



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Estudo numérico de um sistema com PCMs microencapsulados para o revestimento de fachadas verticais exteriores

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Numerical study of a new coating system with microencapsulated PCMs for vertical external facades

Autor

Rúben Emanuel Moreira Rodrigues

Orientadores

Professor Doutor José Joaquim da Costa

Doutor Nelson Miguel Lopes Soares

Júri

Presidente	Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogal	Professor Doutor António Manuel Gameiro Lopes Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor José Joaquim da Costa Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2016

"Escolhe um trabalho que gostes e não terás que trabalhar um único dia na tua vida."

Confucius

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho desenvolvido ao longo desta tese só foi possível graças à colaboração e apoio incondicional de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Agradeço em primeiro lugar aos meus orientadores Professor Doutor José Joaquim da Costa e Doutor Nelson Miguel Lopes Soares, pela total disponibilidade, extrema competência e espírito crítico permanente.

Uma palavra de agradecimento a todos os meus amigos, que me acompanharam ao longo destes 5 anos de trabalho.

Queria agradecer também à minha namorada por todo o incentivo e apoio incondicional em todos os momentos.

Por fim, agradeço aos meus pais pelo constante apoio e força que me deram para ultrapassar todos os obstáculos e me proporcionarem todas as condições para realizar com sucesso este trabalho.

Esta tese foi desenvolvida no âmbito do projecto "PCMs4Buildings" - *Sistemas com cavidades retangulares com materiais de mudança de fase para o aproveitamento de energia solar térmica em edifícios*, ref. POCI-01-0145-FEDER-016750 (FEDER) | PTDC/EMS-ENE/6079/2014 (FCT), cofinanciado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização - COMPETE 2020 e por Fundos Nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia.



Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar numericamente a transferência de calor em cavidades verticais de alumínio, de secção retangular, preenchidas com materiais de mudança de fase (PCMs) microencapsulados. Desenvolveu-se e validou-se um modelo numérico bidimensional, puramente difusivo, baseado no modelo da capacidade calorífica equivalente. O modelo numérico baseia-se no método dos volumes de controlo com uma formulação totalmente implícita, e permite simular a fusão e a solidificação do PCM sujeito a condições de fronteira variáveis. O modelo foi validado com base em resultados experimentais realizados no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra (FCTUC).

Após a validação, o modelo numérico foi utilizado num estudo paramétrico para avaliar o desempenho térmico de diferentes unidades de armazenamento de energia (UAE) com diferentes configurações. Estas UAE são constituídas por uma macrocápsula metálica preenchida com PCMs microencapsulados, e a sua configuração pode constituir um novo sistema para o revestimento exterior de fachadas verticais de edifícios. O estudo visou avaliar o desempenho do sistema no armazenamento e restituição de energia térmica num dia típico de Verão, para diferentes localizações, considerando diferentes espessuras e geometrias da UAE. Verificou-se que a energia armazenada/restituída pelo PCM é diretamente proporcional à espessura da unidade (volume de PCM) e inversamente proporcional ao número de alhetas. A radiação solar incidente tem um efeito notório na mudança de fase do PCM.

Palavras-chave: Material de mudança de fase, PCM, Armazenamento de energia solar, Calor latente, Transferência de calor, Método da capacidade calorífica equivalente.

Abstract

This work aims to numerically evaluate the heat transfer through a vertical stack of rectangular cavities filled with microencapsulated phase change materials (PCMs). A two-dimensional model of heat conduction with phase-change based on the apparent heat capacity method was developed and validated. The numerical model stems from the control-volume method in a fully implicit formulation and is able to predict the alternating melting and solidification of a PCM submitted to different boundary conditions. The experimental data obtained in a previous study carried out in the Mechanical Engineering Department of the Faculty of Sciences and Technology of the University of Coimbra were used to validate the model. A good agreement was obtained between simulations and experimental results.

After validation, the numerical model was used in a parametric study to evaluate the thermal performance of different energy storage units (ESU). These ESU are made of a metallic macrocapsule filled with microencapsulated PCMs and are intended to be used in the design of a new external coating system for vertical facades of buildings. The study aimed to evaluate the thermal performance of the system in terms of total energy stored and released in a typical summer day, for different locations. Several values of the ESU thickness and different configurations of the unit were considered in the parametric study. It was shown that the daily energy storage/release capacity of the system is directly proportional to the thickness of the ESU and inversely proportional to the number of fins. The solar radiation has a strong effect during the PCM phase change processes.

Keywords Phase change Material, PCM, Solar energy storage, Latent heat, Heat transfer, Apparent heat capacity method.

Índice

Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xvii
Simbologia e Siglas	xix
Simbologia.....	xix
Siglas	xx
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objetivos do Trabalho	3
1.3. Metodologia.....	4
1.4. Estrutura da Dissertação	4
1.5. Revisão Bibliográfica	5
1.5.1. Materiais de mudança de fase (PCMs).....	5
1.5.2. Propriedades	5
1.5.3. Classes de PCMs	8
1.5.4. Técnicas de confinamento dos PCMs.....	10
1.5.5. Avaliação da transferência de calor em elementos com PCMs.....	11
1.5.6. Modelação numérica da mudança de fase	15
2. Modelo numérico.....	17
2.1. Modelo Físico	17
2.2. Condições de fronteira e variáveis a monitorizar na validação numérica	19
2.3. Método da capacidade calorífica equivalente	22
2.4. Equações de conservação.....	26
2.5. Procedimento numérico	27
3. Validação do modelo numérico	31
3.1. Propriedades termofísicas do PCM.....	31
3.2. Testes de independência de malha e de discretização temporal	34
3.2.1. Testes de influência de malha.....	35
3.2.2. Testes de discretização temporal	37
3.3. Perfil de evolução da capacidade calorífica equivalente	39
3.4. Influência dos intervalos de temperatura de mudança de fase.....	40
3.5. Resultados numéricos	42
3.5.1. Resultados numéricos da simulação da UAE sem alhetas	43
3.5.2. Resultados numéricos da simulação da UAE com 15 cavidades	45
3.5.3. Influência das alhetas no desempenho da UAE.....	46
4. Estudo de um sistema para o revestimento de fachadas verticais exteriores.....	53
4.1. Modelo físico	54
4.2. Condições de fronteira e equações que regem as trocas de calor	55
4.3. Resultados do estudo paramétrico	57
4.3.1. Impacto do número de alhetas e da espessura no desempenho térmico.....	58
4.3.1. Impacto da variação das condições climáticas: Lisboa e Bragança	61

5. Conclusões	65
5.1. Principais notas conclusivas	65
5.2. Sugestões de trabalhos futuros	66
Referências bibliográficas	67
ANEXO A – Modelação matemática do modelo da capacidade calorífica efetiva com perfil quadrangular.....	71
ANEXO B – Evolução das temperaturas monitorizadas a meia secção nos ciclos de descarga com os intervalos de mudança de fase ideais	73
ANEXO C – Evolução das temperaturas monitorizadas a meia secção do domínio nos ciclos de descarga com os intervalos de temperaturas de mudança de fase validados	75
ANEXO D – Evolução das temperaturas monitorizadas a meia secção no ciclo de carga de 68 W e nos ciclos de descarga a 17 e 20 °C	77
ANEXO E – Perfil de temperaturas e de radiação solar incidente – Lisboa.....	79
ANEXO F – Perfil de temperaturas e de radiação solar incidente – Bragança.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Representação dos principais campos de aplicação de PCMs em soluções para armazenamento de energia térmica. Adaptado de [15].	6
Figura 1.2. Representação esquemática da evolução da entalpia com a variação da temperatura para PCMs puros, com a representação esquemática do possível efeito de subcooling durante a descarga.	7
Figura 1.3 Classificação dos grupos de PCMs. Adaptado de [19].	8
Figura 1.4 Imagens do estudo experimental e das regiões isotérmicas e distribuições de velocidades obtidas numericamente no sistema III na configuração com alhetas do sistema PV/PCM. Adaptado de [32].	12
Figura 1.5 Cavidades “ocas” formadas na zona central da massa de PCM do Waksol e do RT35 quando a solidificação ocorre. Adaptado de [40].	13
Figura 1.6 Evolução da fração líquida local e da distribuição de temperaturas no (a) Icosane e no (b) Gálio. A variável “Overtemperatures” refere-se à diferença entre a temperatura local e a temperatura de fusão do PCM. Adaptado de [33].	13
Figura 1.7. Temperatura no exterior e na parede Este dos dois cubículos, com janela fechada [35].	14
Figura 2.1. (a) Representação esquemática do domínio físico para uma cavidade sem alhetas: geometria, mudanças de material (obstáculos A,B,C e D representam o domínio de alumínio) e condições de fronteira (b) Representação esquemática 3D da UAE sem alhetas. Adaptado de [15].	18
Figura 2.2. (a) Representação esquemática do domínio de cálculo para uma cavidade com 15 cavidades. (b) Representação esquemática 3D da UAE com alhetas. Adaptado de [15].	18
Figura 2.3 Sistema de coordenadas e determinação dos índices I e J para a UAE sem alhetas.	19
Figura 2.4 Sistema de coordenadas e determinação dos índices I e J para a UAE com alhetas.	19
Figura 2.5. Representação esquemática da secção transversal do domínio físico experimental com as principais variáveis monitorizadas durante a (a) descarga e a (b) carga do PCM.	20
Figura 2.6. Representação esquemática da localização das temperaturas T1 a T5 no domínio de cálculo e definição dos nodos correspondes.	20
Figura 2.7. Representação esquemática do método das resistências.	21
Figura 2.8 Representação esquemática do método da capacidade calorífica equivalente, com evolução da capacidade calorífica durante a mudança com perfil (a) triangular e (b) quadrangular	23

Figura 2.9 Variação da condutibilidade térmica do PCM com a temperatura durante os ciclos de carga e de descarga.	25
Figura 2.10 Variação da fração fundida de PCM com a temperatura, durante a carga e descarga do PCM.	26
Figura 2.11. Representação do fluxograma do modelo numérico implementado.....	29
Figura 3.1. Fluxo de calor e evolução da temperatura durante as medições com a técnica de DSC de um ciclo completo do PCM microencapsulado DS 5001 X [15].	32
Figura 3.2. Evolução de T1 com a variação das propriedades termofísicas do PCM, no ciclo de carga de 34W, com malha 32x302 e $\Delta t = 30s$	33
Figura 3.3. Evolução de T1 com a variação das propriedades termofísicas do PCM, no ciclo de descarga de 14C, com malha 32x302 e $\Delta t = 30s$	33
Figura 3.4. Geometria do modelo simplificado utilizados nos testes de influência de malha.	35
Figura 3.5. Evolução temporal da potência térmica transferida para o domínio do PCM, PLINE2, estimada na interface Al – PCM e do erro relativo com as diferentes malhas.	35
Figura 3.6 Evolução temporal de T1 e do erro relativo associado à variação da malha do modelo.....	36
Figura 3.7 Evolução temporal da potência térmica transferida para o domínio do PCM, estimada na interface Al-PCM e do erro relativo com as diferentes discretizações temporais.	38
Figura 3.8 Evolução temporal de T1 e do erro associado à variação da discretização temporal do modelo.	38
Figura 3.9. Evolução temporal da temperatura a meia secção do domínio de PCM com o modelo de evolução da capacidade calorífica equivalente triangular e quadrangular para as condições de carga de 34 W (a) e para as condições de descarga de 14 °C (b).	40
Figura 3.10 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da cavidade sem alhetas no ciclo de carga de 34W, com $\Delta T1 = 5^{\circ}C$; $\Delta T2 = 2^{\circ}C$	41
Figura 3.11 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da cavidade sem alhetas no de carga de 68W, com $\Delta T1 = 5^{\circ}C$; $\Delta T2 = 2^{\circ}C$	41
Figura 3.12 Impacto da variação de ΔTm na evolução de T1 no ciclo de carga 34W.....	42
Figura 3.13 Impacto da variação de ΔTm na evolução de T1 no ciclo de carga 68W.....	42
Figura 3.14 Impacto da potência de aquecimento na evolução da fração fundida total (FRACFT) e de T1 nos ciclos de carga.....	43
Figura 3.15 Impacto da temperatura de arrefecimento na evolução da fração fundida total (FRACFT) e de T1 nos ciclos de descarga.	43

Figura 3.16 Comparação dos valores sem correção (a) e dos corrigidos (b) da energia total acumulada no PCM nos ciclos de carga para as condições de 34 e 68 W com o valor teórico.....	44
Figura 3.17 Comparação dos valores sem correção (a) e dos corrigidos (b) da energia total acumulada no PCM nos ciclos de descarga para as condições de 14, 17 e 20 °C com os valores teóricos.	45
Figura 3.18 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da UAE no ciclo de carga de 34W.....	45
Figura 3.19 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da UAE no ciclo de descarga a 14 °C.	45
Figura 3.20 Impacto das alhetas na evolução da fração fundida total e de T1 no ciclo de carga de 34W.....	46
Figura 3.21 Impacto das alhetas na energia acumulada pelo PCM no ciclo de carga de 34W.....	46
Figura 3.22 Impacto das alhetas na evolução da fração fundida total e de T1 no ciclo de descarga de 14 °C.....	47
Figura 3.23 Impacto das alhetas na restituída acumulada pelo PCM no ciclo de descarga de 14 °C.....	47
Figura 3.24 Evolução do campo de temperaturas na configuração B no ciclo de carga de 34 W nos instantes: (a) 2400s, (b) 4200s, (c) 4800s, (d) 6000s, (e) 12000s.	48
Figura 3.25 Evolução do campo de temperaturas da configuração A no ciclo de carga de 34 W, nos instantes: (a) 2400s, (b) 4200s, (c) 4800s, (d) 6000s, (e) 12000s.	48
Figura 3.26 Evolução do fração fundida na configuração A no ciclo de carga de 34W, nos instantes: (a) 2400s, (b) 4200s, (c) 4800s, (d) 6000s e na configuração B, nos instantes: (e) 2400s, (f) 4200s e (g) 4800s.	49
Figura 3.27 Evolução do campo de temperaturas da configuração A no ciclo de descarga a 14 °C nos instantes: (a) 4500s, (b) 9000s, (c) 13500s, (d) 18000s.....	50
Figura 3.28 Evolução do campo de temperaturas da configuração B no ciclo de descarga a 14 °C nos instantes: (a) 4500s, (b) 9000s, (c) 13500s, (d) 18000s, (e) 22500s.....	50
Figura 3.29 Evolução do fração fundida no ciclo de descarga a 14 °C da configuração B nos instantes: (a) 4500s, (b) 9000s, (c) 13500s, (d) 18000s, e na configuração A nos instantes: (e) 4500s, (f) 9000s.....	51
Figura 4.1. Sistema de revestimento exterior de edificios com placas verticais.	54
Figura 4.2. Representação esquemática do problema físico (sistema de revestimento com placas verticais e trocas de calor com o meio (a) e do modelo físico do sistema: dimensões geométricas e condições de fronteira, com fluxos de calor positivos quando entram no domínio de cálculo (b)).....	55
Figura 4.3. Variação da temperatura do ar exterior, Tar ambiente, com a identificação dos períodos de carga e de descarga do PCM. Dados climáticos retirados do SOLTERM para Beja entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho	55

Figura 4.4. Variação da radiação solar numa fachada vertical orientada a oeste, $q_{\text{rad,solar}}$. Dados climáticos retirados de climas do SOLTERM para Beja entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho.....	56
Figura 4.5. Evolução do peso total do sistema com a variação do número de alhetas para uma espessura de (a) 20 e (b) 30mm.....	58
Figura 4.6. Evolução da energia armazenada e restituída pelo PCM para as diferentes espessuras e configurações do sistema.....	59
Figura 4.7. Evolução da temperatura a meia secção do domínio de PCM e da fração fundida total no ciclo diário do sistema com 30 mm de espessura para as diferentes configurações.	60
Figura 4.8. Evolução da temperatura a meia secção do domínio de PCM e da fração fundida total no ciclo diário do sistema com 30 mm de espessura para as diferentes configurações.	60
Figura 4.9. Evolução temporal da temperatura a meia secção do sistema com 30 mm de espessura para as diferentes configurações.	61
Figura 4.10. Evolução da energia armazenada/restituída pelo PCM no sistema com 20 mm de espessura para as diferentes configurações.	62
Figura 4.11. Impacto da variação das condições climática na evolução da temperatura a meia secção do domínio no sistema com 20 mm de espessura para as diferentes configurações.	62
Figura 4.12. Impacto da variação das condições climática na evolução da temperatura a meia secção do domínio no sistema com 20 mm e 14 alhetas, para as condições climáticas de Beja e Lisboa e com 16 mm e 14 alhetas para as condições climáticas de Bragança.....	63
Figura B.1 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da cavidade sem alhetas num ciclo de descarga de 14°C, com $\Delta T_1 = 5^\circ\text{C}$; $\Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$; $\Delta T_{\text{hist}} = 2^\circ\text{C}$	73
Figura B.2 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da cavidade sem alhetas num ciclo de descarga de 17°C, com $\Delta T_1 = 5^\circ\text{C}$; $\Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$; $\Delta T_{\text{hist}} = 1^\circ\text{C}$	73
Figura B.3 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da cavidade sem alhetas no ciclo de descarga de 20 °C, com $\Delta T_1 = 5^\circ\text{C}$; $\Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$; $\Delta T_{\text{hist}} = 2^\circ\text{C}$	74
Figura D.1 Impacto da variação de ΔT s na evolução de T1 no ciclo de descarga 14C	75
Figura D.2 Impacto da variação de ΔT s na evolução de T1 no ciclo de descarga 17C	75
Figura D.1 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da UAE no ciclo de carga de 68 W	77
Figura D.2 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da UAE no ciclo de descarga de 17 °C.....	77
Figura D.3 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da UAE no ciclo de descarga de 20 °C.....	77

Figura E.1. Variação da temperatura do ar exterior, Tar,amb. Dados climáticos retirados de climas do SOLTERM para Lisboa entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho.....	79
Figura E.2. Variação da radiação solar incidente numa fachada vertical orientada a oeste, qrad,solar. Dados climáticos retirados de climas do SOLTERM para Lisboa entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho.....	79
Figura F.1. Variação da temperatura do ar exterior, Tar,ambr. Dados climáticos retirados de climas do SOLTERM para Bragança entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho.....	81
Figura F.2. Variação da radiação solar incidente numa fachada vertical orientada a oeste, qrad,solar. Dados climáticos retirados de climas do SOLTERM para Bragança entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho.....	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 Propriedades ideais de um PCM para ser incorporado em sistemas de armazenamento de energia térmica.	6
Tabela 1.2 Caracterização dos PCMs Inorgânicos, Orgânicos e Eutéticos.	9
Tabela 3.1 Propriedades termofísicas dos materiais.....	32
Tabela 3.2 Estudo da influência de malha na evolução de T_1 : distância entre nodos, erro médio e máximo de cada malha de discretização.....	36
Tabela 3.3 Estudo da influência de malha na evolução de $PLINE2$: distância entre nodos, erro médio e máximo de cada malha de discretização.	36
Tabela 3.4 Influência da discretização temporal na evolução de $PLINE2$: distância entre nodos, erro médio e máximo de cada discretização temporal.	37
Tabela 3.5 Estudo da influência da discretização temporal na evolução de T_1 : distância entre nodos, erro médio e máximo cada discretização temporal.....	37
Tabela 3.6 Intervalos de temperaturas de mudança de fase, ΔT_1 e ΔT_2 , que garantem a melhor aproximação das curvas de evolução das temperaturas a meia secção do domínio para cada ciclo.....	41

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

C – Capacidade calorífica equivalente	[J kg ⁻¹]
c_p – Calor específico	[J kg ⁻¹ °C ⁻¹]
E – Energia acumulada/restituída pelo PCM	[J]
g – Aceleração da gravidade	[m s ⁻²]
h – Entalpia volumétrica sensível	[Jm ⁻³]
L – Calor latente de fusão	[J kg ⁻¹]
L_{cav} – Largura da cavidade	[m]
m – Massa	[kg]
$P_{int,ALPCM}$ – Potência que entra/sai no domínio de PCM	[Wm ⁻²]
$PLINE2$ – Potência de monitorização na interface al-PCM	[Wm ⁻²]
$q_{rad,Solar}$ – Radiação solar incidente	[Wm ⁻²]
t – Tempo	[s]
T – Temperatura	[°C]
$T_{1,exp}$ – Temperatura de monitorização experimental	[°C]
$T_{1,numério}$ – Temperatura de monitorização numérica	[°C]
$T_{ar,ambiente}$ – Temperatura do ar exterior	[°C]
T_m – Temperatura de fusão	[°C]
T_s – Temperatura de solidificação	[°C]
TF – Temperatura da superfície de arrefecimento	[°C]
TC – Temperatura da superfície de arrefecimento experimental	[°C]
TH – Temperatura da superfície de aquecimento experimental	[°C]
TQ – Temperatura da superfície de aquecimento	[°C]
u – Velocidade segundo x	[m s ⁻¹]
v – Velocidade segundo y	[m s ⁻¹]
ΔE_L – Défice de calor latente do modelo triangular	[J]
ΔT_s – Intervalo de temperaturas de solidificação	[°C]
ΔT_m – Intervalo de temperaturas de solidificação	[°C]
k – Condutibilidade térmica	[W m ⁻¹ °C ⁻¹]
\emptyset – Variável genérica	

Siglas

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DSC – Teste de calorimetria diferencial

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

GEE – Gases com efeito de estufa

IPCC – Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas

LHS – *Latent Heat Storage* (Armazenamento de Calor Latente)

LMPMs – Materiais de baixo ponto de fusão

PCMs – *Phase Change Materials* (Materiais de Mudança de Fase)

PV/PCM – Sistema fotovoltaico com PCM

SHS – *Sensible Heat Storage* (Armazenamento de Calor Sensível)

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a informação de base e as principais motivações para o estudo realizado nesta tese, bem como a apresentação dos principais objetivos e da metodologia adotada.

1.1. Enquadramento

A revolução industrial despoletou uma nova era de rápido crescimento económico, mas também o aquecimento global e algumas mudanças climáticas. Um dos aspetos mais importantes da revolução industrial foi o surgimento de uma economia baseada no consumo de combustíveis fósseis [1-3].

Na realidade, o recurso exagerado e contínuo aos combustíveis fósseis, nos mais diversos setores da atividade económica, perturbou seriamente os níveis de CO₂ na atmosfera. O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2007 mostrou que existe uma ligação direta entre a temperatura média global e as emissões de gases de efeito de estufa (GEE). Além disso, revelou também que as emissões de GEE aumentaram cerca de 1.6% ao ano e que as emissões de CO₂ resultantes do consumo de combustíveis fósseis aumentaram cerca de 1.9% ao ano nas últimas 3 décadas [1].

Perante este cenário, desenvolveram-se esforços para utilizar de forma mais eficiente as mais diversas fontes renováveis de energia. Em muitas zonas do mundo, a energia solar é vista como uma das fontes de energia mais prósperas. Contudo, a energia solar térmica é por natureza intermitente, sendo necessário desenvolver técnicas de armazenamento para ajustar a oferta e a procura. Nesse sentido, surgiu o interesse de desenvolver UAE solar térmica que permitam armazenar energia quando ela está disponível, para ser utilizada noutros períodos.

Uma das técnicas com mais potencial para sistemas de armazenamento de energia térmica baseia-se na incorporação de materiais de mudança de fase (PCMs). Os PCMs exibem uma elevada entalpia de fusão com a capacidade de, num volume relativamente pequeno, acumularem ou libertarem uma grande quantidade de energia (latente) durante a sua solidificação e fusão, respetivamente. Adicionalmente, requerem que

a sua temperatura de mudança de fase sólido-líquido se encontre dentro da gama de temperaturas operacionais da aplicação [4].

Muitos materiais foram identificados como potenciais PCMs, incluindo compostos inorgânicos (sal e sais hidratados), compostos orgânicos (tais como algumas parafinas e ácidos gordos) e também misturas eutécticas. A relação entre a estrutura fundamental e as propriedades dos PCMs tem sido alvo de diversos estudos de forma a determinar os principais mecanismos de acumulação e transmissão de calor [4][5]. Atul *et al.* [6] descrevem os diferentes métodos de acumulação, nomeadamente sob a forma de energia mecânica, elétrica, térmica e termoquímica.

O calor sensível (SHS – *Sensível Heat Storage*) é o método mais comum de armazenamento de energia térmica. Com o advento dos PCMs, o uso do calor latente (LHS – *Latent Heat Storage*) generalizou-se em diversos campos de aplicação, nomeadamente soluções construtivas [7-9], coletores solares [10], centrais de energia solar [11], dissipadores de calor compactos de elevada eficiência [12], fogões solares [13], etc.. Comparativamente ao armazenamento de energia na forma sensível, este método garante uma densidade de armazenamento de energia muito maior, com uma variação da temperatura consideravelmente menor. Os PCMs podem assim acumular 5 a 14 vezes mais calor por unidade de volume do que a água, rochas, ou outros materiais de construção ditos "sensíveis" [6].

Nos PCMs puros (ou ideais), os processos de mudança de fase são isotérmicos. No entanto, nos PCMs comerciais correntes, que geralmente resultam da mistura de vários compostos, a mudança de fase ocorre numa determinada gama de temperaturas. Nestes materiais importa avaliar a evolução da entalpia com a temperatura, não só para determinar a gama de temperatura de mudança de fase, como também, a existência de histerese e subarrefecimento (*subcooling*) nos ciclos de carga/descarga do material.

A utilização de PCMs em UAE apresenta algumas limitações. De facto, a presença de material líquido durante os ciclos de carga e descarga, obriga ao confinamento dos PCMs. Generalizando, existem duas técnicas de confinamento dos PCMs: (i) revestimento do núcleo de PCM por um filme polimérico fino, dando origem aos PCMs microencapsulado [14]; (ii) incorporação do PCM no estado livre numa cavidade, sendo a macrocápsula o único meio de confinamento do PCM de forma a evitar o seu vazamento no estado líquido, permitindo que este se mova livremente no seu interior.

Foram realizados vários ensaios experimentais no DEM-UC, para avaliar a transferência de calor em cavidades verticais de alumínio, de secção retangular, preenchidas com PCMs livres e microencapsulados [15,16]. No contexto desta dissertação, estas cavidades irão ser referidas como UAE com PCMs livres e/ou microencapsulados. Soares *et al.* [15,16] concluíram que as UAE com PCMs livres apresentam um maior período de regulação térmica e uma menor temperatura de controlo na superfície quente da cavidade. No entanto, o PCM funde mais rapidamente nas UAE com PCMs microencapsulados. Estas apresentam também maior estabilidade estrutural e menor risco de vazamento, dois parâmetros essenciais em soluções construtivas.

1.2. Objetivos do Trabalho

O presente trabalho procura estudar numericamente a transferência de calor em cavidades verticais de alumínio, de secção retangular, preenchidas com PCMs microencapsulados. O objetivo principal desta tese é desenvolver um modelo numérico bidimensional para o estudo de um sistema de revestimento de fachadas verticais exteriores. O modelo numérico será validado com base nos resultados experimentais obtidos por Soares *et al.* [15,16].

Outro objetivo deste trabalho, passa por utilizar o modelo numérico no estudo paramétrico de diferentes configurações da UAE. O estudo visa avaliar o desempenho da UAE no armazenamento e restituição de energia térmica num dia típico de Verão, para diferentes localizações, considerando diferentes espessuras da unidade e variando o número de cavidades no seu interior.

O objetivo final é propor um novo sistema para o revestimento de fachadas verticais exteriores, baseado no princípio do funcionamento dos PCMs. Este sistema contribuirá para a termorregulação das fachadas permitindo absorver a energia solar térmica durante o período de maior radiação solar (fusão do PCM), e restituir a energia armazenada durante o período de solidificação do PCM. Os sistemas de revestimento de fachadas com estas características poderão contribuir para evitar o sobreaquecimento de alguns edifícios durante os períodos de maior calor.

1.3. Metodologia

Com o intuito de atingir os objetivos referidos, foi definida a seguinte metodologia de trabalho:

- revisão bibliográfica;
- análise do problema físico;
- desenvolvimento do modelo físico;
- desenvolvimento do modelo matemático e correspondente modelo numérico;
- estudo numérico;
- tratamento dos resultados obtidos e comparação com os resultados experimentais;
- validação do modelo numérico;
- estudo paramétrico de diferentes configurações da UAE;
- estudo numérico de um novo sistema para o revestimento de fachadas verticais exteriores, baseado no princípio do funcionamento dos PCMs.

1.4. Estrutura da Dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos. No primeiro capítulo procura-se justificar o tema estudado, nomeadamente a importância do estudo numérico da transferência de calor em UAE com PCMs. Além disso, é efetuada a revisão bibliográfica dos temas mais importantes no âmbito deste trabalho. No segundo capítulo, é feita a definição do problema físico, a construção do modelo matemático e o desenvolvimento do modelo numérico. No terceiro capítulo, é realizada a validação do modelo numérico através da comparação dos resultados obtidos com resultados experimentais. No quarto capítulo, o modelo numérico validado é utilizado no estudo paramétrico de diferentes configurações da UAE. No quinto capítulo, apresentam-se e discutem-se as principais conclusões. São também feitas algumas sugestões para trabalhos futuros. No final, apresentam-se os Anexos.

1.5. Revisão Bibliográfica

Neste subcapítulo é efetuada a revisão das principais características, propriedades termofísicas dos PCMs, e a sua aplicação em diferentes sistemas para armazenamento de energia térmica. São também revistos vários estudos experimentais e numéricos realizados no campo do armazenamento de energia térmica utilizando PCMs.

1.5.1. Materiais de mudança de fase (PCMs)

Hyun *et al.* [17] definem PCM como qualquer substância que tem um calor latente de fusão muito elevado e um ponto de fusão bem definido. Atualmente, esta terminologia agrupa um número considerável de materiais para diferentes aplicações, e serve também como um "rótulo", que garante uma ligação imediata ao estudo de sistemas de armazenamento de energia térmica. Na literatura [4-17], podem encontrar-se vários estudos de revisão dos diferentes tipos de PCMs disponíveis, das suas propriedades, das diferentes formas de encapsulamento, e dos sistemas que incluem PCMs para armazenamento de energia ou potenciação da termorregulação [9-14].

1.5.2. Propriedades

Para os PCMs serem incorporados em sistemas de armazenamento de energia térmica, devem possuir boas propriedades termofísicas, cinéticas, químicas, económicas e ambientais [4,18-20]. Na Tabela 1.1 encontram-se resumidas algumas das propriedades ideais para a incorporação dos PCMs. De todas as propriedades termofísicas, aquelas que melhor caracterizam a capacidade de armazenamento de um PCM, são a temperatura de mudança de fase, o calor latente de fusão e a capacidade calorífica nas duas fases. A Figura 1.1 mostra os principais campos de aplicação dos PCMs em soluções para armazenamento de energia térmica, evidenciando o efeito termorregulador e o armazenamento de uma grande quantidade de energia, numa pequena quantidade de material. Verifica-se que o calor latente pode ser armazenado sem que ocorram variações significativas da temperatura. Além disso, é visível a diferença de comportamento na mudança de fase dos PCMs puros e dos PCMs comerciais correntes. Nos primeiros, os processos de mudança de fase são isotérmicos e ocorrem a uma temperatura de fusão bem definida T_f , igual à temperatura de solidificação T_s . Nos últimos, a mudança de fase ocorre numa gama de temperaturas ΔT_f e ΔT_s .

Tabela 1.1 Propriedades ideais de um PCM para ser incorporado em sistemas de armazenamento de energia térmica.

Propriedades Cinéticas	Elevada taxa de cristalização Elevada taxa de nucleação: evita o subarrefecimento
Económicas	Estar disponíveis em grandes quantidades e a baixo custo; Ser rentáveis
Ambientais	Facilidade de separação dos materiais e potencial de reciclagem;
Propriedades Termofísicas	Temperatura de mudança de fase situada no intervalo de temperaturas operacionais desejado Elevado calor latente de fusão Elevada condutibilidade térmica Elevado calor específico Reduzida variação de volume durante a mudança de fase Fusão e solidificação congruentes e estabilidade térmica a longo prazo
Propriedades Químicas	Ciclos de fusão/solidificação completamente reversíveis Estabilidade química a longo prazo

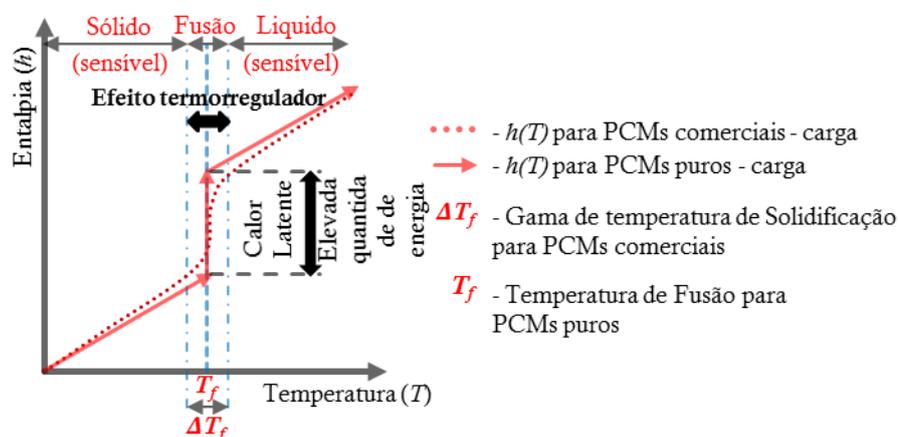


Figura 1.1. Representação dos principais campos de aplicação de PCMs em soluções para armazenamento de energia térmica. Adaptado de [15].

Na caracterização dos PCMs comerciais importa avaliar a evolução da entalpia com a temperatura $h(T)$, uma vez que esta curva representa o comportamento térmico do material. Quando se verifica subarrefecimento durante o ciclo de descarga, a temperatura do PCM tem que descer abaixo da temperatura de solidificação T_s , para iniciar a cristalização

[21]. A temperatura do PCM volta depois a subir, podendo atingir novamente a temperatura de solidificação T_s do PCM. Nos casos em que a temperatura volta a subir para T_s e $T_s = T_f$ não ocorre histerese, conforme representado na Figura 1.2. Quando a temperatura de solidificação sobe, mas $T_s \neq T_f$ o subarrefecimento provoca histerese e os ciclos de carga e descarga não coincidem. Cabeza *et al.* [22] sugeriram algumas soluções para diminuir o subarrefecimento, entre as quais a adição de elementos, que promovam a nucleação, para que a solidificação ocorra com pouco ou nenhum subarrefecimento.

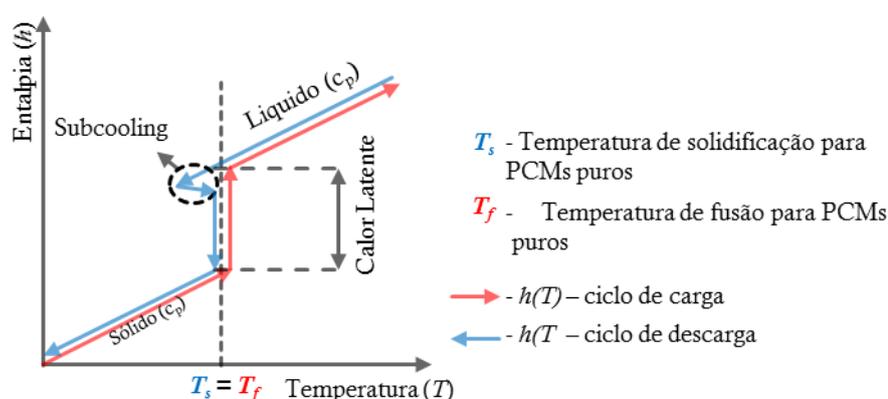


Figura 1.2. Representação esquemática da evolução da entalpia com a variação da temperatura para PCMs puros, com a representação esquemática do possível efeito de *subcooling* durante a descarga.

No que diz respeito ao fenómeno de histerese em si, inicialmente começou por ser definido como uma propriedade do material. Atualmente, entende-se que a histerese pode ser causada pelas condições experimentais dos ensaios de calorimetria (especialmente no método DSC - do inglês “*Differential Scanning Calorimetry*”), realizados para a caracterização das propriedades termofísicas do PCM, ou pelo *subcooling*. Uma vez que, quando se verifica histerese os ciclos de carga e descarga não coincidem, é necessário obter resultados de ambos os ciclos para comparação.

Outro fenómeno muito importante que é preciso ter em conta é a convecção natural no PCM fundido, visto que esta pode afetar os processos de mudança de fase. Os efeitos destes fenómenos e a sua influência na modelação numérica irá ser abordada com mais detalhe nas secções 1.5.5 e 1.5.6.

Para finalizar, como os PCMs têm uma condutibilidade térmica reduzida, é necessário desenvolver técnicas que levem ao aumento da transferência de calor. Hasnain [23] e Kenisarin *et al.* [24] apresentam vários métodos para melhorar a condutibilidade

térmica: introdução de enchimentos metálicos, estruturas de matriz metálica, alhetas e aparas de alumínio e macrocápsulas com materiais de elevada condutibilidade térmica como alumínio.

Em suma, o processo de seleção de um PCM é decisivo para conseguir o armazenamento de energia térmica desejado, e garantir que o PCM reúne as características adequadas para a aplicação pretendida.

1.5.3. Classes de PCMs

Os PCMs agrupam-se em 3 grandes grupos [6]: PCMs sólido-sólido, sólido-líquido e líquido-gasoso, como mostra a Figura 1.3. Nesta tese serão considerados apenas PCMs do segundo grupo, uma vez que estes são mais adequados para aplicações em soluções construtivas de edifícios, pois apresentam uma menor variação volúmica durante a mudança de fase [25]. Os PCMs sólido-líquido compreendem os PCMs orgânicos, inorgânicos e eutéticos. Os orgânicos são descritos como parafinas e não-parafinas. As não-parafinas incluem uma larga seleção de materiais orgânicos, como os ácidos gordos, ésteres, álcoois e glicóis. Geralmente, os PCMs orgânicos são mais usados em aplicações de edifícios, uma vez que apresentam uma temperatura de mudança de fase que se insere no intervalo 20 - 32 °C [19]. Os PCMs inorgânicos são classificados como sais hidratados e metálicos. Os eutéticos são uma composição de dois ou mais componentes, cada um dos quais funde e solidifica congruentemente [26]. Os PCMs eutéticos estão agrupados em orgânicos-orgânicos, orgânicos-inorgânicos e inorgânicos-inorgânicos. Cada um dos grupos de PCMs sólido-líquido descritos apresenta vantagens e desvantagens resumidas na Tabela 1.2.

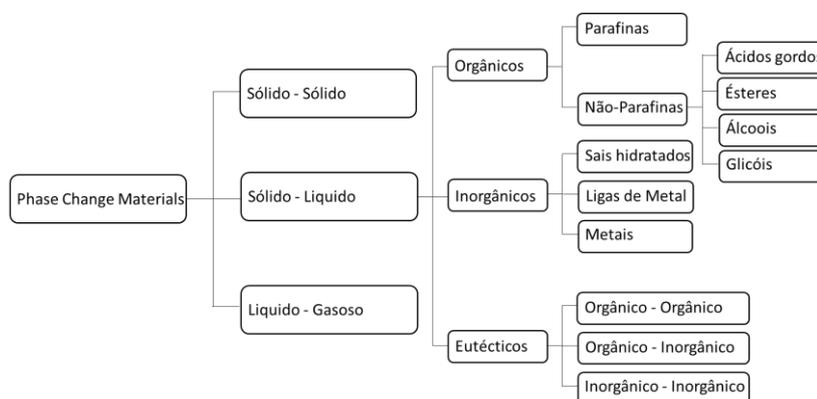


Figura 1.3 Classificação dos grupos de PCMs. Adaptado de [19].

Tabela 1.2 Caracterização dos PCMs Inorgânicos, Orgânicos e Eutéticos.

Classificação	Vantagens	Desvantagens
PCMs Inorgânicos	Elevado calor de fusão	Problemas de subarrefecimento
	Elevada condutibilidade térmica ($0,5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Corrosivo e ligeiramente tóxico
	Reduzidas variações de volume na mudança de fase	Separação de fase e decomposição
	Alargada disponibilidade a baixo custo	Segregação de fase
	Elevada capacidade volumétrica de armazenamento calor latente	Instabilidade térmica
	Compatível com plásticos	Taxas de nucleação pobres (necessidade de adição de agentes)
	Não são inflamáveis	Maioria dos sais hidratados apresenta fusão incongruente (necessidade de encapsulamento do PCM para evitar separação e adição de agentes que impeçam a deposição de sais sólidos, através da suspensão)[6]
		Diminuição da reversibilidade da fusão-solidificação a cada ciclo de carga-descarga, devido à deposição do sal no fundo da cavidade impossibilitando a combinação com a água [6] – Desidratação [23]
	Maior densidade	
		Disponibilidade em larga gama de temperaturas de fusão
	Elevado calor de fusão	Baixa capacidade volumétrica de armazenamento calor latente
	Apresenta pouco ou nenhum subarrefecimento na solidificação	Inflamáveis (dependendo da cavidade de confinamento)
	Estável quimicamente e reciclável	Incompatibilidade com cavidades de confinamento de plástico
	Compatibilidade com materiais de construção convencionais	Instável a elevadas temperaturas
PCMs Orgânicos	Não apresentam segregação de fase	Pontos de inflamação baixo
	Fusão congruente	Níveis de toxicidade variados
	Boa taxa de nucleação	Custo (ácidos gordos são 2 a 2,5 vezes mais caros das parafinas para uso técnico)
	Seguro e não-reativos	Variação de volume relativamente grande [17]
	Recicláveis	
	Propriedades não-corrosivas	
	Baixa pressão de vapor na fase líquida	
	Previsíveis	
	Mais baratos	
	Reduzida variação de volume das Parafinas [6]	
PCMs Eutéticos	Mudança de fase curta	
	Elevada densidade volumétrica de armazenamento térmico	Falta de informação disponível das propriedades termofísicas
	Fusão e solidificação congruente e sem segregação	

Os PCMs podem também ser divididos em três grupos, consoante a gama de temperaturas em que a mudança de fase ocorre. Os PCMs que mudam abaixo dos $15 \text{ }^\circ\text{C}$ –

PCMs de baixa temperatura – são normalmente usados em aplicações de ar condicionado e indústria do frio. Os que apresentam temperaturas de mudança de fase na gama dos 15 – 90 °C – PCMs de temperatura média – são os mais populares, podendo ser usados em aplicações solares, na eletrónica, etc.. Todos os PCMs que mudam de fase acima dos 90 °C são desenvolvidos principalmente para aplicações industriais e aeroespaciais [4].

1.5.4. Técnicas de confinamento dos PCMs

Na literatura foram identificadas várias técnicas de confinamento dos PCMs. Hawes *et al.* [28] consideraram que os 3 métodos mais promissores são: incorporação direta, imersão e encapsulamento.

A incorporação direta é o método mais simples no qual os PCMs são diretamente adicionados a outros materiais durante a produção de soluções construtivas. Este método é economicamente atrativo pelo facto de não requerer equipamento especial, mas o vazamento no estado líquido e a incompatibilidade dos PCMs com alguns materiais de construção podem ser problemáticos.

No método de imersão, os materiais de construção porosos (como o gesso, tijolos ou blocos de cimento) são mergulhados no seio do PCM líquido, sendo este absorvido por ação capilar. O material poroso é depois retirado, permitindo o seu arrefecimento e garantindo que o PCM se mantenha nos poros. No entanto, e tal como no método de incorporação direta, o vazamento de PCM pode ser problemático a longo prazo. No que diz respeito ao encapsulamento, existem duas técnicas principais: o macro e o microencapsulamento.

Relativamente ao macroencapsulamento, há que ter em consideração dois aspetos muito importante [29]: a geometria e os parâmetros térmicos da cavidade de confinamento requerida para uma determinada quantidade de PCM. Cada um destes fatores tem influência direta na transferência de calor para o PCM. Estes parâmetros afetam também a duração dos ciclos de carga e descarga e o próprio desempenho da UAE. O macroencapsulamento compreende a inclusão do PCM no seu estado livre (ou eventualmente microencapsulado) em cavidades como tubos, bolsas, esferas, painéis e outros recipientes [18]. Estas cavidades podem posteriormente ser incorporadas em sistemas para armazenamento de energia. A macrocápsula evita o vazamento de material e funciona como uma barreira com o exterior, aumentando a compatibilidade dos PCMs com outros

componentes. Contudo, o macroencapsulamento pode potencializar problemas relacionados com a baixa condutibilidade térmica dos PCMs.

O microencapsulamento é uma técnica na qual as partículas sólidas ou líquidas de 1 a 1000 μm de PCM (núcleo) são envolvidas por um filme polimérico fino, selado e de elevado peso molecular (a casca). A microcápsula garante a manutenção da forma e previne o vazamento de PCM no estado líquido. Esta técnica permite fabricar PCMs mais avançados com uma área de transferência de calor maior, menor reatividade com a envolvente e um controlo das variações de volume muito maior durante a mudança de fase [5]. Além disso, aumenta a estabilidade cíclica, uma vez que a separação de fase é restringida a um nível microscópico [30].

1.5.5. Avaliação da transferência de calor em elementos com PCMs

A simulação da transferência de calor com mudança de fase dos PCMs é complexa, sendo necessário ter em conta a variação da densidade e de outras propriedades termofísicas com a evolução da temperatura, a expansão volumétrica e a convecção natural no PCM fundido, etc.. Além disto, a frequente incorporação de alhetas de elevada condutibilidade térmica no seio do PCM, torna necessário avaliar o impacto da configuração geométrica das cavidades de confinamento na transferência de calor e, conseqüentemente, na quantidade de energia armazenada e restituída durante os ciclos de carga e descarga, respetivamente.

Em 2004, Huang *et al.* [32] validaram um modelo numérico para avaliar um sistema PV/PCM (sistema fotovoltaico com PCMs), através da comparação de isotérmicas obtidas experimentalmente. A incorporação de PCMs permite que o sistema PV/PCM opere perto das temperaturas características de funcionamento do PCM, garantindo assim uma maior eficiência na conversão de energia solar. Outro benefício passa pela possibilidade de libertar a energia armazenada no PCM para o interior do edifício durante a noite, contribuindo para um maior conforto térmico. Foi realizado um estudo paramétrico para avaliar o comportamento térmico dos sistemas PV/PCM, com 2 tipos de PCMs e 3 configurações diferentes do sistema: sistema I - com uma única placa de alumínio plana; sistema II - PV/PCM sem alhetas internas; sistema III - PV/PCM com alhetas internas. Os autores verificaram uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, como se pode ver na Figura 1.4. Contudo, detetaram-se algumas discrepâncias relacionadas

com atrasos temporais, justificadas por: (i) bolhas no início da fusão inibem a transferência de calor da superfície frontal para o PCM; (ii) os suportes dos termopares aumentam a transferência de calor para a placa de trás e para o PCM sólido. Os autores concluíram que para uma radiação de 1000 W m^{-2} e uma temperatura ambiente de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, a temperatura na superfície frontal do sistema era mantida abaixo dos $36.4 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 80 min, para o sistema III - profundidade de 20 mm (PCM com temperatura de mudança de fase de $32 \text{ }^\circ\text{C}$). As alhetas permitem uma distribuição mais uniforme das temperaturas no interior do sistema PV/PCM. Verificou-se também que a convecção natural no PCM fundido aumenta a transferência de calor, aumentando a capacidade de controlo térmico do PV.

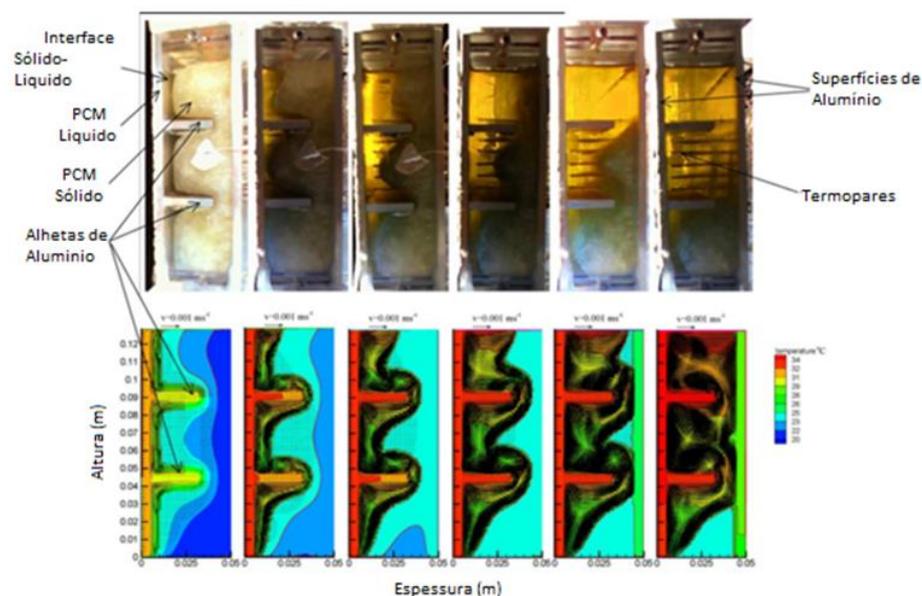


Figura 1.4 Imagens do estudo experimental e das regiões isotérmicas e distribuições de velocidades obtidas numericamente no sistema III na configuração com alhetas do sistema PV/PCM. Adaptado de [32].

Em 2011, Huang *et al.* [40] avaliaram experimentalmente os efeitos da convecção natural e da segregação cristalina na transferência de calor num sistema PV/PCM com alhetas. Os autores verificaram que, durante a solidificação, ocorre a contração do PCM com a formação de cavidades "ocas" sob as alhetas (Figura 1.5). Com um certo espaçamento entre as alhetas, a convecção natural aumentava a taxa de transferência de calor, diminuindo a estratificação da temperatura. Contudo, quando o espaçamento entre as alhetas é reduzido, verifica-se a redução do efeito da convecção natural no PCM fundido. Consequentemente, o tempo necessário para a fusão aumenta. Os autores concluíram que, as principais

desvantagens na utilização de alhetas é a redução do período de regulação térmica e o aumento do peso estrutural.

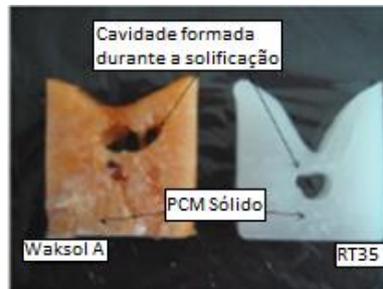


Figura 1.5 Cavidades “ocas” formadas na zona central da massa de PCM do Waksol e do RT35 quando a solidificação ocorre. Adaptado de [40].

Yang *et al.* [33] avaliaram numericamente a mudança de fase de metais de baixo ponto de fusão (LMPMs) e de parafinas. Os LMPMs são um novo tipo de PCMs que exibem uma excelente capacidade de extração de calor, devido à sua elevada condutibilidade térmica (cerca de 200 vezes maior do que as parafinas). Tal característica garante um modo de fusão distinto que dificilmente se encontra em parafinas convencionais. Os autores concluíram que, a convecção natural tem um papel fundamental na mudança de fase das parafinas, ao contrário dos LMPMs onde a condução de calor é o mecanismo dominante (Figura 1.6). De facto, os autores verificaram que no caso do LMPMs, a interface líquido-sólido é praticamente vertical durante todo o período de mudança de fase, bem como a distribuição da temperatura, ao contrário do caso da parafina.

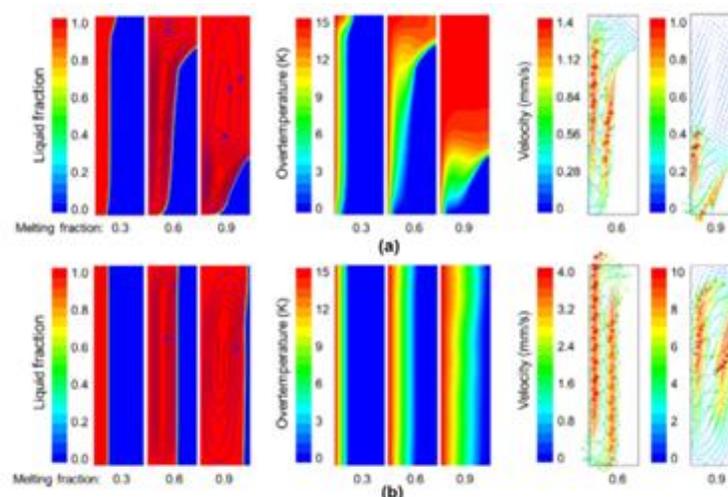


Figura 1.6 Evolução da fração líquida local e da distribuição de temperaturas no (a) Icosane e no (b) Gálio. A variável “Overtemperatures” refere-se à diferença entre a temperatura local e a temperatura de fusão do PCM. Adaptado de [33].

Cabeza *et al.* [34] estudaram a possibilidade de aumentar a capacidade de armazenamento de energia térmica de placas de gesso e de blocos de cimento através da incorporação de PCMs. Os autores começaram por introduzir PCMs microencapsulados em cimento (cimento-PCM). Foram construídas duas células de teste à escala real em Lleida (Espanha), uma célula de referência construída com materiais comuns, e outra com o cimento-PCM.

O PCM usado tem uma temperatura de mudança de fase de 26 °C e uma entalpia de mudança de fase de 110 kJ kg⁻¹. Os autores monitorizaram o comportamento térmico das duas células de teste durante 2 anos. Verificaram que a célula de referência atingia a temperatura máxima medida na célula de cimento-PCM (36 °C) cerca de 2 horas antes. Como se pode ver na Figura 1.7, para um determinado dia em que a temperatura máxima no exterior atingiu os 31 °C, a parede Este da célula de cimento-PCM atingiu apenas 36 °C, enquanto a parede da célula de referência chegou aos 39 °C. De forma a avaliar a influência da área fenestrada e da ventilação foram realizados vários ensaios com duração de uma semana para cada uma de 3 situações: (i) janelas abertas durante a noite e fechadas durante o dia (apenas as janelas da parede Sul podem ser abertas); (ii) janelas abertas durante todo o dia; (iii) janelas fechadas durante todo o dia. Os autores concluíram que nas situações em que as temperaturas no exterior e a radiação solar eram mais elevadas, a primeira combinação era a melhor opção. As janelas abertas durante a noite potenciam a descarga do PCM, garantindo que no início de um novo ciclo de carga não existe PCM no estado líquido.

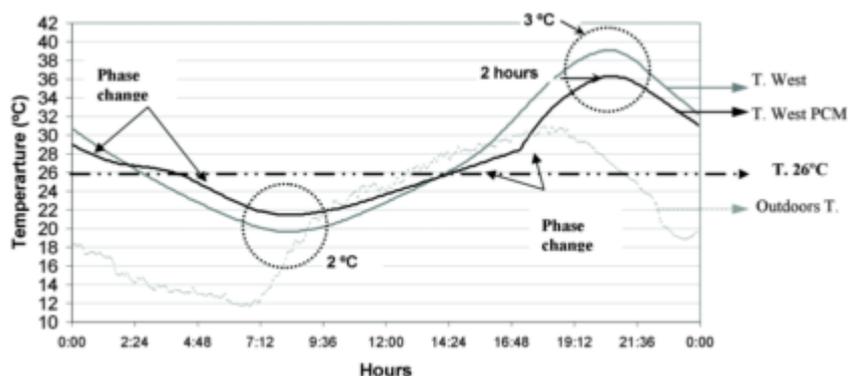


Figura 1.7. Temperatura no exterior e na parede Este dos dois cubículos, com janela fechada [35].

Diarte *et al.* [35] avaliaram o desempenho térmico de um novo tipo de fachadas ventiladas ativas com PCMs na camada exterior. Os autores compararam o comportamento térmico do novo sistema com o comportamento de alguns sistemas construtivos mais convencionais. Os resultados experimentais mostraram que o processo de fusão-solidificação que ocorre no PCM leva a um aumento da absorção de calor durante a mudança de fase, o que reduz o sobreaquecimento da fachada, e que a velocidade do ar que circula através da câmara de ventilação tem uma influência significativa na descarga do PCM e na eficiência do sistema. Relativamente aos resultados das simulações, estes mostraram que a inércia térmica das fachadas ventiladas é maior do que a das soluções construtivas convencionais. Na prática, esta solução construtiva combina os benefícios das fachadas ventiladas com o potencial dos PCMs.

1.5.6. Modelação numérica da mudança de fase

O estudo da transferência de calor envolvendo a mudança de fase de PCMs (fusão e solidificação) é uma área bastante ativa da análise dos processos de transferência de calor. O problema de prever o comportamento da mudança de fase é difícil devido à sua não-linearidade na fronteira móvel, na qual os balanços de massa, de quantidade de movimento e de energia devem ser verificados, e ao facto de as duas fases apresentarem propriedades termofísicas diferentes. Cabeza *et al.* [36] afirmaram que os problemas de fronteira móvel são especialmente complicados devido ao facto da fronteira sólido-líquido se mover em função da velocidade a que o calor latente é absorvido ou libertado na fronteira, de tal forma que a sua posição não é conhecida *a priori*, fazendo parte da solução do problema. Na literatura, a interface sólido-líquido é conhecida como “o problema de Stefan” [6, 37-38]. As soluções para o problema de Stefan incluem soluções analíticas e numéricas. Em geral o uso de soluções analíticas está limitado a uma análise unidimensional, já que se tornam demasiado complexas quando são empregues em problemas multidimensionais [6].

Dutil *et al.* [39] apresentam uma extensa revisão bibliográfica sobre a modelação e a simulação matemática de sistemas de armazenamento de energia térmica com PCMs. O seu trabalho fornece formulações matemáticas básicas para a modelação numérica da mudança de fase usando tanto a primeira como a segunda lei da termodinâmica e o recurso a malhas fixas, móveis e adaptáveis [40]. Sharma *et al.* [6] concluíram que os métodos numéricos, tanto os de diferenças finitas como os de elementos finitos, são aparentemente

mais potentes e versáteis na resolução do problema de Stefan. Referiram ainda que, em geral, uma malha variável no tempo garante uma maior precisão mas é limitada a geometrias e problemas simples. A abordagem com malha fixa, para a qual geralmente se assume que o calor latente de fusão é “absorvido” pelo calor específico (método da capacidade calorífica efetiva) ou pela entalpia (método da entalpia) é muito mais simples em aplicações práticas. O objetivo destes métodos é estabelecer uma única equação de conservação de energia para todo o domínio, incluindo a fase sólida, a fase líquida, e a interface de mudança de fase. O método da entalpia trata a entalpia como a variável dependente na equação de conservação de energia que é integrada expressando o fluxo de calor em termos de entalpia. Este método foi usado várias vezes de uma forma particular para que a temperatura do PCM fosse a única variável desconhecida e que a solidificação ocorresse a uma temperatura uniforme [41]. O método da capacidade calorífica equivalente, ou efetiva, considera o calor latente como um acréscimo da capacidade calorífica em todo o intervalo de temperatura em que ocorre a mudança de fase [40]. Assim, a temperatura é a única variável dependente do problema e a localização da interface sólido-líquido pode ser determinada quando a distribuição de temperaturas for obtida [42].

2. MODELO NUMÉRICO

Este capítulo apresenta o modelo numérico desenvolvido. O modelo físico é definido com base na geometria de um sistema avaliado experimentalmente por Soares *et al.* [15,16] e nas condições de fronteira impostas durante os ensaios experimentais. As propriedades termofísicas dos materiais utilizados foram obtidas com base na literatura e nos valores medidos experimentalmente [15]. Neste capítulo, são também apresentadas as principais hipóteses de simplificação adotadas para a definição do domínio de estudo. Apresenta-se o modelo matemático e as equações que regem o problema. De acordo com a literatura e com os resultados experimentais obtidos por Soares *et al.* [15,16], a condução é o mecanismo de transferência de calor dominante no caso dos PCMs microencapsulados. Deste modo, neste capítulo, apresenta-se um modelo numérico bidimensional puramente difusivo baseado no método dos volumes de controlo [43]. O efeito da convecção natural será desprezado.

2.1. Modelo Físico

O problema da transferência de calor em cavidades retangulares preenchidas com PCMs microencapsulados será tratado numericamente através de um modelo puramente difusivo, bidimensional, referenciado em coordenadas cartesianas. A Figura 2.1 representa a geometria domínio físico considerado para a macrocápsula metálica sem cavidades - UAE sem alhetas. Considera-se que as fronteiras Norte e Sul são adiabáticas. A condição de fronteira de temperatura conhecida ao longo do tempo é imposta nas superfícies Oeste e Este, T_Q e T_F respetivamente, com base nos valores medidos experimentalmente.

A Figura 2.2 mostra uma representação esquemática do domínio físico da macrocápsula com 15 cavidades - UAE com alhetas.

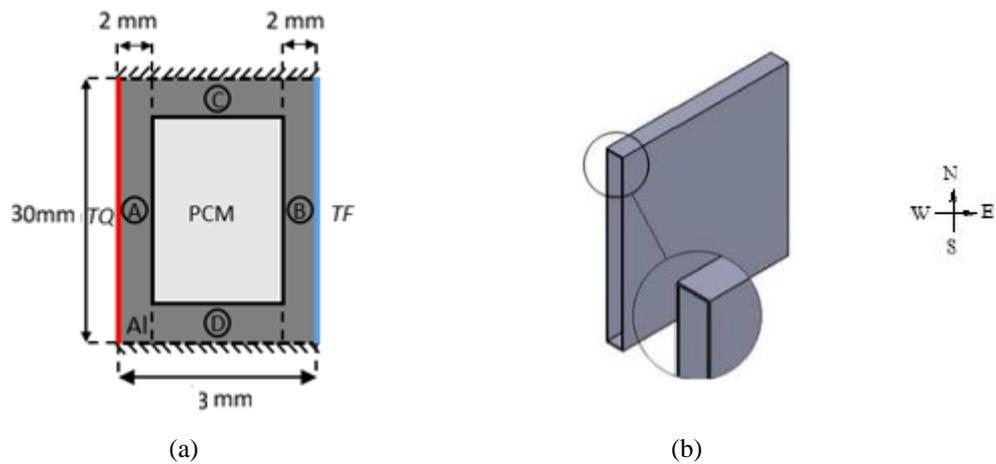


Figura 2.1. (a) Representação esquemática do domínio físico para uma cavidade sem alhetas: geometria, mudanças de material (obstáculos A,B,C e D representam o domínio de alumínio) e condições de fronteira (b) Representação esquemática 3D da UAE sem alhetas. Adaptado de [15].

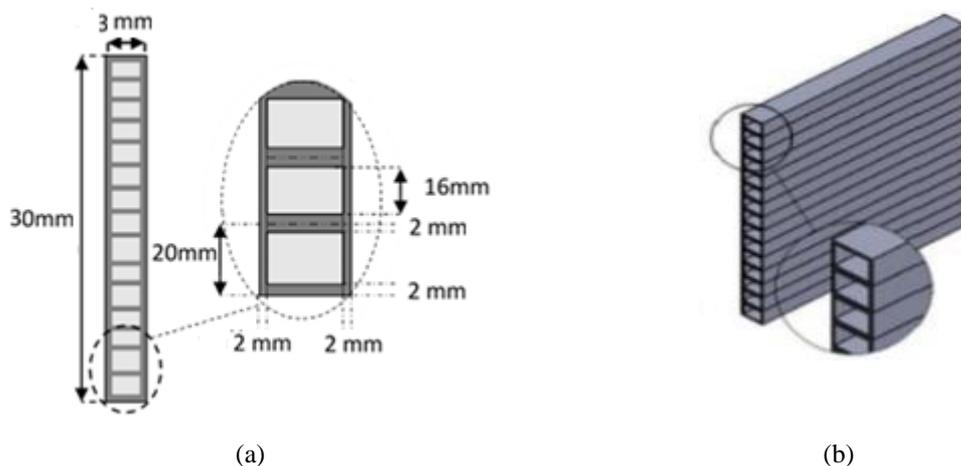


Figura 2.2. (a) Representação esquemática do domínio de cálculo para uma cavidade com 15 cavidades. (b) Representação esquemática 3D da UAE com alhetas. Adaptado de [15].

Após a definição dos domínios físicos, estabeleceu-se o sistema de coordenadas representado na Figura 2.3, que foi usado na determinação dos índices I e J utilizados no modelo numérico para a definição da geometria, condições de fronteira e dos restantes parâmetros de monitorização para a UAE sem alhetas (uma só cavidade). A Figura 2.4 diz respeito à UAE com alhetas (15 cavidades).

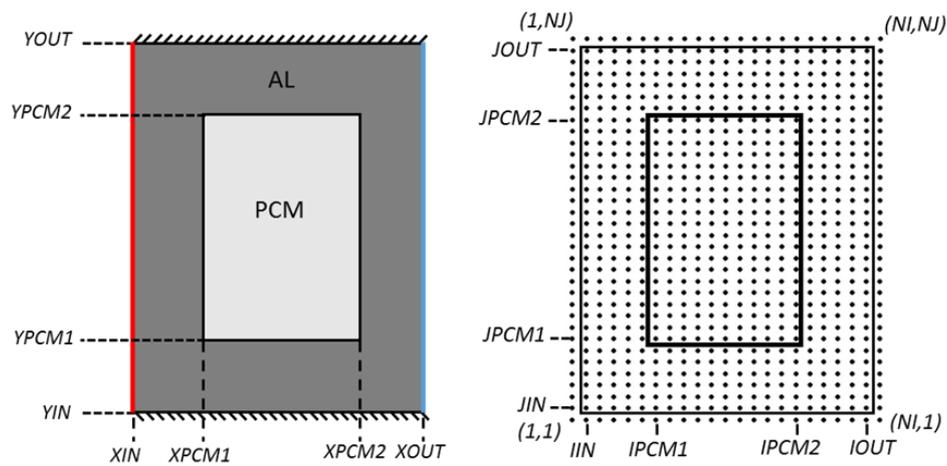


Figura 2.3 Sistema de coordenadas e determinação dos índices I e J para a UAE sem alhetas.

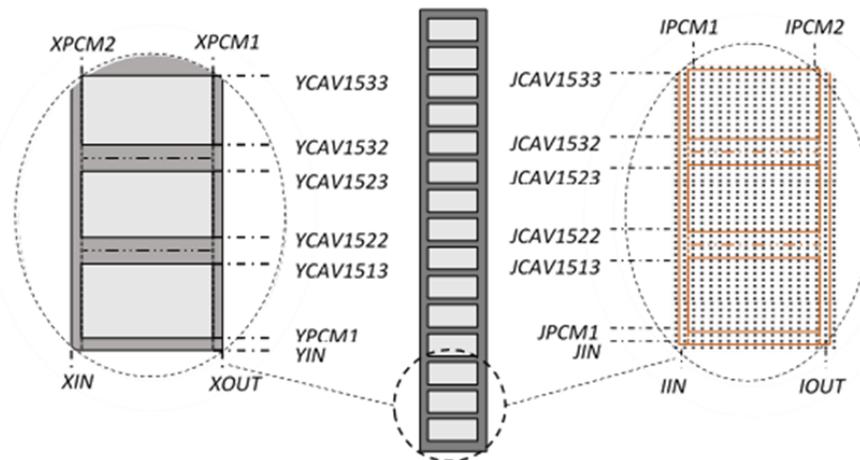


Figura 2.4 Sistema de coordenadas e determinação dos índices I e J para a UAE com alhetas.

2.2. Condições de fronteira e variáveis a monitorizar na validação numérica

As condições de fronteira Oeste e Este do domínio numérico ao longo do tempo, correspondem às variáveis $TQ(t)$ e $TF(t)$, monitorizadas durante os ensaios experimentais desenvolvidos por Soares *et al.* [15, 16], conforme esquematizado na Figura 2.5. A fronteira das superfícies superior e inferior é considerada adiabática.

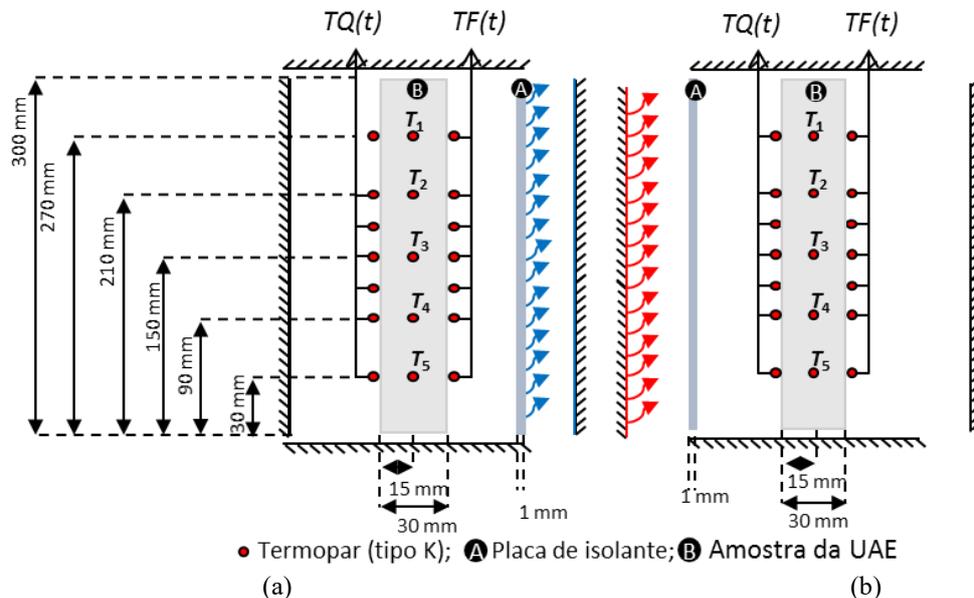


Figura 2.5. Representação esquemática da secção transversal do domínio físico experimental com as principais variáveis monitorizadas durante a (a) descarga e a (b) carga do PCM.

No que diz respeito às variáveis a monitorizar para a validação do modelo numérico, o estudo incidirá, essencialmente, na monitorização da evolução da temperatura a meia secção do domínio do PCM (T_1 a T_5 , Figura 2.6).

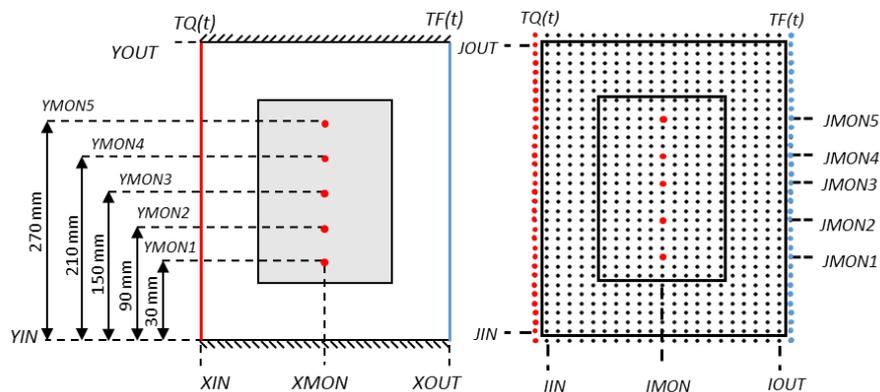


Figura 2.6. Representação esquemática da localização das temperaturas T_1 a T_5 no domínio de cálculo e definição dos nodos correspondes.

De forma complementar, também se determinará a potência na interface de alumínio/PCM. A evolução da potência que entra/sai no domínio de PCM durante a carga/descarga, vai ser usada na validação do modelo numérico, e na avaliação do desempenho da UAE. Na determinação da potência na interface de alumínio/PCM, utilizou-se o método das resistências térmicas (Figura 2.7). Partindo-se da Lei de Fourier tem-se que:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta T}{\Delta x} \right) \quad [\text{W}]. \quad (2.1)$$

Introduzindo o conceito de resistência térmica condutiva tem-se também que:

$$R_{\text{cond}} = \left(\frac{\Delta x}{k \cdot A} \right) \quad [^{\circ}\text{C W}^{-1}], \quad (2.2)$$

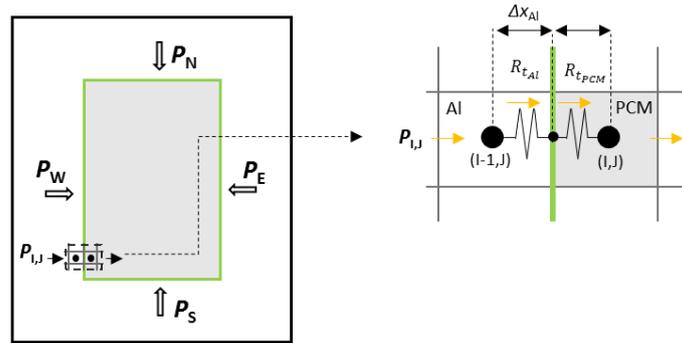


Figura 2.7. Representação esquemática do método das resistências.

No contexto do estudo da potência na interface alumínio/PCM tem-se que:

$$R_{tAl} = \frac{\Delta x}{k_{Al} \times A} \quad [^{\circ}\text{C W}^{-1}], \quad (2.3)$$

e

$$R_{tPCM} = \frac{\Delta x}{k_{PCM} \times A} \quad [^{\circ}\text{C W}^{-1}]. \quad (2.4)$$

Assim, a potência que entra/sai num determinado volume de controle (VC) junto à interface alumínio – PCM do lado Oeste, é determinada a partir de:

$$P_{i,j} = \frac{\Delta T}{R_{tAl} + R_{tPCM}} = \frac{(T_{i-1,j} - T_{i,j})}{R_{tAl} + R_{tPCM}} \quad [\text{W}], \quad (2.5)$$

e a potência total que entra, num determinado instante t , é calculada a partir de:

$$P_W = \sum_{J=J_{PCM1}}^{J_{PCM2}} (P_{I,J}) \quad [\text{W}]. \quad (2.6)$$

As potências que entram/saem nas restantes fronteiras do domínio podem ser calculadas através de equações análogas às equações (2.5) e (2.6). Assim, a potência total que entra/sai no domínio de PCM durante a carga/descarga, por metro de profundidade é determinada a partir de:

$$P_{\text{intAl/PCM}} = \left(\sum_{t=0}^{t_{\text{final}}} (P_W + P_E + P_N + P_S) \right) \times L_{\text{cav}} \quad [\text{W}], \quad (2.7)$$

onde L_{cav} é a largura da cavidade. Desta forma, a energia acumulada/restituída pelo PCM é calculada segundo:

$$E = P_{\text{intAl/PCM}} \times \Delta t \quad [\text{J}]. \quad (2.8)$$

2.3. Método da capacidade calorífica equivalente

No modelo numérico é usado o método da capacidade calorífica equivalente para tratar o calor latente envolvido na mudança de fase dos PCMs. Este método introduz o conceito da equivalência do calor latente a um "falso" calor sensível na gama de temperaturas de mudança de fase. Admite-se que, as propriedades termofísicas do PCM são diferentes nas duas fases, mas constantes em cada uma delas. Considera-se que existe uma variação linear das propriedades com a temperatura, no intervalo de mudança de fase. O fenómeno de histerese ($T_m \neq T_s$) é tido em conta, sendo introduzida uma condição para o modelo saber se está em fase de carga ou descarga. Considera-se que o PCM funde num intervalo de temperaturas $\Delta T_m = [T_{1m}, T_{2m}]$ centrado em T_m , e solidifica num intervalo de temperaturas $\Delta T_s = [T_{1s}, T_{2s}]$ centrado em T_s .

A Figura 2.8 traduz uma representação esquemática do método da capacidade calorífica equivalente implementado no modelo, assumindo-se um perfil de variação triangular (Figura 2.8a), e outro quadrangular (Figura 2.8b).

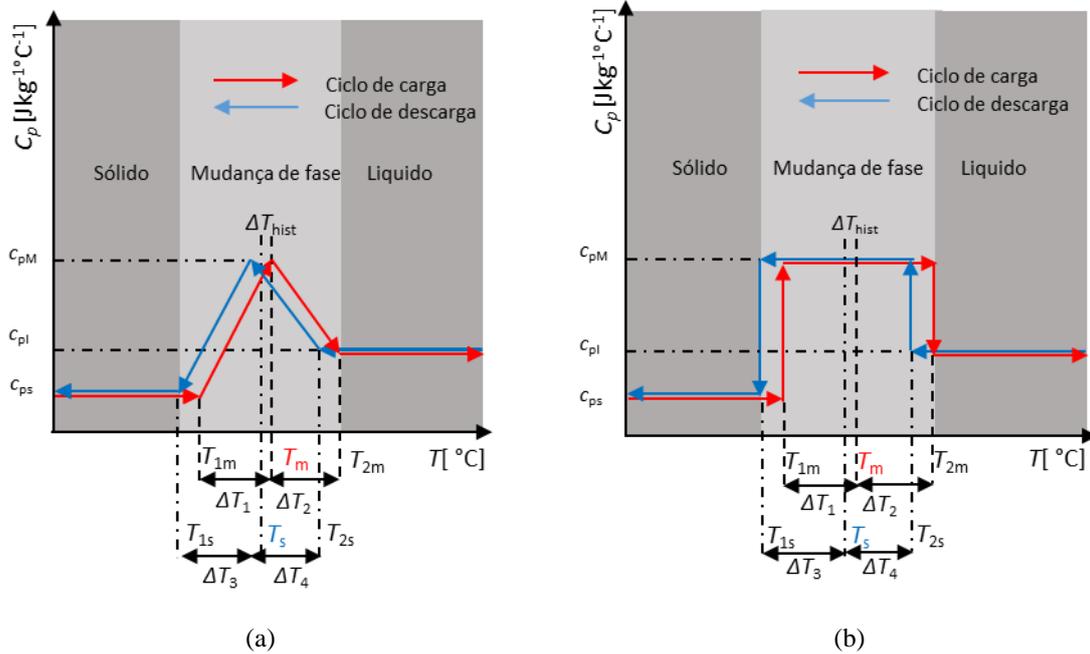


Figura 2.8 Representação esquemática do método da capacidade calorífica equivalente, com evolução da capacidade calorífica durante a mudança com perfil (a) triangular e (b) quadrangular

O método da capacidade calorífica equivalente, ilustrado na Figura 2.8a é traduzido pelas seguintes equações:

$$c_p(T) = \begin{cases} c_{ps} & ; T \leq T_{1m} \\ c_{ps} + \frac{c_{pM} - c_{ps}}{T_m - T_{1m}} \times (T - T_{1m}) & ; T_{1m} < T \leq T_m \\ c_{pM} + \frac{c_{pl} - c_{pM}}{T_{2m} - T_m} \times (T - T_m) & ; T_m < T < T_{2m} \\ c_{pl} & ; T \geq T_{2m} \end{cases}, \quad (2.9)$$

para carga do PCM, com $c_{pM} = \frac{L}{T_{2m} - T_{1m}} + \frac{c_{ps} + c_{pl}}{2}$, $T_{1m} = T_m - \Delta T_1$, $T_{2m} = T_m + \Delta T_2$, e

$$c_p(T) = \begin{cases} c_{ps} & ; T \leq T_{1s} \\ c_{ps} + \frac{c_{pM} - c_{ps}}{T_s - T_{1s}} \times (T - T_{1s}) & ; T_{1s} < T \leq T_s \\ c_{pM} + \frac{c_{pl} - c_{pM}}{T_{2s} - T_s} \times (T - T_s) & ; T_s < T \leq T_{2s} \\ c_{pl} & ; T \geq T_{2s} \end{cases}, \quad (2.10)$$

para a descarga do PCM, com $c_{pM} = \frac{L}{T_{2s} - T_{1s}} + \frac{c_{ps} + c_{pl}}{2}$, $T_s = T_m - \Delta T_{hist}$, $T_{1s} = T_s - \Delta T_3$, $T_{2s} = T_s + \Delta T_4$.

Assim, definindo a capacidade calorífica equivalente, C [$\text{J m}^{-3} \text{°C}^{-1}$], como o produto da massa volúmica, ρ [kg m^{-3}], por um calor específico equivalente, $c_p(T)$ [$\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$], tem-se:

$$C(T) = \begin{cases} C_s & ; T \leq T_{1m} \\ C_s + \frac{C_M - C_s}{T_m - T_{1m}} (T - T_{1m}) & ; T_{1m} < T \leq T_m \\ C_M + \frac{C_l - C_M}{T_{2m} - T_m} (T - T_m) & ; T_m < T < T_{2m} \\ C_l & ; T \geq T_{2m} \end{cases}, \quad (2.11)$$

para a carga do PCM, e

$$C(T) = \begin{cases} C_s & ; T \leq T_{1s} \\ C_s + \frac{C_M - C_s}{T_s - T_{1s}} (T - T_{1s}) & ; T_{1s} < T \leq T_s \\ C_M + \frac{C_l - C_M}{T_{2s} - T_s} (T - T_s) & ; T_s < T \leq T_{2s} \\ C_l & ; T \geq T_{2s} \end{cases}, \quad (2.12)$$

para a descarga do PCM, com $C_s = \rho_{PCMs} \cdot c_{ps}$ e $C_l = \rho_{PCMl} \cdot c_{pl}$.

As equações matemáticas que traduzem a evolução da capacidade calorífica equivalente considerando o modelo quadrangular apresentam-se no ANEXO A. De realçar que, a capacidade calorífica equivalente, $C(T)$, para o estágio da coexistência das duas fases é superior a duas ordens de grandeza em relação à das duas fases, sólida e líquida.

A condutibilidade térmica num dado volume de controlo varia com as frações de líquido e de sólido presentes num determinado momento (Figura 2.9). No método da capacidade calorífica equivalente, as frações de sólido e líquido em cada instante são função da temperatura, por exemplo:

- se $T = T_{1m}$ ou $T = T_{1s}$ tem-se 100% do PCM na fase sólida;
- se $T = T_m$ ou $T = T_s$ tem-se 50% do PCM em cada uma das fases;
- se $T = T_{2m}$ ou $T = T_{2s}$ tem-se 100% do PCM na fase líquida;

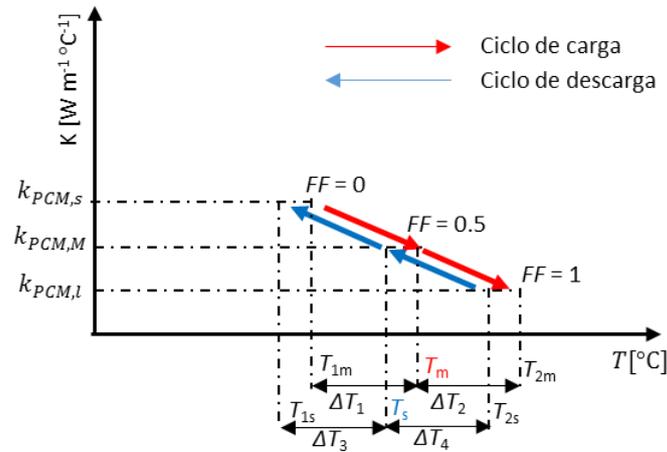


Figura 2.9 Variação da condutividade térmica do PCM com a temperatura durante os ciclos de carga e de descarga.

Tem-se então, que:

$$k_{\text{PCM}}(T) = \begin{cases} k_{\text{PCMs}} & ; T \leq T_{1m} \\ k_{\text{PCMs}} + \frac{k_{\text{PCMM}} - k_{\text{PCMs}}}{T_m - T_{1m}} (T - T_{1m}) & ; T_{1m} < T \leq T_m \\ k_{\text{PCMM}} + \frac{k_{\text{PCMI}} - k_{\text{PCMM}}}{T_{2m} - T_m} (T - T_m) & ; T_m < T < T_{2m} \\ k_{\text{PCMI}} & ; T \geq T_{2m} \end{cases}, \quad (2.13)$$

para a carga do PCM, e

$$k_{\text{PCM}}(T) = \begin{cases} k_{\text{PCMs}} & ; T \leq T_{1s} \\ k_{\text{PCMs}} + \frac{k_{\text{PCMM}} - k_{\text{PCMs}}}{T_s - T_{1s}} (T - T_{1s}) & ; T_{1s} < T \leq T_s \\ k_{\text{PCMM}} + \frac{k_{\text{PCMI}} - k_{\text{PCMM}}}{T_{2s} - T_s} (T - T_s) & ; T_s < T < T_{2s} \\ k_{\text{PCMI}} & ; T \geq T_{2s} \end{cases} \quad (2.14)$$

para a descarga do PCM, com $k_{\text{PCMM}} = 0.5(k_{\text{PCMs}} + k_{\text{PCMI}})$.

A aplicação do método permite simular a mudança de fase do PCM, mantendo a temperatura, T , como a variável dependente, e calculando depois a fração fundida de PCM, FF , em cada instante (Figura 2.7)

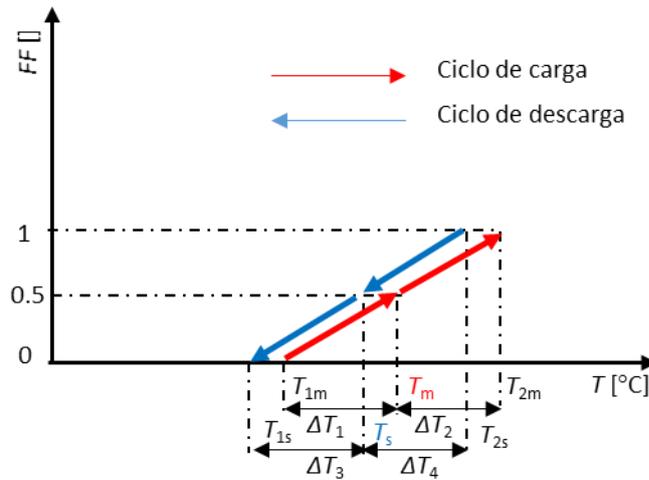


Figura 2.10 Variação da fração fundida de PCM com a temperatura, durante a carga e descarga do PCM.

Tem-se, assim:

$$FF(T) = \begin{cases} 0 & ; T \leq T_{1m} \\ 0.5 \times \left(\frac{T - T_{1m}}{T_m - T_{1m}} \right) & ; T_{1m} < T < T_m \\ 0.5 + 0.5 \times \left(\frac{T - T_m}{T_{2m} - T_m} \right) & ; T_m < T < T_{2m} \\ 1 & ; T \geq T_{2m} \end{cases}, \quad (2.15)$$

para a carga do PCM e

$$FF(T) = \begin{cases} 0 & ; T \leq T_{1s} \\ 0.5 \times \left(\frac{T - T_{1s}}{T_s - T_{1s}} \right) & ; T_{1s} < T < T_s \\ 0.5 + 0.5 \times \left(\frac{T - T_s}{T_{2s} - T_s} \right) & ; T_s < T < T_{2s} \\ 1 & ; T \geq T_{2s} \end{cases}, \quad (2.16)$$

para a descarga do PCM. Assim, garante-se que a capacidade calorífica equivalente, C , a condutibilidade térmica, k , e a fração fundida de PCM, FF , são as únicas variáveis a depender diretamente da temperatura T (variável dependente).

2.4. Equações de conservação

Quase todas as equações diferenciais de conservação que regem os fenómenos de transporte de calor (exceção às trocas de calor por radiação) podem ser representadas pela equação geral de conservação, em coordenadas cartesianas e notação tensorial, dada por:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j \phi - \Gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) = S_\phi, \quad (2.17)$$

onde ϕ é uma variável genérica que pode assumir diferentes significados: 1, na equação da continuidade, u_i ($i=1,2,3$) = u, v, w , nas equações de conservação da quantidade de movimento, h , na equação de conservação de energia, etc., assumindo Γ_ϕ e S_ϕ os significados e valores correspondentes.

Tratando-se de um problema puramente difusivo em regime transiente, cujo domínio físico é referenciado num sistema cartesiano de coordenadas Oxy (Figuras 2.3 e 2.4), tem-se que $u_j=0$, $\phi=h$, $\Gamma_\phi=k c_p^{-1}$, $S_\phi=S_h$. Rearranjando a equação (2.17) obtém-se:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad [\text{Wm}^{-3}]. \quad (2.18)$$

Se o meio físico for incompressível, então $h = c_p T$ e a equação de conservação de energia resume-se a:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad [\text{Wm}^{-3}]. \quad (2.19)$$

Considerando que $\rho \cdot c_p = C$, então obtém-se:

$$\frac{\partial(CT)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad [\text{Wm}^{-3}], \quad (2.20)$$

em que o valor de $C(T)$ é calculado a partir das equações (2.11) e (2.12).

Relativamente à conservação da massa, assumiu-se que a densidade não variava com a temperatura e que ela era igual para as duas fases, ou seja $\rho_{\text{PCM},s} = \rho_{\text{PCM},l} = \rho_{\text{PCM},M}$. Assim, considerou-se um valor contante da massa volúmica ao longo de todo o processo de mudança de massa. Esta simplificação garante o respeito da equação da continuidade, que na sua forma genérica é descrita por:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad [\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}], \quad (2.21)$$

e simplificando para as condições estabelecidas, tem-se que:

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} = 0 \quad [\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-3}]. \quad (2.22)$$

2.5. Procedimento numérico

As não linearidades presentes na equação diferencial de conservação de energia são solucionadas utilizando um método de cálculo iterativo. O conjunto de equações

algébricas lineares que constituem as equações de discretização de todos os nodos do domínio são resolvidas em cada iteração por uma técnica iterativa linha-a-linha, o algoritmo de Thomas ou TDMA, que é apropriado para equações lineares. Considera-se que a equação de discretização, resultante da integração da equação de conservação de energia (2.20) ao longo de um VC P , é descrita por:

$$a_P T_P = \sum_{viz} a_{viz} T_{viz} + b, \quad (2.23)$$

$$a_P^0 = \frac{C^0 \cdot \Delta_x \cdot \Delta_y}{\Delta t}, \quad (2.24)$$

$$b = S_U \cdot \Delta_x \cdot \Delta_y + a_P^0 \cdot T_P^0, \quad (2.25)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_P^0 - S_P \cdot \Delta_x \cdot \Delta_y, \quad (2.26)$$

onde o produto $\Delta_x \cdot \Delta_y$, representa o volume do VC (regime bidimensional: $\Delta_z = 1\text{m}$). Os coeficientes a_E , a_W , a_N , a_S representam as condutâncias térmicas entre o nodo P e os seus vizinhos e o termo $a_P^0 T_P^0$ a energia térmica contida no VC no instante t , dividida pelo intervalo de tempo Δt . O termo transiente b resulta da adição ao termo anterior da taxa de geração de calor no VC, associada a S_U . Assim considerando que a_P e a_{viz} são conhecidos, estes são atualizados antes da iteração seguinte em função dos novos valores de T determinados na iteração “presente”. A Figura 2.11 mostra o fluxograma do modelo numérico implementado, indicando os passos principais necessários para atualizar o campo de temperaturas ao longo do tempo, começando com uma distribuição inicial da temperatura $T_{i,j} = T_0$. Assim, a computação avança para o próximo passo de tempo $t = t_0 + \Delta t$, atualizando iterativamente a distribuição da capacidade calorífica equivalente, C , a fração fundida, FF , e as restantes propriedades que dependem da temperatura, até ser declarada a convergência, quando a soma dos resíduos do cálculo da distribuição da temperatura é inferior ao resíduo máximo admissível, estabelecido como 5×10^{-5} . O modelo avança para o passo de tempo seguinte, armazenando os valores calculados anteriormente.

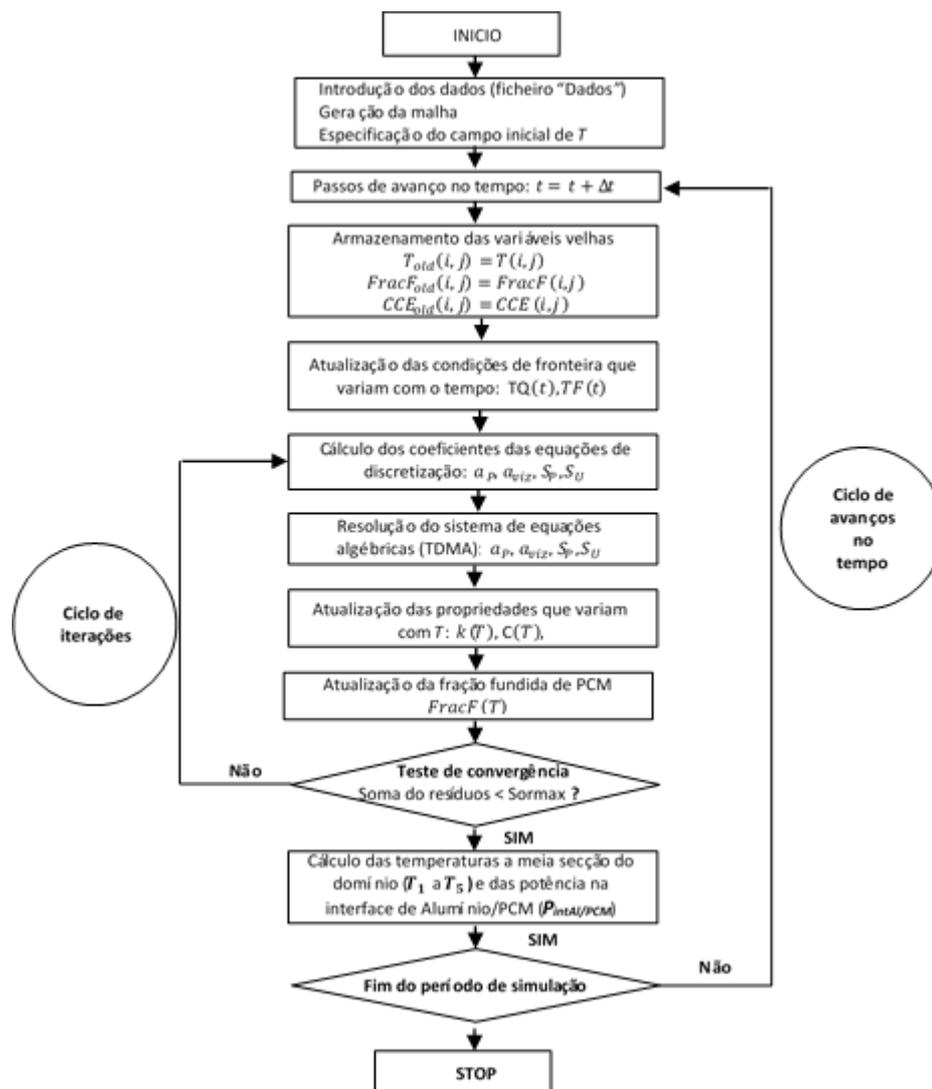


Figura 2.11. Representação do fluxograma do modelo numérico implementado.

3. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Neste capítulo é feita a validação do modelo numérico através da comparação dos resultados numéricos, obtidos com os resultados experimentais realizados por Soares *et al.* [15, 16]. Na segunda parte, apresentam-se as propriedades termofísicas do PCM microencapsulado usado no modelo numérico, avaliando o impacto da variação das propriedades na evolução da temperatura a meio da secção do domínio de PCM durante os ciclos de carga e de descarga. Nesta fase, é utilizada uma malha de 32×302 nodos e uma discretização temporal com avanços temporais, Δt , de 30 segundos. De seguida, apresentam-se alguns testes para avaliar a influência da malha e da discretização temporal. Posteriormente, compara-se a evolução da temperatura a meia secção do domínio de PCM para os dois perfis de evolução da capacidade calorífica equivalente, referidos na secção 2.2. Na última parte do capítulo, apresentam-se os principais resultados numéricos obtidos nos ciclos de carga (com potência de aquecimento de 34 e 68 W) e nos ciclos de descarga (temperatura do banho de água fria mantida a 14, 17 e 20 °C). De forma complementar, será apresentado o estudo da influência de alguns parâmetros na mudança de fase, nomeadamente os intervalos de temperaturas de mudança de fase e o efeito de *subcooling*.

3.1. Propriedades termofísicas do PCM

Nesta secção, apresentam-se os resultados do estudo do impacto da variação das propriedades termofísicas do PCM microencapsulado nas curvas de evolução de T_l . Deve referir-se que no estudo numérico, procurou-se aproximar o mais possível as propriedades dos materiais utilizados nos ensaios experimentais, com as que são definidas no modelo numérico. As propriedades termofísicas do PCM microencapsulado – Micronal® DS 5001 X e do alumínio (Tabela 3.1) foram definidas, com base em valores referidos na literatura e em medições realizadas durante os ensaios experimentais [15] através da técnica de calorimetria diferencial de varrimento (DSC). Conforme se mostra na Figura 3.1, Soares *et al.* [15] verificaram que existia uma variação de cerca de 2 °C entre as temperaturas de fusão (25.67 ± 0.07 °C) e de solidificação (23.56 ± 0.02 °C). Assim, foi considerada uma histerese de 2 °C no modelo numérico, o que permitiu aproximar melhor as curvas obtidas numérica e experimentalmente.

Tabela 3.1 Propriedades termofísicas dos materiais

	Micronal® DS 5001 X	Alumínio
Temperatura de fusão [°C]	25.7 [15]	-
Temperatura de solidificação [°C]	23.7 [15]	-
Calor latente de fusão [kJ kg ⁻¹]	127	-
Calor específico [J kg ⁻¹ K ⁻¹]		
Fase sólida	1823 [15]	896
Fase líquida	2248 [15]	-
Condutibilidade térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]		
Fase sólida	0.10	204
Fase líquida	0.15 [44]	-
Densidade [kg m ⁻³]		
Fase sólida	1150 [45]	2707
Fase líquida	1150 [43]	-

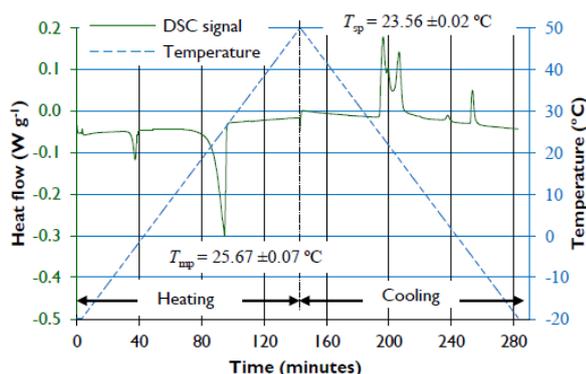


Figura 3.1. Fluxo de calor e evolução da temperatura durante as medições com a técnica de DSC de um ciclo completo do PCM microencapsulado DS 5001 X [15].

Soares *et al.* [15] mediram também o calor específico na fase sólida, $c_{p,s}$, e na fase líquida, $c_{p,l}$, definindo as seguintes gamas para estes parâmetros: $1972 \pm 276 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e $1547 \pm 263 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$, respetivamente. Nos resultados numéricos, verificou-se que, para os valores mais baixos destas gamas, o PCM fundia muito rápido. Contudo, foi possível ajustar as curvas obtidas numericamente à dos resultados experimentais (Figuras 3.2 e 3.3) fazendo variar o valor das propriedades dentro das gamas estabelecidas.

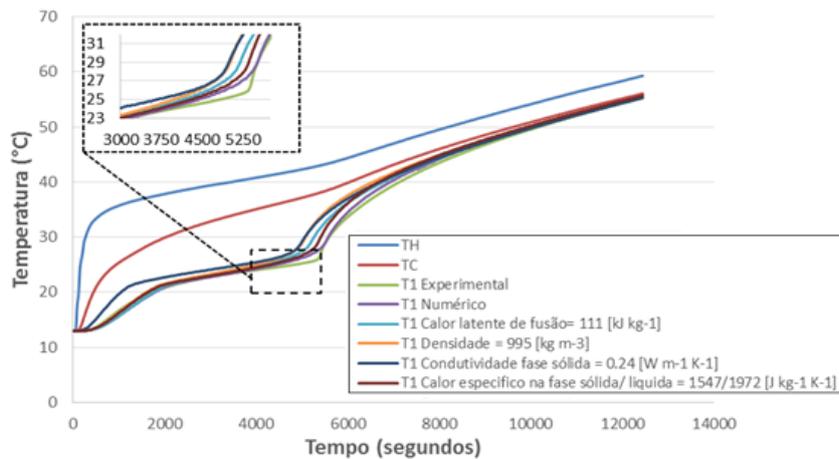


Figura 3.2. Evolução de T_1 com a variação das propriedades termofísicas do PCM, no ciclo de carga de 34W, com malha 32x302 e $\Delta t = 30s$.

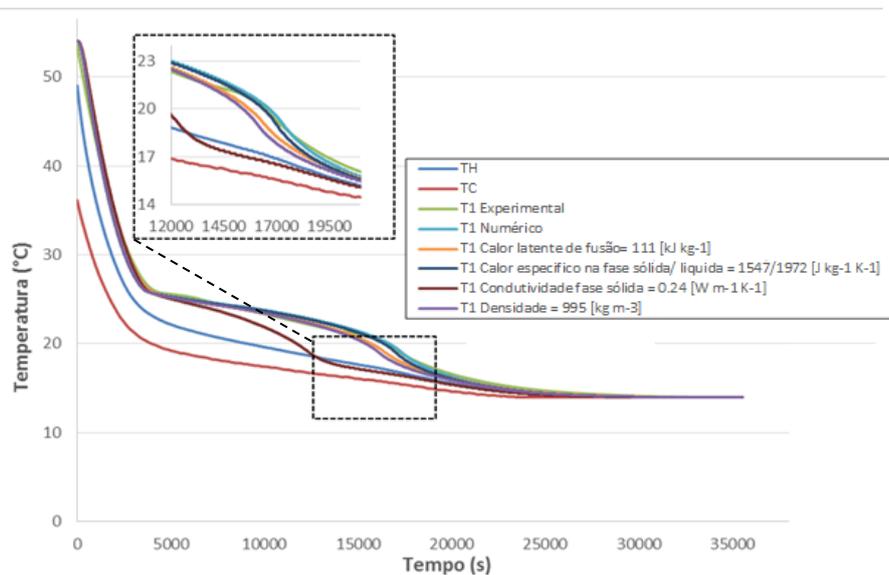


Figura 3.3. Evolução de T_1 com a variação das propriedades termofísicas do PCM, no ciclo de descarga de 14C, com malha 32x302 e $\Delta t = 30s$.

Na literatura [45] foi encontrado um valor de referência para a densidade deste PCM, $\rho_l = 995 \pm 3 \text{ kg m}^{-3}$. No entanto, verificou-se que a curva de T_1 obtida, mostrava um período de mudança de fase demasiado curto quando comparada com a curva de T_1 , medida no ensaio experimental. Soares *et al.* [15] referiram que no ensaio experimental, a cavidade foi completamente cheia com o PCM microencapsulado, e que foi utilizado um mecanismo vibratório para garantir a máxima compactação do PCM dentro da cavidade. Assim, considerou-se justificada a adoção de um valor superior para este parâmetro. No caso do calor latente de fusão do PCM, partiu-se da gama de valores especificada na literatura [45], isto é $115 - 142.6 \text{ kJ kg}^{-1}$, o que permitiu ajustar a curva numérica. Neste caso, verificou-se

que, quanto maior fosse o calor latente, maior seria o período de mudança de fase, uma vez que o PCM precisava de acumular mais energia para completar a mudança de fase. Finalmente, no que diz respeito à condutibilidade térmica na fase líquida, k_l , assumiu-se um valor de $0.15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, que vai ao encontro daquele que é encontrado na literatura [44]. Para a condutibilidade térmica na fase sólida, k_s , verificou-se que se garantia uma boa aproximação à curva experimental definindo uma condutibilidade perto de $0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Assim, conseguiu-se uma boa aproximação das curvas numérica e experimental da evolução de T_1 com o ajuste das propriedades termofísicas do PCM, respeitando os valores encontrados na literatura e medidos experimentalmente.

3.2. Testes de independência de malha e de discretização temporal

Como em qualquer método de diferenças finitas (usado para aproximar os gradientes nas faces dos volumes de controlo), há que ter em consideração os erros de truncatura associados a qualquer método de diferenças finitas, que são proporcionais à dimensão da malha de discretização. Desta forma, a precisão depende não só da obtenção de soluções aceitáveis mas também, de soluções independentes do refinamento da malha e da discretização temporal. Isto é, deve garantir-se que após um certo valor da malha e da discretização temporal, a solução não varia significativamente independentemente de refinamentos adicionais.

Para os testes de independência da malha e da discretização temporal foi adotado um modelo simplificado unidimensional (Figura 3.4), que permite estudar a evolução dos parâmetros de monitorização com menor período de computação, garantindo-se ainda assim o realismo físico.

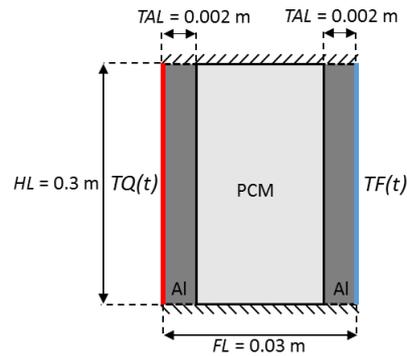


Figura 3.4. Geometria do modelo simplificado utilizados nos testes de influência de malha.

3.2.1. Testes de influência de malha

Nos testes de influência de malha, estudou-se a evolução da potência térmica transferida para o PCM (Figura 3.5) estimada na interface alumínio/ PCM, *PLINE2*, e a evolução da temperatura a meia secção do domínio de PCM, T_1 , (Figura 3.6), comparando as curvas obtidas para malhas sucessivamente mais refinadas. As curvas de evolução dessas variáveis obtidas para a malha de 242x3 serão tidas como referencial na análise do erro relativo. As Tabelas 3.2 e 3.3 mostram a evolução da distância entre os nodos de cada VC e do erro relativo médio e máximo das malhas testadas, na aproximação da evolução de T_1 *PLINE2*. Para cada malha testada, o erro relativo médio corresponde à média dos erros relativos calculados para cada instante, e o erro relativo máximo corresponde ao erro no instante em que a evolução da variável de monitorização apresenta a maior discrepância em relação à curva de referencial.

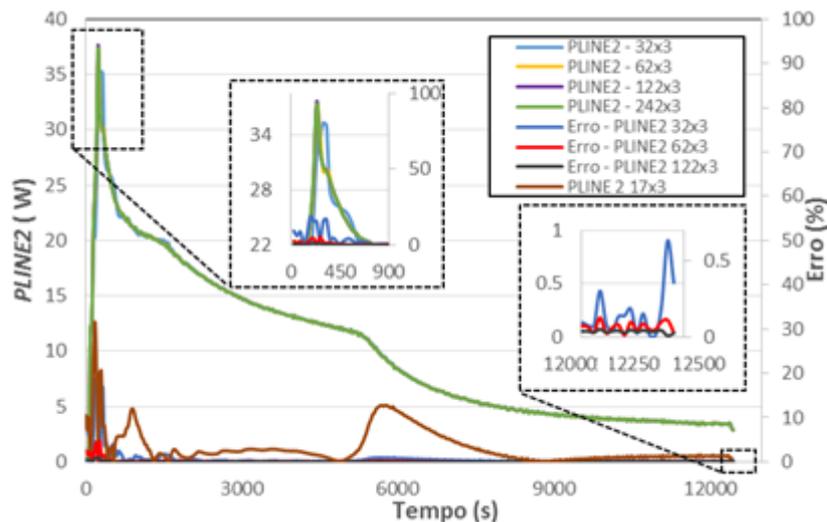


Figura 3.5. Evolução temporal da potência térmica transferida para o domínio do PCM, *PLINE2*, estimada na interface Al – PCM e do erro relativo com as diferentes malhas.

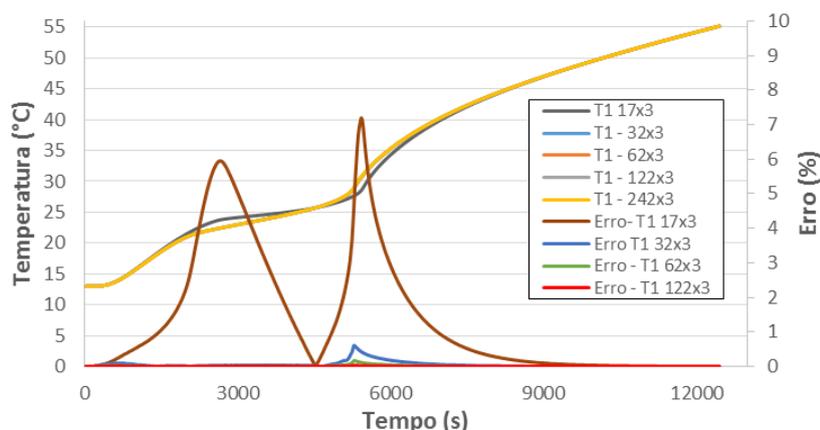


Figura 3.6 Evolução temporal de T_1 e do erro relativo associado à variação da malha do modelo

Tabela 3.2 Estudo da influência de malha na evolução de T_1 : distância entre nodos, erro médio e máximo de cada malha de discretização.

Malha	17x3	32x3	62x3	122x3
Distância entre nodos [m]	0.002	0.001	0.0005	0.00025
Erro médio (%)	1.361	0.049	0.013	0.003
Erro máximo (%)	7.199	0.601	0.166	0.031

Tabela 3.3 Estudo da influência de malha na evolução de $PLINE2$: distância entre nodos, erro médio e máximo de cada malha de discretização.

Malha	17x3	32x3	62x3	122x3
Distância entre nós [m]	0.002	0.001	0.0005	0.00025
Erro médio (%)	3.26	0.64	0.14	0.04
Erro médio (> 300s) (%)	3.04	0.45	0.09	0.03
Erro máximo (%)	31.57	18.37	4.87	1.00
Erro máximo (> 300s) (%)	20.61	16.80	1.87	0.42

Na Figura 3.5 constata-se, que durante os primeiros 300s a evolução do erro relativo tem um comportamento muito irregular, que se pode justificar, com a correspondência à fase em que nos ensaios experimentais a UAE entrava em contacto com a superfície de aquecimento, onde existe alguma incerteza das medições experimentais. Estudou-se a evolução de $PLINE2$ após esse instante (Tabela 3.3), e a independência de malha foi declarada quando se verificou que o erro relativo médio das curvas de evolução temporal de $PLINE2$ e de T_1 era inferior a aproximadamente 0.2 % e o erro relativo máximo era inferior a 2%, considerando uma malha de 62x3. No modelo bidimensional, esta malha

corresponde a uma dimensão dos volumes de controlo igual a $0.0005 \times 0.0005\text{m}$. Verificou-se, ainda, que para além de esta malha oferecer garantias de exatidão e realismo físico, o tempo de computação seria muito menor do que o da malha de 122×3 .

3.2.2. Testes de discretização temporal

Nos testes de discretização temporal assumiu-se que as curvas de evolução das variáveis monitorizadas obtidas com $\Delta t = 5\text{s}$ seriam um referencial adequado para o estudo. Após tratamento dos resultados obtidos (Tabelas 3.4 e 3.5) admitiu-se que a independência da discretização temporal foi conseguida utilizando um $\Delta t = 30\text{s}$, para o qual se verificou que o erro relativo médio de *PLINE2* e de T_1 era inferior a $\approx 1\%$ e o erro relativo máximo se mantinha inferior a 2% a partir dos 300s . As Figuras 3.7 e 3.8 ilustram a evolução de *PLINE2* e de T_1 respetivamente.

Tabela 3.4 Influência da discretização temporal na evolução de *PLINE2*: distância entre nodos, erro médio e máximo de cada discretização temporal.

Discretização Temporal	$\Delta t = 300\text{s}$	$\Delta t = 60\text{s}$	$\Delta t = 30\text{s}$	$\Delta t = 15\text{s}$	$\Delta t = 10\text{s}$
Erro Médio (%)	4.46	1.26	0.59	0.26	0.14
Erro Médio (> 300s) (%)	3.89	1.02	0.41	0.17	0.09
Erro Máximo (%)	31.60	24.44	20.99	15.99	7.59
Erro Máximo (> 300s) (%)	12.12	4.09	1.82	0.77	0.42

Tabela 3.5 Estudo da influência da discretização temporal na evolução de T_1 : distância entre nodos, erro médio e máximo cada discretização temporal.

Discretização Temporal	$\Delta t = 300\text{s}$	$\Delta t = 60\text{s}$	$\Delta t = 30\text{s}$	$\Delta t = 15\text{s}$	$\Delta t = 10\text{s}$
Erro Médio (%)	1.89	0.41	0.19	0.08	0.04
Erro Máximo (%)	7.75	3.95	0.89	0.38	0.20

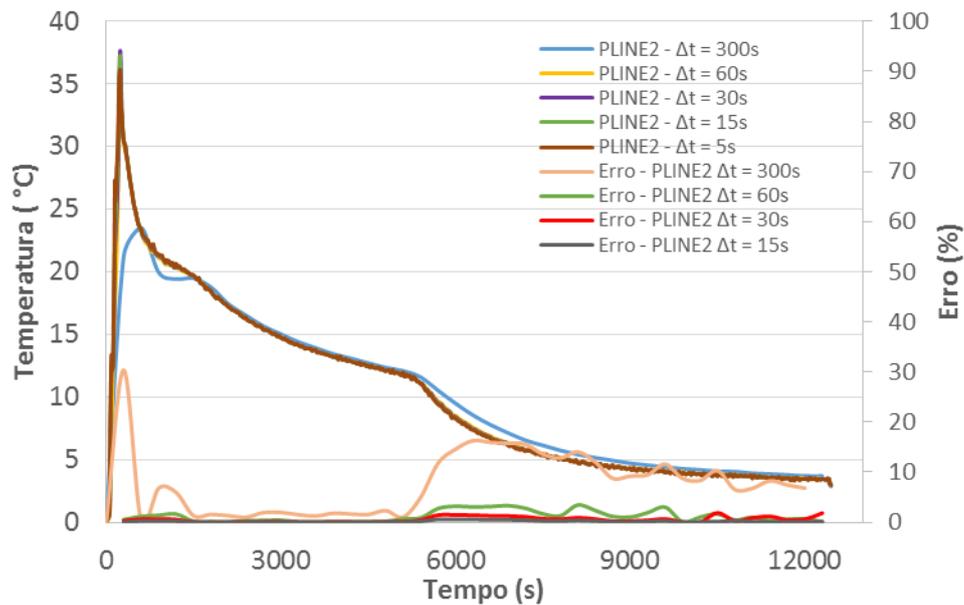


Figura 3.7 Evolução temporal da potência térmica transferida para o domínio do PCM, estimada na interface Al-PCM e do erro relativo com as diferentes discretizações temporais.

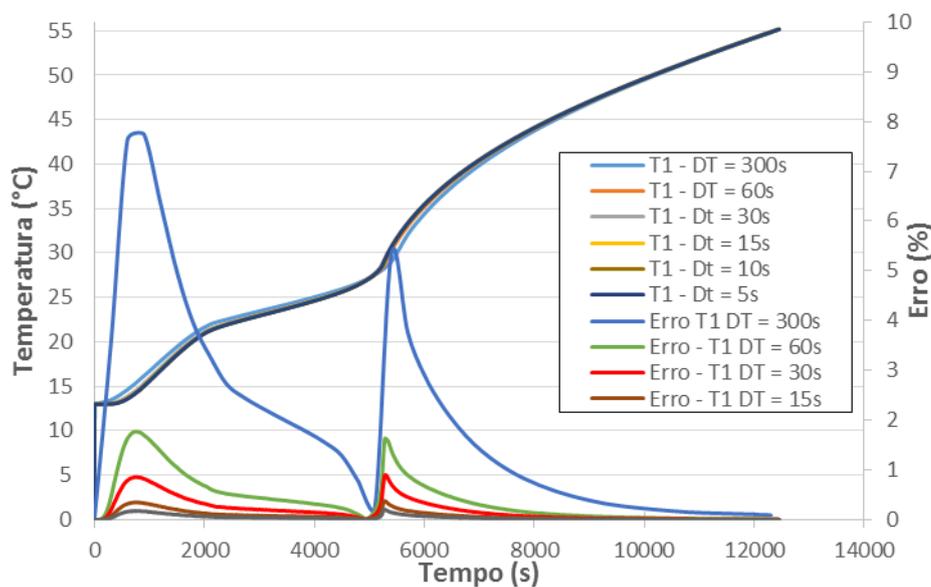


Figura 3.8 Evolução temporal de T_1 e do erro associado à variação da discretização temporal do modelo.

Analisando as curvas de evolução temporal de T_1 e de *PLINE2*, nos dois testes contacta-se um impacto significativo das discretizações nos instantes em que se inicia e termina a mudança de fase do PCM. De facto, é notório que quanto maior grosseira for a malha e/ou o Δt adotado, maior é o erro relativo nos instantes que antecedem e precedem o início e o final da mudança de fase na discretização definida como referencial.

3.3. Perfil de evolução da capacidade calorífica equivalente

Na construção do modelo matemático, secção 2.2, abordaram-se dois modelos para aproximar a evolução da capacidade calorífica durante a mudança de fase: (i) o modelo de perfil triangular; (ii) o modelo de perfil quadrangular. Assim, estudou-se a evolução da temperatura a meio da secção do domínio de PCM, T_1 , de forma a avaliar qual dos modelos garante a melhor aproximação da curva de evolução de T_1 . A Figura 3.9 ilustra a evolução temporal de T_1 obtida com os dois modelos para as condições de carga a 34 W e descarga a 14 °C, respetivamente. A partir da análise das curvas de evolução de T_1 , verificou-se uma excelente aproximação da cinética do processo com o modelo de perfil triangular. De forma a quantificar as diferenças na evolução de T_1 com cada um dos métodos, calculou-se o erro associado à sua evolução a partir de:

$$\text{ERRO}(t) = \frac{|T_{1,\text{EXP}}(t) - T_{1,\text{NUM}}(t)|}{T_{1,\text{EXP}}(t)} \times 100 \quad [\%] \quad (3.1)$$

em que $T_{1,\text{exp}}$ é o valor da temperatura medido experimentalmente, e $T_{1,\text{num}}$ representa os valores obtidos com os modelos de perfil quadrangular e triangular. Verificou-se que, com o modelo de perfil triangular, o erro na aproximação da evolução de T_1 é muito inferior, não chegando aos 8 % no ciclo de carga e aos 6 % no ciclo de descarga, ao contrário das curvas obtidas com o modelo de perfil quadrangular, onde se verificou um erro máximo de quase 38% no ciclo de descarga. Assim, conclui-se que o modelo com perfil triangular, garante uma excelente distribuição das temperaturas no interior do domínio de PCM, com realismo físico dos resultados obtidos.

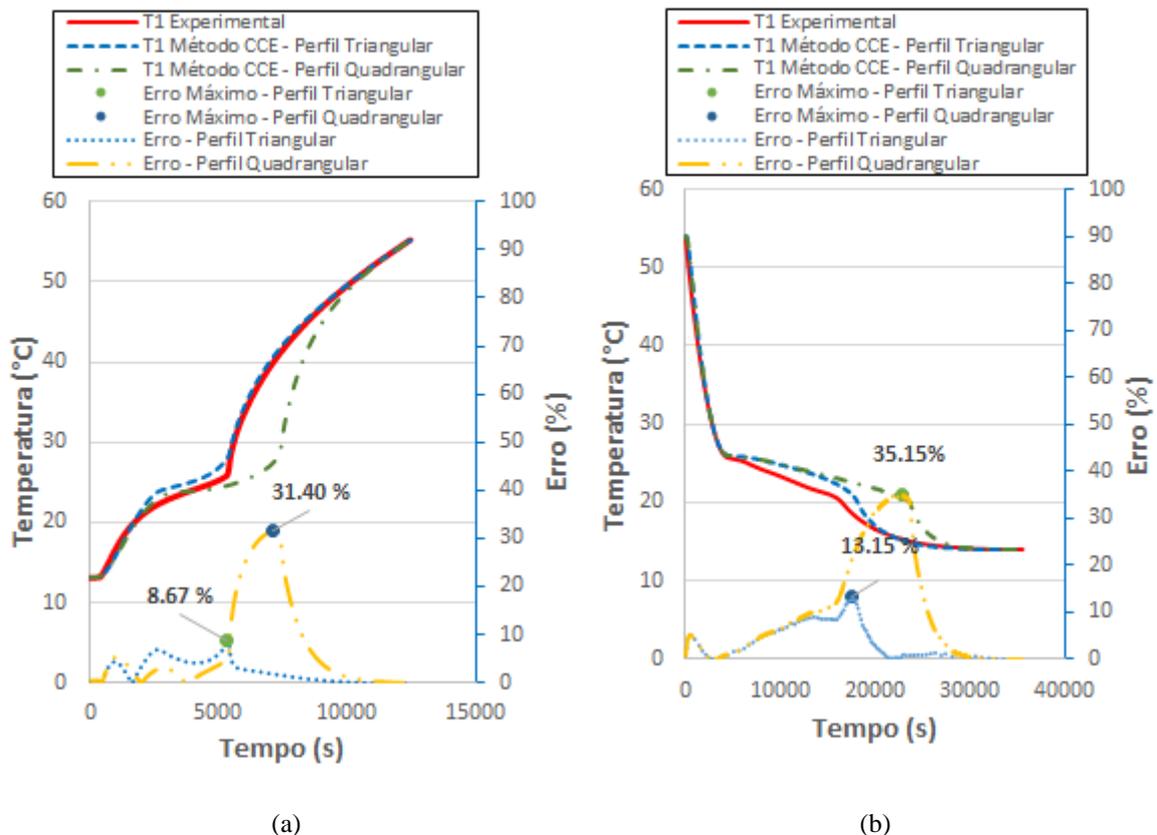


Figura 3.9. Evolução temporal da temperatura a meia secção do domínio de PCM com o modelo de evolução da capacidade calorífica equivalente triangular e quadrangular para as condições de carga de 34 W (a) e para as condições de descarga de 14 °C (b).

3.4. Influência dos intervalos de temperatura de mudança de fase

Nesta secção estuda-se o impacto da variação dos intervalos de mudança de fase ΔT_m e ΔT_s no comportamento do PCM durante os ciclos de carga (34 e 68 W) e de descarga (14, 17 e 20 °C) na configuração sem alhetas. Inicialmente estudam-se as curvas de evolução da temperatura a meia secção do domínio de PCM, T_1 a T_5 , em cada ciclo de carga e de descarga e procura-se definir os valores de ΔT_m e ΔT_s que garantem a melhor aproximação das curvas para cada ciclo em específico. A partir desse estudo é definido um intervalo de temperaturas de mudança de fase que se adequa a todos os ciclos. Para terminar procura-se quantificar o erro relativo que é introduzido com a utilização de um intervalo de temperaturas de mudança de fase igual para todos os ciclos.

Começou-se por estudar o impacto de ΔT_m nos ciclos de carga, e com um $\Delta T_m = 7\text{ °C}$, com $\Delta T_1 = 5\text{ °C}$ e $\Delta T_2 = 2\text{ °C}$ verificou-se uma excelente aproximação das curvas de evolução das temperaturas, como mostram as Figuras 3.10 e 3.111.

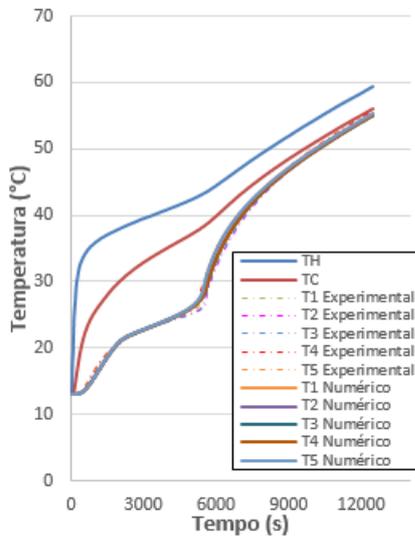


Figura 3.10 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da cavidade sem alhetas no ciclo de carga de 34W, com $\Delta T_1 = 5^\circ\text{C}$; $\Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$.

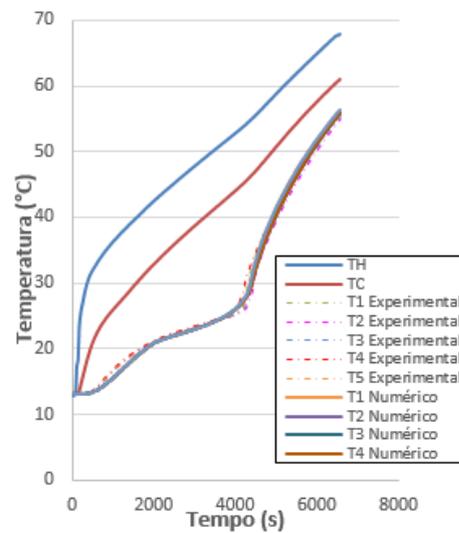


Figura 3.11 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da cavidade sem alhetas no ciclo de carga de 68W, com $\Delta T_1 = 5^\circ\text{C}$; $\Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$.

No entanto, nos ciclos de descarga verificou-se que, considerando uma histerese de 2°C , o valor de ΔT_1 deveria ser no máximo 2°C , para que a temperatura limite da solidificação, T_{1s} , não fosse demasiado próxima ou ultrapassasse a temperatura final do domínio de PCM nos ciclos de 17 e 20°C , caso contrário registam-se problemas de convergência. Assim, optou-se por definir intervalos de temperaturas de mudança de fase, $\Delta T_m = \Delta T_s$, de 4°C , com $\Delta T_1 = \Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$. Na Tabela 3.6 resumem-se os intervalos de temperatura de mudança de fase considerados e no ANEXO B encontram-se as curvas obtidas para os ciclos de descarga com os valores de ΔT_1 e ΔT_2 referidos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 Intervalos de temperaturas de mudança de fase, ΔT_1 e ΔT_2 , que garantem a melhor aproximação das curvas de evolução das temperaturas a meia secção do domínio para cada ciclo.

Ciclo	ΔT_{hist} ($^\circ\text{C}$)	T_m ($^\circ\text{C}$)	ΔT_m ($^\circ\text{C}$)	ΔT_1 ($^\circ\text{C}$)	T_{1m} ($^\circ\text{C}$)	ΔT_2 ($^\circ\text{C}$)	T_{2m} ($^\circ\text{C}$)
34 W	-	25.7	7	5	20.7	2	30.7
68 W	-	25.7	7	5	20.7	2	30.7
		T_s ($^\circ\text{C}$)	ΔT_s ($^\circ\text{C}$)		T_{1s} ($^\circ\text{C}$)		T_{2s} ($^\circ\text{C}$)
14 $^\circ\text{C}$	2	23.7	7	5	18.7	2	28.7
17 $^\circ\text{C}$	1	24.7	7	5	19.7	2	29.7
20 $^\circ\text{C}$	2	23.7	4	2	21.7	2	25.7

Para terminar, procurou-se quantificar o erro relativo associado ao uso do mesmo intervalo de temperaturas de mudança de fase para todos os ciclos, utilizando as curvas obtidas anteriormente como referencial de comparação para cada ciclo. Na análise das curvas

de evolução de T_1 (onde se verifica o maior erro relativo) nos ciclos de carga (Figuras 3.12 e 3.13), constata-se que a variação de ΔT_1 e ΔT_2 introduziu desvio máximo de 3.50 e 3.70 °C nas curvas dos ciclos de 34 e 68 W, respetivamente. Nos ciclos de descarga a diferença máxima entre as curvas de evolução de T_1 ronda 1.1 e 1 °C nos ciclos de 14 e de 17 °C, respetivamente (ANEXO C). Conclui-se que a aproximação introduzida no modelo numérico, com a utilização do mesmo intervalo de temperaturas de mudança de fase para todos os ciclos, introduz um erro considerável nos ciclos de carga e assim, admite-se que a utilização de um intervalo temperaturas de mudança de fase para os ciclos de carga e outro para os ciclos de descarga garantia um melhor comportamento do modelo.

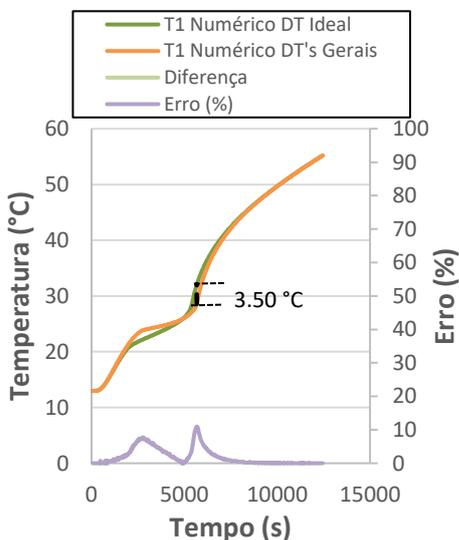


Figura 3.12 Impacto da variação de ΔT_m na evolução de T_1 no ciclo de carga 34W.

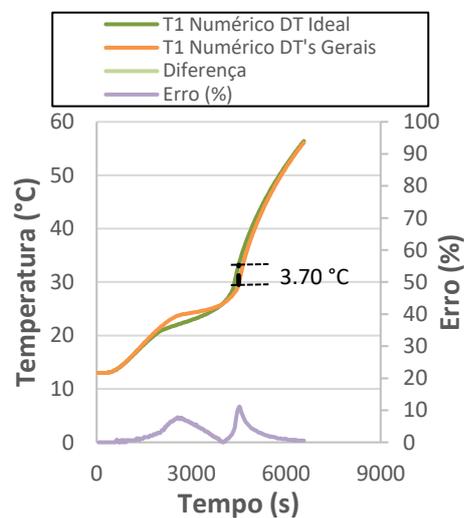


Figura 3.13 Impacto da variação de ΔT_m na evolução de T_1 no ciclo de carga 68W.

3.5. Resultados numéricos

Realizou-se o estudo com os parâmetros e as propriedades do PCM discutidos nas secções anteriores para as duas configurações em análise. Começa-se por apresentar a evolução da temperatura a meia secção da cavidade e da fração fundida total. Avalia-se também o impacto das condições impostas através da comparação da evolução das variáveis de monitorização para as condições de carga (34 e 68 W) e para as de descarga (14, 17 e 20 °C) na configuração sem alhetas. Finalmente, discutem-se os resultados numéricos obtidos para a configuração com alhetas. Avalia-se também o efeito de alheta no desempenho da UAE, através da análise do tempo necessário para fundir todo o PCM e da temperatura atingida no domínio de PCM em determinados instantes.

3.5.1. Resultados numéricos da simulação da UAE sem alhetas

As Figuras 3.14 e 3.15 mostram a evolução temporal da fração fundida total e de T_1 para as condições de carga e descarga, respetivamente. Nos ciclos de carga quanto maior é a potência de aquecimento, mais energia térmica é transferida para o PCM, o que se traduz num aumento da temperatura a uma velocidade superior nas fases sólida e líquida do PCM (calor sensível). Fica evidente a diminuição do tempo necessário para o PCM fundir todo no ciclo de carga 68 W, com uma diminuição de 1200s em relação ao tempo que se verificou no ciclo com 34 W. Tal verifica-se, uma vez que o PCM acumula o calor latente necessário para fundir totalmente em menos tempo. No ciclos de descarga, verifica-se que quanto maior for a diferença entre a temperatura de arrefecimento e a temperatura do domínio, maior é o fluxo de calor libertado pelo PCM, e o PCM solidifica em menos tempo. A título de exemplo verifica-se que no ciclo de descarga a 14 °C, o PCM demora menos 9600s a solidificar todo, em comparação com o tempo que se verificou na descarga a 20 °C.

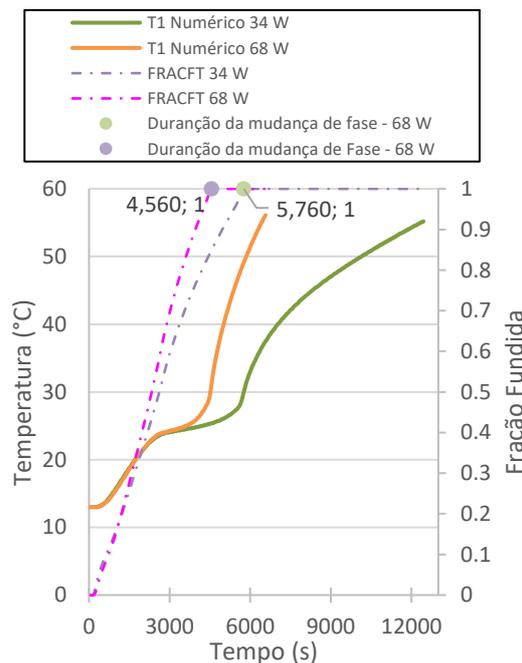


Figura 3.14 Impacto da potência de aquecimento na evolução da fração fundida total (FRACFT) e de T_1 nos ciclos de carga

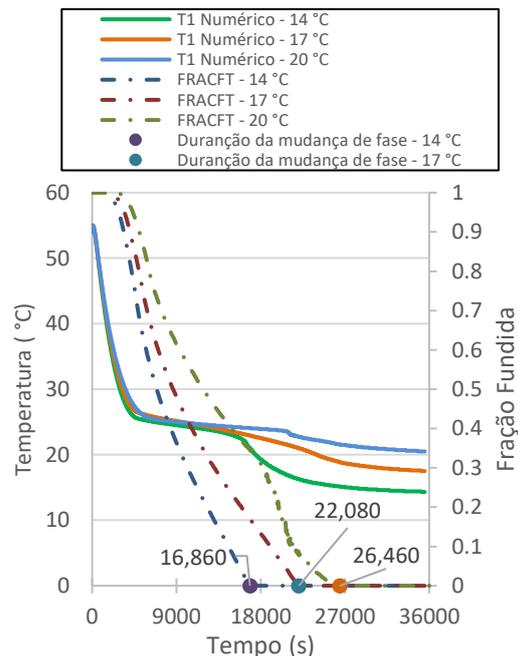


Figura 3.15 Impacto da temperatura de arrefecimento na evolução da fração fundida total (FRACFT) e de T_1 nos ciclos de descarga.

De seguida comparou-se a energia acumulada pelo PCM nos ciclos de carga simulados com a energia que teoricamente seria acumulada pelo PCM, expressa por:

$$E = m_{\text{PCM}}c_{p,s}(T_m - T_{\text{inical}}) + m_{\text{PCM}}L + m_{\text{PCM}}c_{p,l}(T_{\text{final}} - T_m) \quad [J], \quad (3.2)$$

onde, $T_{inicial}$ e T_{final} representam a temperatura inicial e final do domínio de PCM e $m_{PCM} = \rho_{PCM} \times Vol_{Cav}$ [kg] representa a massa de PCM existente no interior da cavidade (assumiu-se que todo o volume da cavidade estava preenchido com o PCM). Experimentalmente, a temperatura média do domínio de PCM variou entre os 13 °C e os 55 °C, ao longo de ambos os ciclos. Assim, teoricamente o PCM teria que absorver 547.4 kJ de energia, no entanto, numericamente verificou-se que, o PCM absorvia apenas 403.4 e 388.4 kJ, no ciclo de 68 e 34 W, respetivamente (Figura 3.16a). Na comparação entre da energia que teoricamente o PCM liberta durante os ciclos de descarga e a que foi libertada durante as simulações dos ciclos também se verificou um défice de energia (Figura 3.17a). Na secção 3.3, verificou-se que, o modelo da capacidade calorífica equivalente com perfil triangular, representa com bastante rigor a evolução da temperatura no interior do domínio de PCM. No entanto, trata-se de um modelo completamente fictício, e concluiu-se que introduz um défice no calor latente do PCM. A parte do calor latente de mudança de fase que não é considerada neste modelo, denominado ΔE_L foi quantificado a partir de:

$$\Delta E_L = C_{pM} - \frac{C_{ps} - C_{pl}}{2} \times m_{PCM} \times \Delta T \quad [J], \quad (3.3)$$

em que ΔT corresponde ao intervalo de temperaturas de mudança de fase (4 °C, para todos). Assim, conclui-se que o défice de energia acumulada/restituída pelo PCM, inerente ao modelo triangular é de 166.3 kJ. Como se pode verificar nas Figuras 3.16b e 3.17b, introduzindo a correção da energia nos valores apresentados anteriormente, consegue-se uma melhor aproximação da energia acumulada/restituída em cada ciclo de carga e de descarga, e assim admite-se a validade dos resultados obtidos. O autor realça que, a partir desta secção, todos os valores da energia acumulada/restituída pelo PCM contam com esta correção.

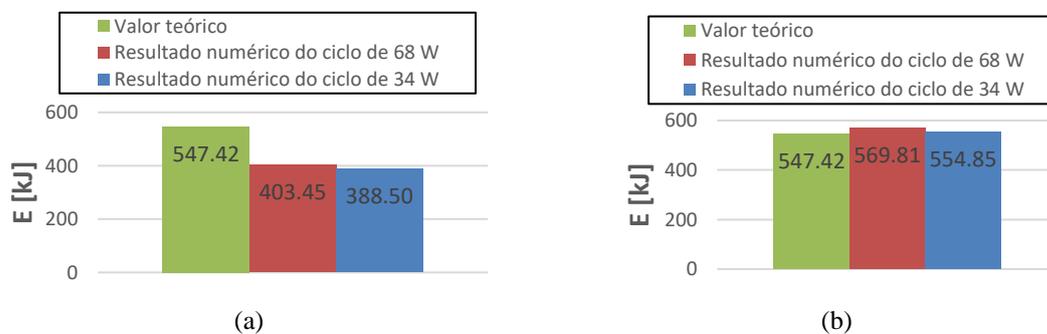


Figura 3.16 Comparação dos valores sem correção (a) e dos corrigidos (b) da energia total acumulada no PCM nos ciclos de carga para as condições de 34 e 68 W com o valor teórico.

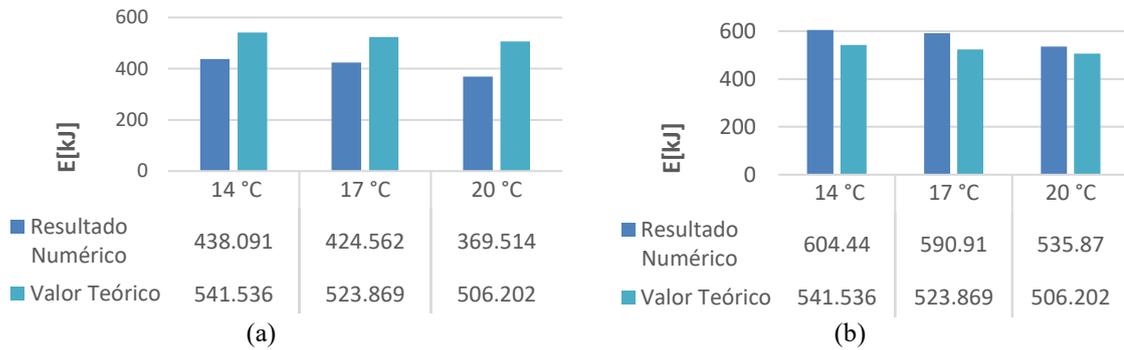


Figura 3.17 Comparação dos valores sem correção (a) e dos corrigidos (b) da energia total acumulada no PCM nos ciclos de descarga para as condições de 14, 17 e 20 °C com os valores teóricos.

3.5.2. Resultados numéricos da simulação da UAE com 15 cavidades

Nas Figuras 3.18 e 3.19 apresentam-se as curvas de evolução das temperaturas a meia secção do domínio da UAE com 15 cavidades, T_1 a T_5 , para o ciclo de carga de 34 W e de descarga a 14 °C, respetivamente, e comparam-se com as medidas experimentalmente. No ANEXO D, apresenta-se a comparação dos resultados para os restantes ciclos de carga (68 W) e de descarga (17 e 20 °C) simulados. No geral, verifica-se uma boa correspondência entre os resultados numéricos e experimentais.

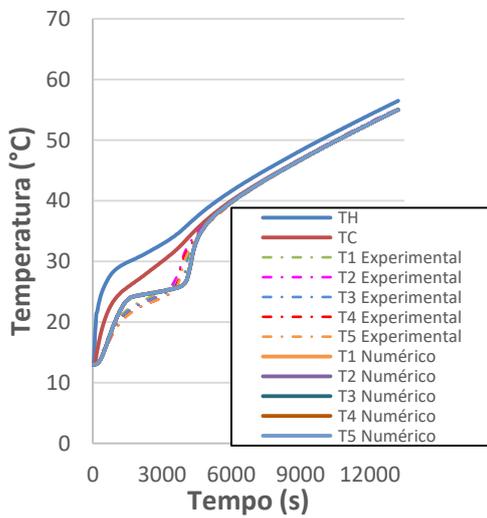


Figura 3.18 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da UAE no ciclo de carga de 34W.

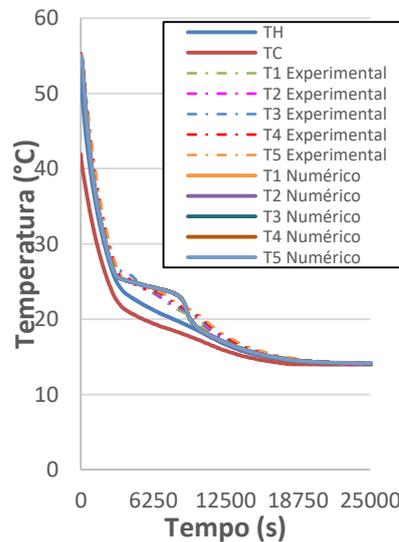


Figura 3.19 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da UAE no ciclo de descarga a 14 °C.

3.5.3. Influência das alhetas no desempenho da UAE

Nesta secção apresentam-se e comparam-se os resultados numéricos obtidos na simulação das duas configurações da UAE (com alhetas – A e sem alhetas – B) para duas situações diferentes: ciclo de carga de 34 W e ciclo de descarga a 14 °C.

As Figuras 3.20 e 3.22 ilustram o efeito de alheta na evolução de T_1 e da fração fundida total de PCM e as Figuras 3.21 e 3.23 mostram o impacto das alhetas na energia armazenada e restituída pelo PCM, respetivamente. Nos ciclos de carga, para a mesma potência de aquecimento, a temperatura da superfície de aquecimento, $TH(t)$, é menor para a configuração A. Esse fenómeno deve-se à elevada difusibilidade térmica do alumínio. Além disso, tomando como referencia o instante $t = 4260s$ verifica-se que, enquanto na configuração A, o PCM está completamente fundido, na B apenas fundiu 80.9% do PCM. Na configuração B o PCM precisa de mais 1500s para fundir completamente (Figura 3.22). Na análise dos ciclos de descarga, verificou-se uma diminuição de 7710s no tempo total de solidificação do PCM com a adição das alhetas e que no instante $t = 9150s$, o PCM termina a solidificação na configuração A, enquanto na B apenas 74.6 % do PCM está solidificado.

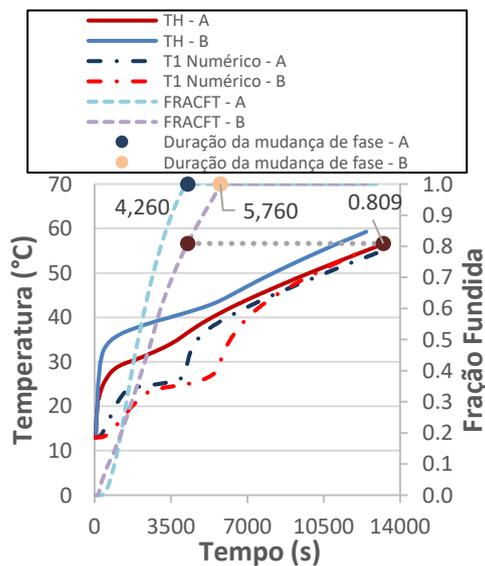


Figura 3.20 Impacto das alhetas na evolução da fração fundida total e de T_1 no ciclo de carga de 34W.

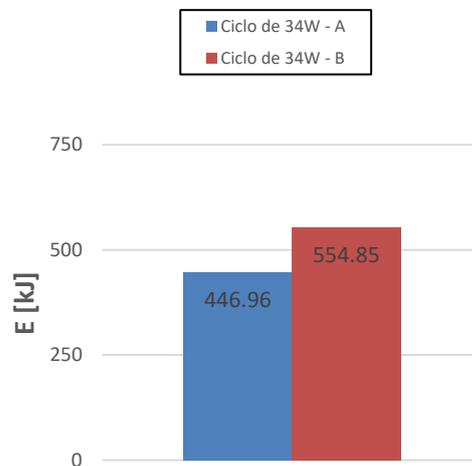


Figura 3.21 Impacto das alhetas na energia acumulada pelo PCM no ciclo de carga de 34W.

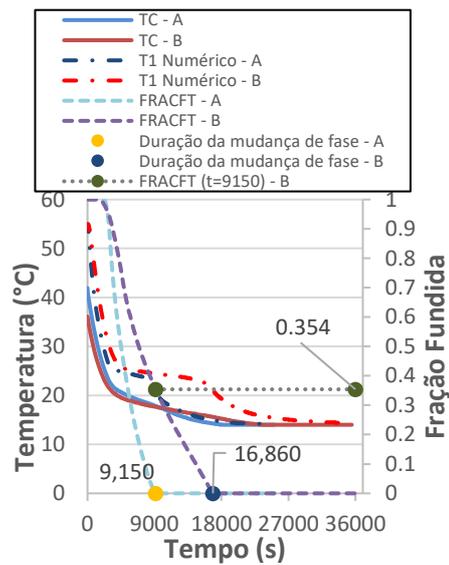


Figura 3.22 Impacto das alhetas na evolução da fração fundida total e de T_1 no ciclo de descarga de 14 °C.

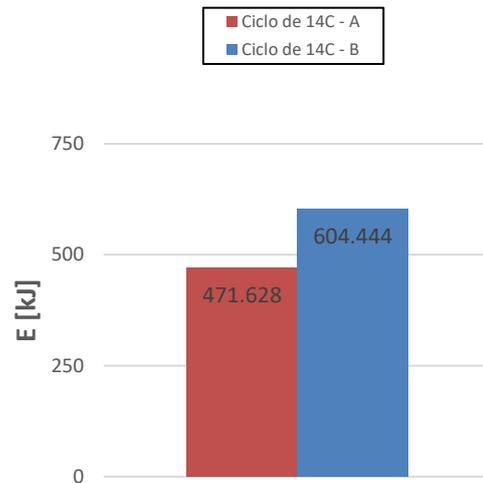


Figura 3.23 Impacto das alhetas na restituição acumulada pelo PCM no ciclo de descarga de 14 °C.

As Figuras 3.25 e 3.26 ilustram as diferenças na evolução do campo de temperaturas para as duas configurações estudadas. Assumiu-se que, a evolução do campo de temperaturas é simétrico relativamente a um eixo horizontal a meia altura da secção, o que permite representar apenas metade da cavidade sem perda de informação.

Constata-se que a energia térmica transferida pela placa de aquecimento, a partir da fronteira do lado Oeste, é conduzida através da placa de alumínio para o PCM, pelo que a temperatura da massa de PCM adjacente aumenta a uma velocidade bastante elevada e mantém-se próxima da temperatura da placa de alumínio. Pelo contrário, no restante domínio de PCM o aumento da temperatura é mais lento.

Comparando a distribuição das temperaturas nas duas configurações nota-se que, principalmente nos primeiros 4800s, a adição das alhetas torna a transferência de calor mais uniforme em todas as direções devido à maior área de contacto com o PCM (Figuras 3.24 e 3.25). Assim verifica-se uma distribuição da temperatura mais uniforme no domínio, que é evidente no instante $t = 12000s$, com um gradiente de temperatura de apenas 2 °C [52.5;54.5] °C na configuração A, e de 3.9 °C, [53.9;57.8] °C na configuração B.

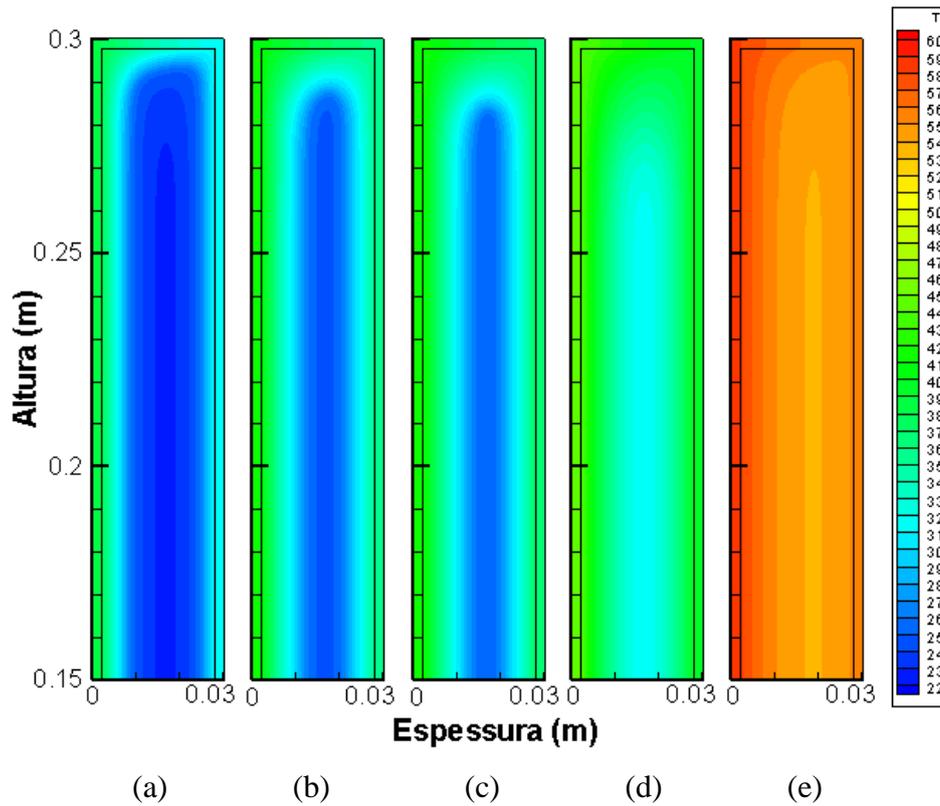


Figura 3.24 Evolução do campo de temperaturas na configuração B no ciclo de carga de 34 W nos instantes: (a) 2400s, (b) 4200s, (c) 4800s, (d) 6000s, (e) 12000s.

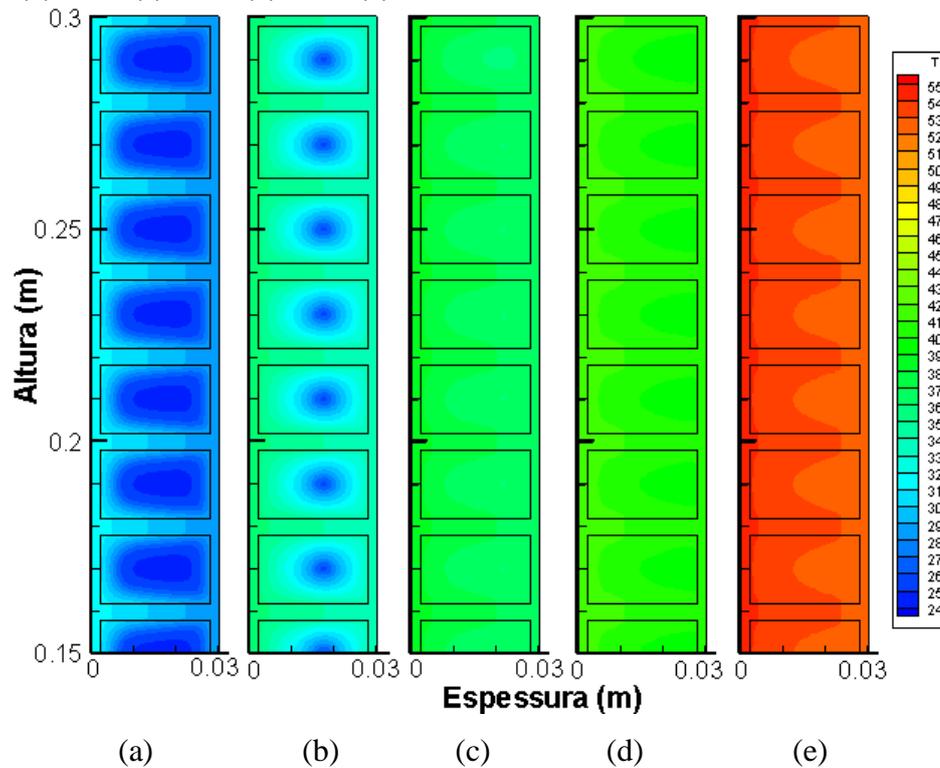


Figura 3.25 Evolução do campo de temperaturas da configuração A no ciclo de carga de 34 W, nos instantes: (a) 2400s, (b) 4200s, (c) 4800s, (d) 6000s, (e) 12000s.

A Figura 3.26 ilustra a evolução da fração fundida nas duas configurações. Em ambas as configurações é visível que a frente de fusão, que se forma e avança a partir da interface com a placa de alumínio do lado Oeste, é “alimentada” com mais energia térmica, conseguindo fundir o PCM envolvente com maior rapidez. Na configuração A, verifica-se que a evolução da frente de fusão é mais uniforme em todas as direções, de tal forma que a última massa de PCM a solidificar corresponde a um pequeno aglomerado no centro de cada cavidade. Por outro lado, na configuração B, nota-se o desenvolvimento de um aglomerado de PCM, proporcional à altura da cavidade, no qual a fusão é mais lenta e ocorre à medida que o PCM envolvente funde completamente e lhe transfere energia térmica. Na configuração B, a transferência de calor para o PCM na direção vertical verifica-se apenas, ao longo da superfície das placas de alumínio horizontais, em contacto com o PCM. No entanto, como as placas horizontais têm uma dimensão 10 vezes inferior às placas verticais, a área de contacto com o PCM é muito inferior, o que se traduz no processo de mudança de fase regido pela transferência de calor na direção horizontal

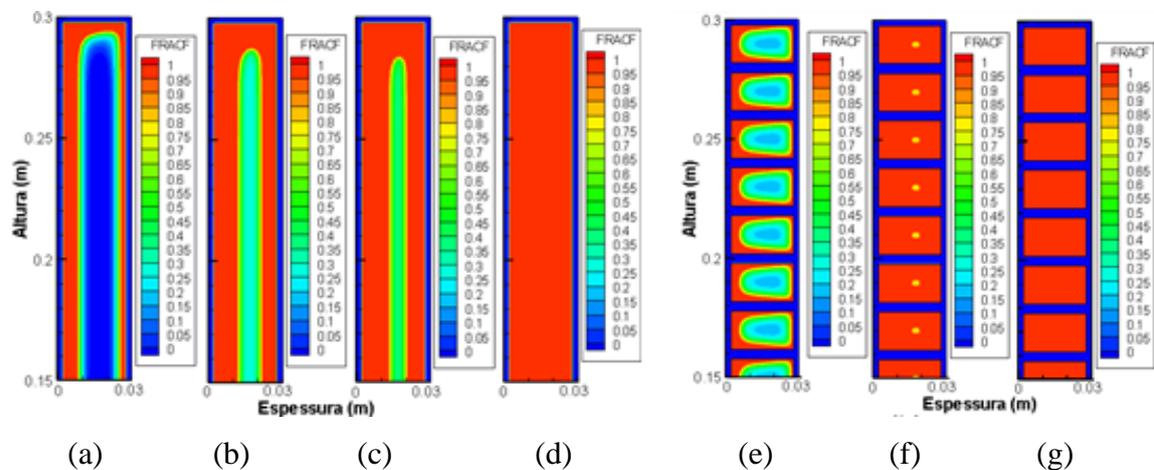


Figura 3.26 Evolução do fração fundida na configuração A no ciclo de carga de 34W, nos instantes: (a) 2400s, (b) 4200s, (c) 4800s, (d) 6000s e na configuração B, nos instantes: (e) 2400s, (f) 4200s e (g) 4800s.

No que diz respeito à descarga, as Figuras 3.27 e 3.28 ilustram a evolução do campo de temperaturas para as duas configurações estudadas durante o ciclo de descarga a 14 °C. A superfície Este tem condições de fronteira de contacto com a superfície de arrefecimento, logo o gradiente de temperaturas é maior, o que leva a uma taxa de transferência de calor do PCM para o alumínio maior e o arrefecimento é mais acentuado.

Na configuração A, o arrefecimento é mais rápido do PCM, verificando-se que no instante $t = 9000s$ o PCM já está todo solidificado, e a temperatura máxima do domínio não ultrapassa os $14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.29).

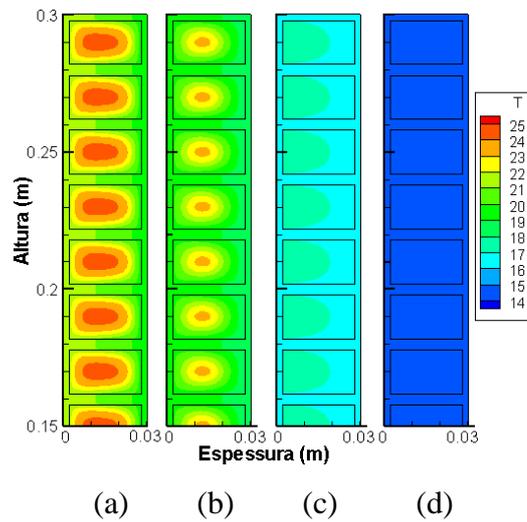


Figura 3.27 Evolução do campo de temperaturas da configuração A no ciclo de descarga a $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ nos instantes: (a) 4500s, (b) 9000s, (c) 13500s, (d) 18000s.

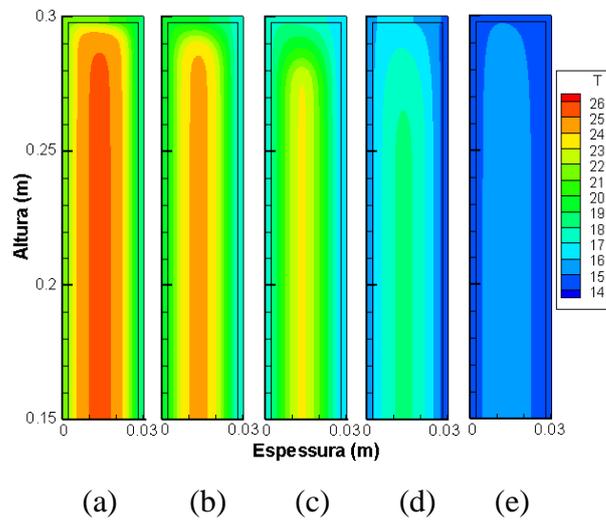


Figura 3.28 Evolução do campo de temperaturas da configuração B no ciclo de descarga a $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ nos instantes: (a) 4500s, (b) 9000s, (c) 13500s, (d) 18000s, (e) 22500s.

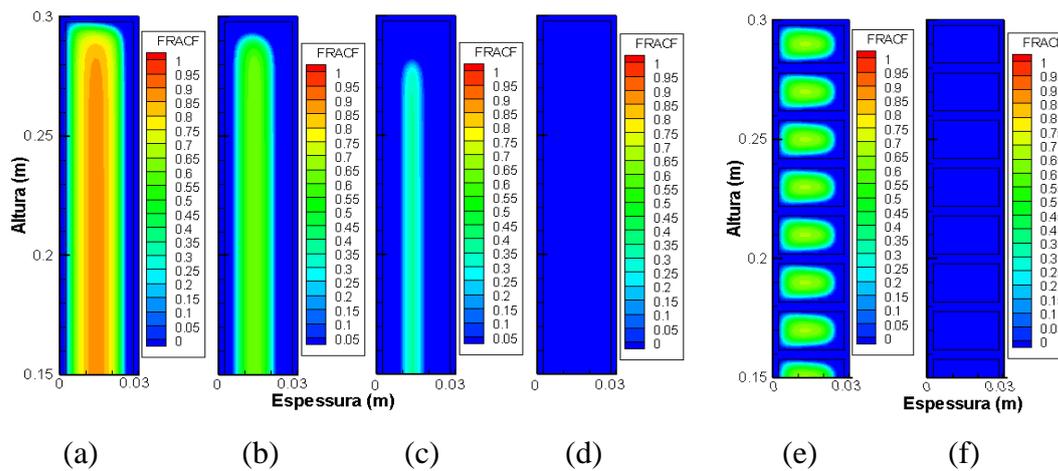


Figura 3.29 Evolução do fração fundida no ciclo de descarga a 14 °C da configuração B nos instantes: (a) 4500s, (b) 9000s, (c) 13500s, (d) 18000s, e na configuração A nos instantes: (e) 4500s, (f) 9000s.

Concluindo, com a adição das alhetas as frentes de solidificação/fusão na direção vertical intensificam-se, o que se traduz na redução do aglomerado PCM com mudança de fase mais prolongada, a uma pequena região no meio de cada cavidade, ao contrário da típica coluna de PCM que se verifica em ambos os ciclos da configuração B.

4. ESTUDO DE UM SISTEMA PARA O REVESTIMENTO DE FACHADAS VERTICAIS EXTERIORES

A procura de novas soluções construtivas para melhorar o desempenho térmico dos edifícios tirando proveito da energia solar, despertou o interesse para o estudo do desempenho térmico de um sistema com PCMs para o revestimento de fachadas verticais exteriores. Pretende-se que o novo sistema configure uma solução de revestimento com vantagens significativas em relação aos sistemas tradicionais de revestimentos de fachadas. O sistema proposto tem na sua constituição macrocápsulas de secção retangular preenchidas com PCMs microencapsulados, e o seu funcionamento baseia-se no princípio de funcionamento dos PCMs. O sistema terá particular interesse para as fachadas orientadas a Oeste e eventualmente a Sul (para o hemisfério Norte), onde a radiação solar é mais significativa durante os meses de Verão. A fusão do PCM permitirá absorver a energia solar térmica durante o dia, sendo depois restituída para o exterior durante o período noturno, durante a solidificação do PCM. Assim, o sistema contribuirá para reduzir os ganhos térmicos pela envolvente do edifícios, podendo contribuir para reduzir as necessidades de energia para climatização e aumentar o conforto térmico no interior do edifício.

Neste capítulo, utiliza-se o modelo numérico validado anteriormente para estudar o desempenho térmico do sistema. Na primeira parte, estuda-se o desempenho térmico do sistema para as condições climáticas de Beja, num dia típico de Verão. Avalia-se também o impacto da variação do número de alhetas e da espessura do sistema na energia armazenada e restituída pelo PCM ao longo dos ciclos de carga e descarga. Na última parte, é feito um estudo da influência das condições climáticas no desempenho térmico do sistema, comparando a evolução do perfil de temperaturas a meia altura da secção transversal do sistema, e da energia armazenada/restituída pelo PCM para diferentes localizações.

4.1. Modelo físico

O sistema de aplicação das placas verticais de alumínio preenchidas com PCMs baseia-se no sistema de fachadas ilustrado na Figura 4.1. O sistema é constituído pelo muro de suporte (a parede do edifício), uma camada de isolamento térmico e as placas com PCMs unidas ao edifício através de uma estrutura de fixação, geralmente de alumínio. Entre o isolamento térmico e o revestimento exterior existe uma pequena caixa-de-ar que se assume não-ventilada.

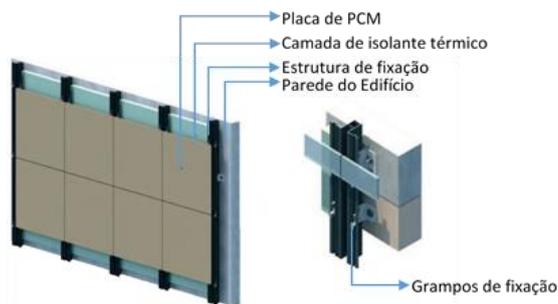


Figura 4.1. Sistema de revestimento exterior de edifícios com placas verticais.

O domínio numérico será referenciado num sistema de coordenadas bidimensional. Assume-se que, a placa nas fronteiras Norte e Sul está em contacto com placas de revestimento à mesma temperatura e as perdas de energia térmica nessas interfaces são desprezadas, logo definem-se fronteiras adiabáticas (Figura 4.2b). Na superfície em contacto com a caixa-de-ar não-ventilada, assume-se que o ar se mantém à mesma temperatura da superfície metálica, desprezando-se as perdas de energia térmica para o ar (fronteira adiabática). E na interface da placa com o ar exterior consideram-se as trocas de calor por convecção com o ar à temperatura ambiente, por radiação com a abóboda celeste e os ganhos de energia térmica resultantes da radiação solar incidente. O modelo físico do domínio de cálculo está representado na Figura 4.2b. A placa de PCM em estudo é constituída pela macrocápsula de alumínio, preenchida por um PCM microencapsulado. A macrocápsula tem 30 cm de altura e 20 cm de largura e irá ser estudada a variação da espessura entre os 1.6 cm e os 3cm.

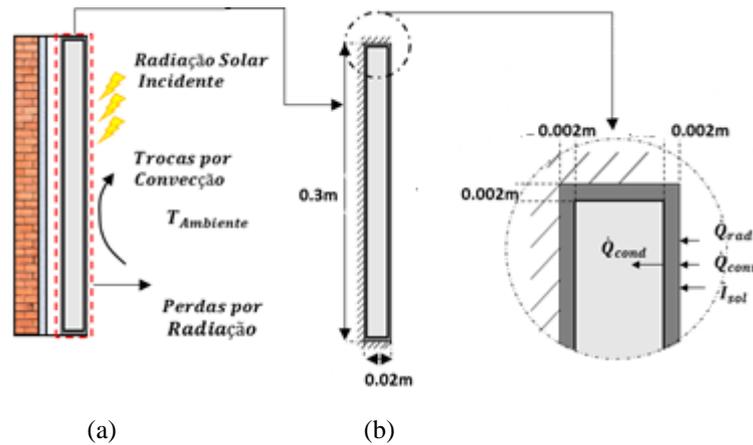


Figura 4.2. Representação esquemática do problema físico (sistema de revestimento com placas verticais e trocas de calor com o meio (a) e do modelo físico do sistema: dimensões geométricas e condições de fronteira, com fluxos de calor positivos quando entram no domínio de cálculo (b).

4.2. Condições de fronteira e equações que regem as trocas de calor

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram a evolução das condições exteriores usadas para definir as condições de fronteira da superfície de alumínio em contacto com o ar exterior, onde $T_{ar,ambiente}$ é a temperatura do ar exterior e $q_{rad,solar}$ é a radiação solar incidente numa fachada vertical orientada a Oeste durante o período entre as 07h00 do dia 18 de Julho e as 06h00 do dia seguinte, em Beja. Os valores destas variáveis foram obtidos a partir da informação climática nacional fornecida pelo *software* SOLTERM[®]. Assumiu-se que durante este período, o sistema realizava a carga do PCM entre as 07h00 e as 18h00 e que das 18h00 às 06h00 se verificava a descarga, com a variação das condições climáticas a comandarem os processos de mudança de fase do PCM.

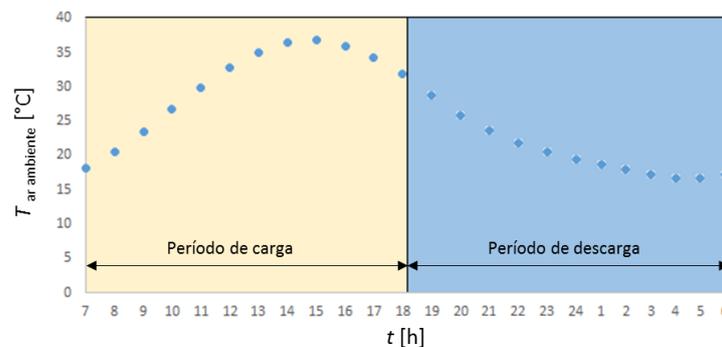


Figura 4.3. Variação da temperatura do ar exterior, $T_{ar,ambiente}$, com a identificação dos períodos de carga e de descarga do PCM. Dados climáticos retirados do SOLTERM para Beja entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho

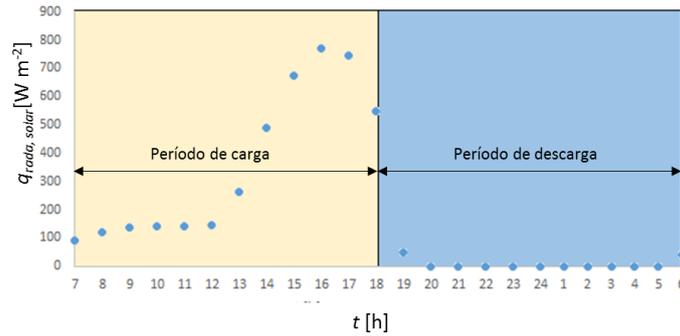


Figura 4.4. Variação da radiação solar numa fachada vertical orientada a oeste, $q_{rad,solar}$. Dados climáticos retirados de climas do SOLTERM para Beja entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho.

Dado que na superfície de alumínio em contacto com o ar exterior são consideradas as trocas de calor por convecção, por radiação, e os ganhos de energia térmica resultantes da radiação solar incidente, fazendo um balanço de energia num VC da interface "superfície de alumínio – ar exterior" (Figura 4.2b) tem-se:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{rad} + \dot{I}_{sol}A + \dot{Q}_{conv}. \quad (4.1)$$

O termo que corresponde ao calor que efetivamente entra no domínio por condução é calculado a partir:

$$\dot{Q}_{cond} = C_{cond}(T_s - T_{i,j}) \quad (4.2)$$

com,

$$C_{cond} = \frac{kA}{\Delta x}, \quad (4.3)$$

em que k é a condutibilidade térmica do alumínio, A é área da superfície do VC e Δx é a distância entre o nodo do VC e o nodo do VC vizinho do lado da fronteira em estudo, que se encontra à temperatura $T_{i,j}$.

Em termos de radiação incidente, \dot{I}_{sol} , foi adotado o seguinte modelo:

$$\dot{I}_{sol}A = A\alpha q_{rad,solar}, \quad (4.4)$$

em que α representa o fator de absorção, sendo que se assumiu que seria 0.95, uma vez que se considerou que a fachada era revestida com tinta seletiva.

Em termos de trocas de calor por radiação com o céu frio, assumiu-se um modelo segundo a lei de Stefan – Boltzmann. Ao considerar o fluxo positivo, isto é, a entrar no VC fica:

$$\dot{Q}_{\text{rad,perdida}} = A\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{céu frio}}^4), \quad (4.5)$$

em que $\varepsilon = 0.9$ é a emissividade da superfície, e $\sigma = 56.7 \times 10^{-9} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, é a constante de Stefan-Boltzmann. Na equação (4.5) as temperaturas devem ser expressas em graus Kelvin. A temperatura do céu frio é definida pela equação de Swinbank [46]:

$$T_{\text{céu frio}} = 0.037536 \times T_{\text{ar,amb}}^{1.5} + 0.32 \times T_{\text{ar,amb}}. \quad (4.6)$$

Uma vez que os termos da radiação são polinómios de 4º grau, foi feita a sua linearização, tendo-se definido o termo correspondente às trocas por radiação por:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = C_{\text{rad}}(T_{\text{céu frio}} + T_s), \quad (4.7)$$

com

$$C_{\text{rad}} = A\varepsilon\sigma(T_{\text{céu frio}}^2 + T_s^2) \times (T_{\text{céu frio}} + T_s), \quad (4.8)$$

ficando como incógnita o valor da temperatura da superfície do VC, T_s .

As trocas de calor por convecção com o ar exterior à temperatura ambiente são modeladas, através de:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = C_{\text{conv}}(T_{\text{ar,ambiente}} - T_s), \text{ com } C = Ah_{\text{conv}} \quad (4.9)$$

em que h_{conv} é o coeficiente de transferência de calor na superfície (assumiu-se um valor de h_{conv} constante e igual a $2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}$).

Após a modelação de todos os termos presentes no balanço de energia no VC, é possível verificar que todos dependem do valor da temperatura da superfície. Assim, substituindo as equações (4.2), (4.4), (4.7) e (4.9) na equação (4.1), obtém-se a expressão que permite determinar T_s :

$$T_s = \frac{C_{\text{cond}}T_{ij} + C_{\text{rad}}T_{\text{céu frio}} + C_{\text{conv}}T_{\text{ar,ambiente}} + I_{\text{sol}}A}{C_{\text{cond}} + C_{\text{conv}} + C_{\text{rad}}}. \quad (4.10)$$

4.3. Resultados do estudo paramétrico

Realizou-se o estudo com os parâmetros e as propriedades do PCM discutidos na validação do modelo. No entanto, devido a limitações no prazo para a elaboração desta tese, assumiu-se a utilização de uma malha mais grosseira $0.002 \times 0.002 \text{ m}$, o que introduziu um erro relativo médio de cerca de 7.2 % na evolução do campo de temperaturas. Assim, começa-se por apresentar a evolução do peso do sistema com a variação da espessura

(20 e 30 mm) e do número de alhetas (0, 4, 9 e 14). Segue-se o estudo paramétrico do sistema, avaliando a variação da quantidade de energia armazenada/restituída com o número de alhetas e espessura do sistema. Considera-se que o desempenho é tanto maior quanto menor for a diferença entre a energia que o PCM acumula durante o ciclo de carga e a que consegue restituir durante o período de descarga. Isto é, idealmente o PCM deveria restituir toda a energia acumulada. Na parte final, avalia-se o impacto da variação das condições climáticas no desempenho do sistema, avaliando a energia armazenada/restituída pelo PCM e o perfil de temperaturas a meia altura da secção, para diferentes localizações (Lisboa e Bragança).

4.3.1. Impacto do número de alhetas e da espessura no desempenho térmico

A Figura 4.5. ilustra a evolução de peso total do sistema com a variação do número de alhetas, para duas espessuras, 20 e 30mm. Os valores da massa de PCM e de alumínio foram calculados com base nos valores da densidade referidos na secção 3.1 e na geometria do sistema descrito na introdução do capítulo. Para uma espessura de 30mm do sistema (Figura 4.5b) a massa de PCM é mais do dobro de massa de alumínio na configuração sem alhetas. Contudo, com a adição das 14 alhetas verifica-se que a massa de alumínio passa para mais do dobro e há um aumento de 444 g ($\approx 15\%$). O cálculo da massa de PCM presente em cada configuração também foi importante na correção do défice de energia de calor latente na energia/armazenada restituída pelo PCM.

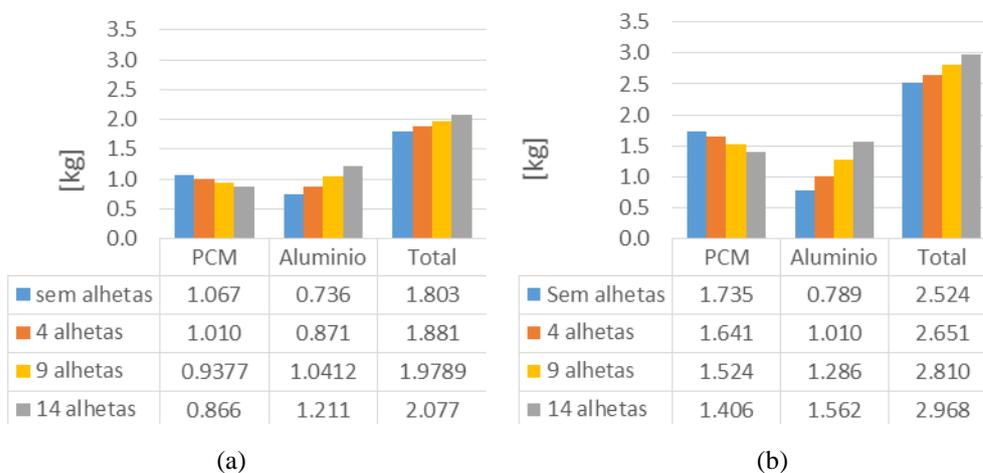


Figura 4.5. Evolução do peso total do sistema com a variação do número de alhetas para uma espessura de (a) 20 e (b) 30mm.

A Figura 4.6 ilustra a evolução da energia restituída/armazenada pelo PCM para cada configuração e espessura do sistema: (i) sistema com 20 mm e zero (S_E2_0), 4 (S_E2_4), 9 (S_E2_9) e 14 alhetas (S_E2_14); (ii) sistema com 30 mm e zero (S_E3_0), 4 (S_E3_4), 9 (S_E3_9) e 14 alhetas (S_E3_14) e a Figura 4.7 mostra a evolução da temperatura a meia secção do domínio de PCM e da fração fundida total para cada espessura e configuração do sistema.

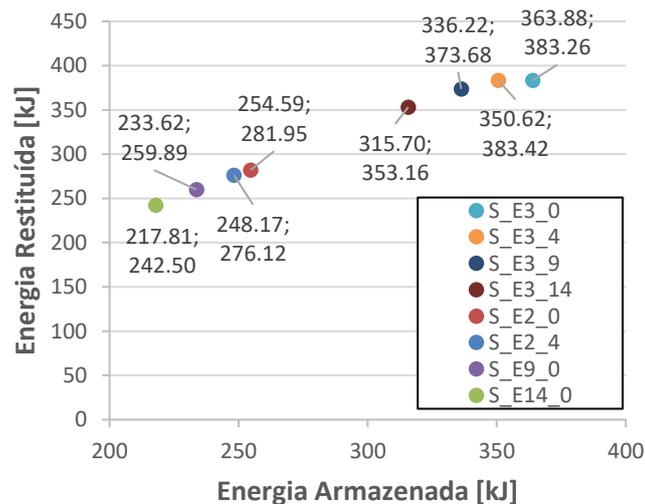


Figura 4.6. Evolução da energia armazenada e restituída pelo PCM para as diferentes espessuras e configurações do sistema.

É notório que a energia armazenada/restituída pelo PCM é diretamente proporcional à espessura do sistema, e inversamente proporcional ao número de alhetas do sistema, sendo evidente para cada espessura a diminuição da energia armazenada com aumento do número de alhetas. Contudo, nota-se que a energia armazenada é inferior à restituída. Isto deve-se à temperatura inicial atribuída ao domínio de PCM como primeira aproximação, 18.1, que ao ser tão elevada, leva a que a variação da temperatura ao longo do período de carga seja inferior à que se verifica no período de descarga, onde a temperatura atinge final ronda os 10 °C. Assim, nas primeiras horas do período de carga, os ganhos de calor sensível são muito reduzidos, e isso traduz-se no balanço global da energia armazenada/restituída. No que toca ao calor latente de mudança de fase, verifica-se que o PCM consegue acumular o calor necessário para fundir no período de carga e libertar o calor acumulado durante a descarga.

Com o aumento da massa de PCM com a espessura, há um aumento do calor latente necessário para fundir todo o PCM. Assim, o PCM acumula mais calor sob a forma

latente, e menos sob a forma sensível, o que se traduz na diminuição da temperatura operativa (Figura 4.7 e 4.8). Com aumento do número de alhetas, a massa de PCM é menor (Figura 4.5) e há uma maior área de transferência de calor para o PCM. Assim, o PCM absorve menos calor latente até fundir totalmente, e os ganhos de calor sensível são maiores, logo verifica-se o aumento da temperatura operativa. No período de descarga, as configurações com alhetas apresentam um período de descarga menor, algo que é evidenciado no sistema de 30 mm, com uma redução de 8340 e 6780s, do período de regulação térmica, nas configurações com 14 e 9 alhetas, respetivamente (Figura 4.8).

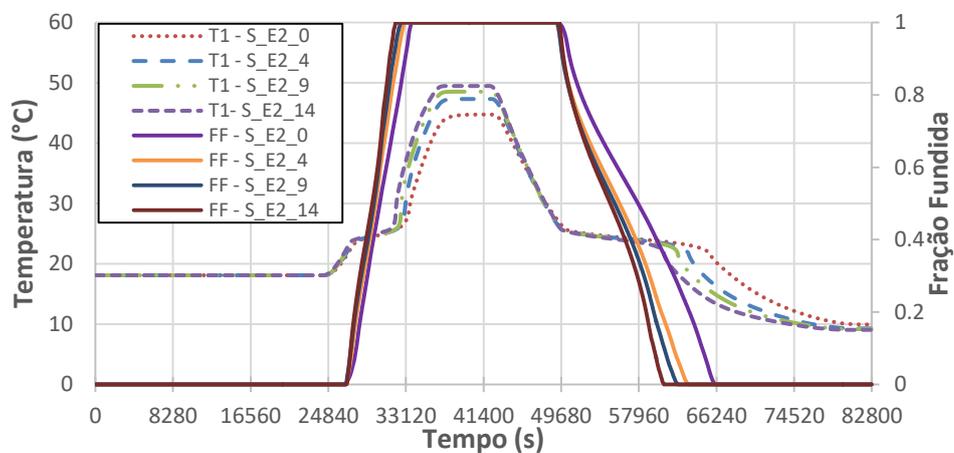


Figura 4.7. Evolução da temperatura a meia secção do domínio de PCM e da fração fundida total no ciclo diário do sistema com 30 mm de espessura para as diferentes configurações.

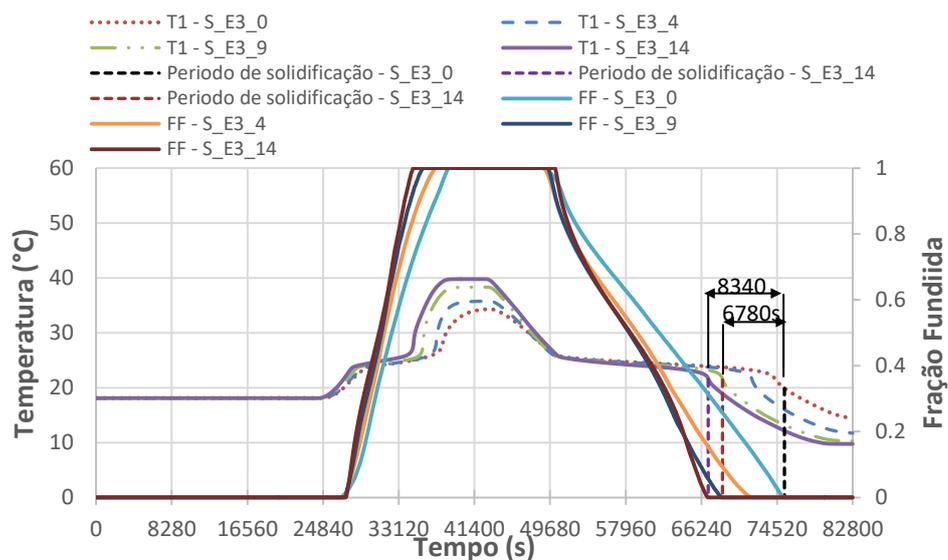


Figura 4.8. Evolução da temperatura a meia secção do domínio de PCM e da fração fundida total no ciclo diário do sistema com 30 mm de espessura para as diferentes configurações.

Após esta análise, concluiu-se que com o aumento da espessura do sistema, dentro desta gama, garante-se que a regulação térmica é eficiente, com garantias de que o PCM funde/solidifica durante os períodos de carga/descarga. De seguida, avaliou-se o impacto da radiação solar e da temperatura do ar exterior na evolução da temperatura a meia secção do domínio e da fração fundida total (Figura 4.9). Constatou-se que a fusão do PCM ocorria nos períodos de maior radiação solar incidente. Por outro lado, o início da descarga coincide com o período em que a radiação solar diminui, até atingir valores mínimos. Nota-se que a inércia térmica do PCM permite que a temperatura se mantenha constante durante algum tempo, enquanto a radiação solar diminui. Esta evolução comprova que a radiação solar comanda a mudança de fase.

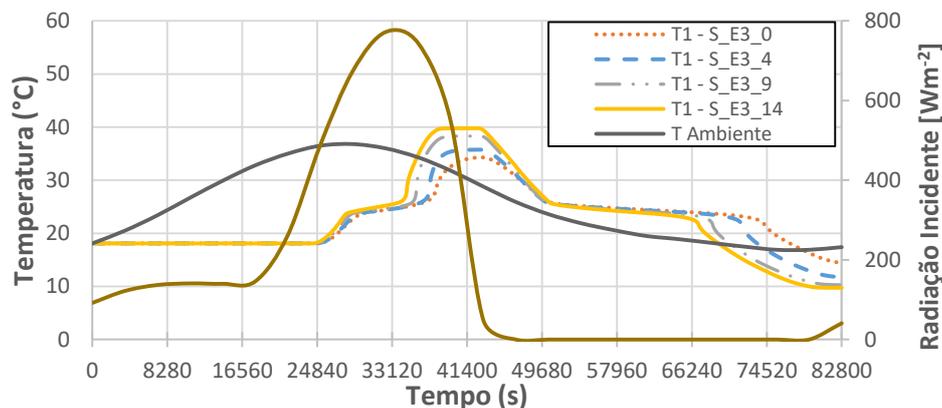


Figura 4.9. Evolução temporal da temperatura a meia secção do sistema com 30 mm de espessura para as diferentes configurações.

4.3.1. Impacto da variação das condições climáticas: Lisboa e Bragança

Procurou-se estudar o impacto da variação das condições climáticas no desempenho do sistema de revestimento. Nesse sentido, estudou-se a variação da energia armazenada/restituída pelo PCM e da evolução da temperatura a meia secção do domínio de PCM no sistema de 20 mm (Sistema S2) para as condições climáticas de Lisboa. A escolha desta localização deve-se ao seu clima, fortemente influenciado pelo oceano Atlântico, e com uma amplitude térmica ao longo do dia reduzida (ANEXO E). Além disso, os níveis de radiação solar são inferiores aos obtidos para Beja (Figura 4.11). Assim, constatou-se que, a energia armazenada/restituída ao longo dos ciclos é menor. No caso da energia armazenada, isso deve-se à menor radiação solar incidente, enquanto, o aumento das temperaturas ao longo a noite leva à diminuição da energia libertada. De seguida, estudou-se o desempenho

das duas configurações que atingiram temperaturas mais elevadas em Beja (S_E2_9 e S_E2_14) para as condições climáticas de Lisboa, de forma a avaliar o impacto da redução da radiação solar incidente. Em ambos os casos, verificou-se que, a mudança de fase é mais lenta, o que se traduz no aumento do período de regulação térmica e diminuição da temperatura máxima a meia secção (Figura 4.11). Conclui-se que, para um clima com uma amplitude térmica e níveis de radiação inferiores é necessário menos PCM para garantir a regulação térmica do sistema. No entanto, como as temperaturas durante a noite são mais altas, as alhetas são importantes, uma vez que facilitam solidificação total do PCM durante a descarga do PCM para não existir PCM líquido no início de um novo ciclo de carga.

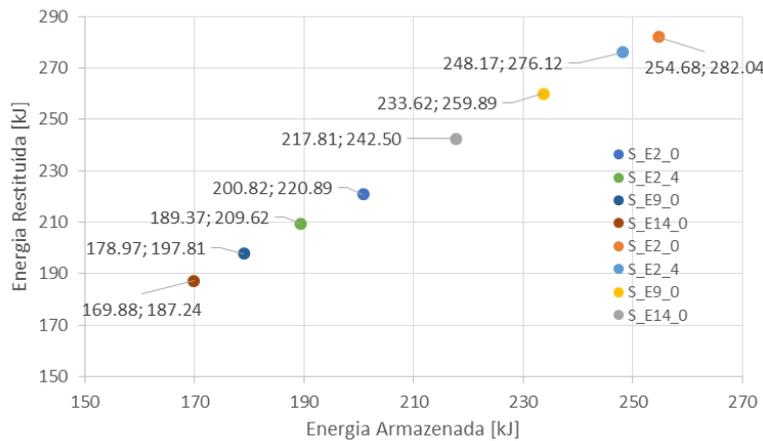


Figura 4.10. Evolução da energia armazenada/restituída pelo PCM no sistema com 20 mm de espessura para as diferentes configurações.

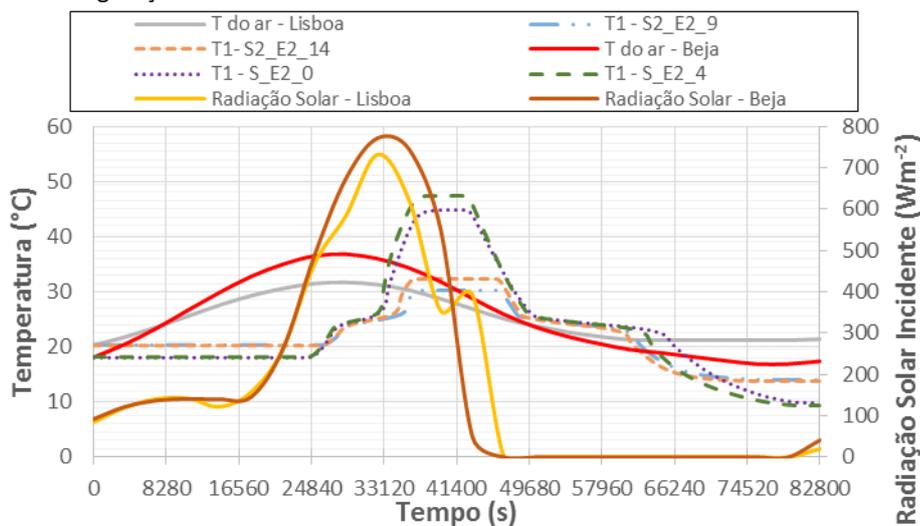


Figura 4.11. Impacto da variação das condições climática na evolução da temperatura a meia secção do domínio no sistema com 20 mm de espessura para as diferentes configurações.

Para terminar estudou-se o desempenho do sistema para as condições climáticas de Bragança (perfis de temperatura e de radiação solar incidente no ANEXO F), localizada na sub-região de Alto Trás-os-Montes e que devido ao seu afastamento do Litoral apresenta uma amplitude térmica mais vincada que nos locais estudados anteriormente. A Figura 4.12 compara a evolução da temperatura a meia secção do domínio no sistema com 20 mm de espessura e 14 alhetas para as condições climáticas de Beja e Lisboa e com a evolução verificada para um sistema com 16 mm de espessura e 14 alhetas para as condições climáticas de Bragança.

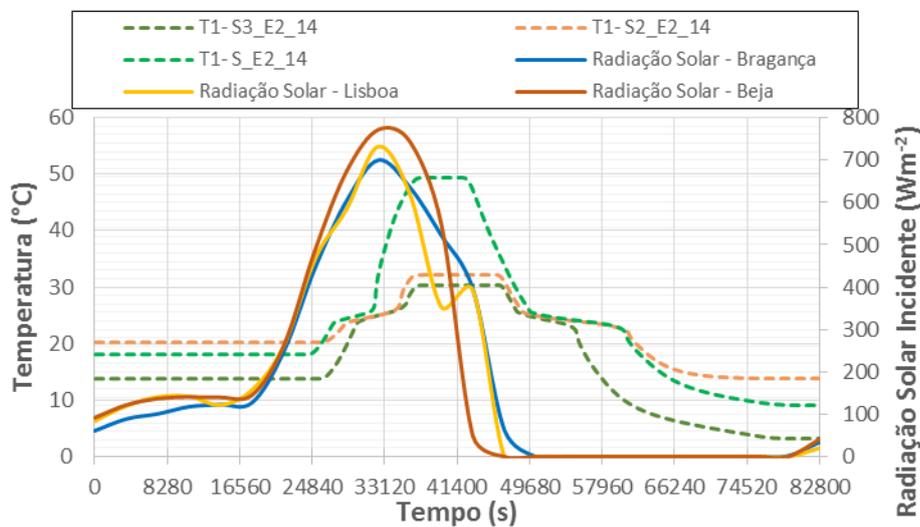


Figura 4.12. Impacto da variação das condições climática na evolução da temperatura a meia secção do domínio no sistema com 20 mm e 14 alhetas, para as condições climáticas de Beja e Lisboa e com 16 mm e 14 alhetas para as condições climáticas de Bragança.

Para as condições climáticas de Bragança verifica-se que, a temperatura operativa no sistema considerado atinge os 30.3 °C, que é apenas 2.5 °C superior à temperatura a que termina a mudança de fase. De facto, a radiação solar tem um peso muito importante nos processos de mudança de fase, e consequentemente na quantidade de PCM necessária para garantir a regulação térmica.

5. CONCLUSÕES

5.1. Principais notas conclusivas

Nesta dissertação foi desenvolvido, e validado, um modelo numérico para avaliar a transferência de calor envolvendo os processos de mudança de fase sólido-líquido de um PCM microencapsulado. Considerou-se um modelo bidimensional puramente difusivo baseado no modelo da capacidade calorífica equivalente. Foi estudado o efeito combinado das alhetas e da dimensão das cavidades preenchidas com PCM, bem como das condições de carga (34 e 68 W) e de descarga (14, 17 e 20 °C) na duração da mudança de fase do PCM, e na evolução dos campos de temperatura e da fração fundida total.

Na validação do modelo numérico verificou-se que o método da capacidade calorífica equivalente com perfil de evolução triangular, representa com bastante rigor a evolução da temperatura no interior do domínio de PCM, no entanto, introduz um défice no calor latente do PCM, que foi corrigido em todos os cálculos da energia armazenada/restituída pelo PCM. Este aspeto merece um estudo mais aprofundado.

Além disso, verificou-se que no geral, foi conseguida uma boa aproximação das curvas de evolução das temperaturas a meia secção do domínio de PCM, T_1 a T_5 , com as curvas medidas experimentalmente. Na avaliação da evolução dos parâmetros de monitorização verificou-se que, na UAE com alhetas, se consegue diminuir o tempo necessário para fundir todo o PCM e uma distribuição mais uniforme da temperatura no domínio de PCM.

Após validação, o modelo numérico foi utilizado num estudo paramétrico para avaliar o desempenho de um novo sistema de revestimento de fachadas verticais exteriores. Avaliou-se o desempenho do sistema no armazenamento e restituição de energia térmica num dia típico de Verão, para diferentes localizações. Foi também avaliada a influência da espessura da placa de revestimento e do número de cavidades no seu interior. Verificou-se que a energia armazenada/restituída pelo sistema aumentava com a espessura, e diminuía com o número de alhetas. A introdução das alhetas também garante períodos de mudança de fase mais curtos, que implicam maior absorção de calor sensível pelo sistema, verificando-se uma temperatura operativa superior. Concluiu-se que a radiação solar incidente tem um efeito muito notório na carga/descarga do PCM, tendo uma relação direta com a massa de PCM necessária para garantir a regulação térmica do sistema.

5.2. Sugestões de trabalhos futuros

Nesta dissertação realizou-se a validação de um modelo puramente difusivo, com base nos resultados experimentais previamente realizados. Para comparar e avaliar o efeito da convecção natural na mudança de fase do PCM livre, será importante desenvolver um modelo que conte com o efeito das forças de impulsão no PCM fundido. De facto, esse modelo numérico permitiria estudar qual seria o número o número de alhetas que melhor conjuga o aumento da área de transferência de calor para o PCM com a diminuição do efeito da convecção natural, de forma a encontrar o compromisso ideal para a geometria das UAE estudadas.

Outra questão muito importante para se avaliar no futuro é o impacto das propriedades termofísicas e dos intervalos de temperatura de mudança de fase no comportamento dos modelos da capacidade calorífica equivalente, especialmente no modelo de perfil triangular, que garantiu uma excelente aproximação dos campos de temperatura, mas apresenta um défice de calor latente que influencia a energia armazenada/restituída pelo PCM.

No que diz respeito ao estudo de sistemas que figurem como novas soluções para o revestimento exterior de edifícios, será importante avaliar o desempenho térmico do sistema, tendo em consideração a variação do coeficiente de transferência de calor na interface AL-PCM. Além disso, também será interessante considerar que a cavidade de ar entre o sistema e o muro do edifício seja ventilada de forma a contar com o efeito da ventilação do ar na carga/descarga do PCM.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Kasman and Y. S. Duman, “CO₂ emissions, economic growth, energy consumption, trade and urbanization in new EU member and candidate countries: A panel data analysis,” *Econ. Model.*, vol. 44, pp. 97–103, 2015.
- [2] F. Kuznik and J. Virgone, “Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling,” *Energy Build.*, vol. 41, no. 5, pp. 561–570, 2009.
- [3] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, and H. Di, “Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 6, pp. 2197–2209, 2007.
- [4] K. Pielichowska and K. Pielichowski, “Phase change materials for thermal energy storage,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 65, pp. 67–123, 2014.
- [5] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, and S. Al-Hallaj, “A review on phase change energy storage: Materials and applications,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 9–10, pp. 1597–1615, 2004.
- [6] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, 2009.
- [7] A. D. Solomon, “Design criteria in PCM wall thermal storage,” *Energy*, vol. 4, no. 4, pp. 701–709, 1979.
- [8] D. A. Neeper, “Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage,” *Sol. Energy*, vol. 68, no. 5, pp. 393–403, 2000.
- [9] 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.
- [10] E. B. S. Mettawee and G. M. R. Assassa, “Experimental study of a compact PCM solar collector,” *Energy*, vol. 31, no. 14, pp. 2622–2632, 2006.
- [11] H. Michels and R. Pitz-Paal, “Cascaded latent heat storage for parabolic trough solar power plants,” *Sol. Energy*, vol. 81, no. 6, pp. 829–837, 2007.
- [12] V. Shatikian, G. Ziskind, and R. Letan, “Numerical investigation of a PCM-based heat sink with internal fins: Constant heat flux,” 2008.
- [13] R. Domanski, A. A. El-Sebaei, and M. Jaworski, “Cooking during off-sunshine hours using PCMs as storage media,” *Energy*, vol. 20, no. 7, pp. 607–616, 1995.
- [14] C. Y. Zhao and G. H. Zhang, “Review on microencapsulated phase change materials (MEPCMs): Fabrication, characterization and applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 8, pp. 3813–3832, 2011.
- [15] N. Soares, A. R. Gaspar, P. Santos, and J. J. Costa, “Experimental study of the heat transfer through a vertical stack of rectangular cavities filled with phase change materials,” *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 192–205, 2015.
- [16] 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.

- [17] D. C. Hyun, N. S. Levinson, U. Jeong, and Y. Xia, “Emerging applications of phase-change materials (PCMs): teaching an old dog new tricks,” *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, vol. 53, no. 15, pp. 3780–95, Apr. 2014.
- [18] 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.
- [19] V. V. Tyagi and D. Buddhi, “PCM thermal storage in buildings: A state of art,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 6, pp. 1146–1166, 2007.
- [20] S. D. Sharma and K. Sagara, “Latent heat storage materials and systems: A review,” *Int. J. Green Energy*, vol. 2, no. March, pp. 1–56, 2005.
- [21] H. Mehling and L. F. Cabeza, “Heat and cold storage with PCM,” *Hand book, Publ. Springer, Ger.*, p. 316, 2008.
- [22] H. Mehling and L. F. Cabeza, “Phase change materials and their basic properties,” *Therm. Energy Storage Sustain. Energy Consum.*, vol. 234, pp. 257–277, 2007.
- [23] S. M. Hasnain, “Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 39, no. 11, pp. 1127–1138, 1998.
- [24] M. Kenisarin and K. Mahkamov, “Solar energy storage using phase change materials,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 9, pp. 1913–1965, 2007.
- [25] X. Wang, E. Lu, W. Lin, T. Liu, Z. Shi, R. Tang, and C. Wang, “Heat storage performance of the binary systems neopentyl glycol/pentaerythritol and neopentyl glycol/trihydroxy methyl-aminomethane as solid–solid phase change materials,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 41, no. 2, pp. 129–134, 2000.
- [26] A. George, *Hand book of thermal design. In: Guyer C, Editor. Phase change thermal storage materials. [chapter 1]. McGraw Hill Book Co.*, 1989.
- [27] F. Kuznik, D. David, K. Johannes, J. Roux, and J. A. Roux, *A review on phase change materials integrated in building walls A review on Phase Change Materials Integrated in Building Walls*. 2014.
- [28] D. W. Hawes, D. Feldman, and D. Banu, “Latent heat storage in building materials,” *Energy Build.*, vol. 20, no. 1, pp. 77–86, 1993.
- [29] F. Agyenim, N. Hewitt, P. Eames, and M. Smyth, “A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS),” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 2, pp. 615–628, 2010.
- [30] 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.
- [31] A. Jamekhorshid, S. M. Sadrameli, and M. Farid, “A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 531–542, 2014.
- [32] M. J. Huang, P. C. Eames, and B. Norton, “Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 47, no.

- 12–13, pp. 2715–2733, 2004.
- [33] X.-H. Yang, S.-C. Tan, and J. Liu, “Numerical investigation of the phase change process of low melting point metal,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 100, pp. 899–907, 2016.
- [34] M. N. Fisch and L. Kühl, “Use of Microencapsulated Phase Change Materials in Office Blocks,” 2004.
- [35] G. Diarce, A. Urresti, A. García-Romero, A. Delgado, A. Erkoreka, C. Escudero, and Ivarro Campos-Celador, “Ventilated active facades with PCM,” *Appl. Energy*, vol. 109, pp. 530–537, 2013.
- [36] 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*, vol. 23, no. 3. 2003.
- [37] B. Zalba, “Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 251–283, 2003.
- [38] P. Lamberg, R. Lehtiniemi, and A. M. Henell, “Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 43, no. 3, pp. 277–287, 2004.
- [39] Y. Dutil, D. R. Rousse, N. Ben Salah, S. Lassue, and L. Zalewski, “A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 112–130, 2011.
- [40] V. R. Voller, C. R. Swaminathan, and B. G. Thomas, “Fixed grid techniques for phase change problems: A review,” *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 30, no. 4, pp. 875–898, 1990.
- [41] N. Soares, J. J. Costa, A. Samagaio, and R. Vicente, “Numerical evaluation of a phase change material-shutter using solar energy for winter nighttime indoor heating,” *J. Build. Phys.*, vol. 37, no. 4, pp. 367–394, 2013.
- [42] C. Chen, H. Guo, Y. Liu, H. Yue, and C. Wang, “A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 5, pp. 882–890, 2008.
- [43] S. Patankar, “Numerical heat transfer and fluid flow,” *Series in computational methods in mechanics and thermal sciences*. pp. 1–197, 1980.
- [44] S. Sari-Bey, M. Fois, I. Krupa, L. Ibos, B. Benyoucef, and Y. Candau, “Thermal characterization of polymer matrix composites containing microencapsulated paraffin in solid or liquid state,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 78, pp. 796–804, 2014.
- [45] J. Giro-Paloma, G. Oncins, C. Barreneche, M. Martínez, A. I. Fernandez, and L. F. Cabeza, “Physico-chemical and mechanical properties of microencapsulated phase change material,” *Appl. Energy*, vol. 109, pp. 441–448, 2013.
- [46] W. C. Swinbank and A. J. Dyer, “An experimental study in micro-meteorology,” *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 93, no. 398, pp. 494–500, Oct. 1967.

ANEXO A – MODELAÇÃO MATEMÁTICA DO MODELO DA CAPACIDADE CALORÍFICA EFETIVA COM PERFIL QUADRANGULAR

A evolução da capacidade calorífica equivalente, C [$\text{J m}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$], com o modelo quadrangular é traduzida pelas seguintes equações:

$$C(T) = \begin{cases} C_s & ; T \leq T_{1m} \\ C_M = \frac{\rho_{\text{PCMs}} \times L}{T_{2m} - T_{1m}} + \frac{C_s + C_l}{2}, & ; T_{1m} < T \leq T_{2m}, \\ C_l & ; T \geq T_{2m} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

para a carga do PCM, e

$$C(T) = \begin{cases} C_s & ; T \leq T_{1s} \\ C_M = \frac{\rho_{\text{PCMs}} \times L}{T_{2s} - T_{1s}} + \frac{C_s + C_l}{2}, & ; T_{1s} < T \leq T_{2s}, \\ C_l & ; T \geq T_{2s} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

para a descarga do PCM.

ANEXO B – EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS MONITORIZADAS A MEIA SECÇÃO NOS CICLOS DE DESCARGA COM OS INTERVALOS DE MUDANÇA DE FASE IDEAIS

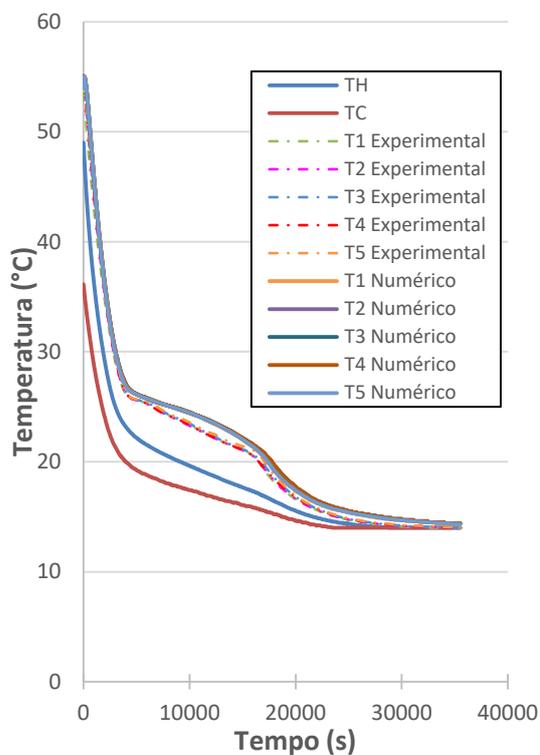


Figura B.1 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da cavidade sem alhetas num ciclo de descarga de 14°C, com $\Delta T_1 = 5^\circ\text{C}$; $\Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$; $\Delta T_{hist} = 2^\circ\text{C}$.

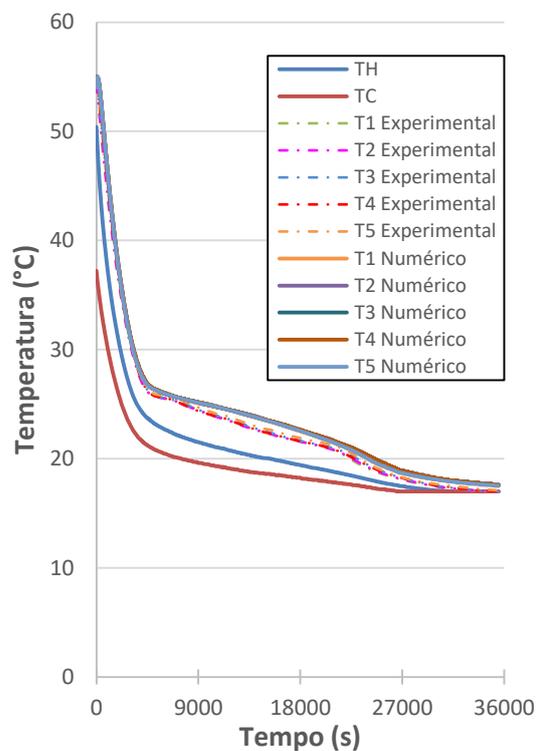


Figura B.2 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da cavidade sem alhetas num ciclo de descarga de 17°C, com $\Delta T_1 = 5^\circ\text{C}$; $\Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$; $\Delta T_{hist} = 1^\circ\text{C}$.

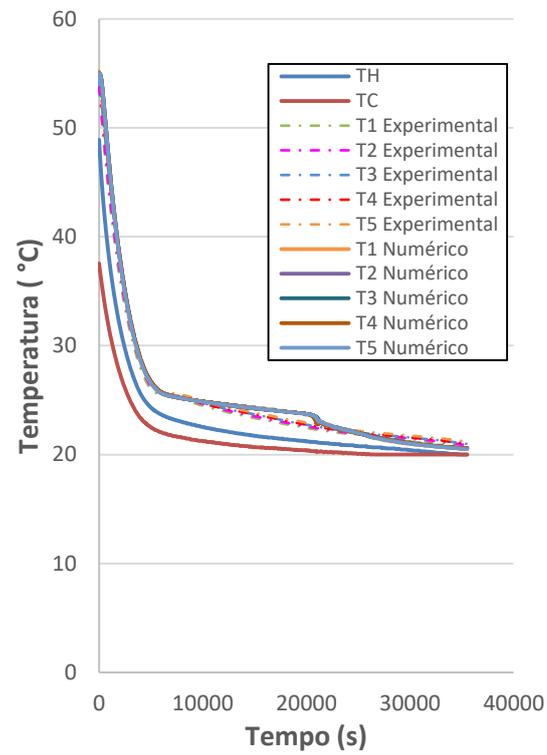


Figura B.3 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da cavidade sem alhetas no ciclo de descarga de 20 °C, com $\Delta T_1 = 5^\circ\text{C}$; $\Delta T_2 = 2^\circ\text{C}$; $\Delta T_{hist} = 2^\circ\text{C}$.

ANEXO C – EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS MONITORIZADAS A MEIA SECÇÃO DO DOMÍNIO NOS CICLOS DE DESCARGA COM OS INTERVALOS DE TEMPERATURAS DE MUDANÇA DE FASE VALIDADOS

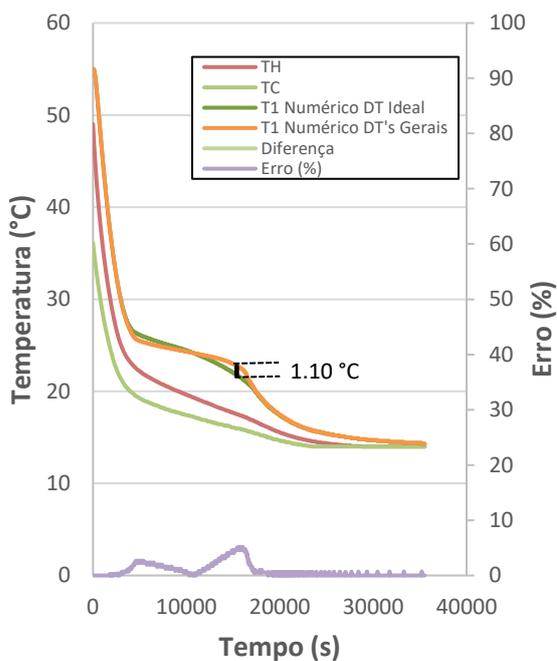


Figura D.1 Impacto da variação de ΔT_s na evolução de T_1 no ciclo de descarga 14C

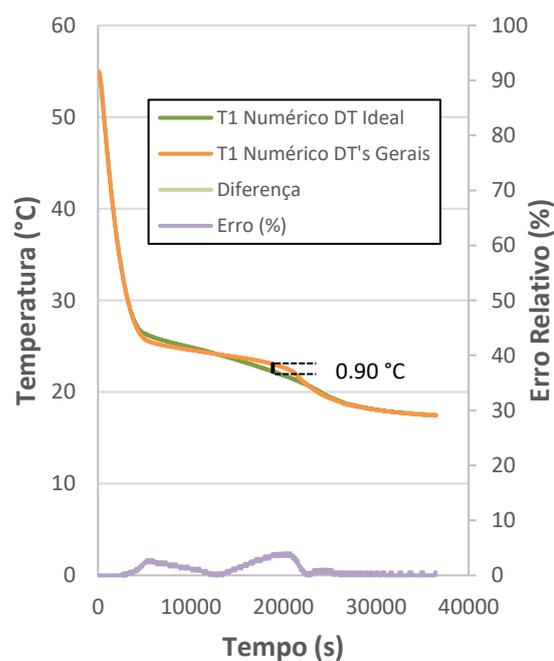


Figura D.2 Impacto da variação de ΔT_s na evolução de T_1 no ciclo de descarga 17C

ANEXO D – EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS MONITORIZADAS A MEIA SECÇÃO NO CICLO DE CARGA DE 68 W E NOS CICLOS DE DESCARGA A 17 E 20 °C

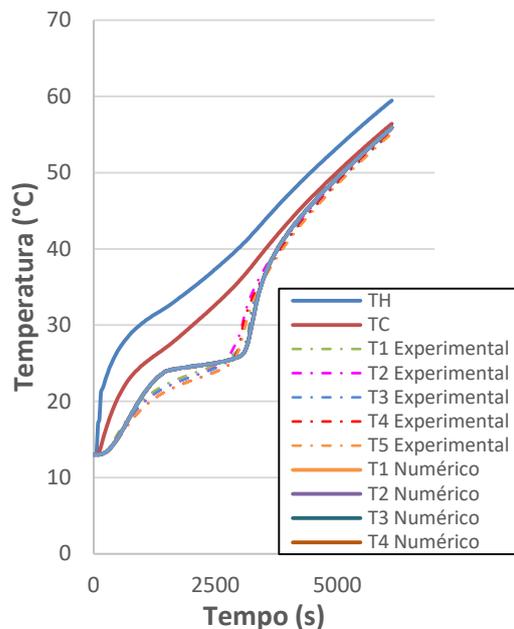


Figura D.1 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da UAE no ciclo de carga de 68 W

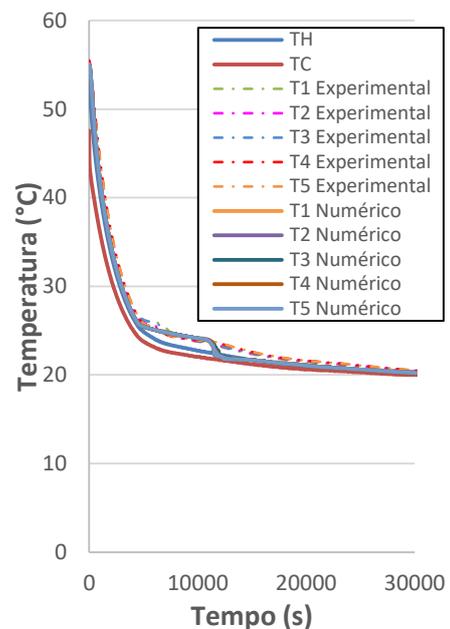


Figura D.2 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da UAE no ciclo de descarga de 17 °C

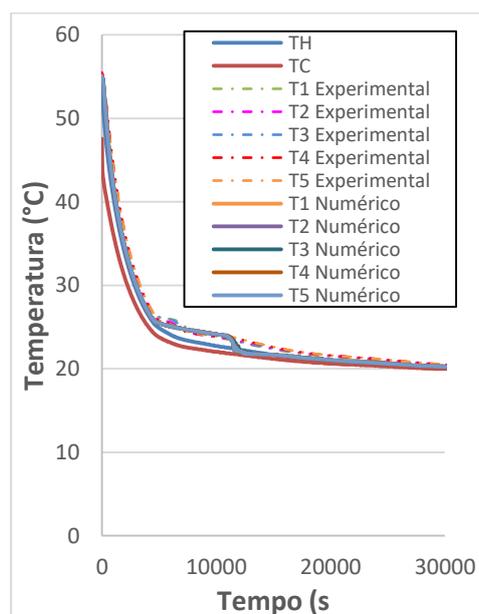


Figura D.3 Evolução das temperaturas a meia secção do domínio da UAE no ciclo de descarga de 20 °C

ANEXO E – PERFIL DE TEMPERATURAS E DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE – LISBOA

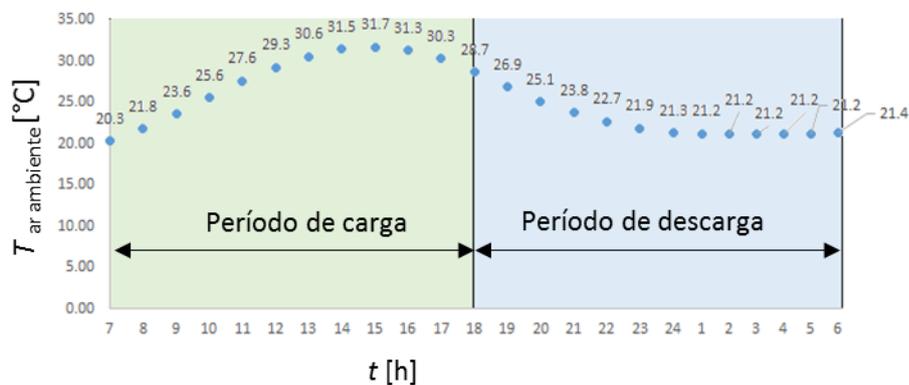


Figura E.1. Variação da temperatura do ar exterior, $T_{ar,amb}$. Dados climáticos retirados de climas do SOLTERM para Lisboa entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho.

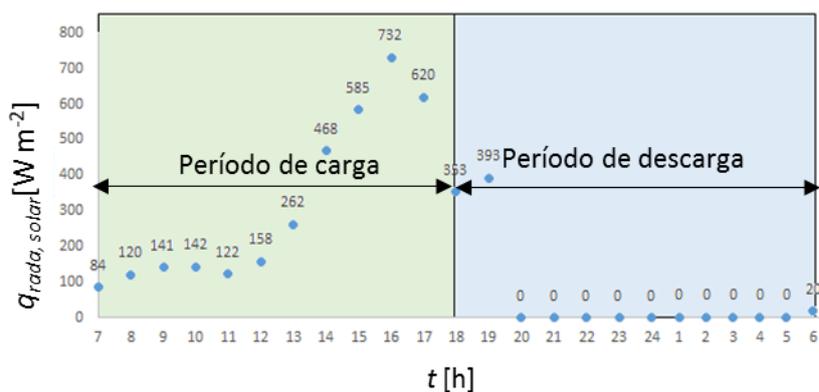


Figura E.2. Variação da radiação solar incidente numa fachada vertical orientada a oeste, $q_{rad,solar}$. Dados climáticos retirados de climas do SOLTERM para Lisboa entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho.

ANEXO F – PERFIL DE TEMPERATURAS E DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE – BRAGANÇA

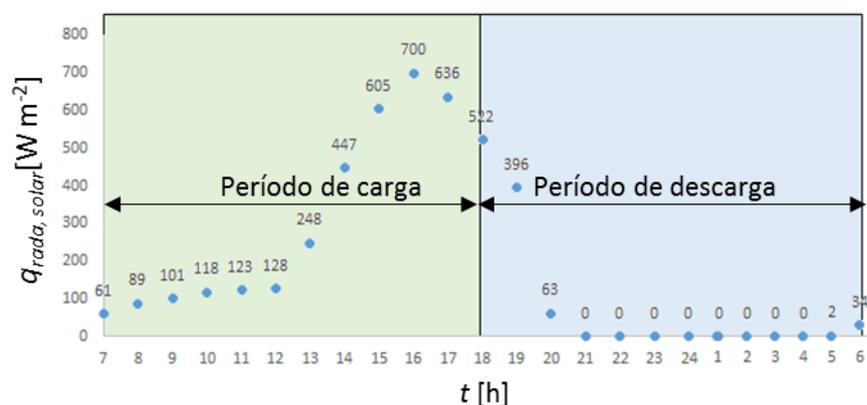


Figura F.1. Variação da temperatura do ar exterior, $T_{ar,ambr}$. Dados climáticos retirados de climas do SOLTERM para Bragança entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho.

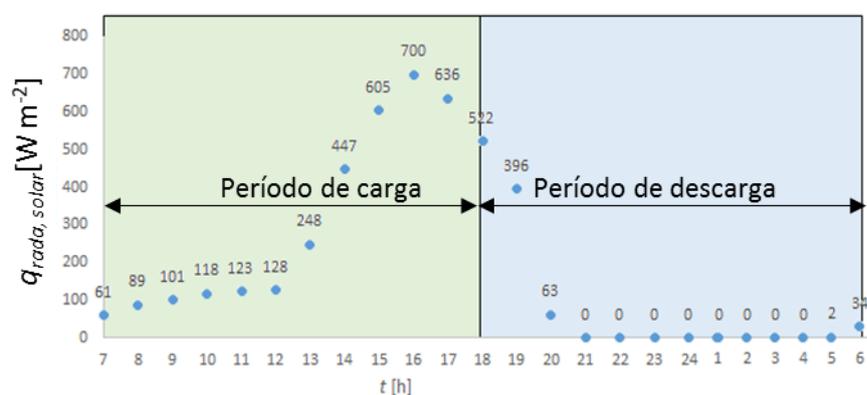


Figura F.2. Variação da radiação solar incidente numa fachada vertical orientada a oeste, $q_{rad,solar}$. Dados climáticos retirados de climas do SOLTERM para Bragança entre as 07h00 do dia 18 Julho e as 06h00 do dia 19 de Julho.