	21579,5	21992,2	21046,8	22696,5
			M182 Q21		21770,2	21832,0	21315,8	21797,6	20685,3	22732,0
			M51 Q25		22370,2	22482,7	22182,2	22333,4	21325,3	22680,1
			M91 Q25		22180,6	22152,6	21728,8	22065,3	20901,2	22697,0
			M182 Q25		21871,4	21853,2	21406,2	21829,7	20563,4	22734,3

Tabela B. 2 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito individual da inserção de PCM para o módulo localizado no Porto (apresentação em escala de cores).

Porto			sPCM	N	E	S	O	Cob	Pav	
N	D	cVent	M51 Q21	28772,4	29548,8	29181,5	29079,5	29069,2	28593,9	30879,3
			M91 Q21		29371,3	28964,5	28883,0	28868,1	28377,4	30888,0
			M182 Q21		29167,3	28724,1	28700,5	28651,7	28250,8	30922,5
			M51 Q25		27751,7	27388,2	27297,7	27221,7	26840,0	29107,2
			M91 Q25		27513,6	27078,4	27000,1	26905,2	26403,1	29084,6
			M182 Q25		27234,4	26679,9	26649,4	26528,6	25984,3	29066,7
	sVent	M51 Q21	27157,3		26622,9	26524,8	26522,9	25914,5	28758,0	
		M91 Q21	26996,8		26415,1	26340,1	26322,4	25709,7	28731,9	
		M182 Q21	26762,0		26115,8	26094,1	26043,5	25471,9	28713,8	
		M51 Q25	27461,4		27072,0	26984,0	26931,0	26537,1	28767,0	
		M91 Q25	27231,6		26766,8	26699,8	26627,6	26143,0	28744,1	
		M182 Q25	26953,2		26379,6	26361,6	26263,0	25742,1	28728,9	
	F	cVent	M51 Q21		30732,8	30716,1	30532,9	30497,0	29967,2	30924,5
			M91 Q21		30640,2	30494,7	30226,6	30245,2	29699,0	30969,9
			M182 Q21		30474,2	30247,8	30027,1	30035,2	29555,1	31041,8
			M51 Q25		28962,3	28918,1	28720,7	28658,6	27881,3	29128,8
			M91 Q25		28867,8	28678,0	28410,3	28380,1	27551,7	29156,8
			M182 Q25		28657,8	28379,3	28157,4	28109,8	27390,5	29226,3
	sVent	M51 Q21	28557,9		28468,6	28279,1	28240,4	27638,3	28806,3	
		M91 Q21	28441,0		28193,2	27925,8	27970,8	27360,7	28843,3	
		M182 Q21	28247,3		27922,1	27719,9	27753,6	27177,2	28897,1	
		M51 Q25	28634,6		28571,5	28374,7	28326,8	27571,3	28806,5	
		M91 Q25	28539,7		28337,4	28074,4	28068,2	27255,2	28832,2	
		M182 Q25	28327,8		28038,1	27827,4	27802,3	27101,4	28898,9	
E	D	cVent	M51 Q21	24491,0	22445,1	23264,8	22297,8	22370,5	21280,0	26291,7
			M91 Q21		22209,4	23067,3	22068,2	22146,7	20926,8	26253,4
			M182 Q21		21928,2	22865,8	21820,2	21891,8	20601,7	26194,3
			M51 Q25		20948,5	21673,3	20756,9	20834,7	19724,5	24627,0
			M91 Q25		20520,9	21347,9	20338,0	20421,7	19163,9	24600,9
			M182 Q25		20054,6	20968,2	19886,1	19965,1	18628,8	24580,5
	sVent	M51 Q21	21254,5		21978,1	21102,2	21169,8	20290,7	24507,0	
		M91 Q21	20950,1		21736,5	20801,4	20864,2	19811,8	24458,1	
		M182 Q21	20566,1		21428,0	20420,6	20476,9	19223,1	24367,2	
		M51 Q25	21296,1		21910,7	21126,2	21201,9	20297,8	24458,5	
		M91 Q25	20864,3		21574,4	20691,4	20771,6	19747,4	24416,7	
		M182 Q25	20365,4		21186,0	20231,8	20302,5	19165,6	24388,9	
	F	cVent	M51 Q21		25960,0	25938,2	25663,7	25763,8	24919,6	26303,1
			M91 Q21		25805,6	25712,0	25289,3	25528,9	24684,1	26325,3
			M182 Q21		25520,4	25491,6	25070,6	25314,1	24454,2	26371,1
			M51 Q25		24413,2	24350,1	24088,3	24163,4	23086,9	24658,9
			M91 Q25		24261,3	24137,0	23722,9	23886,2	22811,0	24678,5
			M182 Q25		23924,0	23864,8	23409,9	23587,4	22612,7	24722,1
	sVent	M51 Q21	24177,2		24137,9	23855,0	23948,8	23088,7	24522,9	
		M91 Q21	24008,1		23899,9	23461,4	23703,6	22863,5	24548,0	
		M182 Q21	23695,5		23674,5	23241,6	23480,2	22633,8	24598,7	
		M51 Q25	24289,2		24221,8	23968,1	24057,1	23039,5	24523,1	
		M91 Q25	24144,7		24032,2	23635,7	23810,5	22776,7	24548,4	
		M182 Q25	23819,8		23761,0	23325,6	23503,8	22590,8	24601,2	

S	D	cVent	M51 Q21	21294,4	16194,1	16115,6	17625,6	16030,3	13061,5	23317,9
			M91 Q21		15839,8	15712,2	17353,3	15682,4	12494,1	23207,8
			M182 Q21		15491,8	15315,0	17102,4	15363,2	12044,9	22997,0
			M51 Q25		15456,1	15340,6	16514,9	15185,7	12787,2	21518,6
			M91 Q25		14842,6	14679,9	16047,7	14566,9	11894,8	21384,3
			M182 Q25		14203,6	13976,5	15568,3	13948,8	11081,0	21184,8
		sVent	M51 Q21		14666,9	14631,7	16011,5	14502,0	11863,1	21209,7
			M91 Q21		14242,6	14154,2	15677,1	14066,9	11140,6	21083,3
			M182 Q21		13836,2	13652,5	15338,2	13644,0	10432,6	20831,0
			M51 Q25		15598,6	15502,1	16576,6	15356,7	13166,7	21195,7
			M91 Q25		14926,7	14797,0	16073,0	14683,9	12244,2	21062,0
			M182 Q25		14271,3	14076,3	15556,4	14039,9	11381,9	20877,2
	F	cVent	M51 Q21		23054,9	23007,2	22788,9	22772,8	21529,8	23376,8
			M91 Q21		22862,3	22638,9	22361,9	22415,5	21033,2	23367,8
			M182 Q21		22475,8	22191,9	22048,8	22035,8	20648,5	23346,7
			M51 Q25		21354,6	21282,6	21066,6	21026,0	19565,6	21569,2
			M91 Q25		21170,8	20944,9	20700,9	20653,7	18995,9	21556,8
			M182 Q25		20735,4	20448,5	20317,1	20194,8	18593,4	21528,9
		sVent	M51 Q21		20938,5	20855,1	20655,8	20621,8	19334,7	21280,2
			M91 Q21		20723,8	20452,9	20210,4	20246,3	18849,1	21269,7
			M182 Q21		20306,3	19994,4	19898,0	19860,3	18455,9	21247,8
			M51 Q25		21069,9	20994,1	20780,5	20760,4	19356,3	21280,3
			M91 Q25		20893,2	20682,4	20439,1	20419,1	18808,1	21269,9
			M182 Q25		20466,3	20191,0	20058,0	19958,5	18417,4	21249,0
O	D	cVent	M51 Q21	27476,8	24697,4	24792,0	24521,6	25772,3	22845,7	29558,9
			M91 Q21		24440,8	24496,5	24230,3	25577,8	22296,4	29501,6
			M182 Q21		24175,8	24194,1	23954,5	25385,0	21824,6	29429,8
			M51 Q25		22975,3	23008,3	22773,7	23885,0	21043,2	27661,9
			M91 Q25		22602,5	22617,5	22393,4	23617,9	20487,9	27601,5
			M182 Q25		22144,5	22150,8	21932,6	23276,5	19922,3	27534,0
		sVent	M51 Q21		23685,6	23780,9	23541,2	24509,4	22341,2	27467,3
			M91 Q21		23313,7	23396,2	23147,7	24228,1	21731,3	27390,3
			M182 Q21		22824,9	22868,5	22627,0	23849,8	20906,0	27268,6
			M51 Q25		23541,6	23609,0	23379,8	24292,8	22059,2	27413,9
			M91 Q25		23103,6	23161,6	22933,7	23962,8	21448,1	27337,3
			M182 Q25		22625,8	22673,2	22453,4	23599,9	20747,4	27264,8
	F	cVent	M51 Q21		29265,3	29340,6	29011,7	29137,8	28127,5	29574,2
			M91 Q21		29106,1	29053,3	28510,4	28882,7	27615,2	29594,2
			M182 Q21		28797,4	28718,7	28185,8	28654,5	27241,1	29636,6
			M51 Q25		27488,7	27534,0	27202,7	27310,3	26029,2	27698,0
			M91 Q25		27347,8	27273,2	26782,1	27062,7	25437,4	27714,6
			M182 Q25		26999,2	26909,3	26409,2	26789,7	25096,6	27753,4
		sVent	M51 Q21		27206,0	27255,1	26926,6	27064,7	26013,4	27511,3
			M91 Q21		27038,7	26949,2	26413,3	26809,3	25532,4	27535,9
			M182 Q21		26701,2	26604,7	26092,0	26576,9	25177,9	27590,0
			M51 Q25		27314,0	27361,9	27034,1	27150,3	25974,7	27511,4
			M91 Q25		27184,9	27144,7	26665,0	26939,6	25417,5	27536,4
			M182 Q25		26861,5	26798,0	26310,3	26664,2	25092,8	27592,6

Tabela B. 3 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito individual da inserção de PCM para o módulo localizado em Évora (apresentação em escala de cores).

Évora			sPCM	N	E	S	O	Cob	Pav	
Z	D	cVent	M51 Q21	25801,7	26152,3	25701,2	25591,7	25567,0	25059,4	27833,0
			M91 Q21		25909,4	25384,4	25291,5	25248,8	24677,9	27799,3
			M182 Q21		25595,7	24983,3	24917,1	24853,7	24247,3	27656,7
			M51 Q25		24250,4	23746,5	23684,2	23617,9	23173,1	26243,3
			M91 Q25		23957,8	23338,0	23286,4	23209,5	22665,0	26199,5
			M182 Q25		23572,0	22820,5	22804,3	22704,6	22134,5	26196,4
		sVent	M51 Q21		24286,9	23841,7	23745,5	23715,6	23281,7	25759,6
			M91 Q21		23998,6	23458,3	23370,7	23314,0	22797,1	25727,0
			M182 Q21		23596,0	22938,0	22870,3	22778,5	22158,1	25586,6
			M51 Q25		23935,7	23473,3	23402,1	23336,8	23025,6	25688,8
			M91 Q25		23629,5	23054,1	22990,0	22912,4	22525,7	25629,4
			M182 Q25		23244,0	22540,1	22500,3	22402,4	21925,8	25607,6
	F	cVent	M51 Q21		27661,6	27673,0	27518,8	27467,9	27027,9	27911,2
			M91 Q21		27535,0	27445,2	27216,0	27182,8	26758,3	27939,1
			M182 Q21		27346,3	27152,9	26957,3	26910,6	26435,0	27996,6
			M51 Q25		26099,4	26076,3	25921,8	25862,0	25190,0	26350,2
			M91 Q25		25969,1	25768,9	25559,6	25502,6	24854,5	26374,8
			M182 Q25		25754,3	25457,2	25273,2	25219,3	24562,6	26427,7
		sVent	M51 Q21		25536,7	25506,3	25356,4	25307,2	24822,5	25839,2
			M91 Q21		25393,5	25233,8	25018,3	24991,9	24542,2	25867,2
			M182 Q21		25196,8	24930,4	24753,9	24720,2	24185,5	25926,0
			M51 Q25		25583,1	25549,4	25394,4	25342,2	24685,2	25839,4
			M91 Q25		25455,7	25250,7	25045,9	24999,5	24357,5	25867,6
			M182 Q25		25236,2	24935,3	24757,2	24715,1	24064,5	25928,4
E	D	cVent	M51 Q21	24283,0	21513,6	22375,3	21400,3	21428,9	20573,4	25080,8
			M91 Q21		21037,3	22000,9	20921,9	20942,4	19822,7	24999,6
			M182 Q21		20454,8	21528,0	20327,5	20343,3	18898,6	24787,3
			M51 Q25		19904,1	20843,6	19773,9	19820,9	18628,7	23987,7
			M91 Q25		19448,7	20477,5	19282,5	19346,0	17919,2	23934,0
			M182 Q25		18987,0	20098,3	18802,1	18857,4	17142,5	23865,1
		sVent	M51 Q21		21741,0	22342,1	21624,3	21657,5	21042,6	24260,9
			M91 Q21		21290,2	21984,5	21171,2	21194,4	20333,4	24227,9
			M182 Q21		20693,8	21494,1	20565,3	20572,1	19368,1	24109,1
			M51 Q25		21386,1	21995,4	21265,9	21306,8	20588,9	24266,8
			M91 Q25		20945,4	21640,6	20800,3	20845,1	19913,2	24234,8
			M182 Q25		20431,0	21223,2	20270,6	20299,6	19080,9	24211,5
	F	cVent	M51 Q21		24759,6	24810,1	24566,7	24625,4	23860,5	25199,1
			M91 Q21		24595,1	24595,1	24224,1	24356,1	23577,4	25230,2
			M182 Q21		24349,5	24368,6	23966,2	24116,9	23163,2	25296,8
			M51 Q25		23683,3	23693,8	23471,1	23519,0	22559,5	24065,5
			M91 Q25		23519,4	23471,9	23123,1	23210,9	22264,2	24098,3
			M182 Q25		23241,3	23240,5	22852,1	22972,2	21924,9	24170,3
		sVent	M51 Q21		23927,6	23961,3	23735,3	23790,3	23071,1	24354,2
			M91 Q21		23771,5	23760,2	23414,1	23537,9	22832,9	24405,8
			M182 Q21		23537,6	23557,0	23190,7	23329,3	22483,5	24517,3
			M51 Q25		23999,7	24004,6	23798,9	23843,7	22973,0	24354,3
			M91 Q25		23857,1	23816,4	23498,6	23577,6	22711,2	24406,2
			M182 Q25		23591,9	23587,6	23231,1	23333,4	22416,5	24519,7

S	D	cVent	M51 Q21	20783,7	15782,0	15807,2	17170,0	15646,6	13411,0	22275,5
			M91 Q21		15237,1	15212,0	16744,4	15078,8	12531,9	22126,9
			M182 Q21		14620,8	14511,1	16233,2	14424,6	11528,6	21845,5
			M51 Q25		14699,9	14640,1	15885,6	14468,3	12180,1	20800,3
			M91 Q25		13990,5	13880,7	15341,6	13743,3	11144,4	20646,2
			M182 Q25		13272,8	13090,1	14784,0	13021,4	10115,4	20447,8
		sVent	M51 Q21		15016,9	15020,8	16224,6	14879,6	12851,9	20691,1
			M91 Q21		14466,3	14431,5	15790,9	14302,1	11971,8	20564,4
			M182 Q21		13765,2	13640,8	15198,3	13547,8	10823,6	20327,8
			M51 Q25		15414,0	15378,5	16374,0	15201,2	13332,1	20633,6
			M91 Q25		14698,3	14628,1	15825,0	14474,1	12314,3	20489,4
			M182 Q25		13956,8	13807,7	15230,6	13713,0	11218,8	20287,2
	F	cVent	M51 Q21		21995,0	22034,0	21855,7	21797,5	20738,8	22394,4
			M91 Q21		21778,1	21694,4	21478,2	21421,4	20273,2	22393,0
			M182 Q21		21436,7	21251,8	21142,2	21022,4	19722,8	22391,5
			M51 Q25		20600,5	20594,7	20460,9	20384,7	19136,4	20951,1
			M91 Q25		20392,9	20231,4	20111,7	19967,3	18599,6	20950,5
			M182 Q25		20009,6	19786,6	19743,9	19554,6	18071,9	20948,6
		sVent	M51 Q21		20373,6	20384,0	20227,8	20170,1	19094,3	20796,7
			M91 Q21		20147,1	20028,8	19847,2	19786,4	18652,1	20807,3
			M182 Q21		19800,2	19598,8	19525,3	19406,5	18126,5	20829,9
			M51 Q25		20458,8	20449,3	20312,1	20247,7	19050,7	20796,8
			M91 Q25		20262,2	20115,9	19986,9	19860,6	18543,5	20807,7
			M182 Q25		19881,3	19671,8	19618,3	19444,8	18041,9	20831,5
O	D	cVent	M51 Q21	26919,0	23718,3	23871,1	23610,1	24740,5	22370,7	28127,6
			M91 Q21		23161,6	23294,7	23027,1	24314,8	21461,1	28011,3
			M182 Q21		22537,5	22624,6	22368,8	23825,5	20374,3	27768,1
			M51 Q25		21814,1	21898,7	21682,2	22868,6	20067,9	26654,5
			M91 Q25		21323,5	21371,6	21153,1	22485,3	19250,1	26556,9
			M182 Q25		20810,8	20812,7	20592,2	22081,5	18381,4	26445,9
		sVent	M51 Q21		23625,5	23714,1	23506,7	24358,2	22567,3	26860,9
			M91 Q21		23069,1	23162,6	22934,0	23923,2	21757,4	26781,8
			M182 Q21		22333,3	22407,5	22176,9	23338,8	20601,2	26610,2
			M51 Q25		23282,4	23386,4	23172,6	23999,4	22164,2	26861,5
			M91 Q25		22759,9	22842,2	22623,4	23593,0	21343,6	26781,4
			M182 Q25		22116,6	22153,1	21933,0	23091,3	20299,1	26691,4
	F	cVent	M51 Q21		27858,4	27991,7	27707,4	27827,8	26932,9	28261,6
			M91 Q21		27645,4	27699,0	27243,7	27545,9	26472,8	28282,3
			M182 Q21		27334,6	27339,3	26873,8	27298,9	25955,3	28324,3
			M51 Q25		26397,5	26481,6	26226,1	26340,5	25210,1	26747,9
			M91 Q25		26209,7	26163,2	25792,0	26044,5	24683,0	26769,8
			M182 Q25		25863,5	25806,9	25406,9	25775,4	24223,1	26816,1
		sVent	M51 Q21		26567,4	26678,7	26403,3	26527,9	25642,3	26974,8
			M91 Q21		26360,4	26386,5	25954,7	26259,2	25228,9	27017,1
			M182 Q21		26056,0	26050,5	25617,1	26019,6	24772,1	27107,0
			M51 Q25		26640,1	26724,5	26472,7	26578,1	25543,1	26975,0
			M91 Q25		26477,1	26457,7	26096,4	26320,8	25064,6	27017,6
			M182 Q25		26154,6	26116,8	25726,6	26054,6	24647,8	27109,3

Tabela B. 4 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito combinado da inserção de PCM em duas fachadas para o módulo localizado em Lisboa (apresentação em escala de cores).

Lisboa		sPCM	NE	NS	NO	Ncob	ES	EO	Ecob	SO	Scob	Ocob
N	M51 Q25 sVent	23536,4	20997,2	20936,7	20907,3	20825,0	20842,5	20811,5	20760,0	20768,0	20722,9	20692,2
	M91 Q25 sVent		20624,7	20575,1	20530,2	20420,8	20456,9	20407,7	20345,1	20373,9	20325,6	20271,4
	M182 Q25 sVent		20122,4	20103,6	20024,1	19904,1	19947,4	19858,4	19813,0	19855,1	19827,7	19726,8
E	M51 Q25	21762,8	14477,7	13807,2	13862,8	13102,9	14366,6	14428,8	13513,5	13774,3	13062,2	13077,0
	M91 Q25		13852,8	13156,0	13201,5	12343,3	13741,3	13803,3	12769,7	13123,8	12314,1	12320,9
	M182 Q25		13195,0	12467,9	12515,7	11502,3	13083,7	13142,3	11927,2	12437,1	11488,3	11486,8
S	M51 Q25	17821,1	8691,5	9265,6	8631,0	7378,7	9218,4	8590,0	7363,7	9151,0	7698,2	7320,3
	M91 Q25		7954,3	8614,3	7920,5	6564,0	8541,7	7861,1	6541,6	8501,0	6916,0	6516,2
	M182 Q25		7165,5	7929,9	7174,7	5710,4	7820,6	7079,5	5666,6	7822,8	6117,3	5666,8
	M51 Q21 sVent		8823,8	9424,1	8719,8	7646,8	9437,2	8730,3	7677,2	9322,3	8024,6	7575,4
	M91 Q21 sVent		7892,1	8592,6	7801,8	6476,0	8573,1	7785,0	6477,2	8477,3	6931,1	6388,6
	M182 Q21 sVent		6740,8	7603,1	6703,0	5041,4	7501,7	6608,5	4988,2	7465,4	5553,5	4937,1
O	M51 Q25	22657,6	16226,4	16078,8	16659,7	15307,1	16138,9	16731,4	15350,0	16559,7	15262,7	15634,9
	M91 Q25		15636,8	15492,8	16133,7	14625,1	15546,7	16187,9	14673,1	16024,4	14599,5	14977,4
	M182 Q25		14979,4	14857,0	15538,6	13906,8	14929,2	15602,6	13978,3	15460,1	13924,2	14319,3

Tabela B. 5 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito combinado da inserção de PCM em duas fachadas para o módulo localizado no Porto (apresentação em escala de cores).

Porto		sPCM	NE	NS	NO	Ncob	ES	EO	Ecob	SO	Scob	Ocob
N	M51 Q21 sVent	28772,4	25811,7	25751,3	25735,8	25394,9	25476,4	25454,1	25206,1	25406,9	25179,0	25150,8
	M91 Q21 sVent		25500,7	25466,6	25435,8	25102,9	25160,6	25121,6	24902,3	25102,7	24904,8	24857,1
	M182 Q21 sVent		25026,7	25043,9	24973,5	24701,7	24705,6	24613,8	24446,0	24660,3	24500,3	24413,9
E	M51 Q25 cVent	24491,0	19766,6	19357,8	19388,2	18884,6	19656,2	19692,9	19079,2	19306,4	18860,8	18863,3
	M91 Q25 cVent		19132,5	18689,8	18715,3	18202,7	19040,2	19075,3	18421,8	18653,4	18204,1	18189,0
	M182 Q25 cVent		18468,4	18025,1	18029,6	17512,6	18413,5	18427,4	17772,0	18011,5	17567,2	17519,0
S	M51 Q21 sVent	821294,4	11350,7	12016,8	11254,6	9929,3	11990,8	11231,6	9963,0	11896,4	10284,7	9851,3
	M91 Q21 sVent		10545,6	11330,1	10474,4	8968,3	11274,2	10425,6	8970,3	11201,8	9389,4	8878,3
	M182 Q21 sVent		9760,2	10686,0	9753,7	8031,1	10544,9	9630,8	7982,8	10547,4	8494,6	7941,1
O	M51 Q25 cVent	27476,8	20961,7	20809,0	21363,1	19860,9	20843,7	21397,0	19885,9	21225,8	19795,2	20131,0
	M91 Q25 cVent		20317,8	20174,5	20791,3	19144,0	20208,5	20815,6	19174,9	20653,3	19102,3	19456,3
	M182 Q25 cVent		19578,2	19448,9	20104,7	18361,4	19496,4	20135,0	18408,4	19990,3	18350,4	18740,0

Tabela B. 6 Número de °C.hora de desconforto obtido para o estudo do efeito combinado da inserção de PCM em duas fachadas para o módulo localizado em Évora (apresentação em escala de cores).

Évora		sPCM	NE	NS	NO	Ncob	ES	EO	Ecob	SO	Scob	Ocob
N	M51 Q25 sVent	25801,7	22802,8	22760,1	22704,6	22590,0	22611,7	22558,1	22486,4	22529,8	22460,5	22412,7
	M91 Q25 sVent		22212,9	22183,2	22107,2	21987,4	21999,9	21925,6	21857,0	21905,5	21855,0	21781,1
	M182 Q25 sVent		21450,7	21450,1	21345,3	21201,1	21203,2	21092,2	21036,2	21113,5	21082,5	20972,1
E	M51 Q25 cVent	24283,0	18317,7	17776,7	17792,7	17267,0	18253,9	18270,2	17618,9	17745,5	17257,8	17244,2
	M91 Q25 cVent		17646,6	17045,1	17057,5	16417,3	17568,7	17586,6	16798,6	17013,6	16420,8	16403,7
	M182 Q25 cVent		16888,2	16215,4	16212,2	15456,1	16813,0	16819,8	15875,7	16176,4	15494,7	15451,7
S	M51 Q25 cVent	20783,7	11768,8	12394,7	11668,0	10419,7	12359,5	11637,0	10416,6	12249,2	10815,3	10353,8
	M91 Q25 cVent		10598,8	11317,3	10518,8	9139,4	11253,9	10467,1	9124,1	11166,0	9572,9	9079,4
	M182 Q25 cVent		9338,6	10191,5	9308,3	7818,9	10069,6	9213,2	7777,3	10031,4	8289,1	7762,1
O	M51 Q25 cVent	26919,0	19347,9	19200,5	19880,3	18307,2	19269,7	19958,9	18349,9	19791,8	18259,9	18741,8
	M91 Q25 cVent		18550,2	18408,0	19164,7	17318,5	18455,5	19208,8	17355,3	19048,1	17269,5	17790,7
	M182 Q25 cVent		17667,3	17535,3	18371,8	16272,8	17568,5	18392,5	16310,6	18242,8	16243,6	16780,9

C. Análise da quantidade de PCM

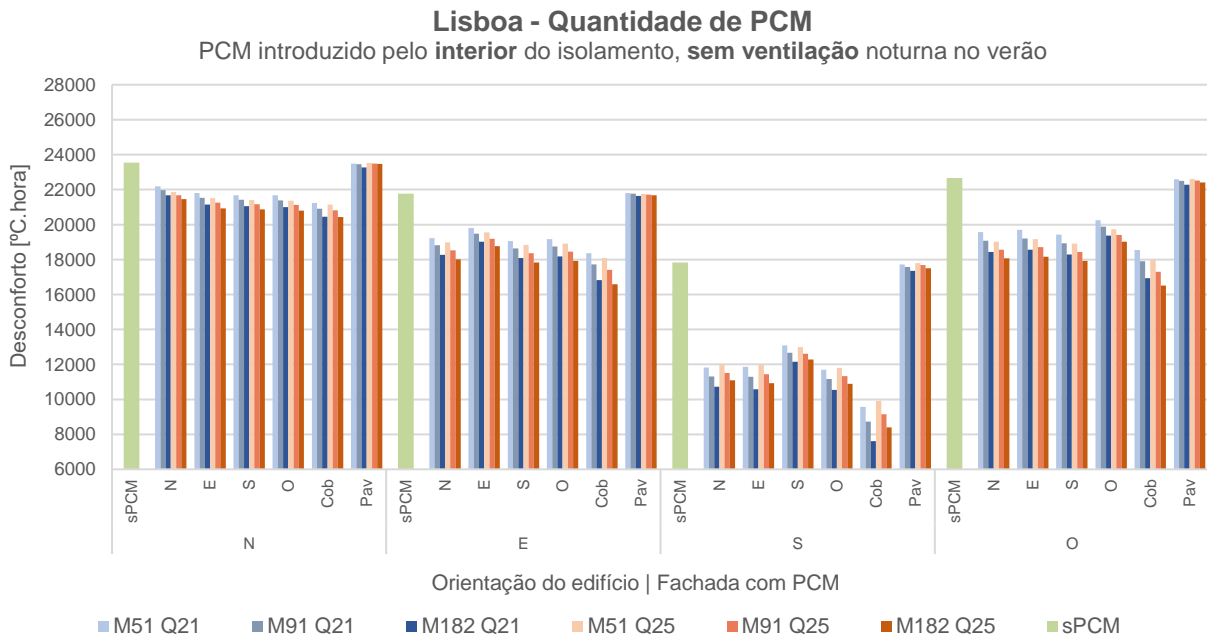


Figura C. 1 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para Lisboa.

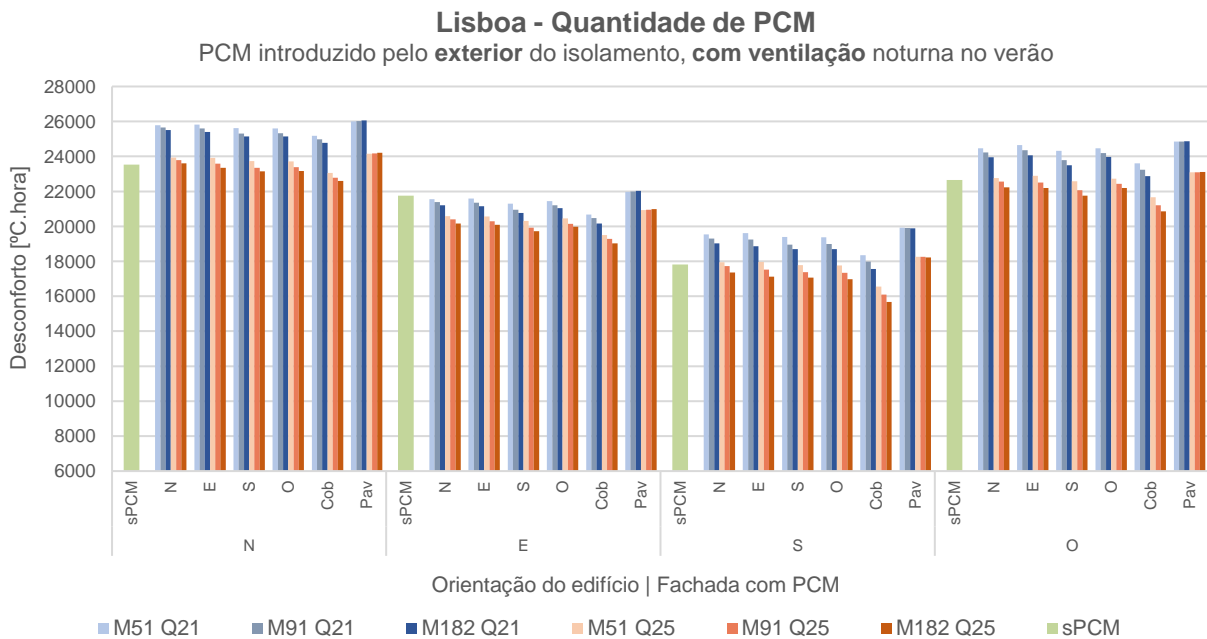


Figura C. 2 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para Lisboa.

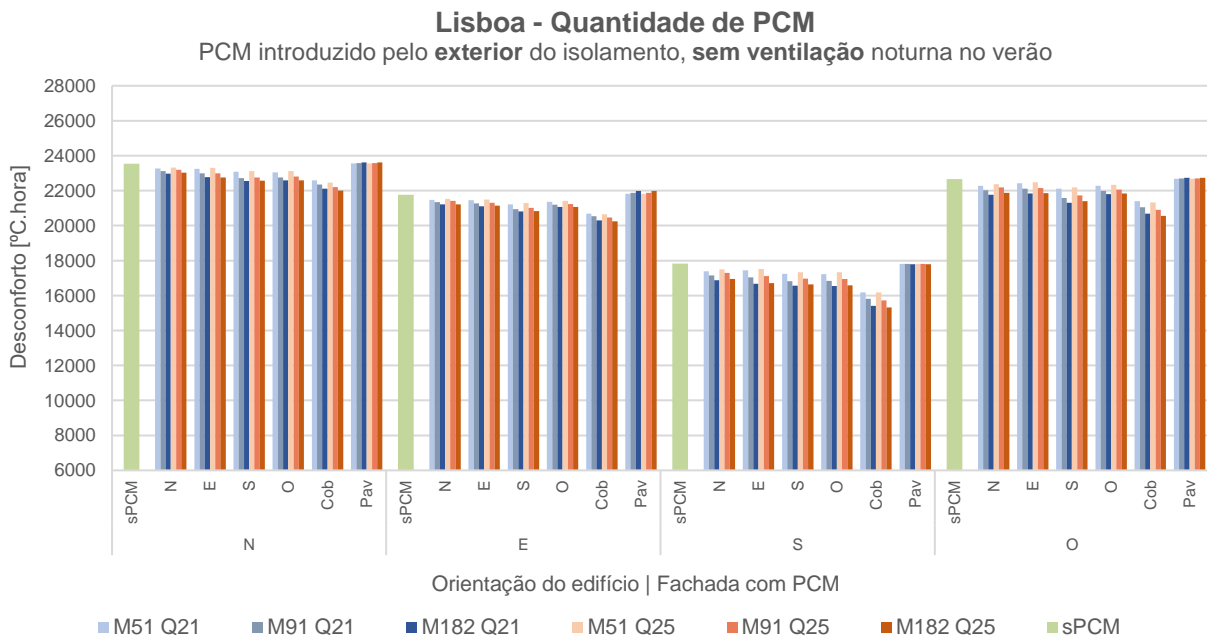


Figura C. 3 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para Lisboa.

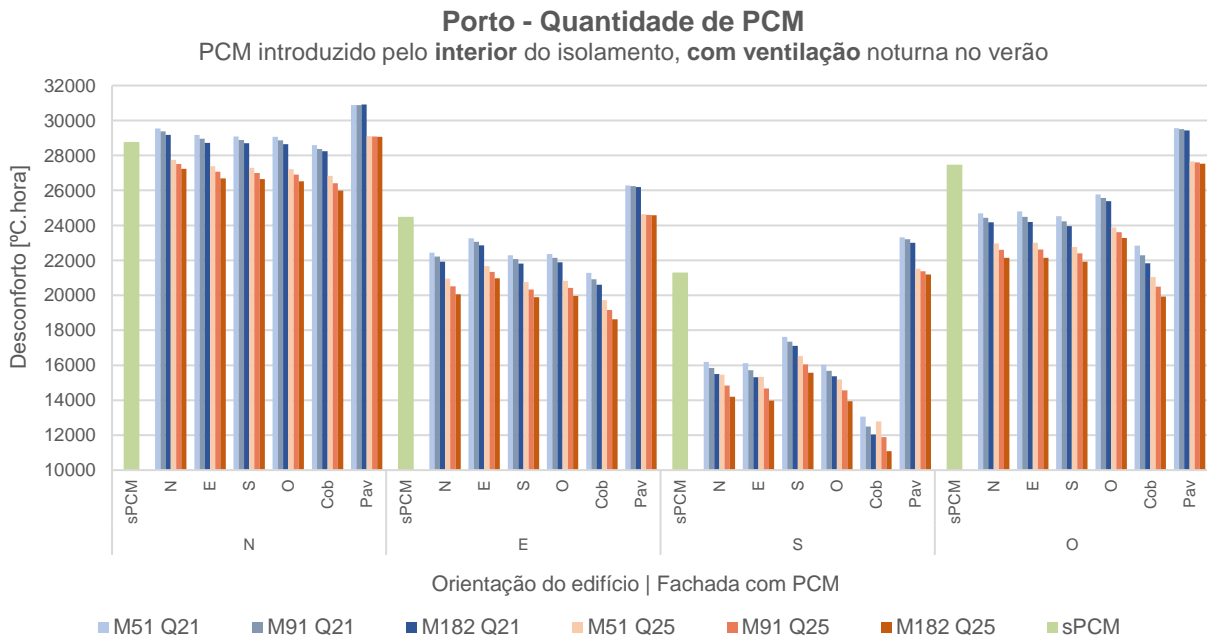


Figura C. 4 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para o Porto.

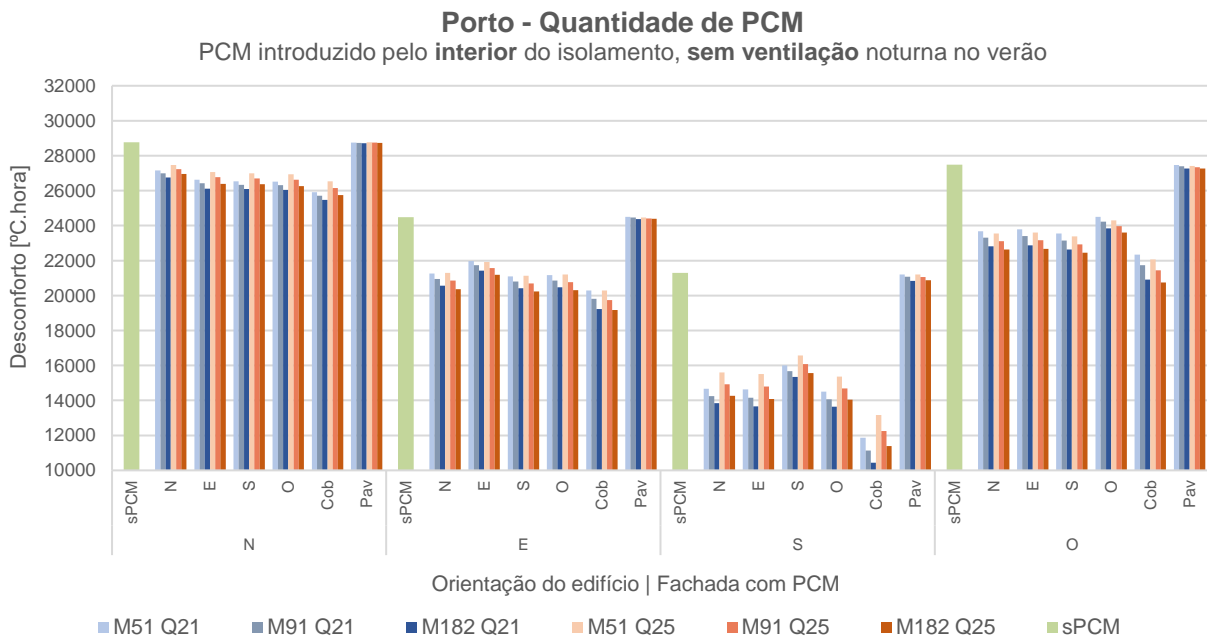


Figura C. 5 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para o Porto.

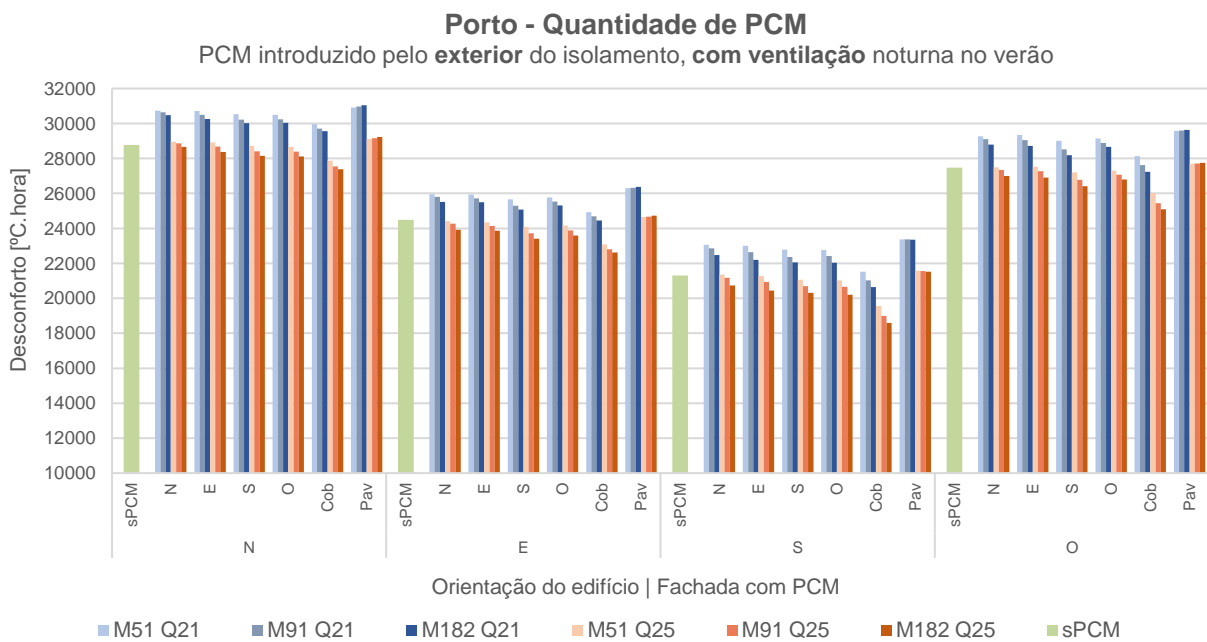


Figura C. 6 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para o Porto.

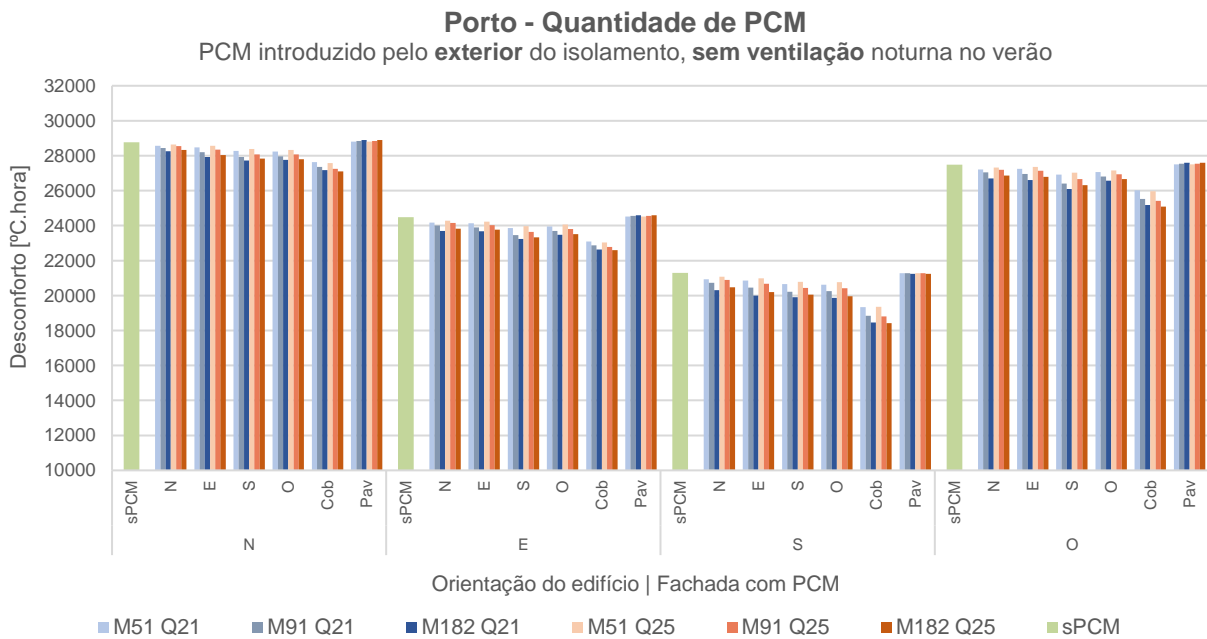


Figura C. 7 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para o Porto.

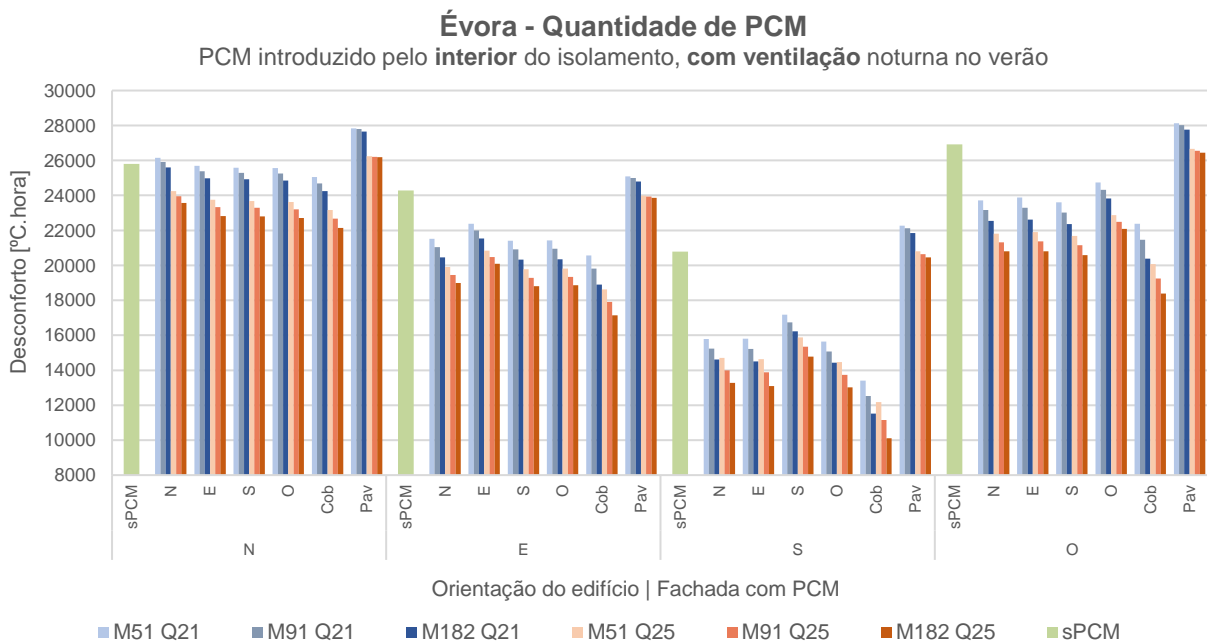


Figura C. 8 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para Évora.

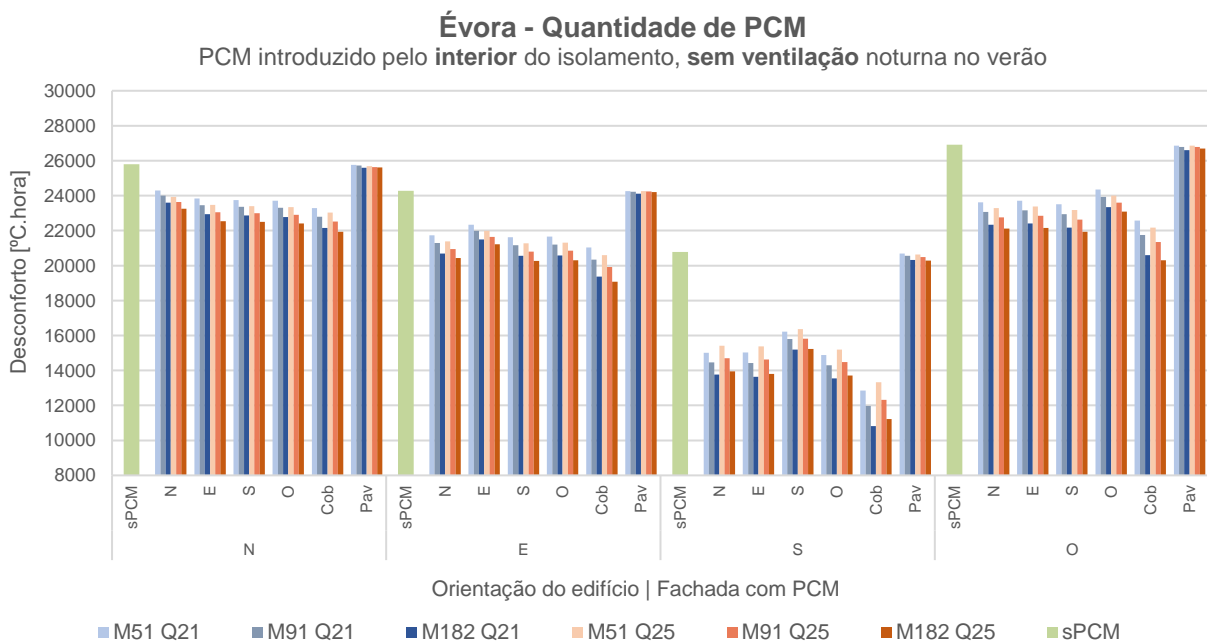


Figura C. 9 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície interna da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para Évora.

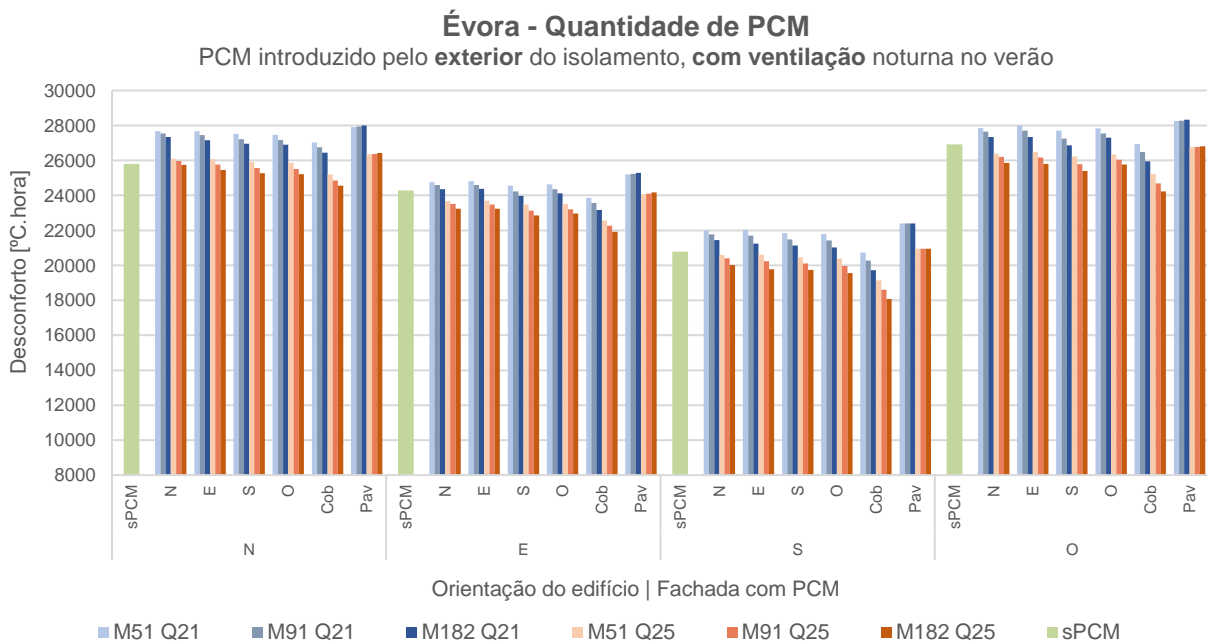


Figura C. 10 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, com ventilação noturna no verão, para Évora.

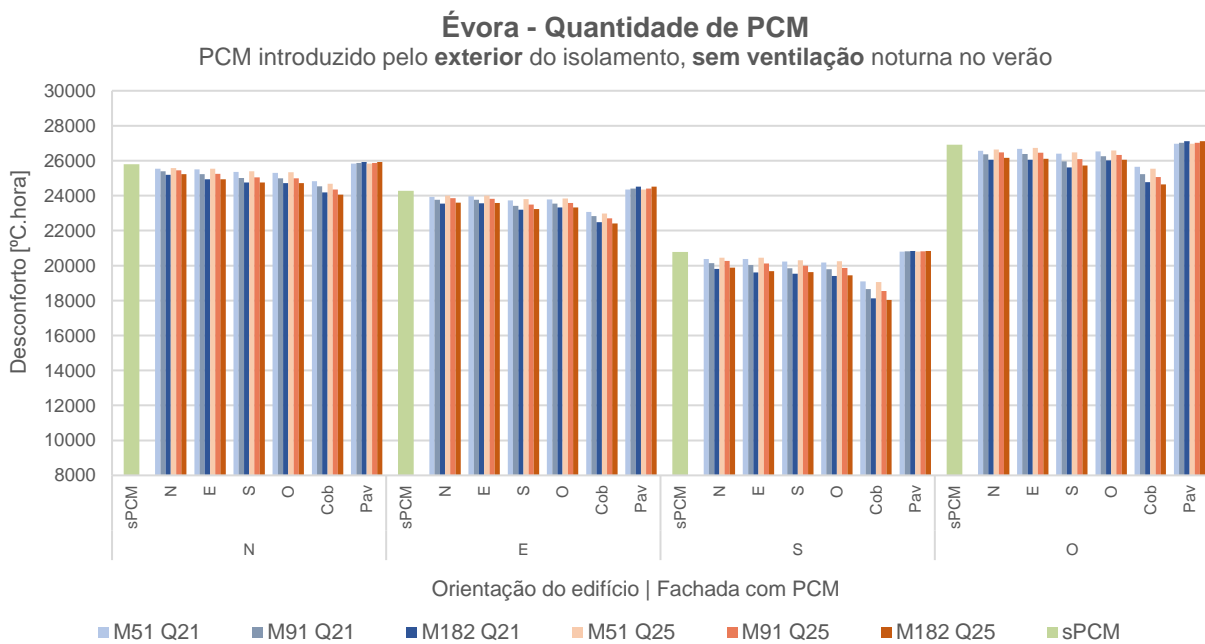


Figura C. 11 Resultados para a configuração com PCM introduzido junto à superfície externa da camada de isolamento, sem ventilação noturna no verão, para Évora.

D. Análise da localização do PCM

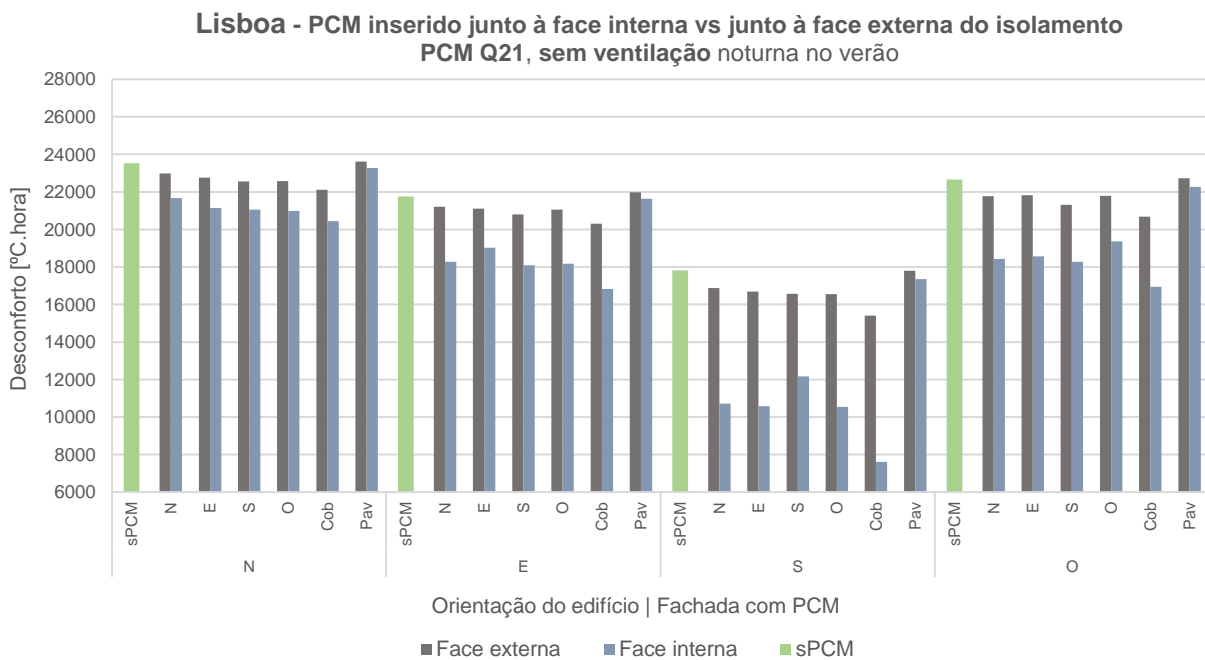


Figura D. 1 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado em Lisboa.

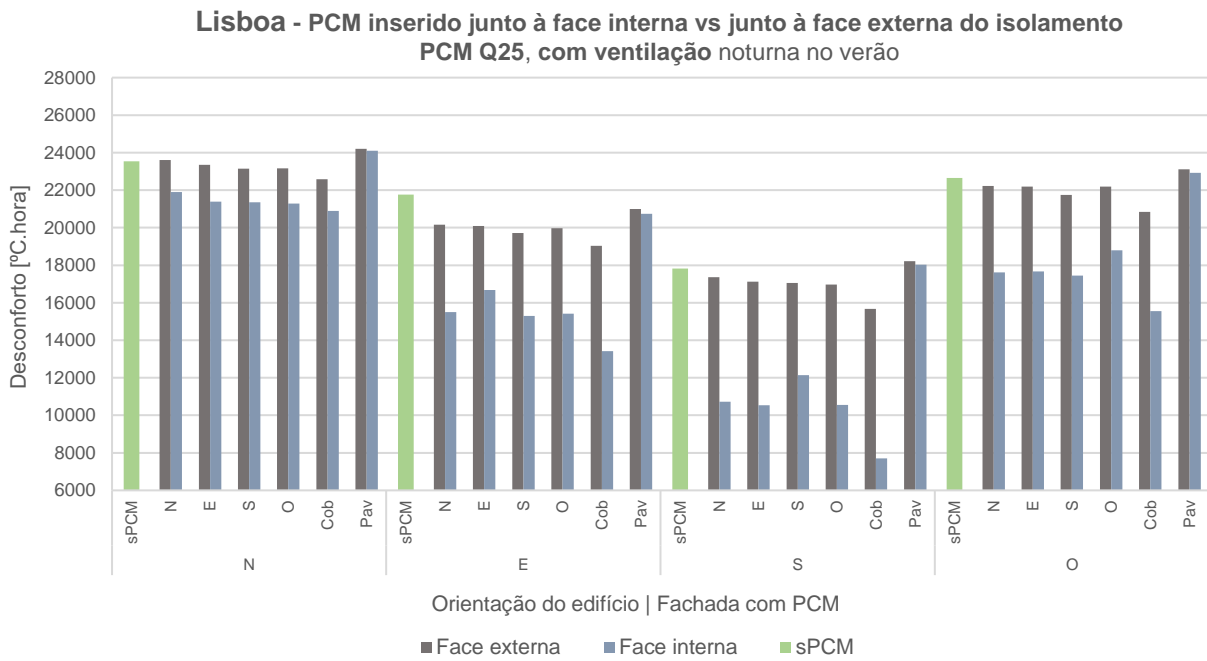


Figura D. 2 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado em Lisboa.

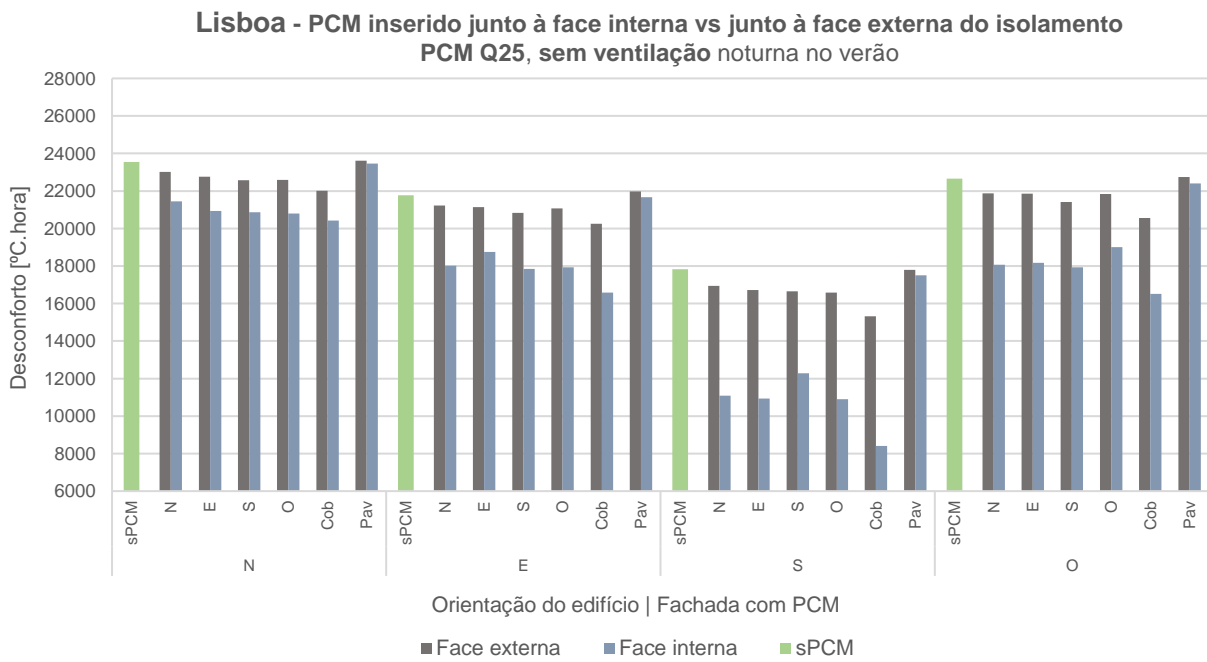


Figura D. 3 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado em Lisboa.

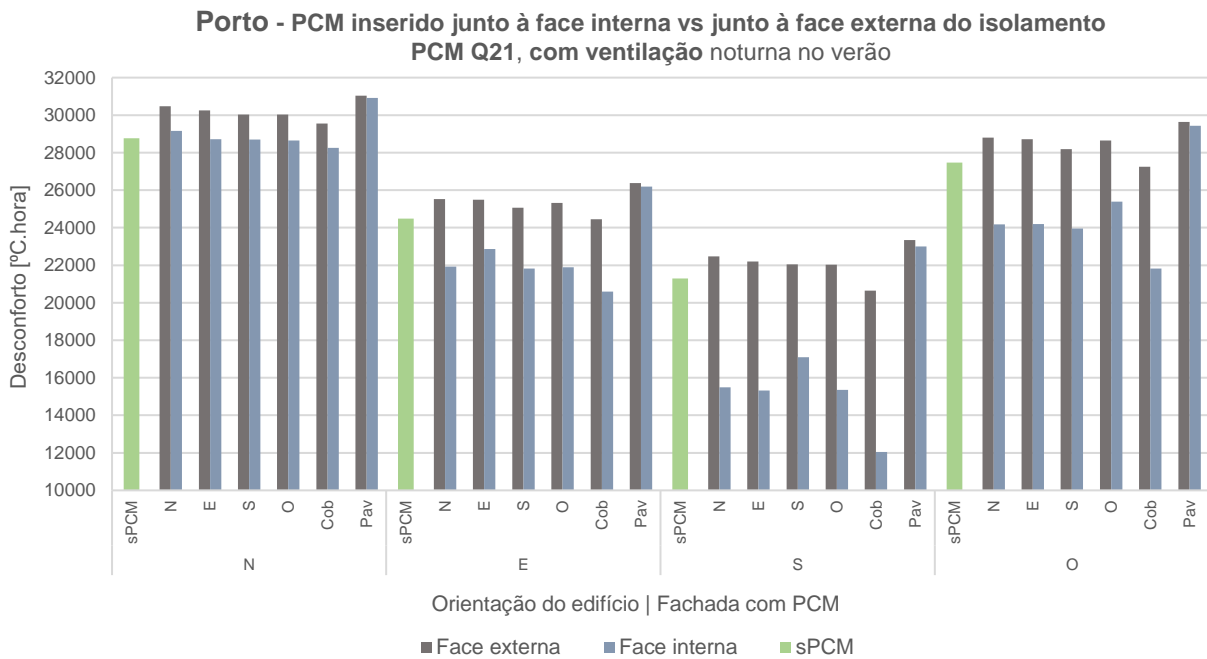


Figura D. 4 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado no Porto.

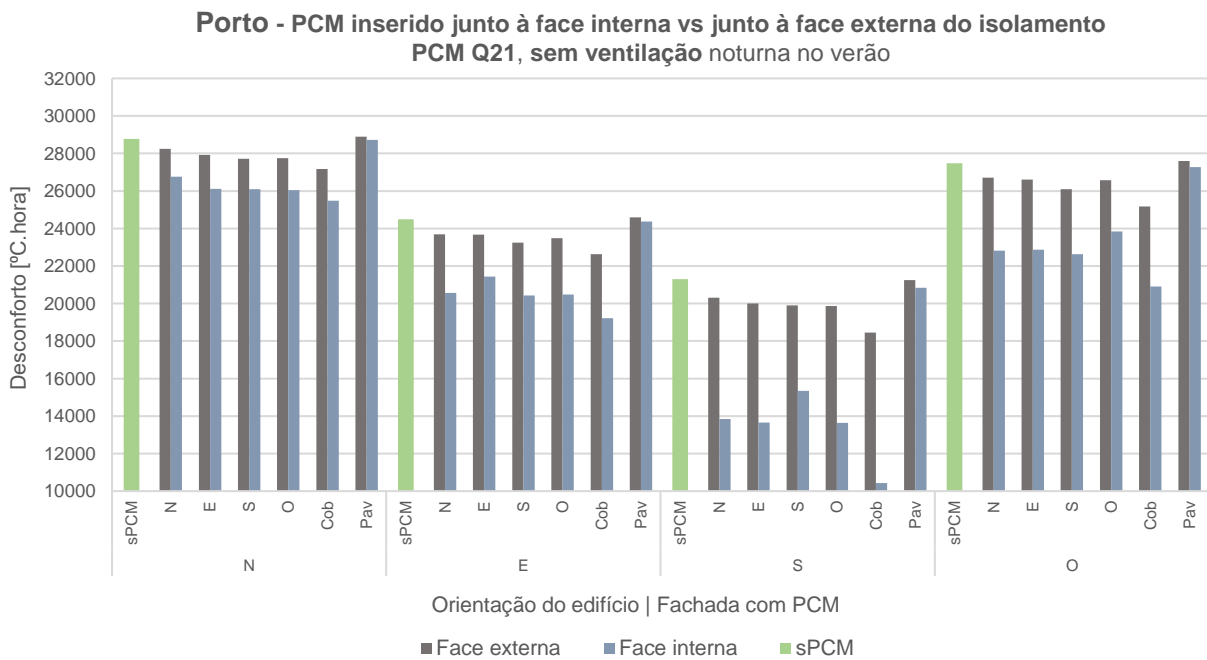


Figura D. 5 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado no Porto.

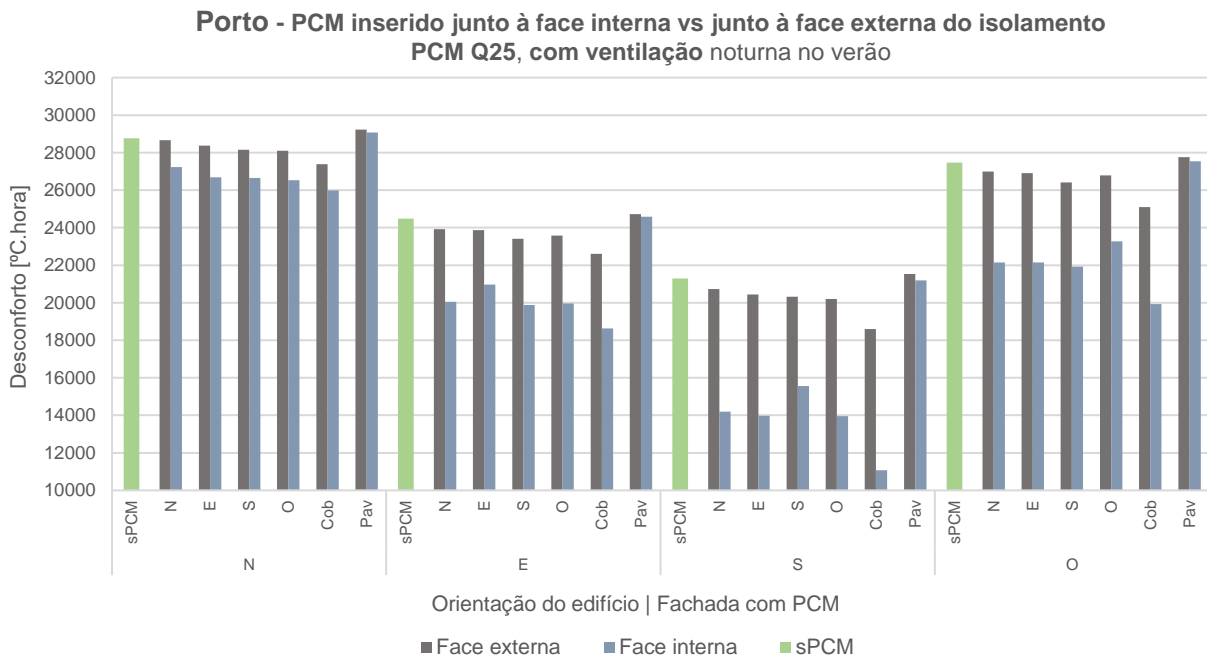


Figura D. 6 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado no Porto.

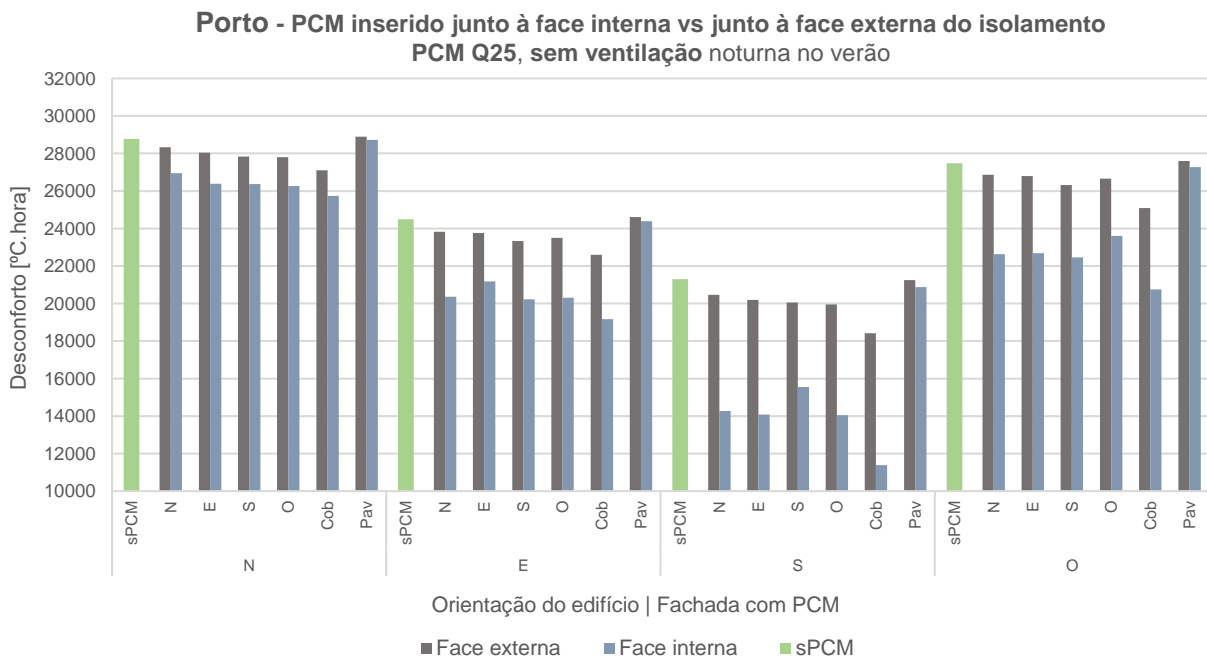


Figura D. 7 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado no Porto.

Évora - PCM inserido junto à face interna vs junto à face externa do isolamento
PCM Q21, com ventilação noturna no verão

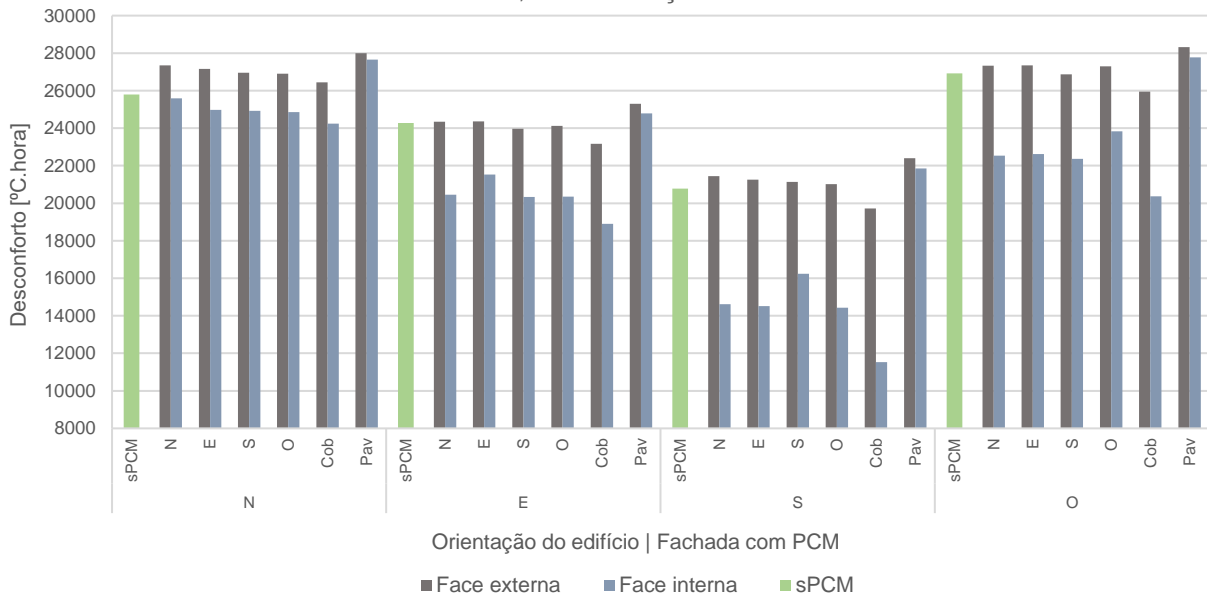


Figura D. 8 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado em Évora.

Évora - PCM inserido junto à face interna vs junto à face externa do isolamento
PCM Q21, sem ventilação noturna no verão

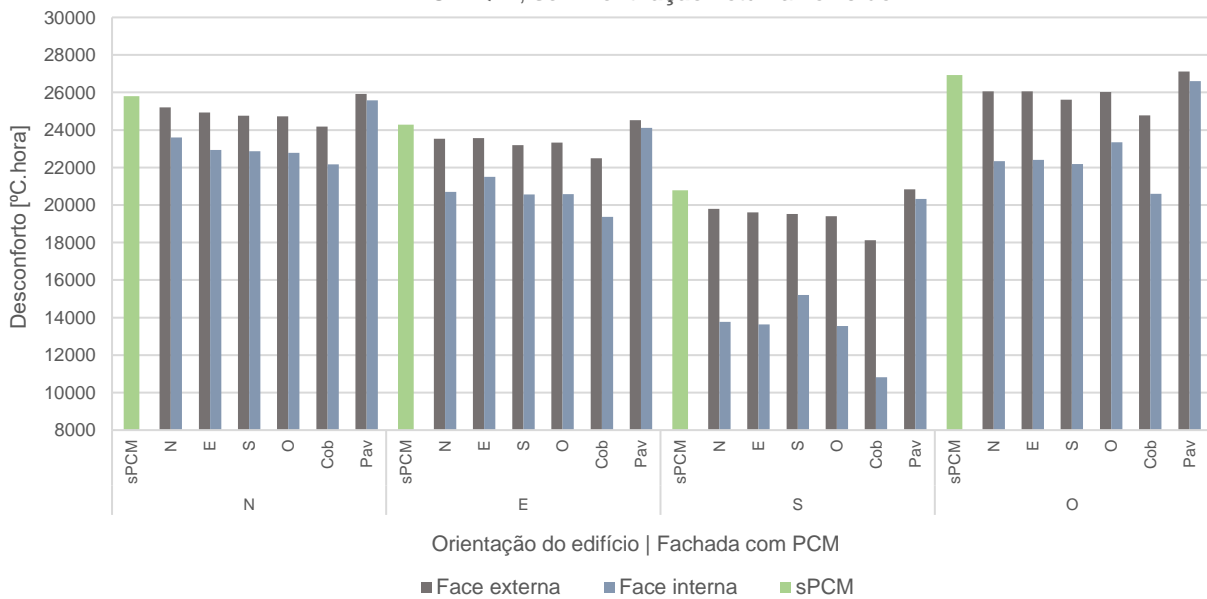


Figura D. 9 Resultados para a configuração com PCM Q21 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado em Évora.

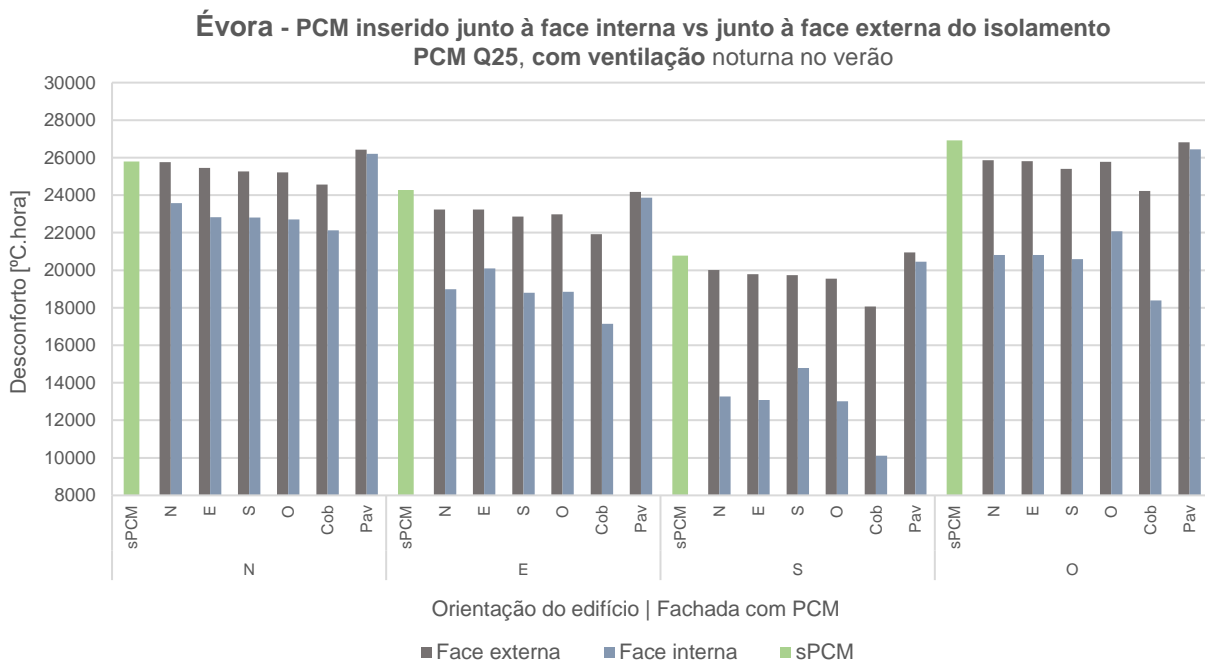


Figura D. 10 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo com ventilação noturna no verão, localizado em Évora.

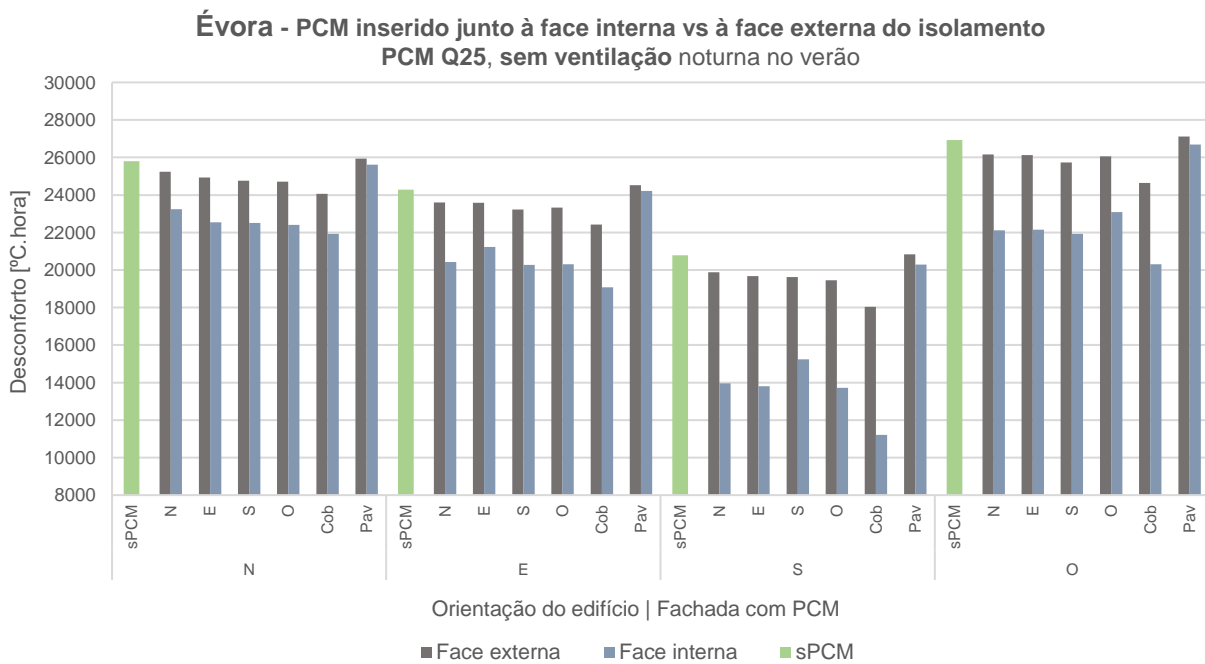


Figura D. 11 Resultados para a configuração com PCM Q25 em cada fachada do módulo sem ventilação noturna no verão, localizado em Évora.

I. Dados climáticos

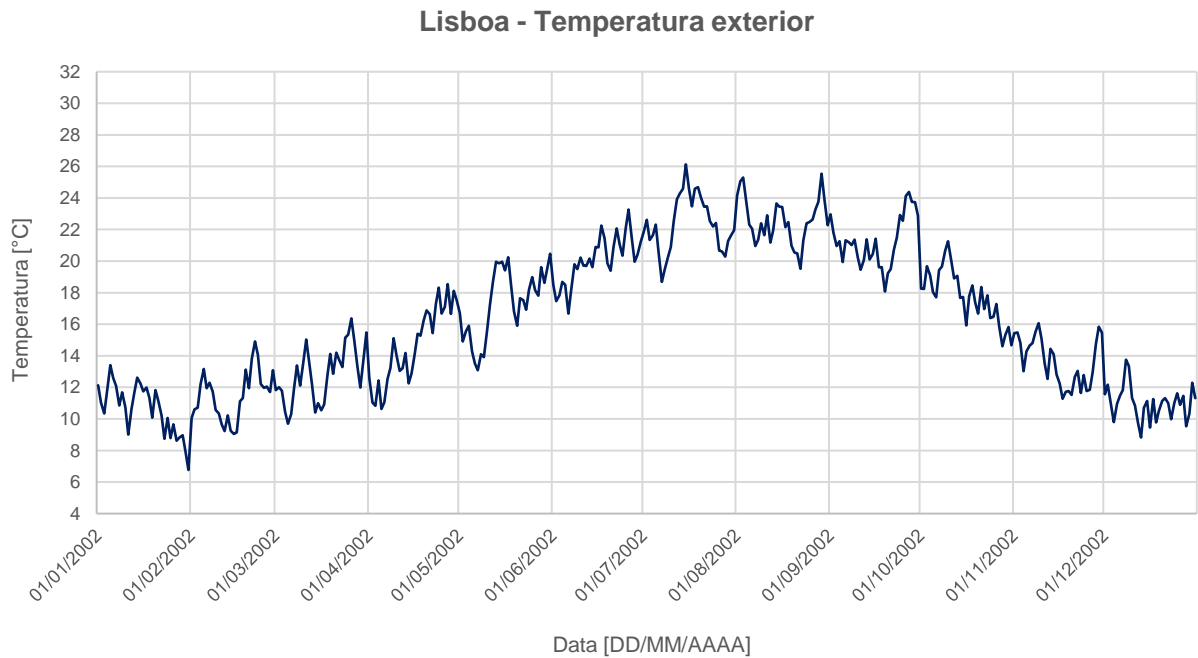


Figura I. 1 Temperatura exterior média diária ao longo de um ano em Lisboa.

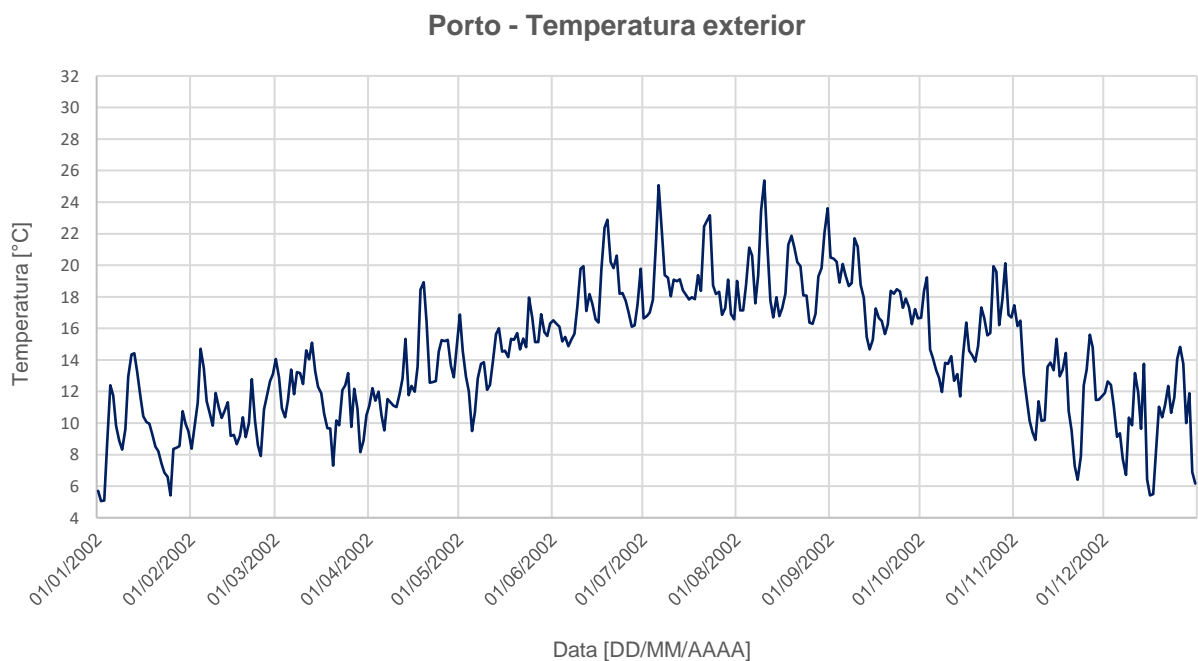


Figura I. 2 Temperatura exterior média diária ao longo de um ano no Porto.

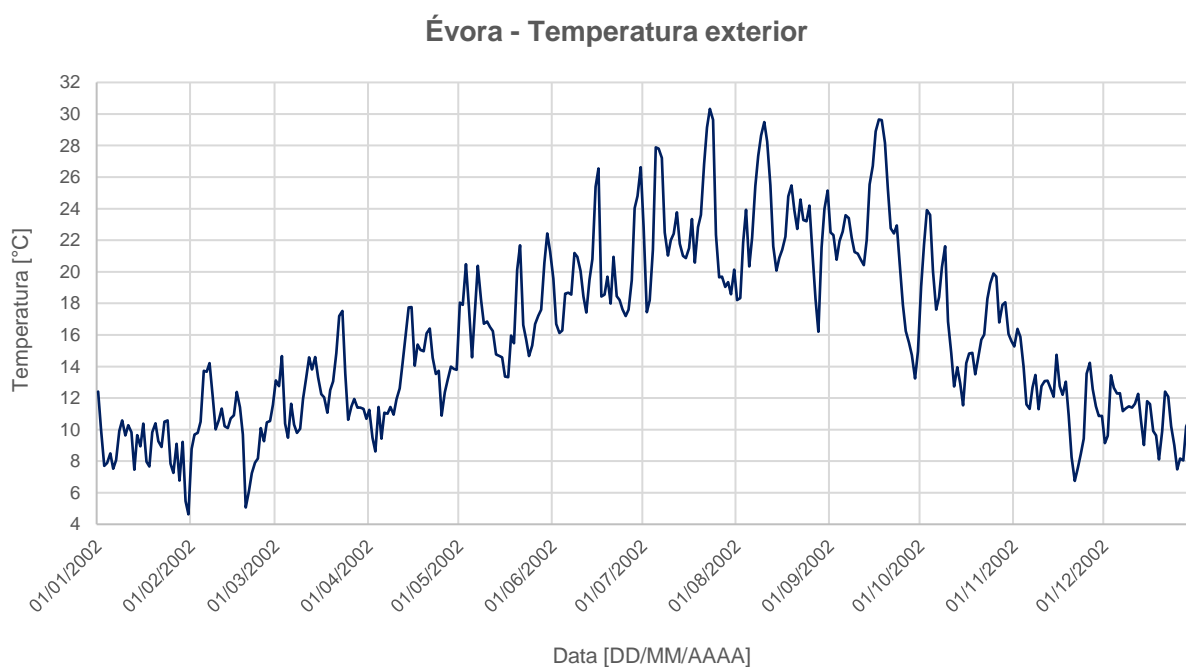


Figura I. 3 Temperatura exterior média diária ao longo de um ano em Évora.

II. Propriedades dos materiais de construção

Tabela II. 1 Principais propriedades utilizadas para os cálculos do software (propriedades existentes na biblioteca-padrão do DesignBuilder).

Material	Condutividade térmica $\left[\frac{\text{W}}{\text{m, K}}\right]$	Calor específico $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg, K}}\right]$	Massa volúmica $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$
Revestimento metálico leve	0,29	1000	1250
XPS (Poliestireno extrudido)	0,034	1400	35
Gesso cartonado	0,25	1000	900
asfalto	0,7	1000	2100
Painel de fibra de madeira	0,06	1000	300
Soalho de madeira	0,14	1200	650
Betonilha de regularização	0,41	840	1200
Painel de betão	1,13	1000	2000
Espuma de ureia-formaldeído	0,04	1400	10

III. Curvas de fusão/solidificação dos PCM

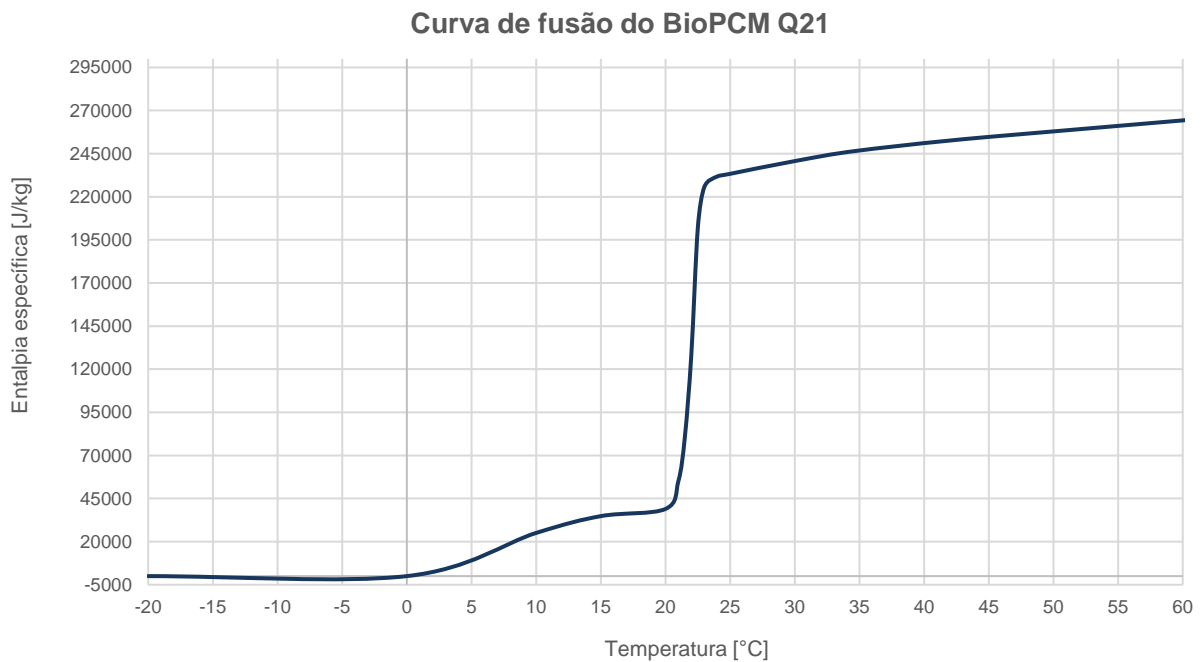


Figura III. 1 Curva de fusão do BioPCM Q21, utilizada no software de simulação dinâmica (já existente na biblioteca-padrão do mesmo).

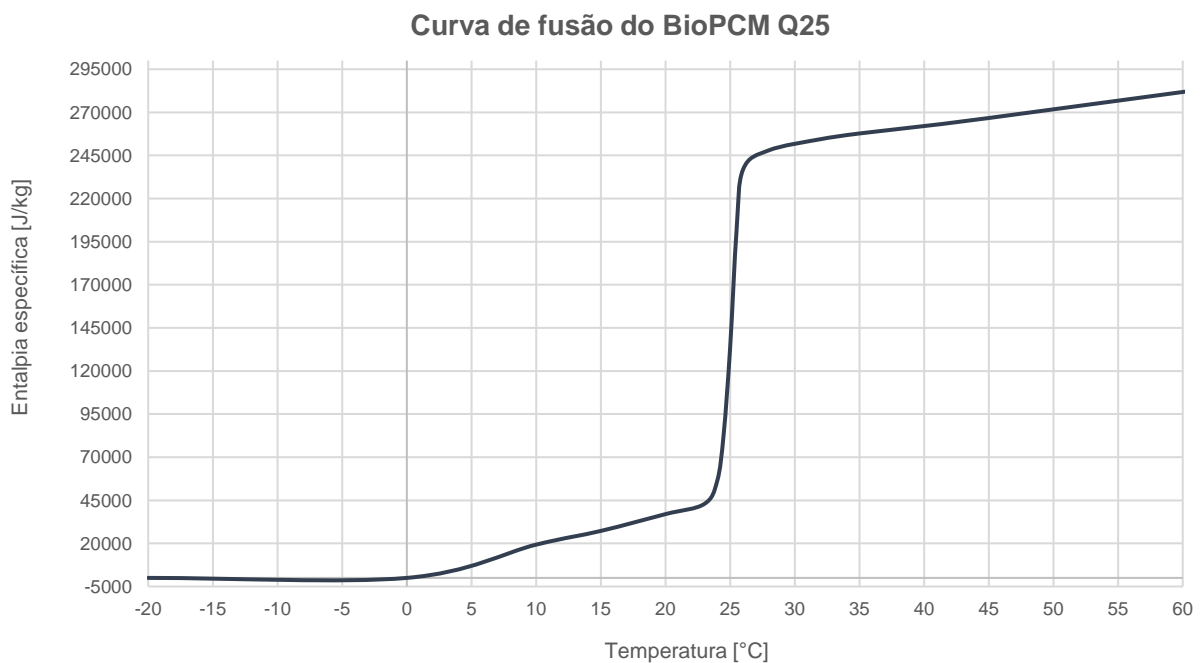


Figura III. 2 Curva de fusão do BioPCM Q25, utilizada no software de simulação dinâmica (já existente na biblioteca-padrão do mesmo).