



Universidade de Aveiro
2023

**Eunice Ferreira
Quintas**

**Desenvolvimento e otimização de um produto com
PCM macroencapsulado de forma a melhorar o seu
desempenho térmico e energético**



Universidade de Aveiro
2023

**Eunice Ferreira
Quintas**

Desenvolvimento e otimização de um produto com PCM macroencapsulado de forma a melhorar o seu desempenho térmico e energético

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica da Doutora Cláudia Patrícia Cândido do Amaral, Professora Auxiliar Convidada em Regime Laboral do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e da Doutora Mónica Sandra Abrantes de Oliveira Correia, Professora Associada com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

A presente dissertação foi o apoio financeiro dos projetos:

UID/EMS/00481/2019-FCT – FCT –
Fundação para a Ciência e a
Tecnologia;

CENTRO-01-0145-FEDER-022083 –
Programa Operacional Regional do
Centro (Centro2020), através do
Portugal 2020 e do Fundo Europeu de
Desenvolvimento Regional.

O júri

Presidente

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

Vogais

Doutor António José Pereira de Figueiredo
Investigador Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutora Cláudia Patrícia Cândido do Amaral
Professora Auxiliar Convidada em Regime Laboral da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Terminar este projeto não foi fácil por vários motivos. Foi um percurso ao longo do qual me entreguei e dediquei totalmente, porém, teria sido mais difícil sem o apoio e colaboração de algumas pessoas, a quem quero dedicar os meus mais sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, quero agradecer às minhas orientadoras.

À Professora Cláudia Amaral, pela orientação, ajuda e apoio contínuos.

À Professora Mónica Oliveira, pela orientação, entrega e debate de ideias que me ajudaram em muitos momentos, e contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional. A ambas, que foram incansáveis, agradeço muito, por todo o tempo disponibilizado que me permitiu concluir esta dissertação.

À Universidade de Aveiro, nomeadamente ao Departamento de Engenharia Mecânica, pelo acolhimento ao longo de todo o meu percurso académico, e a todos os professores pela formação. Em especial ao Professor António Completo e ao Eng. António Festas, pelo apoio e disponibilidade prestados, e ao Eng. Virgílio Araújo pelo suporte contínuo e prestabilidade no laboratório.

Ao Professor António Samagaio, pela prontidão em ceder materiais imprescindíveis para a realização do trabalho.

Existindo a possibilidade de este ser o capítulo final do meu ciclo de estudos, não posso deixar de agradecer ao meu primeiro docente, o Professor Alexandre Loff. Pela sua dedicação incomparável e pelas suas aulas inspiradoras, ao longo dos meus primeiros quatro anos de ensino, que tiveram um impacto significativo na minha vida. Ser-lhe-ei sempre grata.

Quero agradecer aos meus pais e irmãos por todo o apoio, especialmente à minha mãe, a quem devo tudo o que sou hoje como pessoa, que sempre me apoiou incondicionalmente e me incentivou a continuar e a lutar pelo meu futuro.

Aos meus amigos, em especial, à Daniela, à Gabi e ao Gonçalo, pela amizade e apoio, e por muitas vezes me terem feito sair da minha “bolha”.

Por fim, e muito importante, ao meu companheiro de todas as horas, António Salgueiredo, pelo amor, compreensão e paciência, e por ter sido o meu pilar nos momentos mais difíceis no decorrer desta longa jornada.

A todos, obrigada!

palavras-chave

Material de mudança de fase, macroencapsulamento, desempenho térmico, sistemas de aquecimento ambiente

resumo

O maior consumo de energia de edifícios e emissões de CO₂ está relacionado com os sistemas de aquecimento ambiente. Os sistemas de armazenamento de energia térmica, usando materiais de mudança de fase, são mecanismos amplamente investigados e uma área de estudo em vertiginoso desenvolvimento. No entanto, a sua baixa condutividade térmica pode limitar a sua potencial utilização, pois diminui a resposta da transferência de calor associada aos processos de carga e descarga. O uso de PCM macroencapsulado surge assim como uma potencial solução para aumentar a eficiência térmica de várias aplicações, uma vez que pode armazenar grandes quantidades de energia sob a forma de calor latente, e libertá-la quando requerida, auxiliando os sistemas elétricos, reduzindo os consumos energéticos. O presente trabalho consistiu no desenvolvimento e otimização de uma solução com PCM macroencapsulado de forma a melhorar o seu desempenho global. O comportamento térmico do PCM foi estudado, tanto para a carga como para a descarga, através das curvas de fração líquida e calor específico efetivo do PCM, em função da temperatura. Foram analisadas diferentes formas de carregar o PCM e a influência do isolamento das placas com PCM, tendo em conta os tempos de carga e descarga e a taxa de transferência de calor no PCM. Para a solução mais eficiente, foi estudada a influência do macroencapsulamento com dois materiais distintos, alumínio e polietileno de alta densidade (HDPE), nos processos de carga e de descarga do PCM, através da análise da taxa de transferência de calor no PCM. Foram discutidas as vantagens da sua aplicação em sistemas ativos de aquecimento ambiente. A comparação entre o HDPE e o alumínio como macrocápsulas para o mesmo PCM deve ser feita com base em vários critérios, incluindo a sua condutividade térmica, gama de temperaturas de fusão e solidificação, e influência de encapsulamento, sendo a escolha entre ambas baseada nas necessidades da aplicação em causa.

keywords

Phase change material (PCM), macroencapsulation, thermal performance, space heating systems

abstract

The largest building energy consumption and CO₂ emissions are related to space heating systems. Thermal energy storage systems, using phase change materials, are widely investigated mechanisms and an area of study in fast development. However, their low thermal conductivity can restrict their potential utilisation as it decreases the heat transfer response associated with charging and discharging processes. The use of macroencapsulated PCM thus emerges as a potential solution to increase the thermal efficiency of several applications, since it can store large amounts of energy in the form of latent heat, and release it when required, assisting electrical systems by reducing energy consumption. The present work consisted in the development and optimisation of a solution with macroencapsulated PCM in order to improve its global performance. The thermal behaviour of the PCM was studied, both for charging and discharging, through the curves of net fraction and effective specific heat of the PCM, as a function of temperature. Different ways of charging the PCM and the influence of the insulation of the plates with PCM were analysed, taking into account the charging and discharging times and the heat transfer rate in the PCM. For the most efficient solution, the influence of macroencapsulation with two different materials, aluminium and high density polyethylene (HDPE), on the charging and discharging processes of the PCM was studied by analysing the heat transfer rate in the PCM. The advantages of their application in active space heating systems were discussed. The comparison between HDPE and aluminium as macrocapsules for the same PCM should be made on the basis of several criteria, including their thermal conductivity, melting and solidification temperature range, and encapsulation influence, with the choice between the two being based on the needs of the application concerned.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	2
2. Estado da arte	4
2.1 Materiais de mudança de fase: definição e princípios de funcionamento.....	4
2.2 Natureza dos PCM.....	5
2.3 Formas de incorporação de PCM	9
Incorporação direta (PCM puro).....	9
Encapsulamento.....	9
Macroencapsulamento.....	11
Nano e microencapsulamento	14
Estabilizador de forma (SSPCM)	14
2.4 PCM macroencapsulado para sistemas de aquecimento ambiente	16
Aplicações em sistemas passivos.....	17
Aplicações em sistemas ativos	22
3. Materiais e métodos	36
3.1 Aparato experimental.....	36
PCM e macrocápsulas.....	36
Isolamento do sistema	39
Sensores de temperatura	41
Modos de arrefecimento e aquecimento.....	43
3.2 Desenho de experiências	45
4. Modelação analítica do comportamento térmico do PCM	47
4.1 Fração líquida.....	47
4.2 Calor específico efetivo.....	47
4.3 Taxa de transferência de calor.....	48

Descarga do PCM.....	53
Carga do PCM	53
5. Análise e discussão de resultados.....	56
5.1 Estudo da influência do macroencapsulamento nos processos de carga e descarga	57
5.2 Adequar macroencapsulamento a aplicações ativas de aquecimento ambiente.....	62
6. Conclusões e trabalhos futuros.....	63
6.1 Conclusões	63
6.2 Trabalhos futuros.....	64
Referências.....	65
Anexos	74
Anexo A: Solidworks CAD	75
Anexo B: Desenhos técnicos	79
Anexo C: Experiências realizadas	85
Anexo D: Análise paramétrica.....	89

Lista de figuras

Figura 1. Esquema da estrutura da dissertação.	3
Figura 2: Esquema explicativo do funcionamento dos PCM, adaptado de Pacson et al. [4].....	4
Figura 3: Armazenamento de calor latente para o caso sólido-líquido, adaptado de Amaral [5].....	5
Figura 4: Classes de materiais que podem ser utilizados como materiais de mudança de fase e as suas gamas típicas de temperatura e entalpia de fusão, adaptado de Cabeza et al. [1].	6
Figura 5: Classificação dos materiais de armazenamento de energia [1], [5]–[7].	6
Figura 6: Estrutura e princípio de funcionamento do encapsulamento de PCM, adaptado de Salunkhe et al. [13].	10
Figura 7: Várias técnicas utilizadas para a melhoria do desempenho térmico de um sistema de armazenamento de calor latente, adaptado de Moraes et al. [22].	11
Figura 8: Diferentes geometrias de cápsulas (a) esférica (b) tubular (c) cilíndrica (d) retangular [13].	12
Figura 9: Diferentes morfologias das microcápsulas (a) forma irregular; (b) forma simples e esférica; (c) com várias camadas; (d) com vários núcleos (PCM); (e) tipo de matriz, adaptado de Ramírez et al. [3].	14
Figura 10: Representação típica de um SS-PCM, adaptado de Milián et al.[18].	15
Figura 11: Diagrama com algumas aplicações de aquecimento ambiente em sistemas passivos e ativos [6], [42].	17
Figura 12: Ilustração do protótipo à escala real (à esquerda), e composição da parede, da laje de cobertura e colocação dos fluxómetros nas paredes (à direita) [45].	18
Figura 13: Esquema da chaminé solar com PMC incorporado: (a) fechada; (b) aberta, adaptado de Liu et al. [48].	19
Figura 14: Esquema de 2 módulos de PCM embutidos na parte superior do depósito de armazenamento de água quente, adaptado de Cabeza et al. [57]	23
Figura 15: Geometria e dimensões dos tubos helicoidais, adaptado de Saxena et al. [59].	25
Figura 16: Aquecedor solar de ar com (SAH-C) e sem (SAH-A) os tubos helicoidais. [59]	25
Figura 17: Painel Rubitherm® com PCM macroencapsulado disponível comercialmente: fotografia (a) e esboço (b), adaptado de Dolado et al. [60].	27
Figura 18: Aparato experimental, adaptado de Dolado et al. [60].	27
Figura 19: Unidade TES-PCM, adaptado de Dolado et al. [60].	27

Figura 20: Montagem do permutador de calor PCM-ar (105x75x25 mm) com capacidade e 31,8kg de PCM, adaptado de Stathopoulos et al. [61].	29
Figura 21: Plataforma experimental e célula-teste, adaptado de Stathopoulos et al. [61].	29
Figura 22. Distribuição dos termopares (cabana 2), adaptado de Farid et al. [62].	31
Figura 23. Gráfico DSC para uma amostra pura de 32,15 mg de SP21EK da Rubitherm, adaptado de Figueiredo et al. [52].	38
Figura 24. Gráfico <i>T-history</i> para uma amostra pura de 15 g de SP21EK da Rubitherm, adaptado de Figueiredo et al. [52].	38
Figura 25: Placas de alumínio e HDPE, respectivamente.	39
Figura 26. Vista explodida dos moldes de XPS e placa de alumínio de PCM (<i>Solidworks</i>).	40
Figura 27. Vista explodida dos moldes de XPS e placa de HDPE de PCM (<i>Solidworks</i>).	41
Figura 28. Esquema ilustrativo da posição dos sensores de temperatura na placa de alumínio.	42
Figura 29. Esquema ilustrativo da posição dos sensores de temperatura no molde de XPS inferior para a placa de alumínio.	42
Figura 30. Esquema ilustrativo da posição dos sensores de temperatura no molde de XPS superior para a placa de alumínio.	42
Figura 31. Esquema ilustrativo da posição dos sensores de temperatura na placa de HDPE, a meio da espessura.	43
Figura 32. Esquema ilustrativo da posição dos sensores de temperatura nos moldes de XPS para a placa de HDPE, a 15 mm da superfície do molde.	43
Figura 33. Disposição do tubo no interior do molde superior de XPS, para a placa de alumínio.	44
Figura 34. Disposição do tubo no interior do molde superior de XPS, para a placa de HDPE.	44
Figura 35. Aparato experimental.	45
Figura 36. Representação esquemática do modelo 1D das placas.	49
Figura 37. Esquema representativo do escoamento interno em regime permanente no interior do tubo circular estudado, adaptado de Incropera et al. [74].	49
Figura 38. Esquema ilustrativo do escoamento de ar em regime permanente, considerando o ar quiescente e gás ideal.	51
Figura 39. Modelo de resistências (geral) para o cálculo da taxa de transferência de calor.	51
Figura 40. Esquema do aparato experimental no processo de arrefecimento (vista em	

corte frontal, a meio das placas), para a placa de alumínio.	53
Figura 41. Modelo de resistências para o processo de descarga do PCM.	53
Figura 42. Esquema do aparato experimental no processo de carga da experiência 2 (vista em corte frontal, a meio das placas), para a placa de alumínio.	54
Figura 43. Modelo de resistências para o processo de carga do PCM para a experiência 2.	54
Figura 44. Modelo de resistências para o processo de carga do PCM para a experiência 3.	55
Figura 45. Esquema do aparato experimental no processo de carga da experiência 4 (vista em corte frontal, a meio das placas), para a placa de alumínio.	55
Figura 46. Modelo de resistências para o processo de carga do PCM para a experiência 3.	55
Figura 47. Evolução da fração líquida do PCM ao longo dos processos de carga e descarga.	56
Figura 48. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM em função do tempo ao longo do processo de carga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE. ...	57
Figura 49. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM em função do tempo ao longo do processo de descarga, para as placas de alumínio e HDPE.	58
Figura 50. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da massa, em função do tempo ao longo do processo de carga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.	59
Figura 51. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da massa, em função do tempo ao longo do processo de descarga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.	59
Figura 52. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da espessura da macrocápsula, em função do tempo ao longo do processo de carga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.	60
Figura 53. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da espessura da macrocápsula, em função do tempo ao longo do processo de descarga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.	60
Figura 54. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da massa de PCM e da espessura da macrocápsula, em função do tempo ao longo do processo de carga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.	61
Figura 55. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da massa de PCM e da espessura da macrocápsula, em função do tempo ao longo do processo de descarga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.	61

Figura A.1 Vista de trás da placa de alumínio (<i>Solidworks</i>).....	75
Figura A.2 Vista de frente da placa de alumínio (<i>Solidworks</i>).....	75
Figura A.3 Representação isométrica da placa de alumínio vista de trás (<i>Solidworks</i>).	76
Figura A.4 Representação isométrica da placa de alumínio vista de frente (<i>Solidworks</i>).	76
Figura A.5 Vista de frente da placa de HDPE (<i>Solidworks</i>).	77
Figura A.6 Vista de trás da placa de HDPE (<i>Solidworks</i>).....	77
Figura A.7 Representação isométrica da placa de HDPE (<i>Solidworks</i>).	77
Figura A.8 Representação isométrica do molde inferior da placa de alumínio (<i>Solidworks</i>).	78
Figura A.9 Representação isométrica do molde superior da placa de alumínio (<i>Solidworks</i>).	78
Figura A.10 Representação isométrica do molde superior/inferior da placa de HDPE (<i>Solidworks</i>).	78
Figura B.1 Desenho técnico da placa de alumínio.	80
Figura B.2 Desenho técnico do molde inferior de XPS para a placa de alumínio.....	81
Figura B.3 Desenho técnico do molde superior de XPS para a placa de alumínio.	82
Figura B.4 Desenho técnico da placa de HDPE.	83
Figura B.5 Desenho técnico do molde superior/inferior de XPS para a placa de HDPE.	84
Figura C.1 Aparato experimental da experiência 1 (descarga), para a placa de alumínio.	85
Figura C.2 Aparato experimental da experiência 1 (descarga), para a placa de HDPE.	85
Figura C.3 Aparato experimental da experiência 2 (carga), para a placa de alumínio. 86	
Figura C.4 Aparato experimental da experiência 2 (carga), para a placa de HDPE.	86
Figura C.5 Aparato experimental da experiência 3 (carga), para a placa de alumínio. 87	
Figura C.6 Aparato experimental da experiência 3 (carga), para a placa de HDPE.	87
Figura C.7 Aparato experimental da experiência 4 (carga), para a placa de alumínio. 88	
Figura C.8 Aparato experimental da experiência 4 (carga), para a placa de HDPE.	88
Figura D.1 Posição estimada dos 5 termopares tipo-K no interior da placa de alumínio.	90

Figura D.2 Posição estimada dos 5 termopares tipo-K no interior da placa de HDPE. .	90
Figura D.3 Posição efetiva dos 5 termopares tipo-K no interior da placa de HDPE.	91
Figura D.4 Processo de carga da experiência 1, para a placa de alumínio.....	91
Figura D.5 Processo de descarga da experiência 2, para a placa de HDPE.	91
Figura D.6 Processo de carga das experiências 1, 2 e 3, para a placa de alumínio.....	92
Figura D.7 Processo de carga das experiências 1, 2 e 3, para a placa de HDPE.	93
Figura D.8 Evolução da fração líquida do PCM ao longo dos processos de carga e descarga.	94
Figura D.9 Evolução do calor específico efetivo do PCM ao longo dos processos de carga e descarga.....	94
Figura D.10 Evolução da taxa de transferência de calor no PCM ao longo do processo de carga, nas experiências 2 e 4, para a placa de alumínio.....	96
Figura D.11 Evolução da taxa de transferência de calor do PCM ao longo do processo de descarga, na experiência 2, para a placa de alumínio.	96
Figura D.12 Evolução da taxa de transferência de calor do PCM ao longo do processo de carga, nas experiências 2 e 4, respectivamente, para a placa de HDPE.	97
Figura D.13 Evolução da taxa de transferência de calor do PCM ao longo do processo de descarga, na experiência 4, para a placa de HDPE.	98

Lista de tabelas

Tabela 1: Comparação dos PCM orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas [1], [3], [5], [8]–[13].	7
Tabela 2: Comparação dos diferentes tipos de PCM orgânicos [5], [14], [15].	8
Tabela 3: Comparação dos diferentes tipos de PCM inorgânicos [5], [14], [15]	9
Tabela 4: Macroencapsulamento de alguns materiais.	13
Tabela 5: Comparação das vantagens e limitações das formas de incorporação de PCM, adaptado de Magendran et al. e Mousavi et al. [15], [16].	15
Tabela 6: Propriedades termofísicas de alguns PCM.	20
Tabela 7: Algumas aplicações com incorporação de PCM macroencapsulados em sistemas passivos.	20
Tabela 8: Propriedades termofísicas de alguns PCM.	31
Tabela 9: Algumas aplicações com incorporação de PCM macroencapsulados em sistemas ativos.	32
Tabela 10: PCM comerciais disponíveis no mercado.	35
Tabela 11: Propriedades do PCM SP21EK, dadas pelo fabricante. [64]	36
Tabela 12: Propriedades dos materiais das macrocápsulas [74].	39
Tabela 13. Plano de experiências para ambas as macrocápsulas.	46
Tabela 14. Propriedades do fluido operante (R-134a). [74]	50
Tabela 15. Resistências térmicas.	52
Tabela 16. Resistências térmicas (valores).	52

Abreviaturas

A

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado

B

BaCl ₂	Cloreto de bário
-------------------	------------------

C

CAD	Desenho assistido por computador
CAM	Modelação assistida por computador
CH ₃ COONa·3H ₂ O	Acetato de sódio tri-hidratado
COP	Coefficiente de desempenho
CO ₂	Dióxido de carbono
CNC	Controlo numérico computadorizado

D

DSC	Calorimetria de varrimento diferencial
-----	----------------------------------------

F

FETP	Propilo fluoroetileno
------	-----------------------

H

HDPE	Polietileno de alta densidade
------	-------------------------------

I

IV	Infra-vermelhos
----	-----------------

K

KCl	Cloreto de potássio
KNO ₃	Nitrato de potássio

L

LHS	Armazenamento de calor latente
LiNO ₃	Nitrato de lítio

M

MF	Mudança de fase
MgCl ₂	Cloreto de magnésio

N

Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	Tetraborato de sódio deca-hidratado
NaCl	Cloreto de cálcio
NaNO ₃	Nitrato de sódio
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	Sulfato de sódio deca-hidratado

Ni	Níquel
P	
PCM	Material de mudança de fase
PTFE	Politetrafluoroetileno
PVC	Policloreto de vinila
PVF	Fluoreto de polivinilideno
S	
SAR	Coletor solar de ar
ST	<i>Set-point</i> (ponto definido)
Si	Silício
SSPCM	Material de mudança de fase estabilizador de forma
T	
TES	Armazenamento de energia térmica
Z	
Zn	Zinco

Grandezas e unidades

A_{tr}	Área transversal do tubo	[m ²]
A_s	Área superficial da placa	[m ²]
C	Capacidade térmica calorífica	[J/K]
C_p	Calor específico	[kJ/kg·K]
C_{ps}	Calor específico sólido	[kJ/kg·K]
C_{pL}	Calor específico líquido	[kJ/kg·K]
$C_{eff_{erf}}$	Calor específico efetivo	[kJ/kg·K]
D	Diâmetro do tubo	[m]
L	Média dos calores latentes de fusão e solidificação	[kJ/kg]
L_c	Dimensão característica do tubo/placa	[m]
h_{ar}	Coeficiente de convecção do ar	[W/m ² ·K]
H_{erf}	Entalpia	[kJ/kg]
h_{refr}	Coeficiente de convecção do fluido refrigerante	[W/m ² ·K]
$H_{ref S}$	Entalpia de referência sólida	[kJ/kg]

$H_{ref L}$	Entalpia de referência líquida	[kJ/kg]
m_{PCM}	Massa de PCM	[kg]
f_{erf}	Fração líquida	[-]
k	Condutividade térmica do fluido operante	[W/m·K]
$k_{Al/HDPE}$	Condutividade térmica do alumínio/HDPE	[W/m·K]
k_{PCM}	Condutividade térmica do PCM	[W/m·K]
k_{refr}	Condutividade térmica do fluido refrigerante	[W/m·K]
\dot{m}	Caudal mássico	[kg/s]
Nu	Número de Nusselt	[-]
P	Perímetro do tubo/placa	[m]
Pr	Número de Prandtl	[-]
Q	Calor sensível	[J]
\dot{Q}_v	Caudal volúmico	[m ³ /s]
\dot{Q}_{carga1}	Taxa de transferência de calor no PCM na experiência 1 (carga)	[kW]
\dot{Q}_{carga2}	Taxa de transferência de calor no PCM na experiência 2 (carga)	[kW]
\dot{Q}_{carga3}	Taxa de transferência de calor no PCM na experiência 3 (carga)	[kW]
\dot{Q}_{carga4}	Taxa de transferência de calor no PCM na experiência 4 (carga)	[kW]
$\dot{Q}_{descarga}$	Taxa de transferência de calor no PCM na descarga do PCM	[kW]
$\dot{Q}_{placa IV}$	Potência da placa aquecedora de IV	[kW]
\dot{Q}_s	Fluxo térmico na superfície	[kW]
Ra_L	Número de Rayleigh	[-]
R_{refr}	Resistência do fluido refrigerante	[K/W]
R_{ar}	Resistência do ar	[K/W]
R_{XPS_sup}	Resistência da placa de XPS superior	[K/W]
R_{XPS_inf}	Resistência da placa de XPS inferior	[K/W]
$R_{Al/HDPE}$	Resistência do alumínio/HDPE	[K/W]
R_{PCM}	Resistência do PCM	[K/W]

Re	Número de Reynolds	[-]
T_{ar}	Temperatura do ar	[°C]
T_L	Temperatura à qual o PCM se encontra no estado líquido	[°C]
T_{PC}	Temperatura de mudança de fase do PCM	[°C]
T_{PCM}	Temperatura instantânea do PCM	[°C]
T_{ref}	Temperatura de referência	[°C]
T_{refr}	Temperatura do fluido refrigerante	[°C]
T_S	Temperatura à qual o PCM se encontra no estado sólido	[°C]
T_{sup}	Temperatura média da superfície	[°C]
T_{XPS_inf}	Temperatura do XPS inferior	[°C]
T_{XPS_sup}	Temperatura do XPS superior	[°C]
T_{∞}	Temperatura média da superfície	[°C]
u	Velocidade do fluido operante	[m/s]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
β	Coefficiente de expansão térmica	[K ⁻¹]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
α	Difusividade térmica	[m ² /s]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
ρ_{refr}	Densidade do fluido refrigerante	[kg/m ³]
μ	Viscosidade dinâmica	[kg/s·m]
μ_{refr}	Viscosidade dinâmica do fluido refrigerante	[kg/s·m]
σ_L	Coefficiente de temperatura (solidificação)	[°C]
σ_S	Coefficiente de temperatura (fusão)	[°C]
ΔT	Intervalo de temperatura	[°C]
Δt	Intervalo de tempo	[s]
Δx_{xps_inf}	Espessura da placa de XPS inferior	[m]
Δx_{xps_sup}	Espessura da placa de XPS superior	[m]

1. Introdução

1.1 Enquadramento

O aumento contínuo e expedito do desenvolvimento económico mundial, o aumento da população e melhoria do nível de vida são seguidos por uma forte procura de fornecimento contínuo de energia e de uma crescente preocupação da dependência dos combustíveis fósseis. Sob este cenário, os edifícios energeticamente eficientes desempenharão um papel crucial na mudança do paradigma atual a nível energético. O setor da construção de edifícios é responsável por mais de um terço do consumo final de energia a nível mundial e é igualmente responsável pelas emissões de CO₂. Mais de 50% do consumo total de energia nos edifícios deve-se ao arrefecimento, aquecimento e ventilação de espaços. Portanto, o aquecimento e arrefecimento de espaços representam uma oportunidade preponderante na redução do consumo de energia neste setor. Para colmatar o consumo energético, várias empresas e investigadores têm desenvolvido soluções que recorrem a estratégias passivas e ativas.

Os sistemas de armazenamento de energia térmica, referidos como sistemas TES, a sigla para *Thermal Energy Storage*, têm vindo a ganhar um elevado destaque na última década. Tanto em climas frios como quentes, o consumo de energia varia significativamente durante o dia e durante a noite, devido ao aquecimento e arrefecimento de espaços. Uma gestão eficaz do consumo de energia pode ser conseguida através da utilização de sistemas TES para armazenar energia sob a forma de calor em horas de pico dos períodos de carga e utilizá-la durante as horas de pico dos períodos de descarga. Assim, a energia térmica pode ser armazenada durante os períodos nos quais os consumos são mínimos, podendo ser utilizada durante as horas de pico, auxiliando os sistemas de energia elétrica, e reduzindo ainda a pegada de carbono dos edifícios. O grande desafio tem a ver com o rápido armazenamento de energia e a sua recuperação. Ainda que os sistemas TES possam ser classificados de várias maneiras, e que o armazenamento de calor sensível seja o método mais comum, o armazenamento de calor latente (LHS) é considerada a técnica mais promissora para armazenar energia térmica [1], [2].

Neste contexto, os materiais de mudança de fase apresentam-se como uma solução para armazenar e libertar energia térmica em tempo útil e aumentar a eficiência térmica em várias aplicações. Os PCM têm recebido muita atenção nas últimas décadas e tornaram-se um tema de grande interesse para muito arquitetos, engenheiros e investigadores. Nos últimos 5 anos, a publicação de artigos de revisão com enfoque no encapsulamento de PCM aumentou exponencialmente, o que permite evidenciar melhor o potencial do PCM encapsulado. O PCM encapsulado consiste no envolvimento do PCM numa cápsula ou recipiente em forma de tubos, bolsas, esferas, placas e outros. É um método com inúmeras vantagens, nomeadamente porque permite armazenar grandes quantidades de PCM e melhorar o seu

desempenho térmico, dependendo do tipo de material da cápsula.

1.2 Objetivos

Os principais objetivos desta dissertação, de forma sintetizada, são os seguintes:

- Identificar e selecionar, no mercado, soluções de PCM macroencapsulado mais utilizadas em sistemas ativos de aquecimento ambiente;
- Estudar os parâmetros com influência no desempenho térmico e energético em sistemas ativos de aquecimento ambiente;
- Desenvolver um produto com PCM macroencapsulado e identificar estratégias conducentes à melhoria do seu desempenho global;
- Estabelecer a melhor combinação de níveis dos fatores para poder aferir a influência do macroencapsulamento na resposta de sistemas ativos de aquecimento ambiente tanto no ciclo de carga como no de descarga.

1.3 Estrutura da dissertação

A estrutura da dissertação será baseada na otimização do desempenho térmico e energético de um sistema com PCM macroencapsulado, e na abordagem sistêmica, considerando diversos fatores, parâmetros e requisitos, nomeadamente no que concerne ao ambiente (zona climática), tipo de aplicação e materiais. Esta secção tem como propósito sistematizar a organização do documento, esquematizada na Figura 1, na qual estão descritos os capítulos e respetiva ligação com as palavras-chave. A dissertação está estruturada em 6 capítulos e 4 anexos.

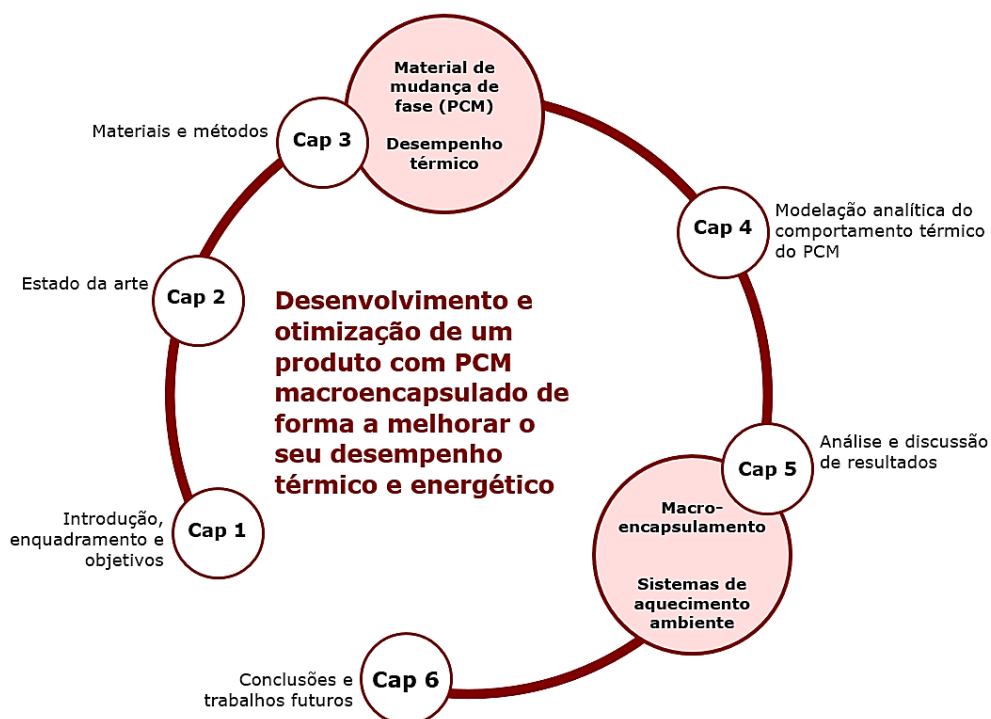


Figura 1. Esquema da estrutura da dissertação.

Este capítulo introduz a dissertação, e destacam-se os objetivos e motivações para a realização deste trabalho. O segundo capítulo diz respeito ao estado da arte, clarifica os conceitos essenciais sobre o tema e descreve ainda alguns estudos realizados anteriormente por diversos autores. De seguida, o terceiro capítulo descreve o que foi realizado experimentalmente, desde os materiais utilizados à implementação do aparato experimental, detalhando todos os passos realizados até obter o produto final. No quarto capítulo é apresentado o modelo analítico do comportamento térmico do PCM, e é ainda proposto um modelo de taxa de transferência de calor simplificado. Segue-se a análise e discussão dos resultados no quinto capítulo. Por último, são feitas as conclusões e sugeridos trabalhos futuros com o intuito de dar seguimento ao estudo realizado nesta dissertação. No final encontram-se as referências bibliográficas e os anexos. Nos anexos são apresentados os desenhos técnicos das placas, ilustrações das experiências realizadas e a análise paramétrica no sentido de otimizar a aplicação com PCM macroencapsulado.

2. Estado da arte

2.1 Materiais de mudança de fase: definição e princípios de funcionamento

Os materiais de mudança de fase, normalmente referidos como PCM, a sigla para *Phase Change Material*, são materiais que armazenam e libertam energia térmica durante os processos de fusão e solidificação. Os PCM libertam grandes quantidades de energia durante a solidificação sob a forma de calor latente, mas posteriormente absorvem energia do ambiente durante a fusão.

Quando um PCM é aquecido e a temperatura se aproxima do ponto de fusão, o calor circundante é usado para completar a mudança de fase. Não há, teoricamente, aumento de temperatura durante esta transformação de sólido para líquido. Se o PCM arrefecer novamente e começar a solidificar, a energia ou calor que foi absorvido anteriormente é libertado, o que acontece porque um estado líquido é um estado de energia mais alta (ver Figura 2). A energia é, portanto, armazenada no estado líquido e pode ser libertada de forma completamente reversível através da solidificação [1]–[3].

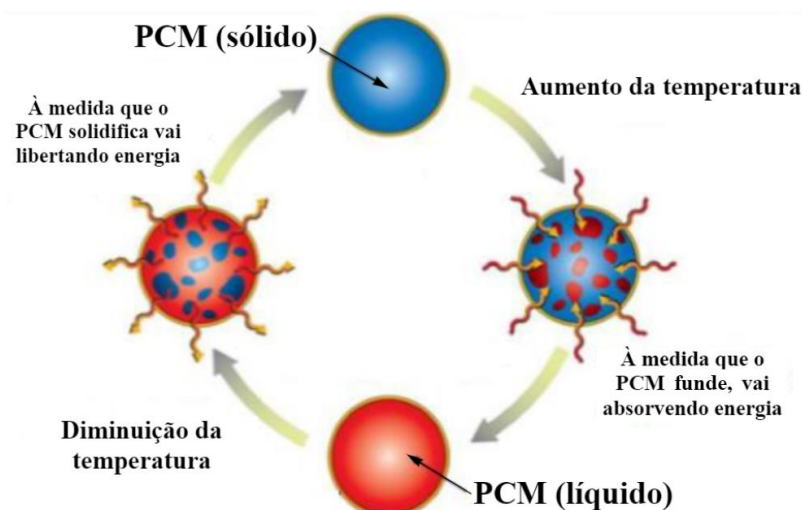


Figura 2: Esquema explicativo do funcionamento dos PCM, adaptado de Pacson et al. [4].

O método mais comum de armazenar energia térmica é sob a forma de calor sensível. A relação entre o calor armazenado (ΔQ) e a diferença entre as temperaturas final e inicial (ΔT) representa a capacidade térmica calorífica (C), que é dada pela quantidade de material (m), e pelo calor específico do material (c). Esta relação pode ser expressa pela equação [1]:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot \Delta T \quad [1]$$

Cada material tem uma capacidade térmica diferente, portanto, o calor sensível depende das propriedades dos materiais e da temperatura [1].

Outro método para determinar o armazenamento de energia térmica é o

processo físico do calor latente, que utiliza o processo de mudança de fase do material para armazenar energia sob a forma latente. Normalmente este tipo de materiais sofre uma pequena mudança de volume, inferior a 10%, quando ocorre o processo de mudança de fase. Como demonstrado na Figura 3, para uma mudança de fase sólido-líquido, quando a temperatura de fusão da mudança de fase é atingida, a temperatura do PCM é constante e o calor armazenado aumenta. Por sua vez, abaixo ou acima do intervalo de temperatura em que ocorre a mudança de fase, o calor é armazenado sob a forma de calor sensível, mas a temperatura do material aumenta [1].

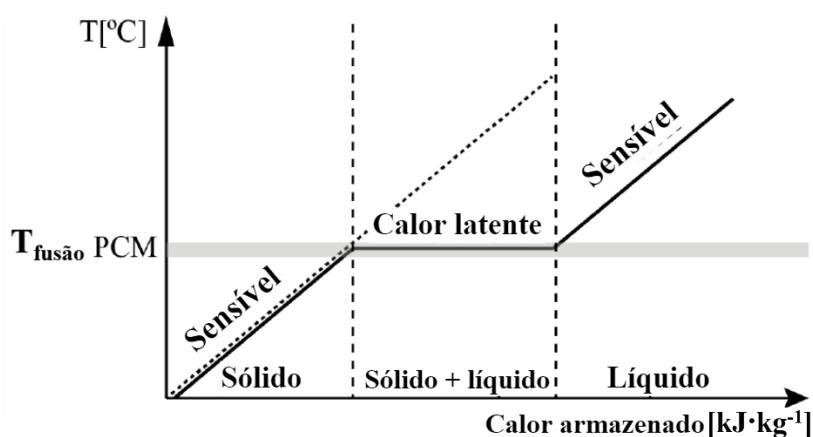


Figura 3: Armazenamento de calor latente para o caso sólido-líquido, adaptado de Amaral [5].

Quando, e se a fusão se completar, uma nova transferência de calor representa, novamente, armazenamento de calor sensível. Devido à baixa variação de volume, o calor latente armazenado (ΔQ), é igual à diferença de entalpia (ΔH), dado pela equação [2]:

$$\Delta Q = \Delta H \quad [2]$$

Fora do intervalo de temperatura de mudança de fase o comportamento do PCM é o mesmo de um material comum. Em suma, os PCM podem ser usados para controlar a temperatura uma vez que pode ser-lhe extraída ou cedida energia sob a forma de calor sem que a sua temperatura se altere significativamente, ou para armazenar ou fornecer grandes quantidades de energia a uma mudança de temperatura relativamente pequena, normalmente entre 1°C a 3°C.

2.2 Natureza dos PCM

Uma vez que os dois critérios mais importantes, a temperatura e entalpia de fusão, dependem dos efeitos moleculares, os materiais pertencentes à mesma classe têm comportamentos semelhantes. A Figura 4 mostra a gama típica de entalpia de fusão e temperatura de fusão de classes de materiais comumente utilizados como PCM.

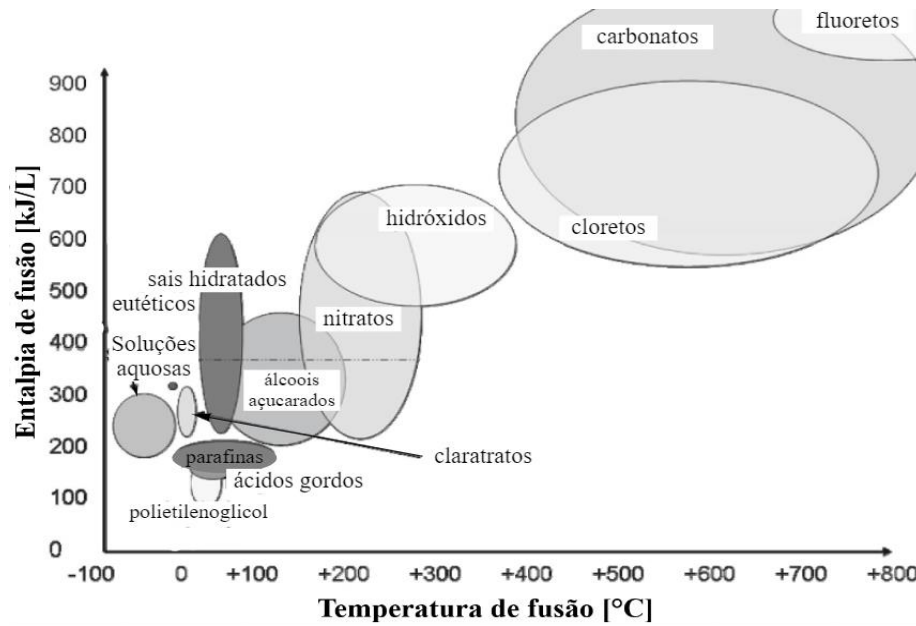


Figura 4: Classes de materiais que podem ser utilizados como materiais de mudança de fase e as suas gamas típicas de temperatura e entalpia de fusão, adaptado de Cabeza et al. [1].

Os PCM são divididos em três grandes grupos: orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas. Os orgânicos podem ser parafinas ou não parafinas, os inorgânicos dividem-se em sais hidratados e metálicos, e as misturas eutéticas são compostas pela combinação de PCM orgânicos ou inorgânicos (Figura 5).

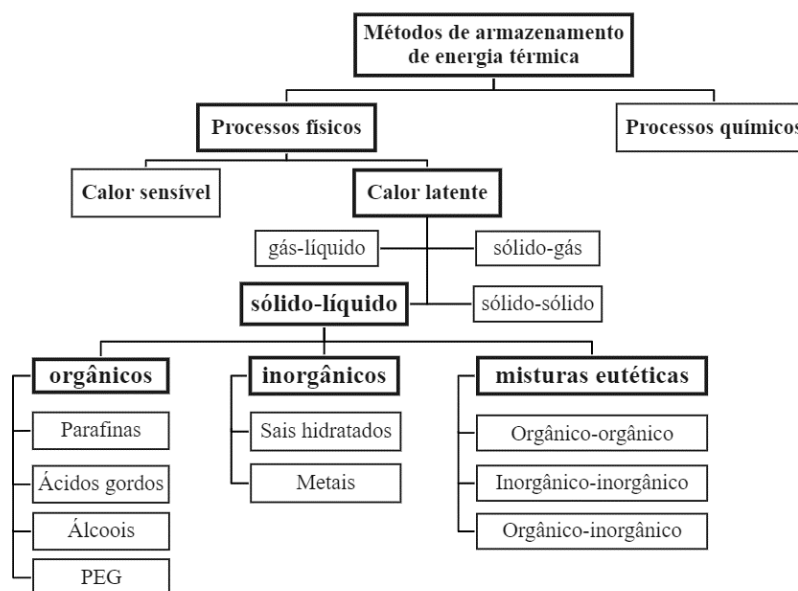


Figura 5: Classificação dos materiais de armazenamento de energia [1], [5]–[7].

Nas Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 apresentam-se as comparações das vantagens e desvantagens dos diferentes grupos de PCM.

Tabela 1: Comparação dos PCM orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas [1], [2], [5], [8]–[13].

	Vantagens	Desvantagens
Orgânicos Temp_funcionamento: 4 - 150°C	Vasta gama de temperaturas Elevado calor de fusão Baixo ou nulo subarrefecimento Estabilidade física e química Bom comportamento térmico Zona de transição ajustável Fusão congruente, sem segregação Taxa de nucleação elevada Não corrosivos Recicláveis	Baixa condutividade térmica, densidade e ponto de fusão Entalpia de mudança de fase baixa Variação de volume significativa durante a mudança de fase Inflamabilidade Volatilidade elevada Custo elevado
Inorgânicos Temp_funcionamento: 8 - 900°C	Entalpia de fusão acentuada Boa condutividade térmica e densidade de armazenamento de energia Não inflamáveis Variação de volume baixa Baixa nucleação Baixo custo comparativamente aos compostos orgânicos	Sobrarrefecimento Fracas estabilidade térmica Instáveis quimicamente Segregação de fases nos processos de fusão e solidificação Fusão incongruente e desidratação no processo de ciclo térmico Corrosão Toxicidade ligeira A sua aplicação exige o uso de alguns agentes nucleantes e espessantes
Misturas Eutéticas Temp_funcionamento: 12 - 600°C	Elevada entalpia de fusão Temperaturas de fusão exatas Baixos pontos de fusão e solidificação Estabilidade química Sem segregação e mudança de fase congruente Densidade volumétrica de armazenamento térmico ligeiramente superior à dos compostos orgânicos Não corrosivos	Custo elevado, até três vezes superior ao dos restantes grupos Odor bastante forte Estudos limitados cientificamente sobre as suas propriedades termofísicas

Tabela 2: Comparação dos diferentes tipos de PCM orgânicos [5], [14], [15].

	Vantagens	Desvantagens
Parafinas	<p>Vasta gama de temperaturas de fusão</p> <p>Densidades moderadas de armazenamento térmico</p> <p>Quimicamente inerte</p> <p>Estável, sem segregação de fases</p> <p>Boa densidade de armazenamento em relação à massa</p> <p>Pressão de vapor não significativa</p> <p>Boa compatibilidade com metais</p> <p>Boas condições de segurança</p> <p>Sem efeito de sobrearrefecimento</p> <p>Comercialmente disponível a um custo razoável</p>	<p>Insolúvel em água</p> <p>Impermeável à água</p> <p>Não reage quimicamente com os reagentes mais comuns</p> <p>Facilmente inflamável</p> <p>Baixa entalpia de fusão</p> <p>Baixa condutividade térmica, densidade e ponto de fusão</p>
Ácidos gordos	<p>Gama adequada de temperaturas de fusão</p> <p>Elevada capacidade térmica calorífica</p> <p>Sobrearrefecimento baixo ou inexistente</p> <p>Baixa pressão de vapor</p> <p>Não tóxico</p> <p>Boa estabilidade térmica e química</p> <p>Variação de volume baixa durante a mudança de fase</p> <p>Elevado calor de fusão</p> <p>Facilmente produzido a partir de óleos vegetais e animais comuns</p>	<p>Entalpia de mudança de fase baixa</p> <p>Baixa condutividade térmica, densidade e ponto de fusão</p> <p>Inflamabilidade</p> <p>Não compatível com metais</p> <p>Custos elevados (cerca de três vezes superior aos das parafinas)</p>
Álcoois, ésteres, glicóis	<p>Elevada densidade volumétrica de armazenamento</p> <p>Alta condutividade térmica</p>	<p>Sobrearrefecimento (ligeiro)</p> <p>Temperaturas de fusão elevadas</p>

Tabela 3: Comparação dos diferentes tipos de PCM inorgânicos [5], [14], [15].

	Vantagens	Desvantagens
Sais hidratados	<p>Elevada densidade volumétrica de armazenamento</p> <p>Alta condutividade térmica</p> <p>Custos razoáveis</p> <p>Não inflamáveis</p>	<p>Instabilidade química</p> <p>Degradação (ciclo de aquecimento)</p> <p>Quimicamente agressivo em relação aos metais</p> <p>Elevado sobrearrefecimento</p> <p>Inoperante após ciclos de mudança de fase repetidos</p> <p>Incompatibilidade com muitos materiais</p>
Metais	<p>Elevado calor de fusão por unidade de volume</p> <p>Alta condutividade</p>	<p>Peso elevado</p> <p>Elevado sobrearrefecimento</p>

2.3 Formas de incorporação de PCM

Na literatura estão disponíveis as diferentes técnicas de incorporação de PCM. A incorporação direta, o encapsulamento e o estabilizador de forma são as mais promissoras e serão descritas de seguida.

Incorporação direta (PCM puro)

A incorporação direta é o método de incorporação de PCM mais simples e económico, no qual o PCM é adicionado aos materiais durante a produção dos mesmos. As maiores desvantagens desta técnica estão associadas às eventuais fugas do PCM e à possível incompatibilidade com os materiais adjacentes [9], [16].

Encapsulamento

O encapsulamento consiste em confinar o PCM num material adequado, designado por cápsula, evitando a interação entre o PCM e o meio envolvente e facilitando o manuseamento dos PCM (Figura 6). Este processo foi inventado por Barret K Green nos anos de 1940 a 1950 [17].

O encapsulamento pode ser classificado, dependendo do tamanho da cápsula, como macroencapsulamento, microencapsulamento e nanoencapsulamento, com diâmetros a partir de 1mm, 1 μ m a 1mm e menores que 1 μ m, respetivamente [1], [5].

O encapsulamento permite melhorar o desempenho termofísico do PCM, estendendo a área de superfície para transferência de calor, potenciando o aumento da sua condutividade térmica e o armazenamento de energia térmica

de calor latente, elevando a compatibilidade do PCM com os materiais de armazenamento, reduzindo o risco de corrosão e inflamabilidade nas suas aplicações, e minimizando o efeito da mudança de volume durante a mudança de fase [2], [13], [18]. Também é proposto como uma solução eficaz para eliminar o risco de fugas [16].

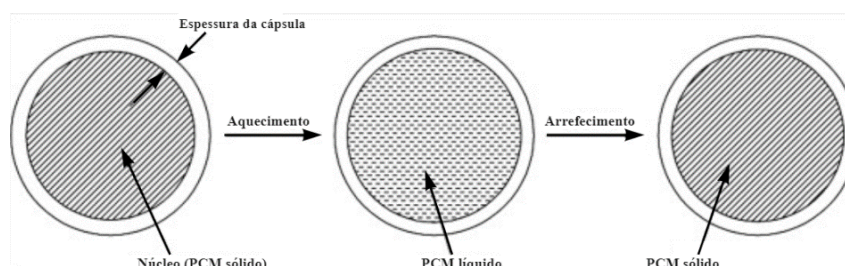


Figura 6: Estrutura e princípio de funcionamento do encapsulamento de PCM, adaptado de Salunkhe et al. [13].

O material da cápsula deve ser cuidadosamente selecionado, uma vez que desempenha sempre um papel fulcral nas propriedades dos PCM encapsulados. A escolha adequada do material da cápsula pode não só melhorar o desempenho no que diz respeito ao armazenamento de energia dos PCM, mas também aumentar a sua estabilidade térmica. Existem cerca de 50 polímeros diferentes que podem ser usados para encapsular PCM. Contudo, existem outros materiais tais como a sílica, carbonato de cálcio, metais (níquel, aço, ligas de crómio e níquel), silicatos ou outros materiais inorgânicos que servem o mesmo propósito. De modo geral, os materiais das cápsulas podem ser orgânicos ou inorgânicos, sendo que os primeiros são os mais mencionados na literatura [2].

Uma das grandes preocupações relativamente ao encapsulamento de sais hidratados, por exemplo, prendem-se com o facto de serem corrosivos com metais e de serem completamente solúveis em água. Deste modo, a natureza não corrosiva e a insolubilidade em água são características altamente desejáveis para os PCM, existindo assim uma dificuldade acrescida aquando da seleção do material da cápsula.

Salunkhe et. al [13] e Rathore et. al [19] descreveram que o material das cápsulas deve seguir as seguintes características:

- Deve ter resistência estrutural e térmica suficiente para suportar o processo de mudança de fase da PCM e prevenir as fugas;
- Deve manter todas as propriedades termofísicas do PCM, não reagindo com o mesmo;
- Não deve ser corrosivo ou tóxico;
- Deve ser uma boa barreira à difusão de água;
- Deve ter uma maior condutividade elevada para equilibrar as trocas de calor entre o PCM e o meio envolvente.

Se o critério de seleção for a transferência de calor, o metal para material

da cápsula é o eleito, ainda que os invólucros de polímeros sejam os mais utilizados. Contudo, como referido anteriormente, a compatibilidade entre os materiais da cápsula e o PCM deve de ser verificada. A seleção final do método deve ser orientada pelo tipo de PCM a ser encapsulado, o custo que implica, a eficiência do encapsulamento, a estabilidade térmica do sistema e a disponibilidade dos reagentes [2], [20], [21].

Moraes et al. [22] observou que a taxa de solidificação pode ser aumentada utilizando um material de revestimento de alta condutividade térmica, menor diâmetro da cápsula e menor temperatura externa. A Figura 7 resume várias técnicas utilizadas para a melhoria do desempenho térmico de um sistema de armazenamento de calor latente.

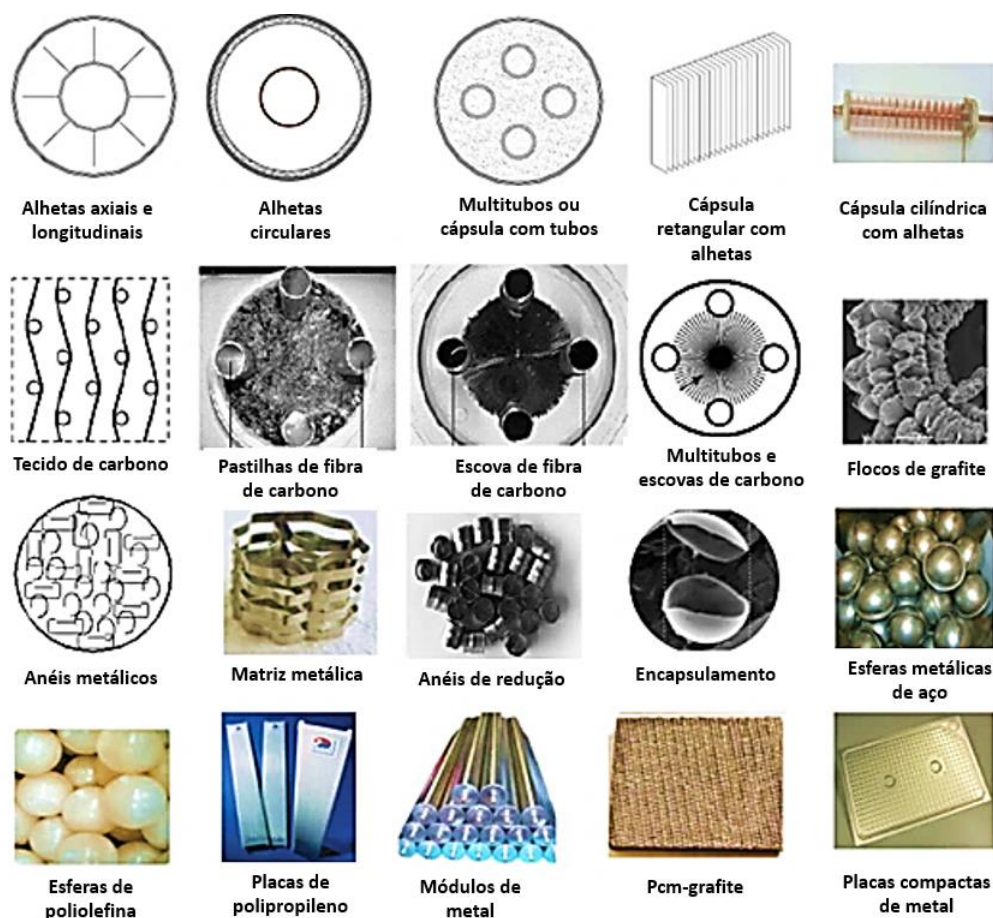


Figura 7: Várias técnicas utilizadas para a melhoria do desempenho térmico de um sistema de armazenamento de calor latente, adaptado de Moraes et al. [22].

Macroencapsulamento

O macroencapsulamento é o método mais simples de encapsulamento de PCM. A técnica consiste na incorporação do PCM num recipiente ou cápsula a partir de 1mm em forma de tubos, esferas, painéis, bolsas, etc. tal como ilustrado na Figura 8.

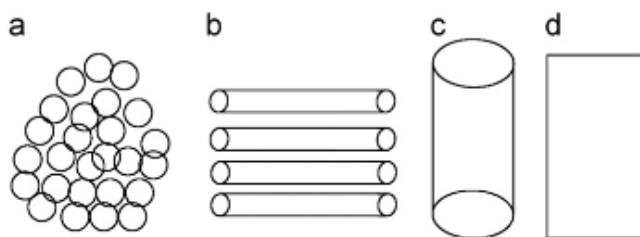


Figura 8: Diferentes geometrias de cápsulas (a) esférica (b) tubular (c) cilíndrica (d) retangular [13].

As macrocápsulas melhoram o desempenho térmico do PCM, uma vez que podem aumentar a taxa de transferência de calor, dependendo do tipo de material do núcleo e melhoram a compatibilidade do material com o meio envolvente, criando uma barreira, e assegurando a mudança de volume externo do PCM. [13] Por outro lado, estes recipientes melhoram a estabilidade térmica e mecânica do PCM.

O método de macroencapsulamento permite acomodar grandes quantidades de PCM. Para as macrocápsulas, a geometria das mesmas faz com que a diferença de temperatura entre o núcleo do PCM e as extremidades seja maior. Assim, o contorno permanece sólido, enquanto a parte do núcleo pode ainda permanecer na forma líquida, impedindo assim a transferência eficaz de calor [13].

Veerappan et al. [23] realizaram um estudo analítico sobre a influência da dimensão das cápsulas na taxa de fusão e solidificação. Notou-se que à medida que o diâmetro da cápsula aumentou de 4 cm para 12 cm, o tempo de fusão do cloreto de cálcio hexahidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) encapsulado também aumentou de 26 para 192 minutos, respetivamente. Desta forma, concluiu-se que o aumento do diâmetro da cápsula irá reduzir a taxa de solidificação e, portanto, o PCM encapsulado levará mais tempo a solidificar.

Wei et al. [24] estudaram o efeito da forma das cápsulas, diâmetro e espessura do revestimento no desempenho térmico do PCM encapsulado. Foi relatado que a cápsula esférica produziu um excelente desempenho na libertação de calor em comparação com as cápsulas cilíndricas, de placa e tubulares. Observou-se ainda que, com o aumento do diâmetro do PCM de 2 mm para 5 mm, a taxa de libertação de calor diminuiu. Com o aumento da espessura do revestimento de 0,2 mm para 0,4 mm, a estabilidade mecânica aumentou, mas reduziu a quantidade de PCM no interior da cápsula e, portanto, afetou a capacidade de armazenamento térmico.

Na Tabela 4 apresentam-se alguns materiais que foram estudados como cápsulas adequadas para determinadas aplicações.

Tabela 4: Macroencapsulamento de alguns materiais.

Material do núcleo (PCM)	Material da cápsula	Temperatura de estabilidade térmica em teste [°C]	Temperatura de fusão teórica [°C]	Geometria e tamanho médio das cápsulas	Ciclos térmicos	Ref. de investigação
NaNO ₃ -KNO ₃	AISI 321	160-270	-	Cilíndrica (27,3 x 39 x 75) mm	5000	[12]
CrO ₃ , H ₂ SO ₄ , H ₂ SiF ₆ , NiSO ₄ ·7H ₂ O, NiCl ₂ ·H ₂ O, H ₂ B ₃	Crômio-Níquel	1050-1150	-	Esférica 2 mm	1000	[12]
Parafina	Aço	0-36	18	Retangular (30 x 18 x 2,8) cm	8 dias	[12]
Parafina (n-eicosano) (OM35)	Aço	60,2	36-38 35	-	-	[5]
Parafina	PVC	70	52	-	-	[25]
Parafina	Alumínio	54	27-29	-	-	[5]
Parafina (RT18) (SP19)	Alumínio	40-45	17-19 28-30	-	-	[5]
Parafina	PVC, Cobre	-	25	-	-	[13]
Parafina	Aço inox	-	1400	-	-	[5]
NaNO ₃ , NaCl-MgCl ₂ , MgCl ₂ , Alumínio	Aço inox, aço-carbono	300-450/300-750	-	Cilíndrica	60 (480 h)	[12]
NaNO ₃ , sal fundido	Cerâmica Metal	300-550	-	Esférica 5-15 mm	2500	[12]
Sais hidratados, parafina, ácidos gordos, bio PCM	Poliolefina	(-64)-120	-	Esférica 98 mm	-	[13]
Sais hidratados	Poliolefina	-	-	Bolas esféricas 77 mm	-	[13]
Parafina, sal hidratado	Alumínio, plásticos	(-10)-100	-	Caixa, saco	-	[13]
NaNO ₃ , KNO ₃ , NaNO ₃ - KNO ₃ , NaNO ₃ - KNO ₃ -LiNO ₃	PTFE-Níquel	120-350	-	Esférica 27,43 mm	2200 (5133 h)	[13]
Sal hidratado	Polietileno, Alumínio	51	24-34	-	-	[5]

Nano e microencapsulamento

Segundo vários artigos da literatura, o microencapsulamento é, dos diferentes métodos, o mais estudado, no qual as microcápsulas, com diâmetros compreendidos entre 1 μm e 1mm, podem assumir diferentes morfologias, como apresentado na Figura 9, sendo as mais comuns as esféricas e irregulares [26]–[30].

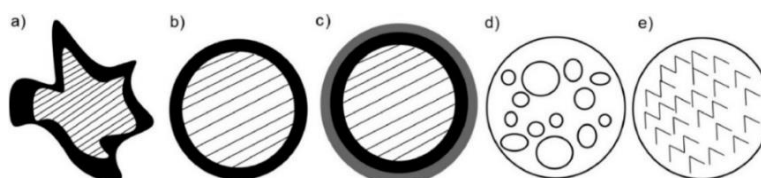


Figura 9: Diferentes morfologias das microcápsulas (a) forma irregular; (b) forma simples e esférica; (c) com várias camadas; (d) com vários núcleos (PCM); (e) tipo de matriz, adaptado de Ramírez et al. [2].

Recentemente surgiu uma nova técnica para encapsular PCM, o nanoencapsulamento, cujos principais benefícios são prevenir eventuais fugas do material do núcleo, melhorar a resistência termofísica dos PCM e intensificar a transferência de calor [15]. As cápsulas têm diâmetros inferiores a 1 μm , e também existem alguns estudos, apesar de, comparativamente com o microencapsulamento, serem menos numerosos [31]–[34].

A seleção do material da cápsula é também importante e depende de vários fatores como a temperatura desejada para a aplicação, condutividade térmica, permeabilidade, toxicidade e compatibilidade com o núcleo (PCM) e o ambiente circundante onde vai ser incorporado. Por conseguinte, os materiais adequados devem ser cuidadosamente selecionados. Têm sido utilizados diferentes materiais para encapsular PCM, desde acrílicos, ureia, formaldeído e polímeros à base de sílica, metais e compósitos à base de carbono como grafeno e grafite, entre outros.

Estabilizador de forma (SSPCM)

No final dos anos 90 foram desenvolvidos os SSPCM [5]. No estabilizador de forma (SSPCM), o PCM está disperso em materiais de estrutura (de suporte) para fabricar material composto estável que pode ser facilmente integrado nos materiais (Figura 10). O material poroso de suporte utilizado neste método pode ser inorgânico, como as matrizes de dióxido de silício (SiO_2), ou orgânico, como o polietileno de alta densidade (HDPE) [35].

Capacidade de manter a forma do PCM estabilizada durante o processo de mudança de fase, condutividade térmica adequada, grande calor específico, bom comportamento térmico a longo prazo, custo relativamente mais baixo, e nenhuma fuga são as principais vantagens dos SSPCM [5].

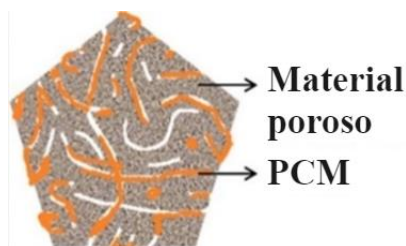


Figura 10: Representação típica de um SS-PCM, adaptado de Milián et al. [18].

A Tabela 5 descreve e compara as vantagens e limitações das formas de incorporação de PCM descritas anteriormente.

Tabela 5: Comparação das vantagens e limitações das formas de incorporação de PCM, adaptado de Magendran et al. e Mousavi et al. [15], [16].

	Vantagens	(Possíveis) limitações
Incorporação direta	<p>Processo de preparação simples, sem equipamento adicional</p> <p>Baixo custo</p>	<p>Fuga do PCM derretido</p> <p>Baixo resistência ao fogo</p> <p>Corrosão</p> <p>Incompatibilidade com materiais</p>
Encapsulamento	<p>Macro</p> <p>Boa compatibilidade com o ambiente</p> <p>Manuseamento de PCM melhorado durante o fabrico</p> <p>Pode atuar como permutador de calor</p> <p>Previne alterações da sua composição através da exposição com o meio envolvente</p> <p>Baixo custo</p> <p>Aumento da resistência mecânica devido às cápsulas</p>	<p>Baixa condutividade térmica ou características de transferência de calor</p> <p>Solidificação dos limites da cápsula (sobreaquecimento)</p>
	<p>Micro</p> <p>Baixa variação de volume durante a mudança de fase</p> <p>Inclusão fácil nos materiais de construção convencionais</p> <p>Estáveis termicamente</p> <p>As cápsulas agem como uma barreira e previnem as fugas do PCM</p> <p>Aumento da resistência mecânica</p>	<p>A resistência do material pode afetar</p> <p>Sobreaquecimento</p> <p>Técnica de encapsulamento dispendiosa</p> <p>A convecção natural perturba a solidificação</p>

	<p>Prevenção de eventuais fugas do PCM</p> <p>Aumento da resistência térmica física</p> <p>Majoração da transferência de calor</p> <p>Aumento da estabilidade</p>	<p>Custo de produção elevado</p> <p>Tratamento adicional necessário para purificação/limpeza</p>
<p>SSPCM</p>	<p>Condutividade térmica adequada</p> <p>Elevado calor específico</p> <p>Estabilidade térmica a longo prazo</p> <p>Custo relativamente baixo</p> <p>Redução do risco de fugas</p> <p>Redução dos possíveis efeitos de corrosão</p> <p>Fácil integração em materiais</p> <p>Utilização de materiais residuais (sustentabilidade)</p>	<p>Processo de preparação quase complexo com equipamento adicional</p>

2.4 PCM macroencapsulado para sistemas de aquecimento ambiente

As aplicações do PCM macroencapsulado têm abrangido uma vasta gama de entidades e recursos dependentes de energia, tais como: energia solar (secadores solares [36] e painéis solares para aquecimento de água doméstica [37]), têxteis, transporte de componentes sanguíneos, edifícios [1], [7], [12], [38], entre outros [39], [40], [41].

Tal como ilustrado na Figura 11, as aplicações com PCM macroencapsulado para sistemas de armazenamento de energia térmica em edifícios podem ser para arrefecimento, aquecimento ou ambos. Os sistemas de aquecimento ambiente podem ser passivos, nomeadamente ao nível da envolvente opaca dos edifícios, através da incorporação de PCM nas paredes, pavimentos e coberturas. Por outro lado, os sistemas de aquecimento ambiente podem ser ativos, no que diz respeito aos sistemas AVAC (aquecimento, ventilação e ar condicionado), bombas de calor, pisos radiantes, tanques TES, entre outros.

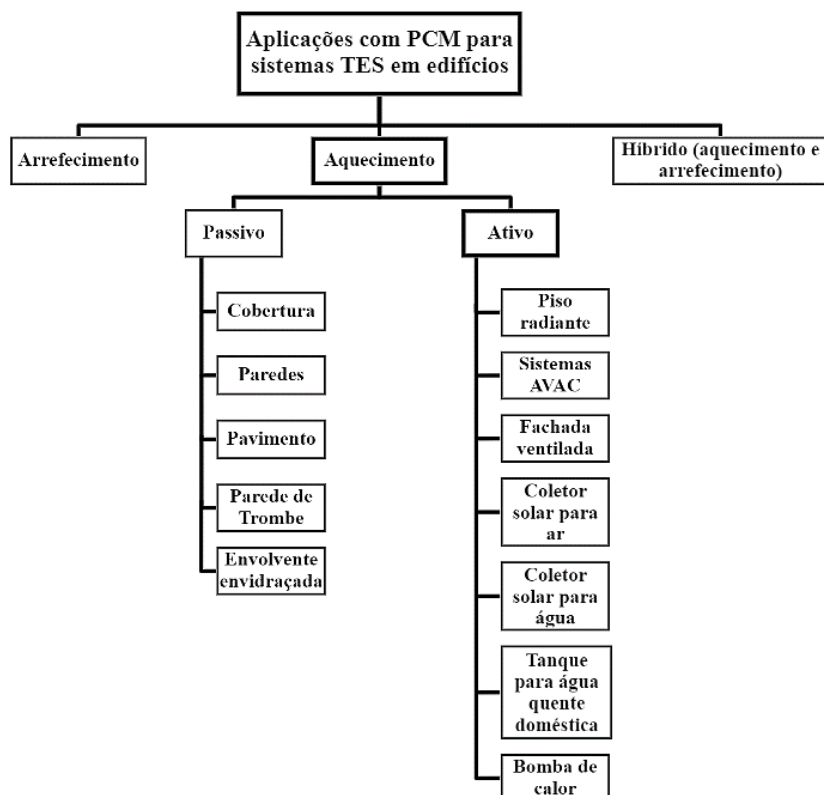


Figura 11: Diagrama com algumas aplicações de aquecimento ambiente em sistemas passivos e ativos [6], [42].

Aplicações em sistemas passivos

A aplicação de PCM macroencapsulados para aquecimento passivo passa principalmente pela incorporação destes materiais nos elementos construtivos da envolvente dos edifícios: nas paredes, particularmente em materiais de construção como tijolos e betão, bem como em revestimentos, nomeadamente em placas de gesso; em lajes de pavimentos e coberturas. Outros estudos incluem a aplicação de paredes de Trombe e envolvente envidraçada, incorporando PCM para armazenamento de energia térmica. Os PCM integrados em “wallboards” têm sido intensamente investigados devido ao facto de apresentarem custos baixos e de serem amplamente utilizados numa variedade de aplicações, e por serem capazes de minimizar o efeito de grandes flutuações da temperatura ambiente no interior de um edifício [43], [44].

Mourid et al. [45] testaram o comportamento térmico de dois protótipos em escala real no clima mediterrânico de Casablanca, e Marrocos. A análise experimental passou por medir as temperaturas interiores, da superfície das paredes, da superfície da cobertura e do ambiente exterior, assim como o fluxo de calor através da parede e da cobertura. Estas medições abrangeram um protótipo de referência e outro com placas de PCM EnErgain® (Tabela 6, Tabela 7) de 5,26 mm de espessura nas paredes (Figura 12). Foi demonstrado que a temperatura da sala com a aplicação dos PCM era superior à da sala de

referência, com um desvio máximo de 7,3°C. Além disso, concluiu-se dos resultados que a incorporação de PCM contribui para diminuir os efeitos de estratificação térmica, tendo-se observado uma redução de 50% nas perdas de calor através da cobertura. A colocação do PCM na cobertura revelou-se mais eficiente do que na parede, registando-se uma redução média do consumo de energia de 20%, com um intervalo de 6 horas de mudança entre as densidades de entrada e saída de ar através das placas de PCM.

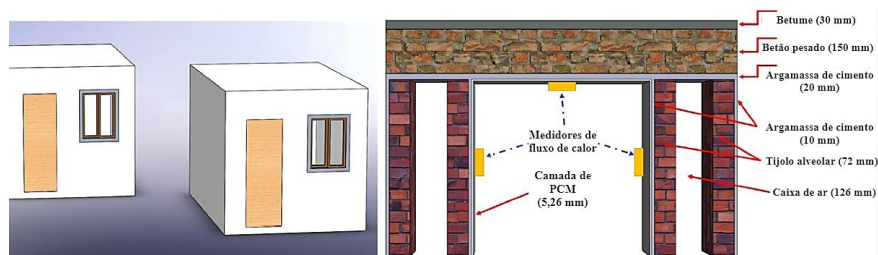


Figura 12: Ilustração do protótipo à escala real (à esquerda), e composição da parede, da laje de cobertura e colocação dos fluxómetros nas paredes (à direita) [45].

Kant et al. [46] realizaram uma investigação numérica para avaliar o desempenho térmico de um tijolo de construção com PCM. O modelo foi baseado na implementação de cápsulas de acrílico cilíndricas num tijolo. Para ter uma visão ampla sobre o comportamento térmico do PCM e as suas vantagens de forma a melhorar o desempenho de um determinado material de construção, foram considerados três tijolos: um tijolo de referência sem PCM, um tijolo com PCM e outro com ar nas suas cavidades cilíndricas. Por outro lado, o estudo abrangeu uma análise comparativa de três PCM diferentes: parafina, ácido cáprico e RT25 (Tabela 6). Verificou-se que a redução do fluxo de calor com três cápsulas foi 8,31%, 6,07%, e 3,61% para o ácido cáprico, parafina e RT25, respetivamente. A percentagem de redução de fluxo de calor para uma cápsula foi 2,26, 1,90 e 1,24 para o ácido cáprico, parafina e RT25, respetivamente. Os resultados confirmaram que o ácido cáprico é mais eficaz nestes casos em comparação com outros PCM, e que uma maior quantidade de PCM corresponde a uma maior eficiência. Além disso, a redução do fluxo de calor com a utilização de múltiplos PCM é obtida em 11,98%. O principal inconveniente da adição das macrocápsulas no interior dos tijolos de construção foi uma redução da resistência mecânica, portanto, se fosse aumentado o número de cavidades dentro do tijolo, a resistência mecânica também poderia ser reduzida de forma semelhante.

Ahmad et. al [47] realizaram um estudo numérico, com o software TRANSYS, com PEG600 incorporado em placas de policloreto de vinilo (PVC) em paredes. Para poder efetuar comparações recorreu-se a duas células-teste. Na célula sem PCM, as paredes eram constituídas por um painel de isolamento a vácuo ensanduichado entre um painel de fibra e um painel de contraplacado. Para a célula com PCM, as paredes eram constituídas por um painel de isolamento a vácuo seguido de um com o PCM entre um painel de

fibra e um painel de contraplacado. Tendo em conta os resultados obtidos na primeira fase com diferentes painéis de 25 mm de espessura, o painel alveolar em PVC foi escolhido em detrimento de um policarbonato, que se revelou demasiado frágil. Cada painel de PVC foi preenchido com 20 kg de PCM. Este estudo mostrou que a eficiência do PCM é notável com uma redução da amplitude da temperatura interior de aproximadamente 20°C na célula de teste. No Verão, a amplitude da temperatura no interior da célula com PCM é reduzida em 20°C num ciclo diário. No Inverno, isto impede a temperatura interior negativa enquanto a temperatura da célula sem PCM for de -9 °C e que a temperatura exterior for inferior a -6°C. É de notar que após mais de 480 ciclos térmicos, o PCM continuou estável termicamente. Como os resultados mostraram que um sistema pode ser construído com materiais e equipamentos normalmente disponíveis, a otimização da utilização da contribuição solar continua a ser um elemento essencial dos problemas no contexto atual.

Liu et. al [48] testaram experimental e numericamente a incorporação de um PCM macroencapsulado numa chaminé solar. A chaminé solar experimental era constituída por uma tampa de vidro, uma placa de aço inoxidável com 50kg parafina incorporada, uma caixa de ar e duas aberturas. As paredes laterais da chaminé foram construídas em madeira e isoladas termicamente por placas de poliestireno para reduzir as perdas de calor (ver Figura 13). A escolha do material da cápsula deveu-se ao facto do aço inox ser concebido como o intensificador da condutividade térmica. Os resultados mostraram que a inclusão do PCM numa chaminé solar reduz o fluxo de ar durante o período de carga, mas aumenta-o durante o período de descarga, em comparação com a chaminé solar sem PCM. Mostraram também que quanto maior a entalpia de fusão, mais lento será o processo de mudança de fase, e que isolar bem o sistema revela ser o método mais eficaz para melhorar o desempenho térmico do mesmo com menor esforço e custo.

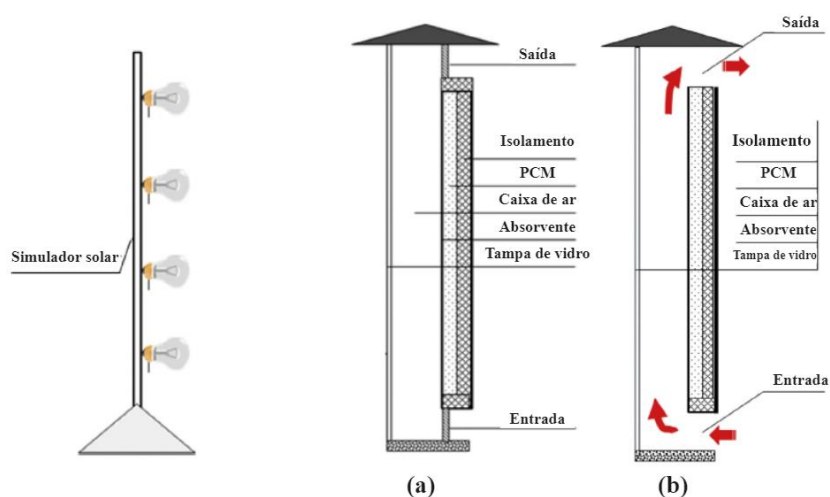


Figura 13: Esquema da chaminé solar com PMC incorporado: (a) fechada; (b) aberta, adaptado de Liu et al. [48].

Na Tabela 6 encontram-se descritas as propriedades termofísicas dos PCM utilizados nas aplicações anteriormente descritas.

Tabela 6: Propriedades termofísicas de alguns PCM.

PCM	T _{fusão} [°C]	Entalpia de fusão [kJ/kg]	Capacidade de calor específica [kJ/kg·K]	Densidade [kg/m ³]	Condutividade térmica [W/m·K]	Ref. de investigação
Parafina + polímero	22	72,4	-	853	0,18 (sólido) 0,22 (líquido, 25 °C)	[45]
Parafina	28,2	245	1,934 (sólido) 2,196 (líquido)	814 (sólido) 775 (líquido)	0,35 (sólido) 0,149 (líquido)	[46]
Ácido cáprico	32	152,7	1,9 (sólido) 2,4 (líquido)	1018 (sólido) 888 (líquido)	0,372 (sólido) 0,153 (líquido)	[46]
Parafina RT25	26,6	232	1,8 (sólido) 2,4 (líquido)	785 (sólido) 749 (líquido)	0,19 (sólido) 0,18 (líquido)	[46]
PEG 600	21-25	148	2,49 (líquido)	1128 (líquido, 20°C)	-	[47]
RT42	38-43	174	2,0	760	0,2	[48]

Na Tabela 7 estão descritas algumas aplicações em sistemas passivos nas quais foram incorporados diferentes PCM macroencapsulados.

Tabela 7: Algumas aplicações com incorporação de PCM macroencapsulados em sistemas passivos.

Aplicação	PCM	Cápsula	Vantagens	Limitações	Ref. de investigação
Lajes de cobertura e parede	Parafina + polímero	Placas EnErgain® de alumínio (1198 x 1000 x 5,26) mm com fita adesiva de alumínio (2 x 0,12) mm	Redução em 50% das perdas térmicas Redução média do consumo de energia em 20% Diminuição da estratificação térmica	A redução do consumo de energia não foi menor devido ao excesso de energia utilizada no aquecimento	[45], [49]
Tijolo	Parafina Ácido cáprico RT25	Cilindros de plástico acrílico (32 x 150) mm	Redução até 8,31% no fluxo de calor	Necessidade de otimização Baixa resistência mecânica	[46]
Parede	PEG600	Placas de PVC (920 x 920 x 25) mm	Aumento da inércia térmica do edifício Conforto térmico	Necessidade contínua de otimização	[47]

Chaminé	Parafina RT42	Placas de aço inox (1600 x 1000 x 40) mm	Reduz o fluxo de ar durante o período de carga Perdas térmicas baixas	Aumento do fluxo de ar durante o período de descarga	[48]
Lajes de pavimento, cobertura e paredes	SP29 RT18	Placas de alumínio Rubitherm® (450 x 300 x 10) mm	Redução na flutuação da temperatura no inverno e no verão de 17,7-25,4% e 28,8-67,8%, respetivamente	Perdas térmicas	[50]
Betão	Parafina (octadeno)	Esferas ocas de aço (22 x 1,4) mm	Redução do pico de temperatura interior Redução das flutuações de temperatura Fuga térmica praticamente nula	Possibilidade de otimização	[51]
Soluções construtivas de paredes exteriores	SP21EK	Placas de alumínio Rubitherm® (450 x 300 x 15) mm	Redução significativa da amplitude térmica (regulação térmica passiva) Aumento da eficiência energética do edifício Redução da taxa de sobreaquecimento	Redução da condutividade térmica da solução construtiva em 12,6%	[52]
Laje de pavimento (piso radiante)	S27	Placas de HDPE (250 x 250 x 27) mm	Aumento do conforto térmico Aumento da eficiência energética do sistema	Margem para otimização do design do sistema de piso radiante	[53]
Laje de cobertura e paredes	Parafina RT40	Placas de aço (100 x 100 x 1,5) cm	Aumento do desempenho térmico Poupança de energia nos períodos de pico de carga Melhores condições de conforto térmico	Dependência das condições climáticas do local Quantidade de PCM insuficiente para manter o conforto térmico nos dias mais quentes	[54]

Os métodos passivos apresentam vantagens como baixos custos iniciais e de funcionamento, contudo, o armazenamento de calor é limitado, não funcionando eficazmente para climas muito mais quentes, onde são necessárias diferenças de temperatura mais elevadas, por exemplo.

Aplicações em sistemas ativos

O conforto térmico é definido pela norma ANSI/ASHRAE Standard 55-2020 como a condição da mente que expressa satisfação com a temperatura ambiente e é avaliado de forma subjetiva [55]. Deste modo, a satisfação dos ocupantes deve ser sempre levada em conta, uma vez que influencia fortemente o bem-estar e produtividade dos indivíduos.

O objetivo de manter um espaço quente, mais especificamente para evitar que a temperatura desça abaixo de um certo nível, pode ser alcançado de três maneiras: pela redução da perda de calor, pelo fornecimento de calor, e pela redução das flutuações de temperatura para temperaturas demasiado baixas. Um PCM com uma temperatura de mudança de fase dentro do intervalo de conforto é utilizado para armazenar o excesso de calor do dia proveniente de fontes internas ou radiação solar para evitar que as temperaturas desçam à noite. Para fornecer calor, é necessária uma fonte de calor auxiliar, como bombas de calor, painéis solares térmicos, ou sistemas de AVAC.

Real et al. [56] concentraram-se na melhoria do desempenho de um sistema AVAC numa casa em Madrid, baseado numa bomba de calor com dois tanques de armazenamento térmico usando PCM. O tanque frio foi utilizado para aproveitar as baixas temperaturas exteriores à noite para arrefecer o PCM com um elevado coeficiente de desempenho (COP), sendo utilizado mais tarde para arrefecer o edifício quando a temperatura exterior subisse. O segundo tanque foi operado como um reservatório quente alternativo que proporcionou ao sistema a flexibilidade de dissipar o calor para o tanque a uma temperatura constante impedindo a redução do COP abaixo de um valor mínimo. De acordo com as condições climáticas esperadas, com base nos dados de 5 anos anteriores, os produtos PCM escolhidos para os tanques frio e quente foram S10 e S27 da empresa *PCMproducts*, sais hidratados com temperaturas de mudança de fase de 10°C e 27°C, respetivamente, e foram armazenados em recipientes "FlatICE" que são fáceis de empilhar em altura. Os PCM macroencapsulados foram empilhados no interior dos tanques com o objetivo de aproveitar o calor latente dos PCM a temperaturas que proporcionassem um bom desempenho da bomba de calor. Para as diferentes configurações possíveis foram utilizadas 13 eletroválvulas e três bombas de circulação, uma delas já incluída no interior da bomba de calor, ligada à casa e à ventoinha. O sistema de AVAC satisfaz as necessidades da habitação durante o período requerido e manteve com sucesso a temperatura dentro dos limites estabelecidos. Para além disso, o consumo de eletricidade (compressor, bombas de circulação e ventilador) diminuiu 18,97% com a utilização do tanque quente.

Cabeza et al. [57] estudaram o comportamento de armazenamento térmico de um tanque de armazenamento de água quente com a introdução de vários módulos de PCM encapsulado na parte superior de um tanque com estratificação térmica, cuja energia provém de painéis solares ou, ocasionalmente, de um aquecedor elétrico. O tanque foi equipado com

termopares para medir a temperatura da água em diferentes níveis, permitindo deste modo analisar a estratificação térmica. Para poder retirar conclusões, foi utilizado outro tanque idêntico, mas sem a aplicação de PCM. Consoante os resultados de um estudo numérico e de experiências laboratoriais, um composto granular de acetato de sódio tri-hidratado ($\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$) (90%) e grafite (10%) foi encapsulado em cilindros de alumínio de tamanho 8,8 cm x 31,5 cm, colocados na parte superior do tanque, como mostrado na Figura 14. O $\text{CH}_3\text{COONa}\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ foi escolhido pelo facto da sua temperatura de fusão rondar os 60 °C, que era a temperatura à qual a água seria armazenada no tanque, aproximadamente, e a grafite foi introduzida por ter a capacidade de aumentar a taxa de transferência de calor. A inclusão de 2, 4 e 6 módulos de PCM significou um peso de 2,1 kg, 4,2 kg e 6,3 kg, e ocupou 2,05%, 4,1% e 6,16% de volume do tanque de armazenamento, respetivamente. Notou-se um aumento na densidade térmica de 40%, 57,2% e 66,7% para 1 K de diferença de temperatura no caso de 2, 4 e 6 módulos de PCM, respetivamente. O aumento da densidade térmica foi de 6%, 12% e 16,4% para a diferença de temperatura de 8 K, respetivamente. A inclusão do PCM encapsulado manteve a temperatura da camada superior da água no tanque de armazenamento acima de 54°C durante 10 a 12 h, uma vez que, após descarregar o sistema, existia um fluxo de água fria para o tanque, reaquecido pela energia armazenada em forma de calor latente nos módulos PCM (período de descarga do PCM).

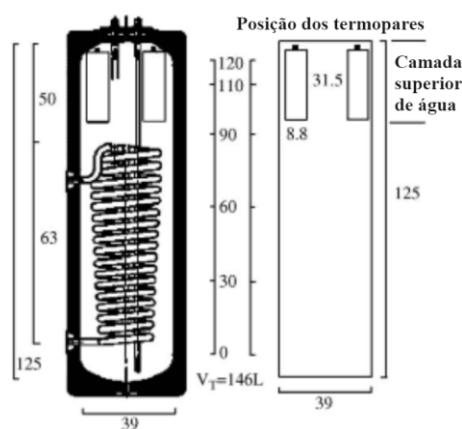


Figura 14: Esquema de 2 módulos de PCM embutidos na parte superior do depósito de armazenamento de água quente, adaptado de Cabeza et al. [57].

Da mesma forma, Mehling et al. [58] investigaram a inclusão de parafina-grafite encapsulada em cilindros de latão de tamanho 10 cm x 30 cm. Para a conceção do aparato experimental, construíram um tanque com metacrilato, um polímero termo-moldável que opera entre 40°C e 100°C, resistente e transparente, permitindo observar o interior do tanque. Outra vantagem deste termoplástico seria minimizar a transferência de calor através das paredes do tanque. Posteriormente foi isolado com dois materiais diferentes, com coeficientes de perda de calor de 5 W/m²·K e 1,5 W/m²·K. A temperatura do PCM foi registada no centro da parte superior da macrocápsula. No interior do

tanque também foram colocados dez termopares para registrar a temperatura das camadas estratificadas. A água fria foi conduzida até ao difusor no fundo do tanque, para minimizar a turbulência durante o funcionamento, por um tubo de borracha dentro de um tubo de vidro acrílico. A capacidade de armazenamento térmico foi aumentada entre 20% e 45% e a duração do armazenamento de água quente foi aumentada de 50% a 200%.

Em 2020, Saxena et al. [59] avaliaram o desempenho térmico de um coletor solar para aquecimento de ar (SAH) com o estudo de dois modelos para além do de referência (SAH-A). No primeiro modelo (SAH-B), foram usados tubos helicoidais (Figura 15) preenchidos com material de armazenamento de calor sensível e de baixo custo para melhorar a eficiência do aquecedor de ar. Já no segundo (SAH-C), nos tubos helicoidais foi incorporada uma mistura específica de pó de carbono e parafina, em 90% do seu volume total devido à expansão térmica do armazenamento de calor latente. O carbono granular foi identificado como um material atraente para fins de armazenamento de energia solar de forma a aumentar o desempenho térmico do aquecedor, devido à sua baixa densidade e alta condutividade térmica. Subsequentemente, o envolvimento do pó de carbono com a parafina aumentou a condutividade térmica, mas diminuiu o calor latente. Os tubos de cobre preenchidos com a mistura de PCM apresentavam assim uma capacidade de armazenamento de calor notável a temperaturas restritas, para além de ser considerado económico e completamente seguro do ponto de vista químico. Por conseguinte, mostraram ser uma boa possibilidade de adoção como recipiente de armazenamento de energia para um melhor armazenamento e transferência de calor em sistemas térmicos. A extremidade superior de cada tubo foi maquinada para ser roscada com uma tampa de modo a evitar a fuga do material armazenado, que poderia ser facilmente substituído após a conclusão dos ciclos de vida térmica, também pelo facto do tubo ser flexível.

Para cada modelo, para além dos tubos mencionados anteriormente, foi utilizado um contraplacado, a placa do coletor solar pintada de preto mate para maximizar os ganhos de calor, uma camada de lã de vidro como isolante para reduzir as perdas de calor do sistema para o meio ambiente e um vidro transparente, resistente até 350°C. As paredes laterais do aquecedor foram colocadas a 115° para receberem a radiação máxima. O ar foi fornecido por um ventilador, fixado à entrada da conduta, e com uma velocidade fixa de 6 m/s em operações de convecção forçada. Os modelos foram colocados sobre um suporte que os manteve a 43° do plano horizontal (ver Figura 16).

As variações de temperatura em diferentes pontos dos modelos e temperatura ambiente foram medidas através de um termómetro com precisão de $\pm 1^\circ\text{C}$, com 12 fios de cobre tipo-K. A radiação solar no sistema foi medida diretamente através de um dispositivo de medição solarimétrica com precisão de $\pm 1 \text{ W/m}^2$. A velocidade do vento no exterior e interior do sistema foi monitorizada através de um anemómetro com precisão de $\pm 1\%$. A temperatura do ar também foi medida através de um termómetro de mercúrio

com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. As leituras foram feitas para variações de temperatura em diferentes pontos, temperatura ambiente, radiação solar incidente e velocidade do vento para cada 30 minutos e discutidas numa base horária para fácil compreensão.

A análise experimental revelou que as eficiências térmicas dos modelos SAH-A, SAH-B e SAH-C foram 50%, 57,41% e 79,10%, respetivamente. Os coeficientes de transferência de calor (U) dos tubos eram $249,19 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $389 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $411,05 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, e as temperaturas de saída máximas $44,7^{\circ}\text{C}$, $46,9^{\circ}\text{C}$ e $52,5^{\circ}\text{C}$, respetivamente. Os principais parâmetros do estudo experimental permitiram concluir que o modelo SAH-C apresentou um "design" económico e ótimo para o aquecimento de espaços e para operações de secagem industrial.

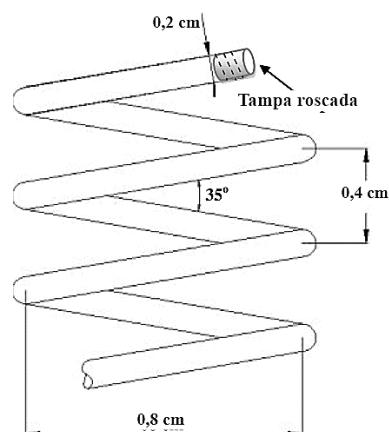


Figura 15: Geometria e dimensões dos tubos helicoidais, adaptado de Saxena et al. [59].



Figura 16: Aquecedor solar de ar com (SAH-C) e sem (SAH-A) os tubos helicoidais [59].

Dolado et. al [60] desenvolveram um modelo numérico e validaram-no experimentalmente para testar o comportamento térmico de uma unidade TES constituída por um permutador de calor PCM-ar.

Um PCM orgânico foi macroencapsulado em placas retangulares de alumínio (Figura 17), colocadas paralelamente ao fluxo de ar na unidade TES. A Figura 18 demonstra um esquema do aparato experimental, que consistiu

num circuito fechado com vários componentes, dos quais um "chiller", resistências, um fluxómetro, um controlador de temperatura, uma unidade TES com as placas de PCM (ver Figura 19), ventiladores, uma termopilha, entre outros. Também foi monitorizada uma única placa com PCM num modelo à parte, com sensores de temperatura colocados dentro e sob a placa de PCM. Deste modo, foram recolhidos dados tanto para a unidade TES como para uma placa apenas. O modelo era teoricamente válido para cada fluxo de ar sob convecção forçada interna e foi validado experimentalmente para uma gama de velocidade do ar de 0,7 a 2,1 m/s e para uma gama de temperatura do ar de entrada de 8 a 45°C. A partir da comparação entre simulações e resultados experimentais, concluiu-se que para determinar o comportamento térmico da unidade TES, a simulação térmica do encapsulamento PCM não era necessária.

A partir da análise da influência de uma série de parâmetros geométricos e condições de funcionamento (fluxo de ar, rugosidade das cápsulas, condutividade térmica, espessura das placas de PCM, distâncias entre as placas no interior do permutador, caixa de ar), concluiu-se que o sistema térmico poderia ser adaptado segundo os requisitos de aplicação sem modificar as propriedades do PCM, mas modificando o "design" do permutador de calor. Foi possível aumentar os picos de potência ou diminuir o tempo de mudança de fase do PCM, através do aumento do caudal de ar, aumentando a rugosidade da superfície das placas, reduzindo a espessura das placas, aumentando o comprimento do sistema TES-PCM ou reduzindo o espaço de ar entre as placas de PCM, ou seja, diminuindo a distância entre as mesmas.

As análises efetuadas para estudar a influência das propriedades térmicas do PCM utilizadas como "inputs" mostraram que um incremento de 10% no valor da entalpia do PCM em relação ao seu valor medido levava a diferenças nos resultados da simulação de 6% da potência térmica no platô de alta temperatura em fusão e de 2,5% no platô de alta temperatura em solidificação. Por outro lado, verificou-se que à medida que a espessura das cápsulas aumentava, o pico de potência diminuía e o tempo decorrido para o processo completo de fusão e solidificação aumentou 11% e 10%, respetivamente. Já quando a espessura era menor, a absorção/libertação de calor era mais rápida, o que significava que o efeito do aumento da superfície de transferência de calor era maior do que o efeito da redução dos valores do coeficiente de convecção do ar, devido à diminuição da velocidade do ar.

Na fase de solidificação, a diminuição da temperatura média de mudança de fase teve o efeito oposto: à medida que esta temperatura se deslocou para valores mais baixos, tornou a solidificação do PCM mais difícil, exigindo mais tempo para realizar a solidificação total e diminuindo a potência fornecida. Ainda existiram outros resultados inesperados: a superfície de transferência de calor da unidade TES diminuía à medida que o volume das placas aumentava, e a velocidade do ar aumentava à medida que o volume das placas aumentava, o que estaria ligado a um aumento dos valores do coeficiente de convecção do ar.

Uma melhoria da condutividade térmica do PCM levou a pequenas

melhorias no desempenho térmico da unidade TES, pois em muitos casos o estrangulamento do processo de transferência de calor estava no lado do ar.

Uma limitação desta investigação prendeu-se com o facto de que a inadequação da temperatura de apenas 1°C nos valores da entalpia-temperatura do PCM podia levar a erros relativos de até 20% na curva de potência da unidade TES e até 14% em tempos decorridos até à fusão completa.

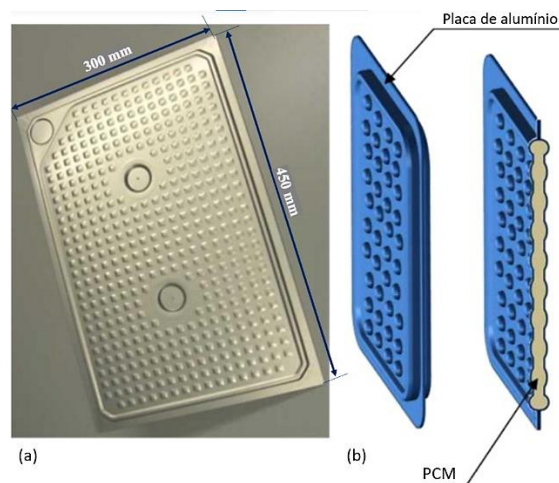


Figura 17: Pannel Rubitherm® com PCM macroencapsulado disponível comercialmente: fotografia (a) e esboço (b), adaptado de Dolado et al. [60].

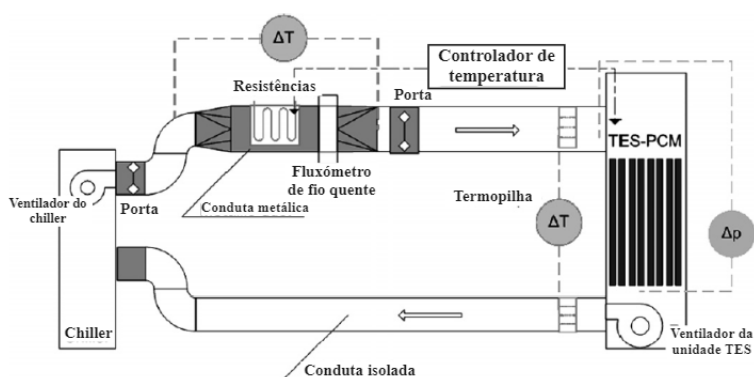


Figura 18: Aparato experimental, adaptado de Dolado et al. [60].

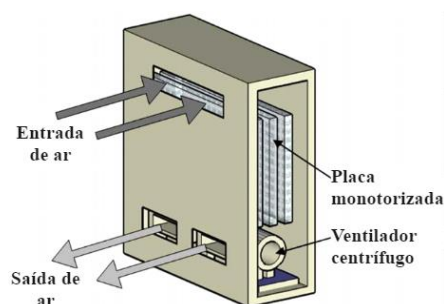


Figura 19: Unidade TES-PCM, adaptado de Dolado et al. [60].

Stathopoulos et al. [61] investigaram experimental e numericamente o potencial de um PCM através de um permutador de calor PCM-ar concebido

para gestão de picos de carga para tentar colmatar o pico diário de consumo energético, nomeadamente na estação de aquecimento. O principal objetivo do estudo foi possuir as ferramentas necessárias para desenvolver estratégias de controlo avançadas tendo em conta vários fatores: redução do pico de potência, conforto térmico e qualidade do ar interior.

Para desenvolver o aparato experimental e poder realizar as experiências, foi construído um permutador de calor constituído por 16 placas de placas de alumínio (1000x800x18 mm) dispostas lado a lado, com parafina incorporada, alhetas, sensores de temperatura, painéis de poliestireno para isolar as placas do meio envolvente, tábuas de madeiras para assegurar a estabilidade da estrutura (ver Figura 20).

As placas foram fabricadas de modo a terem duas aberturas para incorporar o PCM e controlar a pressão causada pelas mudanças de fase. A parafina 37D da Microtek® foi escolhida pela sua temperatura de fusão (37°C), reduzida expansão volumétrica no processo de mudança de fase sólido-líquido (12%) e elevado calor latente de fusão (ver o valor da entalpia de fusão na Tabela 8). As alhetas foram colocadas entre as placas de PCM para assegurar a distância uniforme entre elas, ou seja, a mesma espessura de ar, porque contribuem para uma distribuição uniforme do fluxo de ar no interior do permutador de calor e também pelo facto de melhorarem as trocas de calor entre placas e o ar. Os sensores de temperatura foram colocados em três pontos distintos através de aberturas adicionais nas placas: no início, no meio e no fim do permutador. Em cada ponto foram colocados dois sensores: um dentro do PCM, medindo diretamente a sua temperatura, e outro na superfície exterior da placa.

O aparato experimental completo está demonstrado na Figura 21. O circuito que permite o fluxo de ar é constituído por um coletor de ar, um difusor de ar, pelo permutador de ar instrumentado e por várias condutas de ventilação. Os ventiladores são usados para regular o fluxo de ar, as duas resistências elétricas, com potência total de 2 kW, para aquecer o ar circulante e os sensores de temperatura. Também foi incluído um sistema de controlo para estudar o impacto das estratégias de controlo no desempenho do sistema.

Quando é necessário armazenar energia para aquecimento, o ar quente proveniente do sistema de energia elétrica flui através do permutador de calor e funde o PCM (período de carga). Quando a célula-teste precisa de energia, o ar passa pelo permutador, capturando o calor do PCM, que vai solidificando (período de descarga). O calor é armazenado durante os períodos de vazio, por exemplo durante a noite, quando os consumos são mínimos, e é utilizado durante o período de pico, para substituir o sistema elétrico e reduzir o consumo. Através de um sistema de aquisição de dados foram recolhidos todos os dados precisos com o objetivo de estudar o processo de mudança de fase do PCM, as perdas de calor e a progressão no processo de carga/descarga do permutador de calor. Foram medidos alguns parâmetros, nomeadamente a temperatura e humidade relativa à entrada e saída do permutador de calor

e a taxa de fluxo de ar à saída do permutador.

Durante as horas de pico de energia, devido à potencialidade dos PCM, os consumos foram reduzidos e a temperatura interior manteve-se constante, a 21°C, como era pretendido. Concluiu-se que a energia armazenada no permutador foi suficiente não só para proporcionar conforto térmico, mas também para reduzir o pico de carga. Apesar de existir margem para otimização, é um sistema que pode ser utilizado para a realização de estudos paramétricos para investigar o impacto do clima ou o tipo de PCM no desempenho de um permutador de calor.

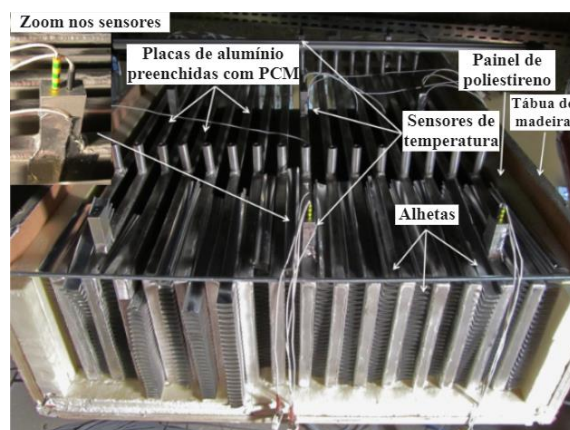


Figura 20: Montagem do permutador de calor PCM-ar (105x75x25 mm) com capacidade e 31,8kg de PCM, adaptado de Stathopoulos et al. [61].

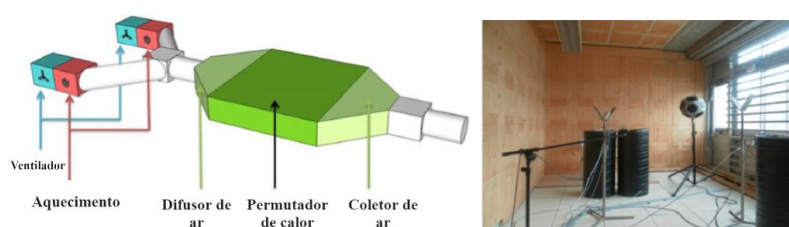


Figura 21: Plataforma experimental e célula-teste, adaptado de Stathopoulos et al. [61].

Farid et al. [62], projetaram um permutador de calor com 19 placas de alumínio da Rubitherm (450 x 300 x 10) mm preenchidas com parafina RT25HC do mesmo fabricante. Os objetivos do estudo passaram por caracterizar o sistema ativo de aquecimento ambiente, analisar o seu efeito na redução das necessidades energéticas, carregando o PCM apenas com um aquecedor elétrico e/ou através de um painel solar. Tendo em conta a radiação solar e a gama de temperatura de conforto no inverno em Auckland, Nova Zelândia (junho e julho), 18-27°C, a temperatura de fusão do PCM foi o principal fator tido em consideração para a seleção do RT25HC, que também foi escolhido pelo facto de ser o que tem o calor latente de fusão mais elevado (230 kJ/kg), uma vez que, quanto maior for o calor desta propriedade, maior é a capacidade do PCM armazenar calor latente durante o processo de carga

e, por conseguinte, libertá-lo para o meio envolvente.

O aparato experimental foi composto por 3 cabanas, construídas com materiais leves e isoladas no teto, pavimento e paredes, para mitigar as perdas térmicas. A cabana 2 foi equipada com um aquecedor elétrico no interior, e um painel solar no exterior com um painel fotovoltaico integrado, utilizado para fornecer ou extrair energia do espaço ou às placas PCM. O ar circulou com auxílio de ventiladores e as passagens de ar nos tubos foram definidas com válvulas, consoante as necessidades. A radiação solar foi medida com um piranómetro e a velocidade do ar com um anemómetro. A única diferença da cabana 1, de referência, foi o facto de não ter o conjunto de placas PCM. Toda a informação ao longo das experiências foi gravada num computador, através de um sistema de aquisição de dados, alocados na cabana 3, de controlo. As placas de PCM foram dispostas lado a lado, com 5 mm entre elas, envoltas em placas de acrílico e isoladas com 20mm de espuma de borracha preta (*PVC foam*). Aplicaram 12 termopares do tipo-T (ver Figura 22): 3 na superfície da placa de PCM (3, 4 e 5), 4 para monitorizar a temperatura do ar ao longo das condutas (1, 2, 6 e 7), 1 para medir a temperatura fornecida pelo aquecedor elétrico (8), 2 para medir a temperatura no interior da cabana (9, 10) e 2 para registar a temperatura exterior. Para efeitos de operação do sistema, consideram uma gama de temperatura de conforto durante o dia de 20-25°C, e durante a noite de 19-20°C.

Nas experiências nas quais a fonte de calor foi só o painel solar, a cabana com o permutador de calor PCM-ar demonstrou ter uma eficiência térmica superior, no sentido em que a temperatura de conforto foi mantida por um período 54% superior ao da cabana 1. Durante o dia, graças ao elevado calor latente do PCM, a energia solar foi armazenada, e usada posteriormente quando a temperatura de conforto atingisse o seu limite inferior, e a temperatura mínima foi sempre 3°C superior à da cabana 1, que acabou por exceder o limite máximo da temperatura de conforto durante o dia. De seguida, colocando também o aquecedor elétrico a fornecer energia, para colmatar os dias nublados e mais frios, na experiência mais longa (28 dias), enquanto a cabana 1 recebeu calor diretamente proveniente da radiação solar, na cabana 2, depois de atingida a temperatura de conforto, o calor foi armazenado nas placas de PCM. Enquanto na cabana 1 o aquecedor elétrico estava ligado durante a noite toda, abrangendo a hora de pico do valor da eletricidade, na cabana 2, só estava ligado durante 20 minutos, porque nas horas seguintes era usada a energia armazenada no PCM, e o aquecedor só voltava a ser ligado quando o PCM estivesse completamente descarregado, já fora do período de pico de carga. A poupança diária de energia atingiu 54%, dos quais 10,3% devido ao auxílio do PCM e do painel solar, minimizando também o custo da eletricidade através da redução do pico de carga.

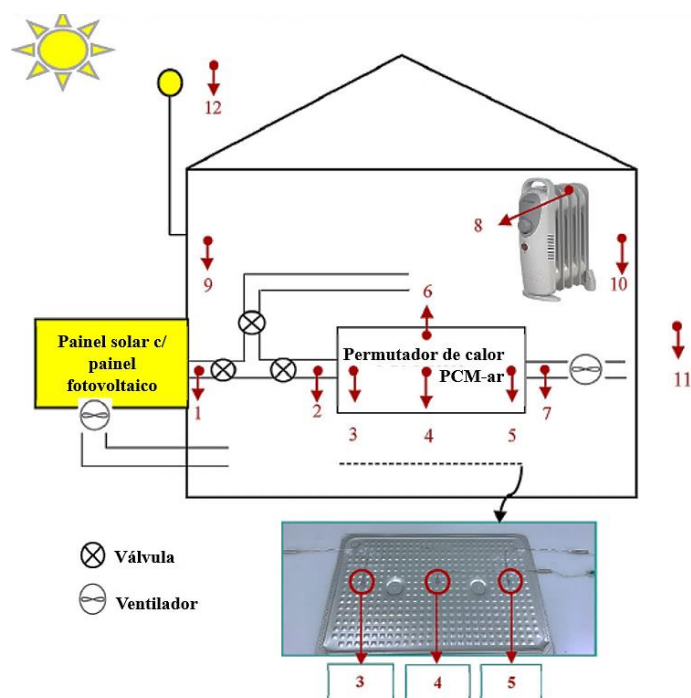


Figura 22. Distribuição dos termopares (cabana 2), adaptado de Farid et al. [62].

Na Tabela 8 encontram-se descritas as propriedades termofísicas dos PCM utilizados nas aplicações anteriormente descritas.

Tabela 8: Propriedades termofísicas de alguns PCM.

PCM	Temperatura de fusão [°C]	Entalpia de fusão [kJ/kg]	Calor específico [kJ/kg·K]	Densidade [kg/m ³]	Condutividade térmica [W/m·K]	Ref. de investigação
S10	10	170	1,9	1,470	0,43	[56], [63]
S27	27	185	2,2	1,530	0,44	[56], [63]
CH ₃ COONa·3H ₂ O (90%) + Grafite (10%)	58	180-200	2,5	1350-1400	2-5	[57]
Parafina	41-44	250	2,0	800 (sólido, 5°C) 700 (líquido, 80°C)	0,2	[59]
RT28HC	28	250	2,0	880 (sólido, 15°C) 770 (líquido, 40°C)	0,2	[60]
Parafina 37D (Microtek®)	37	230 (sólido) 226,8 (líquido)	2,36 (sólido) 2,45 (líquido)	870 (sólido) 779 (líquido)	0,24 (sólido) 0,18 (líquido)	[61]

RT25HC	25	230	2,0	880 (sólido, 15°C) 770 (líquido, 40°C)	0,2	[62]
--------	----	-----	-----	----------------------------------------------------	-----	------

Na Tabela 9 estão descritas algumas aplicações em sistemas ativos nas quais foram incorporados diferentes PCM macroencapsulados.

Tabela 9: Algumas aplicações com incorporação de PCM macroencapsulados em sistemas ativos.

Aplicação	PCM	Cápsula	Vantagens	Limitações	Ref. de investi- -gação
Bomba de calor	Sais hidratados S10 e S27	Polímero HDPE (500 x 250 x 45) mm	Conforto térmico Elevado COP 18,97% de energia economizada	Inexistência de bomba de calor com a potência requerida Dados experimentais insuficientes	[56]
Tanque de armazenamento de água quente	CH ₃ COONa·3H ₂ O (90%) + Grafite (10%)	Cilindros de alumínio (8 x 31,5) cm	Aumento da capacidade de armazenamento térmico	Perdas térmicas consideráveis para o meio envolvente	[57]
Tanque de armazenamento de água quente	Parafina + grafite	Cilindros de latão (10 x 30) cm	Aumento da capacidade de armazenamento térmico de 20% a 45% Diminuição da estratificação térmica	Perdas térmicas consideráveis para o meio envolvente	[58]
Coletor solar para aquecimento de ar	Parafina + pó de carbono granular	Tubos helicoidais de carbono (Figura 15)	Aumento da eficiência térmica em 29,10% "Design" económico Redução das perdas térmicas	Placa do coletor solar com capacidade térmica limitada, só fornece ar quente no pico solar diário	[59]
Permutador de calor de PCM-ar	Parafina RT28HC	Placas de alumínio da Rubitherm® (450 x 300 x 10) mm	Melhoria do desempenho térmico	Gama de temperaturas altamente limitada sob o risco de influenciar bastante os resultados	[60], [64]

Permutador de calor de PCM-ar	Parafina 37D (Microtek®)	Placas de alumínio (1000 x 200 x 18) mm	Capacidade de manter o conforto térmico no interior a 21 °C durante o período de pico energético	Pico de mudança de potência não alcançado Possibilidade de otimização	[61]
Permutador de calor de PCM-ar	Parafina RT25HC	Placas de alumínio da Rubitherm® (450 x 300 x 10) mm	Aumento do período de conforto Poupança de energia Redução do pico de carga (menores custos de eletricidade)	Limite superior da temperatura de conforto excedida na estação de arrefecimento Necessidade de diminuir a massa de PCM, a temperatura de fusão e o tamanho do painel solar (no verão)	[62]
Piso radiante	Parafina granulada GR27 Rubitherm®	Estrutura metálica quadrada (500 x 500 x 40) mm	Estudo realizado em condições dinâmicas realistas Estabilidade térmica em 1000 ciclos	São necessários testes laboratoriais sobre o produto comercial específico A integração dos resultados no software de análise de edifícios requer o desenvolvimento da função de transferência não linear do pavimento	[65]
Tanque TES	Sais inorgânicos NaCl/52Mg Cl ₂ Aço Liga metálica	Tubos	Aumento da capacidade de armazenamento de calor Redução significativa do tempo de carga do tanque TES	Influência significativa da estrutura do tanque TES nos desempenhos de carga e descarga de calor latente	[66]
Permutador de calor PCM-ar	Cera parafínica (60 wt. %) incorporada a num polímero à base de etileno	Painéis de alumínio da Dupont™ Energain® (1200 x 1000 x 5,2) mm	Redução do pico de carga em 82% e da potência média de energia em 31%	Dependência das condições climáticas	[67]
Permutador de calor PCM-ar	Parafina RT25HC	Placas de alumínio da Rubitherm® (450 x 300 x 10) mm	Desvio do pico do preço da eletricidade	Elevada influência da radiação solar	[68]

Coletor solar para aquecimento de ar	Parafina RT45	Placas de metal (400 x 400 x 10) mm	Aumento do conforto térmico Capacidade de funcionamento do sistema mesmo em dias nublados	Necessidade de otimização relativamente às propriedades térmicas do PCM para funcionamento contínuo do sistema	[69]
Permutador de calor PCM-ar híbrido	Parafina RT10HC e sal hidratado SP24E	Placas de alumínio (450 x 300 x 15) mm	Aumento da eficiência térmica Poupança energética	Necessário um estudo para apurar as condições ótimas de funcionamento do sistema híbrido	[70]

Em suma, os sistemas ativos de aquecimento ambiente reúnem as seguintes vantagens, relativamente aos passivos ([67]):

- Flexibilidade na área de transferência de calor. A área de transferência de calor pode ser aumentada ajustando a relação entre a área da superfície, o volume do PCM e a taxa de fluxo de ar;
- Condições estáveis para carregar e descarregar energia. A elevada densidade energética do PCM e o facto do processo de transferência de calor latente ser aproximadamente isotérmico resultam em menores variações de temperatura. O armazenamento ativo de energia térmica permite que o PCM carregue ou descarregue mesmo quando as condições internas são estáveis, facilitando assim o controlo da energia térmica;
- Ajuste do ponto de fusão do PCM. Numa aplicação ativa, é mais fácil ajustar o ponto de fusão, portanto, a gama de condições úteis para carregar e descarregar o PCM pode ser alargada, por exemplo, recorrendo a um PCM diferente;
- Integração com sistemas mecânicos. Com ventilação mecânica, pode ser fornecido um fluxo de ar suficiente para alcançar a quantidade necessária de energia armazenada no PCM, o que resulta na diminuição dos picos de procura e deslocamento de carga. Esta redução dos picos de procura permite também a redução do equipamento e condutas de aquecimento e arrefecimento, poupando assim espaço nos edifícios, bem como custos.

Soluções comerciais para macroencapsulamento no mercado

Durante os últimos 30 anos, várias formas de PCM encapsulado foram comercializadas para aplicações em sistemas ativos e passivos [71].

Na Tabela 10 encontram-se alguns exemplos, para além dos apresentados nas tabelas anteriores.

Tabela 10: PCM comerciais disponíveis no mercado.

PCM	Tipo de produto	T_{fusão} [°C]	Entalpia de fusão [kJ/kg]	Empresa	Referência de investigação
RT8	Parafina	15	176	Rubitherm GmbH®	[64]
RT20	Parafina	22	172	Rubitherm GmbH®	[64]
Climsel C24	Parafina	24	216	Climator	[72]
RT26	Parafina	26	131	Rubitherm GmbH®	[64]
S27	Sal hidratado	27	207	Cristopia	[73]
RT30	Parafina	28	206	Rubitherm GmbH®	[64]
RT27	Parafina	28	179	Rubitherm GmbH®	[64]
SP21EK	Sal hidratado	22	170	Rubitherm GmbH®	[64]
SP29	Sal hidratado	29	200	Rubitherm GmbH®	[64]
Climsel C32	Sal hidratado	32	212	Climator	[72]
RT32	Parafina	31	130	Rubitherm GmbH®	[64]

3. Materiais e métodos

O presente capítulo descreve a bancada experimental e as experiências realizadas, e é bastante relevante na medida em que a dissertação apresenta uma componente experimental significativa.

Neste sentido, como explicado anteriormente, pretende-se desenvolver um sistema de armazenamento de calor latente que incorpore PCM macroencapsulado, com o principal objetivo de avaliar a influência do macroencapsulamento em aplicações ativas de aquecimento ambiente.

3.1 Aparato experimental

O trabalho laboratorial realizado consistiu no desenvolvimento de um sistema de armazenamento de energia térmica latente, utilizando placas com PCM macroencapsulado, por forma a monitorizar o comportamento do PCM nos ciclos de carga e descarga, sob diferentes condições operativas.

PCM e macrocápsulas

É fundamental selecionar o PCM consoante vários parâmetros, mas principalmente em função da sua temperatura de mudança de fase. A gama de temperatura de conforto térmico na estação de aquecimento (inverno) é 18-25°C [52], [72], portanto, o PCM deve ter uma temperatura de mudança de fase compreendida no intervalo referido. Também é importante ter em conta o valor do calor latente de fusão/solidificação por unidade de volume, porque quanto mais elevado for, menor o volume necessário para armazenar o material, e para que os períodos de carga/descarga sejam mais curtos, o PCM deve ter uma condutividade térmica elevada.

O PCM escolhido foi uma solução comercial fabricada pela Rubitherm, SP21EK, pertencente ao grupo dos PCM inorgânicos, neste caso, uma mistura de sais hidratados com aditivos. O SP21EK tem baixa inflamabilidade, uma elevada capacidade de armazenar energia por unidade de volume e é química e fisicamente estável durante vários ciclos de funcionamento. A Tabela 11 enumera as suas propriedades termodinâmicas e termofísicas, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 11: Propriedades do PCM SP21EK, dadas pelo fabricante. [64]

Designação do fabricante	SP21EK
Materiais	Mistura de sais hidratados com aditivos
Temperatura de fusão [°C]	22-23 Pico: 22

Temperatura de solidificação [°C]	21-19 Pico: 21,50
Entalpia de fusão [kJ/kg]	170±7,5%
Calor específico [kJ/kg·K]	2,0
Densidade [kg/m³]	1500 (sólido, 15°C) 1400 (líquido, 35°C)
Condutividade térmica [W/m·K]	0,5
Expansão volumétrica [%]	3-4
Temperatura máxima de funcionamento [°C]	45

As propriedades termofísicas do material de mudança de fase definidas pelo fornecedor não incluem os calores específicos sólido e líquido, essenciais para a modelação do comportamento do PCM. No desenvolvimento do estudo para avaliar o impacto da incorporação de PCM em soluções construtivas de paredes exteriores, Figueiredo et. al [52] utilizaram placas de alumínio da Rubitherm com SP21EK. Realizaram dois testes distintos para avaliar o comportamento térmico do PCM: calorimetria diferencial de varrimento (DSC) e *T-history*.

Relativamente ao DSC, as temperaturas de pico de fusão e cristalização observadas foram 25,12°C e 17,40°C (ver Figura 23), apresentando diferenças consideráveis relativamente aos valores referidos pelo fabricante, de 22°C e 21°C, respetivamente, e histerese elevada. O DSC é um método específico que exige repetibilidade, e que requer uma amostra de material muito reduzida, característica que normalmente não é problemática para materiais homogéneos. No entanto, o PCM estudado apresenta heterogeneidades locais, que podem induzir erros de amostragem neste tipo de teste, dificultando a obtenção de valores representativos das propriedades termofísicas do composto.

Como demonstra a Figura 24, o teste *T-history* provou ser mais adequado para sais hidratados, as temperaturas de pico e entalpias de fusão e solidificação foram semelhantes às indicadas pelo fabricante, e, portanto, recorreu-se aos dados do mesmo para obter os valores dos calores específicos sólido (C_{p_s}) e líquido (C_{p_L}) do SP21EK. Com base numa amostra de SP21EK de 15g de massa (m) e, tendo em conta as variações de temperatura (ΔT início e pico) nas respetivas mudanças de fase, e o calor libertado/armazenado correspondentes (Q), ou seja, o declive na zona linear das curvas, calcularam-se, através da equação [3], os valores dos calores específicos (C_p) pretendidos.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T [J] \quad [3]$$

De onde resultou $C_{p_s} = 4,533 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ e $C_{p_L} = 2,311 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$.

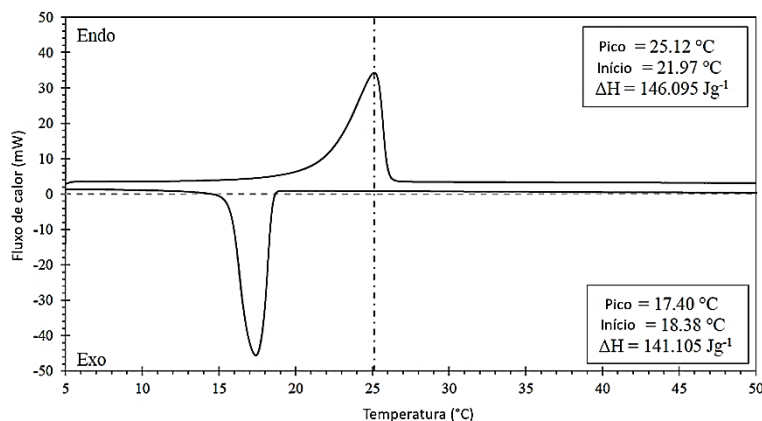


Figura 23. Gráfico DSC para uma amostra pura de 32,15 mg de SP21EK da Rubitherm, adaptado de Figueiredo et al. [52].

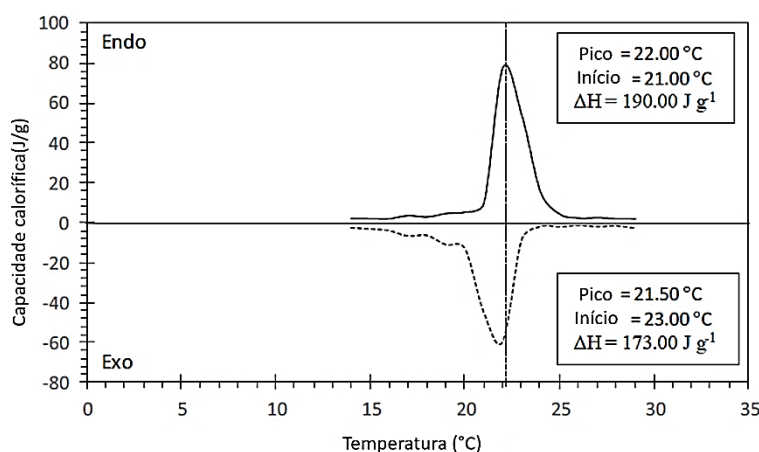


Figura 24. Gráfico *T-history* para uma amostra pura de 15 g de SP21EK da Rubitherm, adaptado de Figueiredo et al. [52].

As macrocápsulas consistiram em duas placas de alumínio, moldadas e ligadas uma à outra, formando uma espessura final de 15 mm, e continham 1,57 kg de PCM puro. Devido à sua composição à base de alumínio, esta macrocápsula permite uma elevada transferência de calor entre o PCM e os materiais em contato com ela. Existe a possibilidade de adquirir as placas já com PCM incorporado, o que torna mais evidente a decisão da escolha do fabricante. Deste modo, e como o principal desígnio do trabalho é aferir a influência do macroencapsulamento em sistemas ativos de aquecimento ambiente, foi eleita outra macrocápsula, do mesmo fabricante, composta por duas placas de HDPE, unidas entre si, e preenchidas com 1,82 kg do mesmo PCM. As propriedades dos materiais das macrocápsulas encontram-se na Tabela 12, e as placas encontram-se representadas na Figura 25.



Figura 25: Placas de alumínio e HDPE, respetivamente.

Tabela 12: Propriedades dos materiais das macrocápsulas [74].

Material	Dimensões [mm]	Espessura do invólucro [mm]	Densidade [kg/m ³]	Condutividade térmica [W/m·K]	Calor específico [kJ/kg·K]
Alumínio	450 x 300 x 15	0,075	2700	237	0,921
HDPE	320 x 290 x 25	2	940	0,44	1,850

Isolamento do sistema

De forma a diminuir as perdas térmicas, recorreu-se a placas de XPS (poliestireno extrudido), com 40 mm de espessura, com uma condutividade térmica de 0,033 W/m·K e densidade de 33 kg/m³, para isolar cada uma das macrocápsulas. O ideal seria que as placas com PCM ficassem completamente isoladas, para que a transferência de calor entre o PCM e os materiais envolventes possa ser desprezada nas laterais das placas, ou seja, considerar o fluxo de calor unidimensional. Assim, para a macrocápsula de alumínio, foram moldadas duas placas de XPS, de forma que o sistema ficasse totalmente isolado.

Em primeiro lugar, as macrocápsulas foram desenhadas em 3D de forma rigorosa com recurso ao software Solidworks CAD (Anexo A: Solidworks CAD) e, posteriormente, com recurso ao comando cavity no Assembly, foram criados os moldes da macrocápsula na placa de XPS (530 x 380 x 40 mm), com 40 mm de sobreespessura, valor escolhido tendo em conta a espessura das placas de XPS, para, de algum modo, uniformizar o sistema. Depois, foi simulada a montagem das três placas (molde inferior, placa de PCM e molde superior) no Solidworks Assembly para garantir que os desenhos estariam bem realizados e não havia interferências. De seguida, com o Solidworks CAM, foram gerados os códigos CNC (controlo numérico computadorizado) com as ferramentas e comandos adequados (pós-processamento). Após gerar os códigos CNC, foi necessário, para cada um, ajustar as velocidades de avanço

e mergulho (F) e de rotação (S), de acordo com as ferramentas e o material em questão (XPS). A posição das ferramentas, o cabeçalho e a finalização do programa foram incrementados posteriormente pelo engenheiro responsável pelo centro de maquinagem. As placas foram maquinadas no Laboratório de Tecnologia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, no centro de maquinagem vertical CNC.

Dolado et al. [60], como abordado no capítulo anterior, usaram várias placas de alumínio da Rubitherm e, entre outros procedimentos, realizaram uma análise paramétrica à macrocápsula, no que concerne rugosidade, condutividade térmica, espessura e quantidade. No que diz respeito à rugosidade da placa, concluíram que as saliências podem aumentar a taxa de transferência de calor entre o PCM e o meio envolvente, uma vez que estão relacionadas com o valor do coeficiente de convecção. Quanto maior a rugosidade da placa, maior será o pico de potência e menores os períodos de carga e descarga do PCM. No entanto, cada placa tem cerca de 500 saliências com (10 x 10 x 0,6) mm, o que se traduz num número de linhas de código exorbitante no pós-processamento e, conseqüentemente, em imensas horas de maquinagem no centro CNC. Por esta razão, e como as saliências têm menos de 1 mm de espessura, ao desenhar os moldes, foram desprezadas (Anexo A: Solidworks CAD).

Relativamente à placa de HDPE, as saliências nos moldes não foram levadas em conta pelos mesmos motivos e, portanto, neste caso, os moldes de XPS superior e inferior comportam as mesmas medidas e exatamente o mesmo formato (400 x 370 x 40) mm (Anexo A: Solidworks CAD). Assim, para maquinar os moldes da placa de HDPE, foi necessário recorrer ao cavity e gerar o código CNC.

As Figura 26 e Figura 27 ilustram a simulação do encaixe das três placas em perspetiva explodida. Os desenhos técnicos das placas de alumínio, HDPE e XPS encontram-se representados em anexo (Anexo B: Desenhos técnicos).

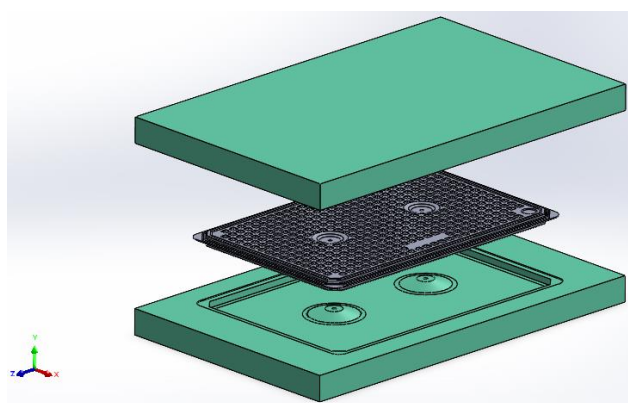


Figura 26. Vista explodida dos moldes de XPS e placa de alumínio de PCM (Solidworks).

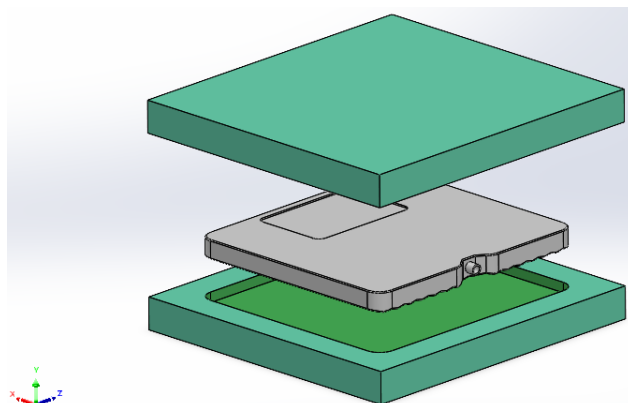


Figura 27. Vista explodida dos moldes de XPS e placa de HDPE de PCM (Solidworks).

Sensores de temperatura

Para registrar as temperaturas ao longo do tempo, foram usados 9 sensores de temperatura calibrados com 0,1 °C, um sistema de aquisição de dados e um computador. Foram inseridos no interior da placa de PCM cinco termopares tipo-K (Figura 28) com o propósito de verificar a uniformidade do comportamento do PCM no interior da macrocápsula. A placa foi furada, colocaram-se os sensores, e vedaram-se os furos com uma cola que solda a frio, e resiste a temperaturas desde -30°C até 150°C. Para verificar que os furos estariam bem vedados, a placa foi colocada sobre uma placa aquecedora IV (de infravermelhos). Deste modo, estando o PCM no estado líquido, caso a placa não vertesse material, estaria pronta para ser usada na montagem final.

O SP21EK é gorduroso e, apesar de ser resistente à água e óleo, durante as experiências acabou por existir fuga do PCM, uma vez que o material que protege os fios condutores dos sensores, absorveu bastante material, o que dificultou sempre a vedação dos furos e, por conseguinte, a execução das experiências. Os outros dois sensores foram colocados, pelo interior, no centro dos moldes de XPS, a 15 mm da macrocápsula (Figura 29 e Figura 30), para avaliar a eficiência do isolamento. Para a placa de HDPE, foi levado a cabo o mesmo procedimento, como ilustrado nas Figura 31 e Figura 32.

Ao longo das experiências foi ainda utilizado um termopar extra (9) do tipo-K, que serviu para monitorizar a temperatura à superfície da serpentina e, deste modo, aferir se ao longo dos ensaios laboratoriais, o fluido refrigerante estava a circular de forma contínua pelo tubo. Quando não estava a ser empregue a serpentina, o termopar 9 serviu para monitorizar a temperatura à superfície da placa de PCM, e verificar a diferença com temperatura do PCM, dada pelos cinco termopares em contato com o material no interior da placa.

A temperatura ambiente foi parametrizada com um PT-100 (sensor de temperatura).

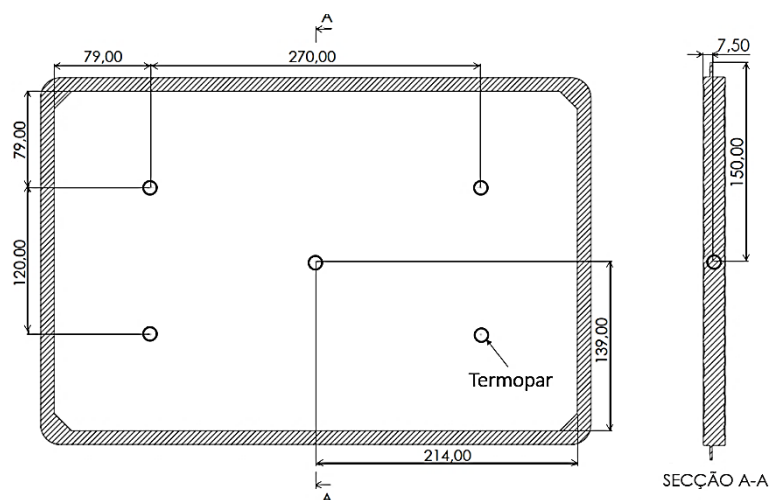


Figura 28. Esquema ilustrativo da posição dos sensores de temperatura na placa de alumínio.

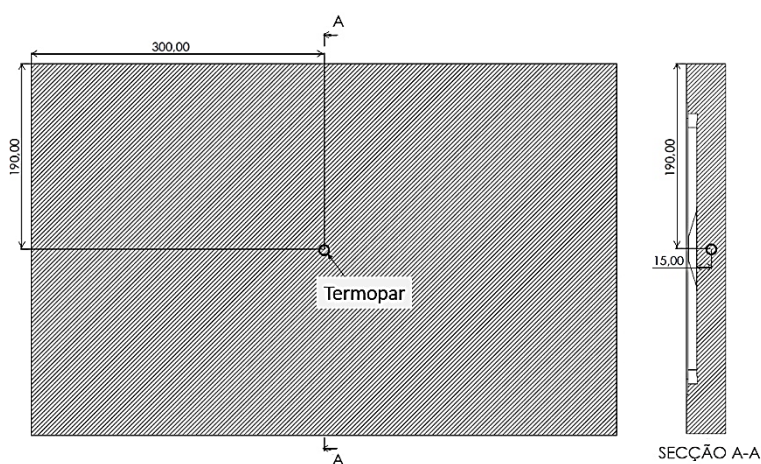


Figura 29. Esquema ilustrativo da posição dos sensores de temperatura no molde de XPS inferior para a placa de alumínio.

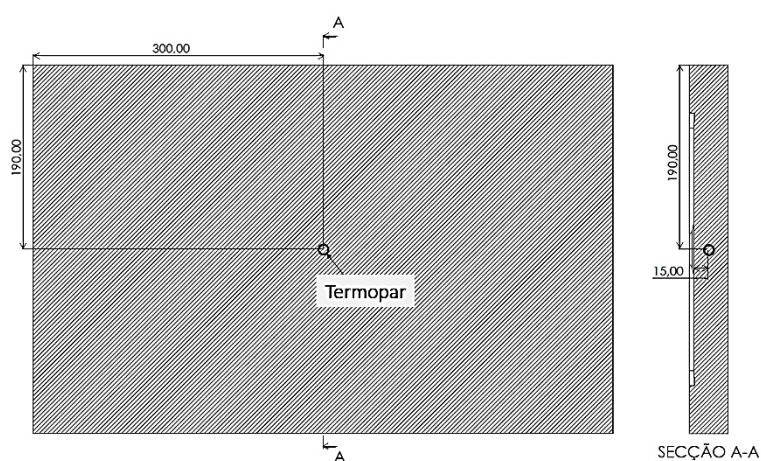


Figura 30. Esquema ilustrativo da posição dos sensores de temperatura no molde de XPS superior para a placa de alumínio.

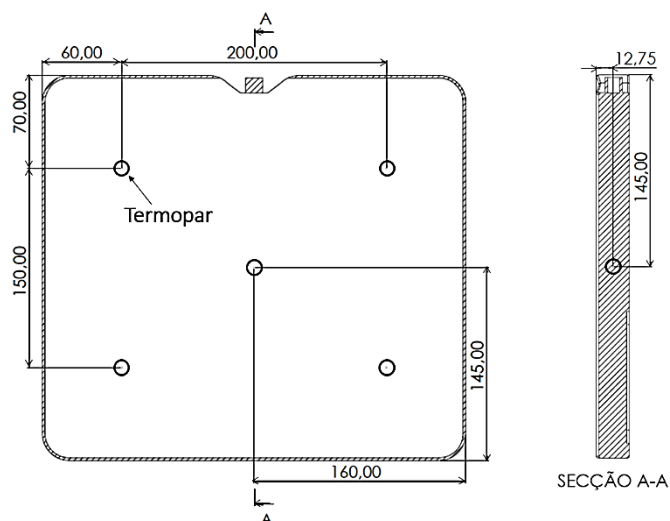


Figura 31. Esquema ilustrativo da posição dos sensores de temperatura na placa de HDPE, a meio da espessura.

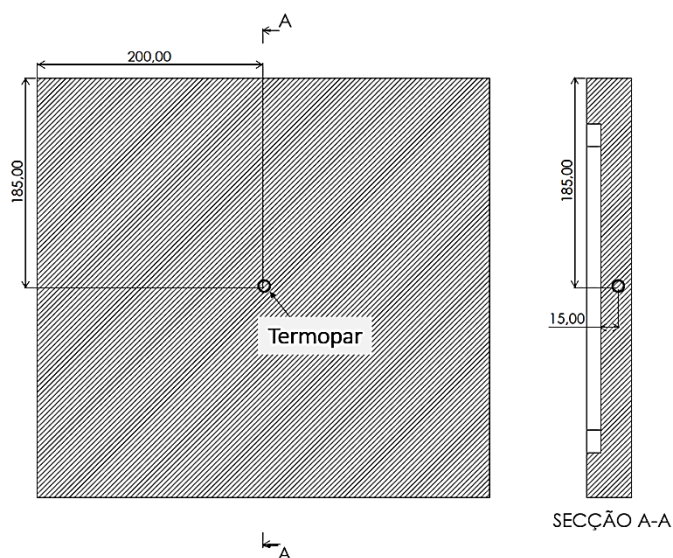


Figura 32. Esquema ilustrativo da posição dos sensores de temperatura nos moldes de XPS para a placa de HDPE, a 15 mm da superfície do molde.

Modos de arrefecimento e aquecimento

Devido aos meses quentes em que se efetuaram as experiências (junho e julho), foi necessário coadjuvar a fase de descarga do PCM, através do projeto de um sistema de refrigeração. Assim, juntou-se ao aparato experimental, um sistema de permuta constituído por tubagem de silicone, fluido refrigerante (R-134a) e um banho térmico, com 200W de potência. Para o caso da macrocápsula de alumínio ver Figura 33. Para a placa de HDPE ver Figura 34. Tendo em conta o objetivo de maximizar as trocas de calor entre o fluido refrigerante e cada uma das placas, foi aplicado em cada caso, o maior comprimento de tubo de silicone possível, considerando também as perdas de carga nas curvas de 90°, aproximadamente. Em ambos os casos, o tubo foi fixo ao molde de XPS superior com grampos, não só para uniformizar a área

de contato com a placa respectiva, mas também para evitar que a serpentina se desfizesse ao longo das experiências. Para otimizar as experiências e, mais uma vez, mitigar as perdas térmicas, as frações de tubo expostas à temperatura ambiente foram isoladas por espuma de polietileno expandido, com 10 mm de espessura.

No que concerne ao processo de carga do PCM, o objetivo seria usar apenas a serpentina tanto para o aquecimento como para o arrefecimento. No entanto, este método revelou-se insuficiente e ineficaz para fundir a massa de PCM de forma integral. Portanto, recorreu-se também a uma placa aquecedora IV com 300W, bem como a isolamento do sistema.



Figura 33. Disposição do tubo no interior do molde superior de XPS, para a placa de alumínio.



Figura 34. Disposição do tubo no interior do molde superior de XPS, para a placa de HDPE.

Para além das placas de XPS moldadas, macrocápsulas com PCM, sensores de temperatura, serpentina (permutador de calor) e respetivo banho térmico,

e da placa IV, a instalação experimental possuía um sistema de aquisição e monitorização de dados e um computador para efetuar o registo dos mesmos. Na Figura 35 encontra-se representado o aparato experimental de uma das experiências realizadas, com todos os componentes nomeados anteriormente. Em anexo encontram-se os dados dos restantes ensaios realizados (Anexo C: Experiências realizadas).

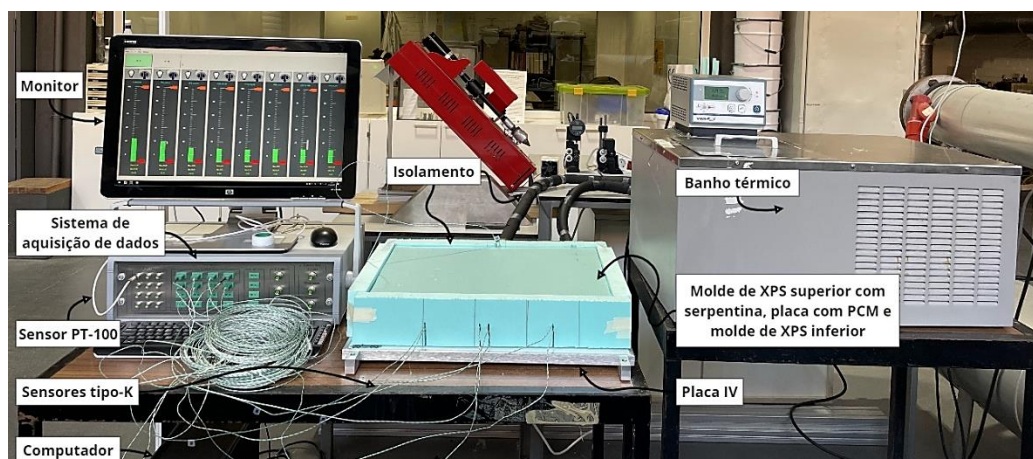


Figura 35. Aparato experimental.

3.2 Desenho de experiências

Para a caracterização experimental do SP21EK, recorreu-se ao aparato experimental descrito no capítulo anterior. Devido ao exposto anteriormente, foram aplicadas diferentes condições para efetuar o ciclo de carga do PCM, usando as seguintes variáveis: placa IV, banho térmico com fluido refrigerante a 40°C e molde superior de XPS, ou seja, com um dos lados da macrocápsula exposto à temperatura ambiente, ou não. Apesar de o silicone ser resistente a temperaturas elevadas, optou-se pelos 40°C para prevenir o dano do fluido refrigerante e do tubo, com uma espessura baixa, e também pelo facto de o número de experiências a realizar ser considerável. Por outro lado, o único modo de arrefecimento era recorrendo ao mesmo fluido, mas com um ST de -5°C, existindo uma amplitude térmica significativa e sistemática.

Relembrando que as temperaturas de fusão e solidificação consideradas são 22°C e 21,50°C, respetivamente, as rampas de aquecimento e arrefecimento estipuladas foram 10-30°C e 30-10°C, respetivamente, considerando, à priori, que o PCM se encontraria completamente sólido a 10°C e totalmente líquido a 30°C. Para as placas de alumínio e HDPE desenhou-se um plano de experiências, representado na Tabela 13, inerentemente com propósitos associados. A diferença entre o modo de aquecimento das experiências 1, 2 e 3 serviu precisamente para definir o melhor método de carregar o PCM, e para tal recorreu-se primeiramente à serpentina com o fluido refrigerante a 40°C, posteriormente à placa aquecedora de IV, e finalmente à junção de ambas, com o propósito de testar o comportamento

do PCM com o sistema mais isolado, com aquecimento de ambos os lados. De seguida, com a realização da experiência 4, pretendeu-se aferir acerca da influência da placa de XPS superior no processo de carga, ou seja, sobre a exposição da placa com PCM à temperatura ambiente, ou não. Finalmente, com a experiência mais eficiente de cada placa, foram tiradas ilações no que diz respeito ao macroencapsulamento.

As temperaturas foram registadas em intervalos de 20 segundos, suficientes para permitir acompanhar os processos de carga e descarga e, sobretudo, a mudança de fase do PCM, uma vez que à priori o comportamento do PCM não era totalmente conhecido.

Tabela 13. Plano de experiências para ambas as macrocápsulas.

<p>Descarga (arrefecimento) $T_{\text{solidificação}} = 21,50^{\circ}\text{C}$ $30^{\circ}\text{C} \rightarrow 10^{\circ}\text{C}$</p>	<p>Carga (aquecimento) $T_{\text{fusão}} = 22^{\circ}\text{C}$ $10^{\circ}\text{C} \rightarrow 30^{\circ}\text{C}$</p>
<div data-bbox="437 1294 737 1496" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: auto;"> <p style="text-align: center;">XPS</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">Serpentina a -5°C</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">Placa com PCM</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">XPS</p> </div>	<p style="text-align: center;">Experiência 1</p> <div data-bbox="892 904 1192 1106" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: auto;"> <p style="text-align: center;">XPS</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">Serpentina a 40°C</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">Placa com PCM</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">XPS</p> </div>
	<p style="text-align: center;">Experiência 2</p> <div data-bbox="892 1193 1192 1395" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: auto;"> <p style="text-align: center;">XPS</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">Placa com PCM</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">XPS</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">Placa IV</p> </div>
	<p style="text-align: center;">Experiência 3</p> <div data-bbox="892 1485 1192 1718" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: auto;"> <p style="text-align: center;">XPS</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">Serpentina a 40°C</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">Placa com PCM</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">XPS</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">Placa IV</p> </div>
	<p style="text-align: center;">Experiência 4</p> <div data-bbox="892 1809 1192 1951" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: auto;"> <p style="text-align: center;">Placa com PCM</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">XPS</p> <hr style="border: 1px solid gray;"/> <p style="text-align: center;">Placa IV</p> </div>

4. Modelação analítica do comportamento térmico do PCM

Neste capítulo apresentam-se as equações aplicadas para formular o modelo analítico que permite analisar o comportamento do PCM. Na literatura encontram-se diferentes formulações, no entanto, os modelos possuem algumas limitações. Nesse sentido, recorreu-se ao modelo proposto por Thonon et. al [75]. As equações relacionam a evolução da fração líquida com o calor específico efetivo, que permitem modelar analiticamente o comportamento térmico do PCM nos ciclos de carga e descarga.

4.1 Fração líquida

A expressão que descreve a evolução da fração líquida serve como ponto de partida, e é dada pela equação [4]. A fração líquida é descrita com a função de erro (*erf*), ou derivada da função gaussiana. Os coeficientes σ_s e σ_L (ver expressões [5] e [6], respetivamente) garantem que a fração líquida se encontra próxima de 0 na T_s (temperatura à qual o PCM se encontra no estado sólido), e 1 na T_L (temperatura à qual o PCM se encontra no estado líquido).

$$f_{erf} = \begin{cases} \frac{\sigma_s}{\sigma_s + \sigma_L} \cdot \left[\operatorname{erf}\left(\frac{T - T_{PC}}{\sigma_s}\right) + 1 \right] & T \leq T_{PC} \\ \frac{1}{\sigma_s + \sigma_L} \cdot \left[\sigma_L \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{T - T_{PC}}{\sigma_L}\right) + \sigma_s \right] & T > T_{PC} \end{cases} \quad [4]$$

Onde T_{PC} representa a temperatura de mudança de fase (*phase change*) e T a temperatura instantânea do PCM.

$$\sigma_s = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (T_{PC} - T_s) \quad [5]$$

$$\sigma_L = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot (T_L - T_{PC}) \quad [6]$$

4.2 Calor específico efetivo

O calor específico efetivo, dado pela equação [7], é calculado recorrendo à fração líquida, mas também aos calores específicos sólido (C_{ps}) e líquido (C_{pL}), e à média dos calores latentes de fusão e solidificação (L), como sugerido na literatura [75].

$$C_{eff\ erf} = \begin{cases} C_{ps} + (C_{pL} - C_{ps}) \cdot f_{erf}(T) + \frac{2 \cdot L}{(\sigma_s + \sigma_L) \cdot \pi^{0.5}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{T - T_{PC}}{\sigma_s}\right)^2\right) & T \leq T_{PC} \\ C_{ps} + (C_{pL} - C_{ps}) \cdot f_{erf}(T) + \frac{2 \cdot L}{(\sigma_s + \sigma_L) \cdot \pi^{0.5}} \cdot \exp\left(-\left(\frac{T - T_{PC}}{\sigma_L}\right)^2\right) & T > T_{PC} \end{cases} \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \quad [7]$$

4.3 Taxa de transferência de calor

Para medir a taxa de transferência de calor, Thonon et al. [75] incluíram no aparato experimental dois fluxómetros, um de cada lado da amostra. Uma vez que para a bancada experimental da presente dissertação não se usaram fluxómetros, para modelar a taxa de transferência de calor do PCM em cada experiência, foi desenvolvido um modelo analítico resultante do balanço térmico à montagem experimental e monitorização das temperaturas registadas nas diferentes localizações. Para o efeito, consideraram-se alguns pressupostos. Como os quatro lados da amostra foram totalmente isolados com XPS para evitar perdas térmicas, a transferência de calor pelas laterais do sistema foi desprezada, e a taxa de transferência de calor foi, portanto, considerada unidirecional (Figura 36).

Os modos de transferência de calor considerados foram os seguintes: convecção através do fluido refrigerante (R_{refr}) e do ar (R_{ar}) - Lei de arrefecimento de Newton, e condução nas placas de XPS superior (R_{XPS_sup}) e inferior (R_{XPS_inf}), e nas placas de alumínio ou HDPE ($R_{Al/HDPE}$) - Lei de Fourier. [74]. Relativamente ao PCM, quando se encontra em estado sólido, o calor é transferido por condução, e quando se encontra no estado líquido, por convecção. Todavia, foi considerado o calor específico efetivo, que engloba as três fases: sólida, líquida e de transição (calor latente). As variáveis medidas, com um intervalo de tempo de 20 segundos (Δt), foram a temperatura do PCM (T_{PCM}), a temperatura das placas de XPS, superior (T_{XPS_sup}) e inferior (T_{XPS_inf}), a 15 mm da macrocápsula, e a temperatura ambiente (T_{ar}). A temperatura do refrigerante (T_{refr}) considerou-se constante, dada pelo set-point (ST) do banho térmico. Os valores das condutividades térmicas do PCM (k_{PCM}) e dos materiais das cápsulas ($k_{Al/HDPE}$) estão indicados nas Tabela 11 e Tabela 12, respetivamente, e a condutividade térmica do XPS é 0,033 W/(m·K). A espessura das placas de alumínio e HDPE são 15mm e 25mm, respetivamente. A espessura do XPS é dada pela diferença entre a espessura da placa (40mm) e a espessura da placa de PCM que encaixa nos moldes. Para a placa de alumínio, as espessuras da placa de XPS inferior (Δx_{xps_inf}) e superior (Δx_{xps_sup}) são 29,5mm e 35,5mm, respetivamente. Da mesma forma, para a placa de HDPE, a espessura da placa de XPS inferior e superior é 27,3mm.

Relativamente ao fluido refrigerante que circula ao longo do tubo (Figura 37) com o propósito de calcular os coeficientes de convecção para as diferentes temperaturas, -5°C e 40°C, mediu-se o caudal volúmico do fluido operante (\dot{Q}_v), $1,25 \times 10^{-6}$ m³/s, e pelas equações [8] e [9] calculou-se o seu caudal mássico (\dot{m}) e velocidade (u), respetivamente. Assumindo escoamento interno em regime permanente e completamente desenvolvido, seguiu-se o cálculo do número de Reynolds para o fluido operante a -5°C e 40°C (equação [10]), 1219 e 1879, respetivamente, valores menores do que 2300, condição necessária e suficiente para afirmar que se trata de um escoamento em regime laminar [74]. Sob as condições referidas, num tubo circular caracterizado por um fluxo térmico na superfície uniforme (\dot{Q}_s), o número de Nusselt (Nu) é

constante (equação [11]). Assim, os coeficientes de convecção do refrigerante (h_{refr}) a -5°C e 40°C são 69 e 54 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, respetivamente.

No que diz respeito à convecção natural do ar, considerada para a experiência 4, onde a placa foi exposta à temperatura ambiente (ver Figura 38), para aferir o valor do coeficiente de convecção, considerando ar quiescente, a uma temperatura média do ar de 24°C (T_{∞}) e que a superfície se encontrava a 30°C (T_{sup}), calculou-se o número de Rayleigh (Ra_L) usando a equação [12], de onde resultou que $Ra_L=4\cdot 10^5$ e $4,9\cdot 10^5$ para as placas de alumínio e HDPE, respetivamente. A camada limite de convecção natural é, portanto, laminar ($10^4\leq Ra_L\leq 10^9$) [74]. Pela equação [13], o coeficiente de convecção do ar é igual a 4 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (h_{ar}), para as duas placas. As propriedades do ar descritas são aferidas para a temperatura média entre T_{sup} e T_{∞} (temperatura do filme). Devido ao isolamento adiabático, a transferência de calor por convecção nas laterais da placa foi desprezada. A espessura exposta ao ar era muito baixa relativamente à área da superfície superior: 4,5mm (placa de alumínio) e 12,7mm (placa de HDPE).

A Figura 39 representa o modelo geral de resistências implícito na instrumentação das equações da taxa de transferência de calor [14]-[17]. As resistências térmicas encontram-se detalhadas na Tabela 15, e os valores das mesmas na Tabela 16.

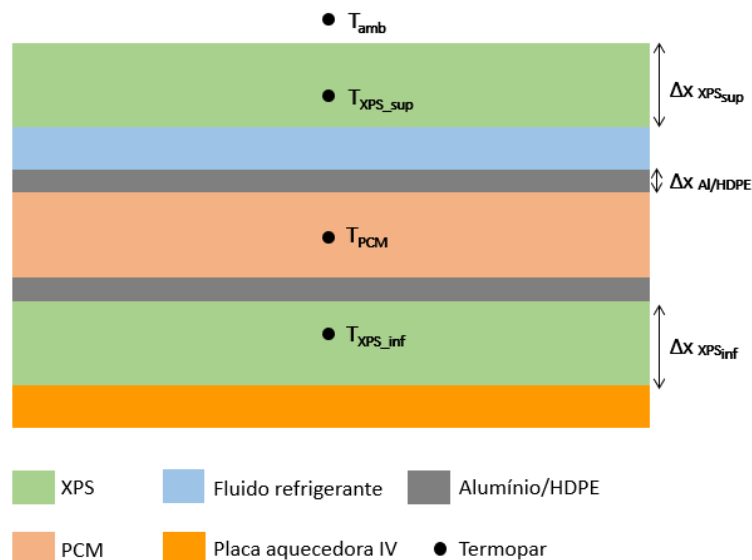


Figura 36. Representação esquemática do modelo 1D das placas.

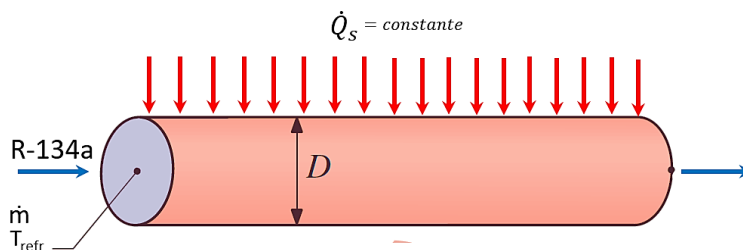


Figura 37. Esquema representativo do escoamento interno em regime permanente no interior do tubo circular estudado, adaptado de Incropera et al. [74].

$$\dot{m} = \dot{Q}_v \cdot \rho \text{ [kg/s]} \quad [8]$$

De onde resultou 0,0016 kg/s e 0,0014 kg/s para temperaturas do fluido refrigerante de -5°C e 40°C, respetivamente.

$$u = \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A_{tr}} \text{ [m/s]} \quad [9]$$

Onde, $A_{tr} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ representa a área de secção transversal uniforme, e D o diâmetro do tubo. A velocidade de fluido operante calculada foi 0,04 m/s para ambas as temperaturas.

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad [10]$$

Onde ρ , u e μ indicam a densidade, velocidade e viscosidade dinâmica do fluido operante, respetivamente.

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} = 4,36 \quad [11]$$

Tabela 14. Propriedades do fluido operante (R-134a). [74]

	T_{refr} = -5°C	T_{refr} = 40°C
ρ_{refr} (kg/m ³)	1311,50	1146,97
μ_{refr} ((N·s)/m ²) x10 ²	0,02853	0,01619
k_{refr} (W/(m·K)) x10 ³	94,30	74,90

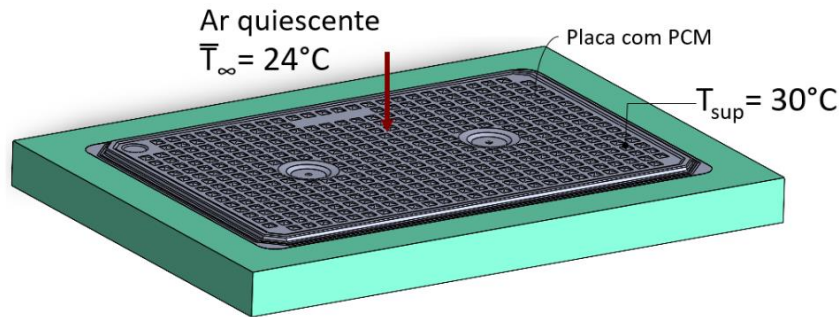


Figura 38. Esquema ilustrativo do escoamento de ar em regime permanente, considerando o ar quiescente e gás ideal.

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{sup} - T_{\infty}) \cdot L_c^3}{\nu \cdot \alpha} \quad [12]$$

Onde g , β , ν , α e L_c simbolizam a aceleração da gravidade ($9,81 \text{ m/s}^2$), o coeficiente de expansão volumétrica térmica ($9,81 \text{ K}^{-1}$), velocidade cinemática ($15,89 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), difusividade térmica ($22,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) e a dimensão característica da placa, respetivamente, calculada por $L_c = \frac{A_s}{P}$, onde, A_s , corresponde à área da superfície da placa e P ao seu perímetro.

$$Nu = \frac{h \cdot L_c}{k} = 0,54 \cdot Ra_L^{1/4}, \quad (10^4 \leq Ra_L \leq 10^7, Pr \geq 0,7) \quad [13]$$

Onde k significa a condutividade térmica do ar à temperatura do filme ($26,3 \cdot 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), e Pr representa o número de Prandtl, igual a 0,707.

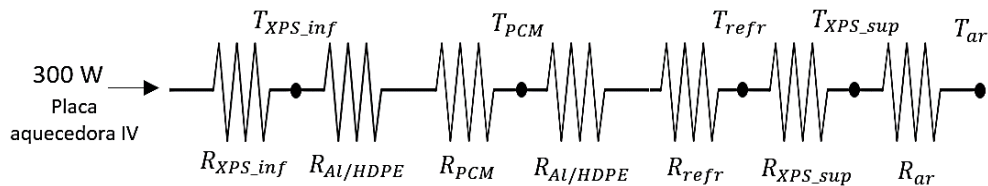


Figura 39. Modelo de resistências (geral) para o cálculo da taxa de transferência de calor.

Tabela 15. Resistências térmicas.

Resistências térmicas por condução	Resistências térmicas por convecção [K/W]	Resistência térmica por condução e convecção [K/W]
$R_{XPS_inf} = \frac{1}{k_{XPS} \cdot \Delta x_{XPS_inf}}$	$R_{refr} = \frac{1}{h_{refr} \cdot A_{serp_Al/HDPE}}$	$R_{PCM} = \frac{\Delta t}{m_{PCM} \cdot C_{eff_erf}}$
$R_{Al/HDPE} = \frac{1}{k_{Al/HDPE} \cdot \Delta x_{Al/HDPE}}$	$R_{ar} = \frac{1}{h_{ar} \cdot A}$	
$R_{XPS_sup} = \frac{1}{k_{XPS} \cdot \Delta x_{XPS_sup}}$		

Tabela 16. Resistências térmicas (valores).

Resistências térmicas [K/W]	Placa de alumínio	Placa de HDPE
R_{XPS_inf}	1043,02	1127,08
$R_{Al/HDPE}$	2,81	568,18
R_{XPS_sup}	866,74	1127,08
$R_{refr} (T_{refr}=-5^{\circ}C)$	0,22	0,42
$R_{refr} (T_{refr}=40^{\circ}C)$	0,24	0,31
R_{ar}	2,08	1,69
R_{PCM}	$12,74 \cdot C_{eff_erf}$	$10,99 \cdot C_{eff_erf}$

Descarga do PCM

A instrumentação para o processo de descarga no PCM foi idêntica para as quatro experiências, e encontra-se representada, de forma ilustrativa, na Figura 40. No que diz respeito à taxa de transferência de calor no PCM foram levadas em conta as equações [3] e [7] e, considerando que o calor específico efetivo modela o comportamento do PCM no seu estado sólido, líquido e na mudança de fase, ou seja, na gama de temperaturas estudada, entre os 10°C e os 30°C.

Para o cálculo da taxa de transferência de calor foi desprezada a influência do isolamento superior e do silicone (material do tubo). Consideraram-se as resistências dos materiais da macrocápsula e da placa de XPS inferior. Partiu-se do princípio de que o PCM foi descarregado exclusivamente pelo sistema da serpentina, levando apenas em conta a convecção gerada pelo fluido refrigerante a -5°C (ver equação [14] e Figura 41).

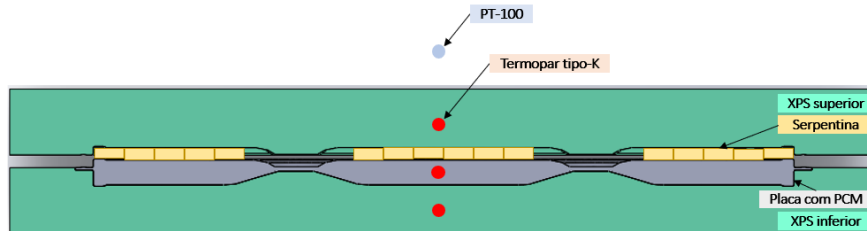


Figura 40. Esquema do aparato experimental no processo de arrefecimento (vista em corte frontal, a meio das placas), para a placa de alumínio.

$$\dot{Q}_{descarga} = \frac{T_{XPS\ sup_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{PCM}} + \frac{T_{refr} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{refr@-5^{\circ}C}} - \frac{T_{XPS\ sup_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{Al/HDPE}} - \frac{T_{XPS\ inf_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{Al/HDPE} + R_{XPS\ inf}} \quad [W] \quad [14]$$

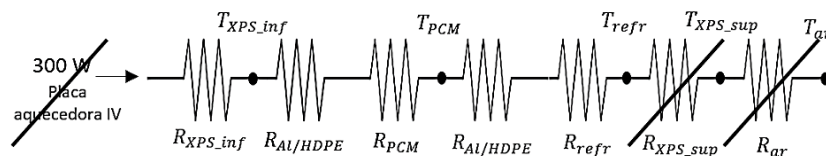


Figura 41. Modelo de resistências para o processo de descarga do PCM.

Carga do PCM

O período de carga foi estudado variando a fonte de calor ou o isolamento (molde de XPS superior). Primeiramente, como seria o objetivo inicial, usou-se o permutador fluido refrigerante-PCM em forma de serpentina como fonte de calor, com um ST de 40°C, cujo esquema pode ser representado também pela Figura 40. Tal como descrito no processo de descarga, similar ao nível da montagem laboratorial com a primeira experiência de aquecimento, as

resistências do XPS superior e do material do tubo não foram tidas em conta no cálculo da taxa de transferência de calor por considerar-se que o fluido refrigerante estava em contato direto com a placa de PCM (ver esquema da Figura 41). A fração da equação [15] da mudança de fase do PCM é semelhante em todas as experiências, tendo como indicador principal da modelação analítica do PCM o calor específico efetivo.

$$\dot{Q}_{carga1} = \frac{T_{XPS\ sup_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{PCM}} + \frac{T_{refr} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{refr@40^{\circ}C}} - \frac{T_{XPS\ sup_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{Al/HDPE}} - \frac{T_{XPS\ inf_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{Al/HDPE} + R_{XPS_{inf}}} [W] \quad [15]$$

Para a experiência 2 (Figura 42), a fonte de calor foi uma placa aquecedora IV com 300W, potência considerada fixa no cálculo da taxa de transferência de calor (equação [16]). Nesta experiência, para além das resistências do alumínio, também se considerou a influência do isolamento superior e inferior no que diz respeito ao cálculo da taxa de transferência de calor, como indicado na Figura 43.

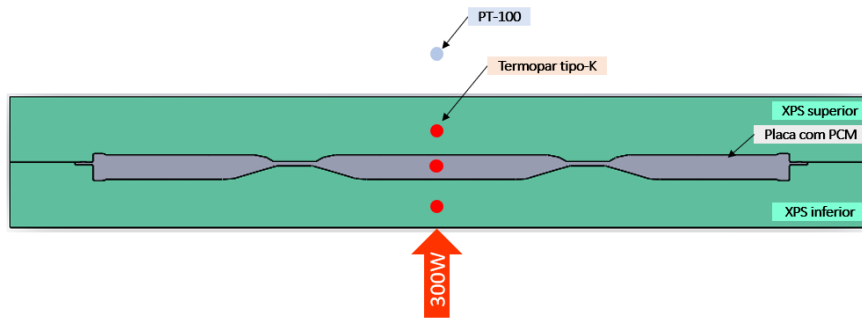


Figura 42. Esquema do aparato experimental no processo de carga da experiência 2 (vista em corte frontal, a meio das placas), para a placa de alumínio.

$$\dot{Q}_{carga2} = \frac{T_{XPS\ inf_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{PCM}} + \dot{Q}_{placa\ IV} - \frac{T_{XPS\ sup_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{Al/HDPE} + R_{XPS_{sup}}} - \frac{T_{XPS\ inf_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{Al/HDPE} + R_{XPS_{inf}}} [W] \quad [16]$$

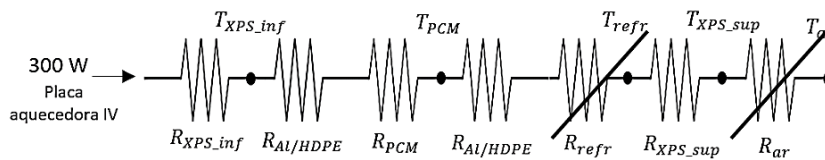


Figura 43. Modelo de resistências para o processo de carga do PCM para a experiência 2.

A taxa de transferência de calor para a experiência 3, calculada pela equação [16], teve em consideração duas fontes de calor: a placa IV por baixo do isolamento inferior, e o permutador de calor sobre a placa de PCM. O

esquema da Figura 40 representa esta experiência, faltando apenas a indicação da potência fixa, e o modelo da Figura 44 ilustra as resistências consideradas.

$$\dot{Q}_{carga3} = \frac{T_{XPS\ inf_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{PCM}} + \dot{Q}_{placa\ IV} + \frac{T_{refr} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{refr@40^{\circ}C}} - \frac{T_{XPS\ sup_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{Al/HDPE}} - \frac{T_{XPS\ inf_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{Al/HDPE} + R_{XPS\ inf}} \quad [W] \quad [16]$$

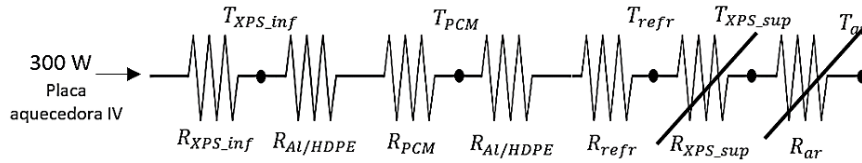


Figura 44. Modelo de resistências para o processo de carga do PCM para a experiência 3.

Por fim, foi realizada uma quarta experiência, sem isolamento sobre a placa de PCM, ou seja, exposta à temperatura ambiente, usando a placa IV novamente como fonte de aquecimento. A equação [17] descreve a taxa de transferência de calor da experiência 4, a Figura 45 ilustra a disposição das placas e dos sensores de temperatura, e a Figura 46 o modelo de resistências.

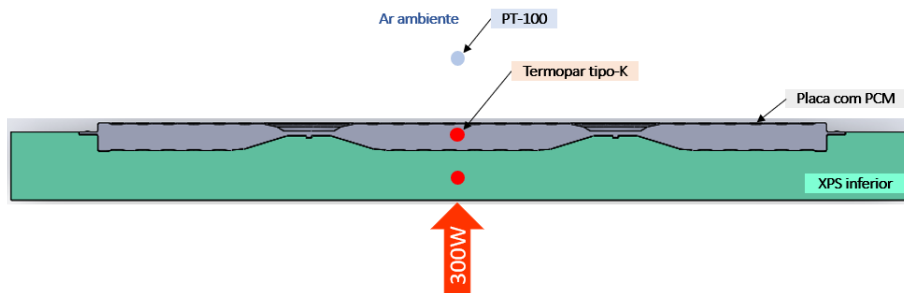


Figura 45. Esquema do aparato experimental no processo de carga da experiência 4 (vista em corte frontal, a meio das placas), para a placa de alumínio.

$$\dot{Q}_{carga4} = \frac{T_{XPS\ inf_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{PCM}} + \dot{Q}_{placa\ IV} + \frac{T_{amb_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{ar}} - \frac{T_{amb_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{Al/HDPE}} - \frac{T_{XPS\ inf_{t=i+1}} - T_{PCM\ centro_{t=i}}}{R_{Al} + R_{HDPE} + R_{XPS\ inf}} \quad [W] \quad [17]$$

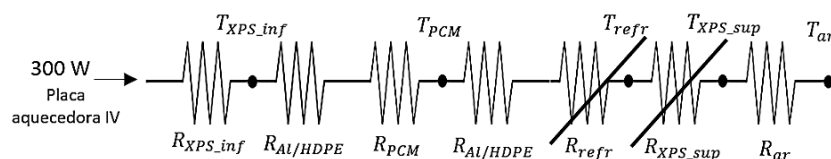


Figura 46. Modelo de resistências para o processo de carga do PCM para a experiência 3.

5. Análise e discussão de resultados

Uma vez desenvolvidas as equações que modelam o comportamento térmico do PCM, é possível aplicá-las a ambas as placas: alumínio e HDPE. Tendo por base o mesmo PCM (SP21EK), as variáveis entre as duas placas são a massa do PCM, a espessura do macroencapsulamento e a condutividade térmica do material da cápsula. Com o intuito de aplicar estratégias conducentes à melhoria do desempenho térmico do produto com PCM macroencapsulado, em primeiro lugar, analisaram-se as três experiências realizadas inicialmente, fazendo apenas variar a fonte de calor (rever Tabela 13). Depois de determinar a melhor solução até então estudada, seguiu-se o estudo da influência do isolamento da placa de PCM e, por fim, para o modelo com os melhores resultados (experiência 2), analisou-se a influência do macroencapsulamento nos processos de carga e descarga, que constitui o principal desígnio da dissertação. As etapas de aprimoramento do conjunto de placas encontram-se detalhadas em anexo (Anexo D: Análise paramétrica).

O gráfico da Figura 47 representa a evolução da fração líquida do PCM ao longo dos processos de carga e descarga. É possível verificar que a gama de valores da temperatura selecionada (10-30°C) é válida, visto que, antes de atingir os 10°C, o PCM encontra-se completamente sólido (fração líquida nula), e que à temperatura de 30°C o material encontra-se em estado líquido puro (fração líquida igual a 1). Toda a massa de PCM fundiu e solidificou durante os períodos de carga e descarga do PCM, respetivamente. As formas das curvas assemelham-se aos resultados atingidos pelos autores do novo modelo analítico estudado [75]. A diferença entre as duas curvas representadas deve-se ao fenómeno de histerese, porque o PCM não se comporta da mesma maneira ao longo da fusão e solidificação, os intervalos de mudança de fase (MF) são distintos.

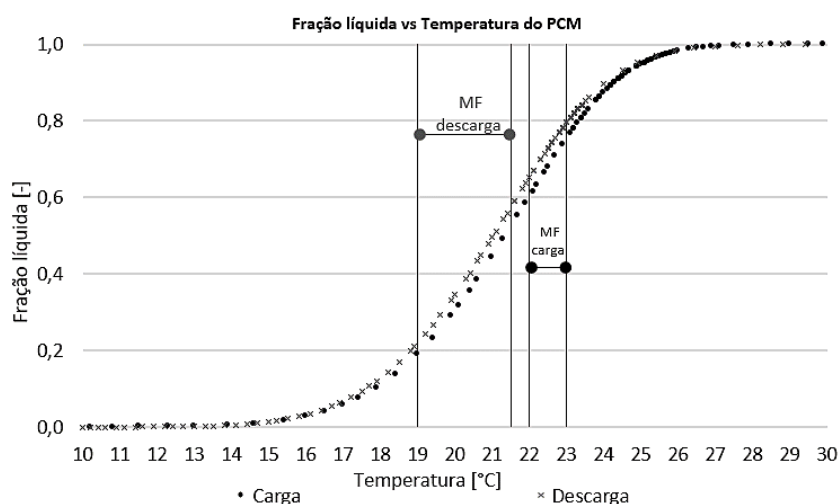


Figura 47. Evolução da fração líquida do PCM ao longo dos processos de carga e descarga.

5.1 Estudo da influência do macroencapsulamento nos processos de carga e descarga

O gráfico da Figura 48 compara as curvas da taxa de transferência de calor no PCM e da sua temperatura, ao longo do período de carga do PCM, entre as placas de alumínio e HDPE. Verifica-se que, com a mesma fonte de calor, o PCM na placa de HDPE apresenta uma taxa de transferência de calor superior ao da placa de alumínio. Um dos fatores que levou a estas diferenças são as características do material da cápsula, nomeadamente a condutividade térmica, que é muito superior no caso do alumínio e, entende-se, pela equação [16] e pela diferença entre as resistências que as macrocápsulas oferecem à transferência de calor (2,81 K/W e 568,18 K/W para a placa de alumínio e HDPE, respetivamente). Também por este motivo, o PCM na placa de alumínio, carregou mais rápido do que na placa de HDPE, uma vez que o alumínio é um bom condutor térmico, ao contrário do HDPE (consultar Tabela 12).

No que diz respeito à descarga do PCM (Figura 49), com a placa de HDPE, observou-se que o tempo de descarga foi, aproximadamente, doze horas superior. Ainda que a placa de HDPE tenha mais 250g de PCM do que a placa de alumínio e que a espessura do invólucro seja o dobro, o tempo de descarga é substancialmente superior. De facto, o HDPE tem uma condutividade térmica muito menor do que o alumínio.

Comparando os dois gráficos, para a mesma placa, constata-se que o tempo de carga é inferior ao de descarga, ou seja, o PCM leva mais tempo a libertar todo o calor que armazenou ao longo do período de carga. O PCM descarrega lentamente devido à sua baixa difusividade térmica.

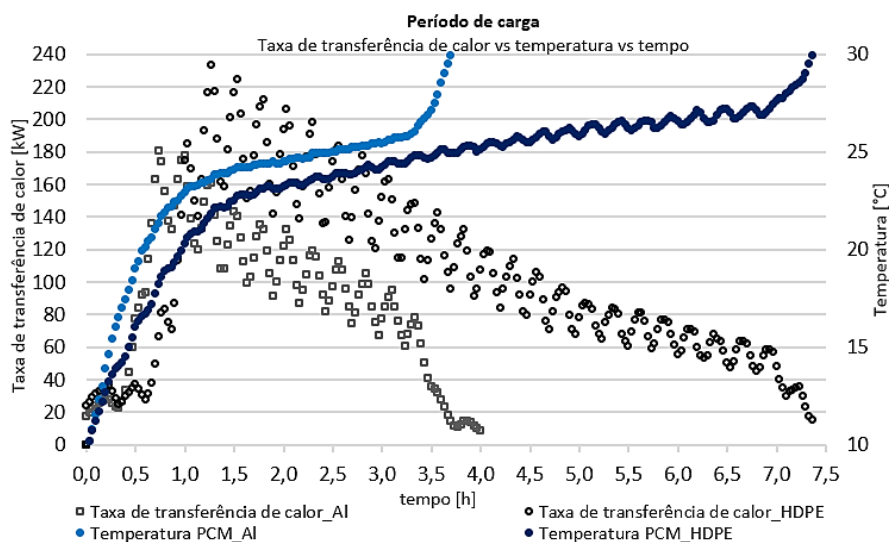


Figura 48. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM em função do tempo ao longo do processo de carga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.

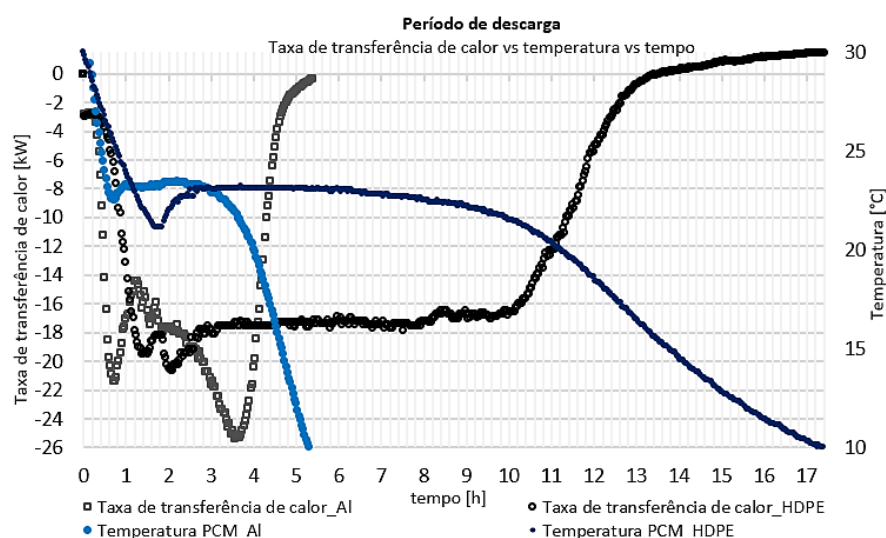


Figura 49. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM em função do tempo ao longo do processo de descarga, para as placas de alumínio e HDPE.

Como descrito anteriormente, a massa do PCM, a espessura e a condutividade térmica das macrocápsulas foram parâmetros que variaram de uma placa para a outra. Enquanto a condutividade térmica é uma propriedade termofísica do material das macrocápsulas, é possível, matematicamente, tornar os resultados obtidos independentes no que diz respeito à quantidade de PCM e à espessura do encapsulamento. Este método permite aferir de que modo é que as duas variáveis condicionam a diferença entre a transferência de calor do PCM nas duas placas no sistema desenvolvido.

Para tornar o sistema independente da massa de PCM, multiplicaram-se todos os termos das equações que definem a taxa de transferência de calor de carga e descarga do PCM (equações [14] e [16]) pelo mesmo fator, primeiro só para a massa de PCM $\left(\frac{1}{1,82}\right)$, sendo 1,82 kg a massa de PCM na placa de HDPE, em seguida para a espessura das cápsulas $\left(\frac{1}{0,002}\right)$, sendo 2 mm a espessura do invólucro de HDPE, e por último para ambas $\left(\frac{1}{1,82 \cdot 0,002}\right)$. Os gráficos das Figura 50 e Figura 51 representam a taxa de transferência de calor do PCM, independente da massa, ao longo da carga e descarga, respetivamente. Verifica-se que a diferença entre o máximo das curvas diminuiu, o que significa que, de certo modo, a diferença entre a quantidade de PCM entre as placas é um fator passível de ser considerado. Da mesma maneira, analisando os gráficos das Figura 52 e Figura 53, conclui-se que a espessura das cápsulas afeta consideravelmente a transferência de calor no PCM, uma vez que a diferença entre as curvas atenuou.

Neste sentido, visto que ambos os fatores influenciam a taxa de transferência de calor no PCM, considerou-se pertinente apresentar os dados, desta vez, independentes da massa de PCM e da espessura das placas simultaneamente, para a carga e descarga (ver Figura 54 e Figura 55). Apesar

de existirem claramente diferenças porque o material do macroencapsulamento não é o mesmo, o pico das curvas demonstra-se mais próximo do que antes, sem averiguar estas variáveis (rever Figura 48 e Figura 49), no entanto, a cápsula de HDPE continua a oferecer mais resistência à transferência de calor ao longo da carga do PCM devido à sua baixa condutividade térmica, pelo que é necessário fornecer mais energia para o material mudar de fase, neste caso. No caso da descarga, na placa de XPS inferior existe um armazenamento de energia devido ao facto da placa ter sido aquecida ao longo de várias horas no período de carga. A inércia térmica é mais notória no HDPE do que no alumínio, a temperatura do PCM é quase constante durante várias horas.

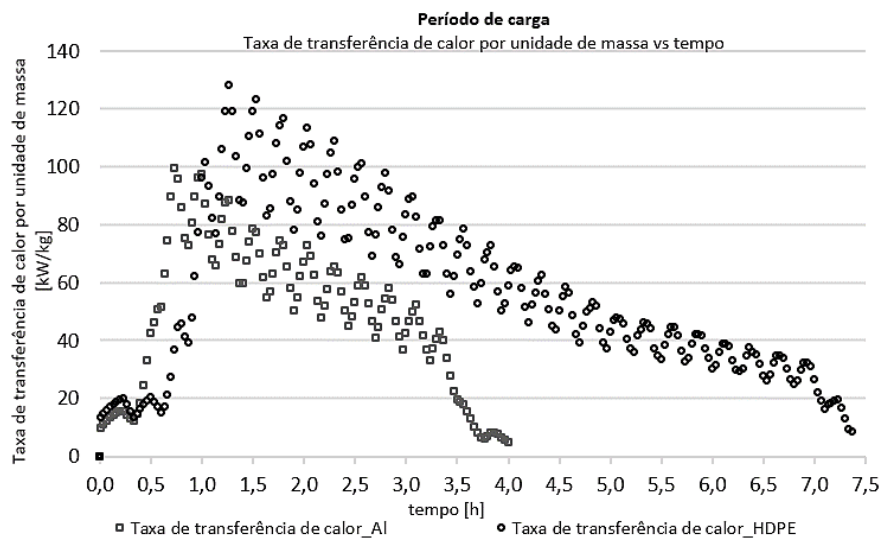


Figura 50. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da massa, em função do tempo ao longo do processo de carga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.

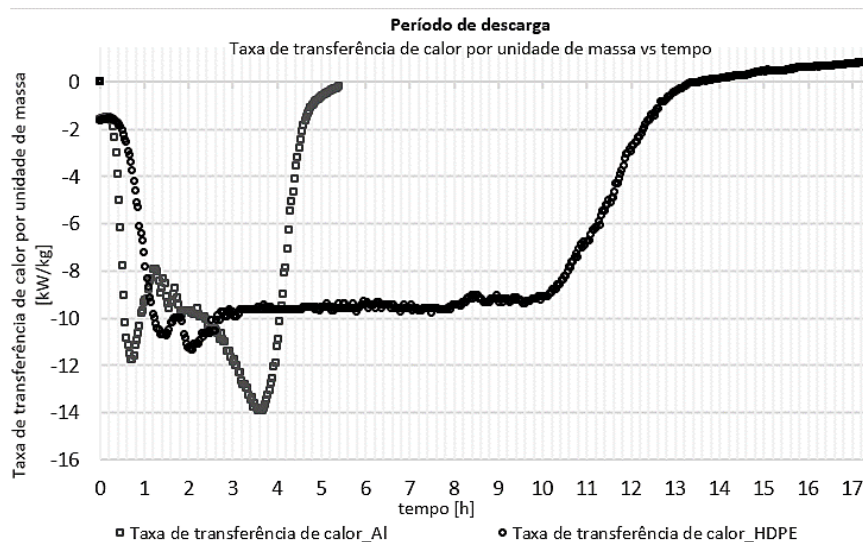


Figura 51. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da massa, em função do tempo ao longo do processo de descarga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.

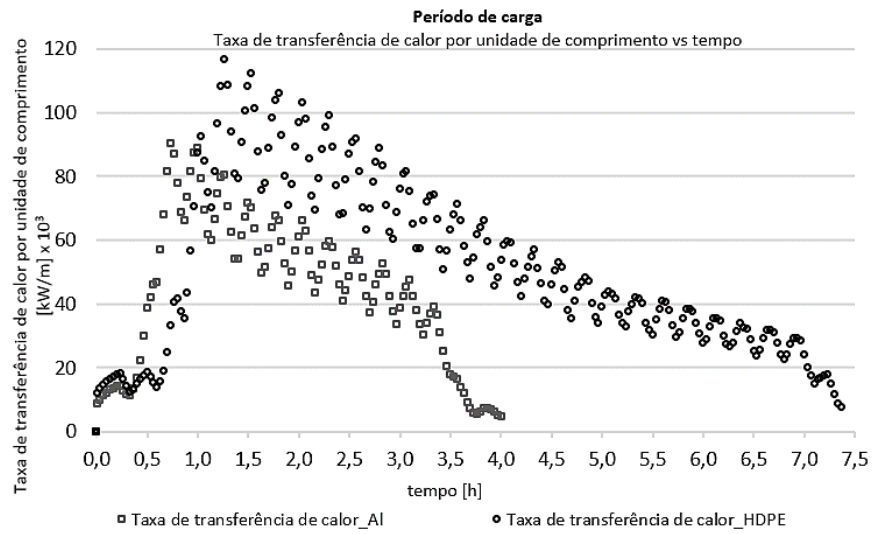


Figura 52. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da espessura da macrocápsula, em função do tempo ao longo do processo de carga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.

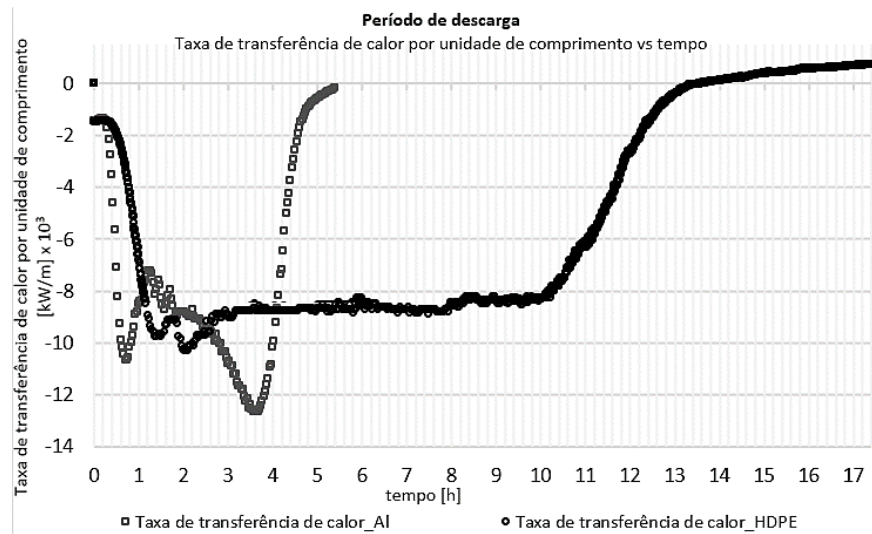


Figura 53. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da espessura da macrocápsula, em função do tempo ao longo do processo de descarga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.

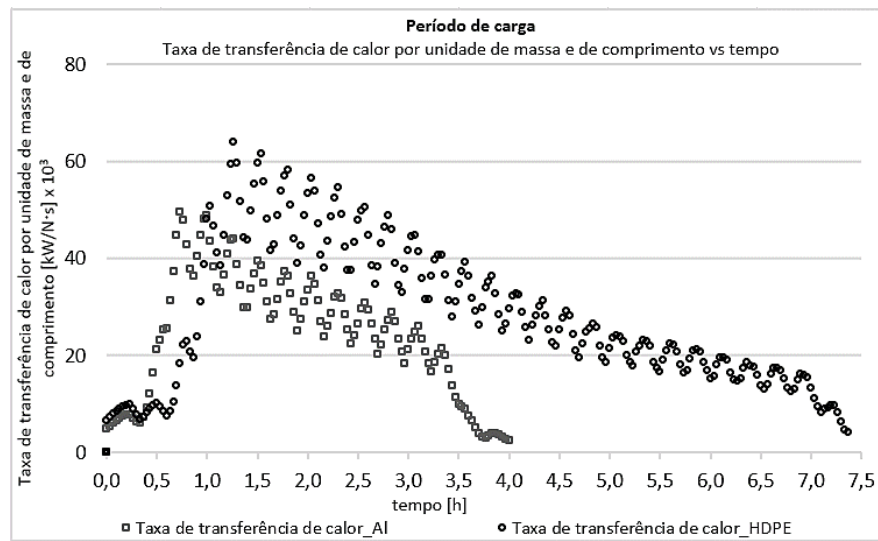


Figura 54. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da massa de PCM e da espessura da macrocápsula, em função do tempo ao longo do processo de carga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.

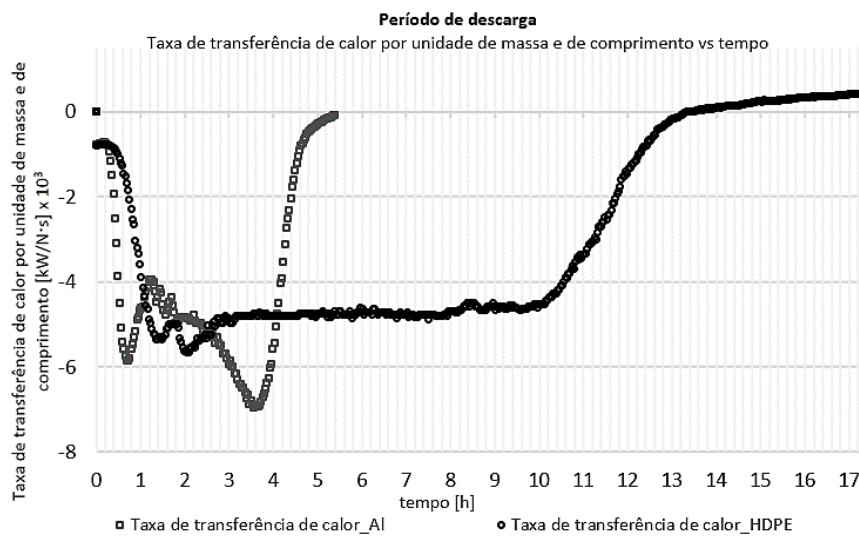


Figura 55. Evolução da taxa de transferência de calor do PCM, independente da massa de PCM e da espessura da macrocápsula, em função do tempo ao longo do processo de descarga, na experiência 2, para as placas de alumínio e HDPE.

5.2 Adequar macroencapsulamento a aplicações ativas de aquecimento ambiente

O uso de PCM macroencapsulado em sistemas ativos de aquecimento ambiente permite a redução do consumo energético, uma vez que o PCM auxilia os equipamentos elétricos, o que resulta na diminuição dos picos de procura e deslocamento de carga. Após a análise realizada no capítulo anterior, não pode dizer-se com clareza que existe uma macrocápsula “melhor” ou mais eficiente, porque depende da aplicação em causa e das condições do sistema num todo.

A energia solar é uma fonte de energia renovável, gratuita e ecológica, no entanto, não está disponível durante a noite ou ao longo das horas em que o tempo está nublado. Tomando como exemplo a aplicação ativa desenvolvida por Farid et al. [62] (permutador de calor PCM-ar), na estação de aquecimento, partindo do princípio de que a temperatura de mudança de fase se adequaria às amplitudes térmicas do ambiente exterior, dependendo do clima da zona onde fosse instalada a aplicação, a placa de alumínio seria a mais indicada nos dias em que se verificassem menos horas de radiação solar, porque o alumínio é um bom condutor, portanto, e pelo que já foi discutido, o PCM carregaria mais rápido. Por outro lado, nos dias com largas horas de sol, a placa de HDPE poderia também ser eficiente uma vez que o tempo de carga não seria problema. No entanto, no que concerne às horas de pico de procura, ao longo das quais o PCM é descarregado, no caso do alumínio, o PCM descarregaria mais rápido, ou seja, auxiliaria o sistema elétrico por menos tempo. Já para a placa de HDPE, com base no estudo realizado, o PCM levaria muito tempo a libertar todo o calor armazenado, o que seria vantajoso, pois significaria uma poupança de energia e, por conseguinte, dos custos energéticos. Said et al. [70] propuseram um permutador de calor PCM-ar híbrido com o mesmo macroencapsulamento, mas com PCM diferentes, cada um com intervalos de temperatura de mudança de fase adequados às temperaturas de cada estação, para, deste modo, a aplicação ativa ser eficiente tanto no inverno como no verão. Perante o exposto, e partindo do princípio de que, neste caso, o PCM é o mesmo, uma solução eficiente na estação de aquecimento, passaria por recorrer a ambas as macrocápsulas estudadas, ou seja, desenvolver um sistema híbrido, que colmataria as mudanças de tempo, por vezes imprevisíveis.

6. Conclusões e trabalhos futuros

6.1 Conclusões

Ambicionando um futuro mais sustentável, no qual o aumento pela procura de energia tornar-se-á cada vez maior, o ideal será que se recorra preferencialmente a fontes de energia renováveis. Assim, os PCM, flexíveis, seguros e de baixo custo, assumem um papel fundamental devido à sua célebre capacidade de armazenar grandes quantidades de calor num baixo volume, apesar de terem uma difusividade térmica muito baixa.

Neste contexto, desenvolveu-se e otimizou-se um sistema de armazenamento de energia térmica latente, com PCM macroencapsulado, e estudou-se a influência do macroencapsulamento ao longo dos processos de carga e descarga do PCM.

A comparação entre o HDPE e o alumínio como macrocápsulas para o mesmo PCM pode ser feita com base em vários critérios, incluindo a sua condutividade térmica, gama de temperaturas de fusão e solidificação, eficiência de encapsulamento e custo. Em termos de eficiência de encapsulamento, o alumínio oferece uma eficiência mais elevada do que o HDPE, o que quer dizer que é possível armazenar mais PCM numa cápsula do mesmo tamanho. Relativamente à condutividade térmica, a do alumínio é muito mais elevada do que a do HDPE, o que pode tornar o primeiro mais adequado para aplicações em que são importantes elevadas taxas de transferência de calor. Em termos de gama de temperaturas de fusão e solidificação, ambos os materiais oferecem gamas semelhantes para o PCM, o que os torna igualmente adequados para aplicações em que é necessária uma gama de temperaturas específica. Finalmente, em termos de custo, o alumínio é considerado uma opção de custo mais elevado do que o HDPE. De um modo geral, a escolha entre estes dois materiais de macrocápsulas depende dos requisitos específicos da aplicação, tais como a eficiência de encapsulamento desejada, a condutividade térmica, a durabilidade e as considerações de custo. Se a eficiência do encapsulamento e a elevada condutividade térmica forem fatores críticos, o alumínio pode ser considerado a melhor opção para incorporar o PCM, apesar do seu custo mais elevado. Se o custo for a principal preocupação e a aplicação não exigir uma elevada condutividade térmica, o HDPE pode ser a melhor opção para a macrocápsula.

Em suma, os PCM macroencapsulados oferecem uma solução promissora para o armazenamento de energia térmica em várias aplicações, para a redução dos consumos energéticos, e contribuem para a mitigação da pegada de carbono. É necessária mais investigação para otimizar o seu desempenho e reduzir o seu custo, mas os potenciais benefícios são significativos e justificam uma investigação contínua.

6.2 Trabalhos futuros

No seguimento do estudo realizado na presente dissertação, seria pertinente realizar os seguintes trabalhos:

1. Para o conjunto de placas manifestamente mais eficiente ao longo dos processos de carga e descarga do PCM, realizar mais ensaios para a mesma experiência e com uma temperatura ambiente menos díspar, de modo a uniformizar ao máximo o sistema e obter barras de erro, indicadoras da exatidão dos valores medidos.
2. Desenvolver um permutador de calor PCM-ar híbrido, partindo do princípio que foi sugerido (em 5.2), e aplicá-lo num ambiente real, para poder estudar o comportamento térmico do PCM e averiguar a eficiência do sistema, com base no método de instruir num sistema de armazenamento de calor latente, diferentes macrocápsulas para o mesmo PCM.
3. Investigar o efeito de diferentes tipos de PCM no desempenho de diferentes macrocápsulas. O estudo pode passar por comparar a condutividade térmica e a eficiência de encapsulamento de diferentes PCM, tais como ácidos gordos, misturas eutéicas e parafinas, quando encapsulados nas duas macrocápsulas.
4. Investigar a estabilidade a longo prazo das macrocápsulas em diferentes condições ambientais. Para tal, as macrocápsulas podem ser expostas a humidade elevada, radiações e temperaturas variáveis durante um período prolongado e medir a sua condutividade térmica, eficiência de encapsulamento e estabilidade.
5. Desenvolver um modelo numérico para prever o desempenho das macrocápsulas em diferentes condições de funcionamento, o que pode ser útil para otimizar a conceção das macrocápsulas para diferentes aplicações e para estudar o seu desempenho em diferentes condições climáticas.
6. Estudar a viabilidade económica da utilização das macrocápsulas em diferentes aplicações, comparando o custo da utilização do PCM macroencapsulado com outros sistemas de arrefecimento ou aquecimento existentes e analisando o período de retorno do investimento para diferentes cenários.
7. Investigar outros modelos, analíticos ou numéricos, que caracterizem o comportamento do PCM, e sobretudo a transferência de calor no PCM, visto que no estudo realizado, o calor específico efetivo foi diretamente incluído no cálculo da taxa de transferência de calor, pressupondo que no mesmo componente ($C_{eff\,erf}$) estariam implícitas as "três fases" do PCM - sólida, líquida e de transição de fase. Ainda neste âmbito, seria importante e exímio desenvolver novas formulações especificamente para a resolução do problema de mudança de fase no PCM.

Referências

- [1] H. Mehling e L. F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM*. em *Heat and Mass Transfer*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-68557-9.
- [2] C. Cárdenas-Ramírez, F. Jaramillo, e M. Gómez, «Systematic review of encapsulation and shape-stabilization of phase change materials», *Journal of Energy Storage*, vol. 30. Elsevier Ltd, 1 de Agosto de 2020. doi: 10.1016/j.est.2020.101495.
- [3] R. R. Gonçalves, «Estudo sobre a incorporação de PCM's em sistemas térmicos passivos», 2015.
- [4] T. Pacson, *Introduction to Phase Change Materials: Building Applications*. 2011.
- [5] C. P. C. do Amaral, «A nanotecnologia na construção: estudo experimental e numérico de soluções construtivas com materiais de mudança de fase», 2020.
- [6] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, e C. Castelain, «A review on phase change materials for thermal energy storage in buildings: Heating and hybrid applications», *Journal of Energy Storage*, vol. 33. Elsevier Ltd, 1 de Janeiro de 2021. doi: 10.1016/j.est.2020.101913.
- [7] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, e A. I. Fernández, «Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n. 3. pp. 1675–1695, Abril de 2011. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.018.
- [8] A. Sharma, R. Chauhan, M. Ali Kallioglu, V. Chinnasamy, e T. Singh, «A review of phase change materials (PCMs) for thermal storage in solar air heating systems», em *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2020, pp. 4357–4363. doi: 10.1016/j.matpr.2020.10.560.
- [9] P. Miguel e B. Teixeira, «Materiais de mudança de fase em processos de aquecimento: propriedades», 2013.
- [10] J. Schröder, *Some materials and measures to store latent heat*. Stuttgart, Germany: Proc. of IEA workshop on Latent heat stores, 1985.
- [11] Z. Khan, Z. Khan, e A. Ghafoor, «A review of performance

- enhancement of PCM based latent heat storage system within the context of materials, thermal stability and compatibility», *Energy Conversion and Management*, vol. 115. Elsevier Ltd, pp. 132–158, 1 de Maio de 2016. doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.045.
- [12] T. E. Alam, J. S. Dhau, D. Y. Goswami, e E. Stefanakos, «Macroencapsulation and characterization of phase change materials for latent heat thermal energy storage systems», *Appl Energy*, vol. 154, pp. 92–101, Set. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.04.086.
- [13] P. B. Salunkhe e P. S. Shembekar, «A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, n. 8. pp. 5603–5616, Outubro de 2012. doi: 10.1016/j.rser.2012.05.037.
- [14] M. K. Rathod e J. Banerjee, «Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 18. pp. 246–258, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2012.10.022.
- [15] S. S. Magendran *et al.*, «Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review», *Nano-Structures and Nano-Objects*, vol. 20. Elsevier B.V., 1 de Outubro de 2019. doi: 10.1016/j.nanoso.2019.100399.
- [16] S. Mousavi, B. Rismanchi, S. Brey, e L. Aye, «PCM embedded radiant chilled ceiling: A state-of-the-art review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 151. Elsevier Ltd, 1 de Novembro de 2021. doi: 10.1016/j.rser.2021.111601.
- [17] M. N. A. Hawlader, M. S. Uddin, e M. Khin, «Microencapsulated PCM thermal-energy storage system», 2003. [Em linha]. Disponível em: www.elsevier.com/locate/apenergy
- [18] Y. E. Milián, A. Gutiérrez, M. Grágeda, e S. Ushak, «A review on encapsulation techniques for inorganic phase change materials and the influence on their thermophysical properties», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73. Elsevier Ltd, pp. 983–999, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.01.159.
- [19] P. K. S. Rathore e S. K. Shukla, «Potential of macroencapsulated pcm for thermal energy storage in buildings: A comprehensive

- review», *Construction and Building Materials*, vol. 225. Elsevier Ltd, pp. 723–744, 20 de Novembro de 2019. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.221.
- [20] X. Chen, H. Yu, Y. Gao, L. Wang, e G. Wang, «The marriage of two-dimensional materials and phase change materials for energy storage, conversion and applications», *EnergyChem*, vol. 4, n. 2. Elsevier B.V., 1 de Março de 2022. doi: 10.1016/j.enchem.2022.100071.
- [21] D. Zhou, S. Wu, Z. Wu, e X. Yu, «Thermal performance analysis of multi-slab phase change thermal energy storage unit with heat transfer enhancement approaches», *Renew Energy*, vol. 172, pp. 46–56, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.02.144.
- [22] K. A. R. Ismail e R. I. R. Moraes, «A numerical and experimental investigation of different containers and PCM options for cold storage modular units for domestic applications», *Int J Heat Mass Transf*, vol. 52, n. 19–20, pp. 4195–4202, Set. 2009, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.04.031.
- [23] M. Veerappan, S. Kalaiselvam, S. Iniyan, e R. Goic, «Phase change characteristic study of spherical PCMs in solar energy storage», *Solar Energy*, vol. 83, n. 8, pp. 1245–1252, Ago. 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.02.006.
- [24] J. Wei, Y. Kawaguchi, S. Hirano, e H. Takeuchi, «Study on a PCM heat storage system for rapid heat supply», *Appl Therm Eng*, vol. 25, n. 17–18, pp. 2903–2920, Dez. 2005, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.02.014.
- [25] Y. Chen, S. Zhang, Q. Zhang, Y. Chen, e Y. Zhang, «Composite phase change materials prepared by encapsulating paraffin in PVC macrocapsules», *Thermochim Acta*, vol. 578, pp. 10–14, Fev. 2014, doi: 10.1016/j.tca.2013.12.018.
- [26] A. Jamekhorshid, S. M. Sadrameli, e M. Farid, «A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 531–542, Março de 2014. doi: 10.1016/j.rser.2013.12.033.
- [27] W. Su, J. Darkwa, e G. Kokogiannakis, «Review of solid-liquid phase change materials and their encapsulation technologies»,

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 48. Elsevier Ltd, pp. 373–391, 1 de Agosto de 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.04.044.
- [28] C. Liu, Z. Rao, J. Zhao, Y. Huo, e Y. Li, «Review on nanoencapsulated phase change materials: Preparation, characterization and heat transfer enhancement», *Nano Energy*, vol. 13. Elsevier Ltd, pp. 814–826, 1 de Abril de 2015. doi: 10.1016/j.nanoen.2015.02.016.
- [29] J. Giro-Paloma, M. Martínez, L. F. Cabeza, e A. I. Fernández, «Types, methods, techniques, and applications for microencapsulated phase change materials (MPCM): A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53. Elsevier Ltd, pp. 1059–1075, 1 de Janeiro de 2016. doi: 10.1016/j.rser.2015.09.040.
- [30] N. Soares, T. Matias, L. Durães, P. N. Simões, e J. J. Costa, «Thermophysical characterization of paraffin-based PCMs for low temperature thermal energy storage applications for buildings», *Energy*, vol. 269, Abr. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.126745.
- [31] P. K. S. Rathore, N. K. Gupta, D. Yadav, S. K. Shukla, e S. Kaul, «Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: an updated review.», *Sustain Cities Soc*, vol. 79, p. 103690, Abr. 2022, doi: 10.1016/j.scs.2022.103690.
- [32] E. Alehosseini e S. M. Jafari, «Nanoencapsulation of phase change materials (PCMs) and their applications in various fields for energy storage and management», *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 283. Elsevier B.V., 1 de Setembro de 2020. doi: 10.1016/j.cis.2020.102226.
- [33] C. J. Ho, Y. W. Guo, T. F. Yang, S. Rashidi, e W. M. Yan, «Numerical study on forced convection of water-based suspensions of nanoencapsulated PCM particles/Al₂O₃ nanoparticles in a mini-channel heat sink», *Int J Heat Mass Transf*, vol. 157, Ago. 2020, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119965.
- [34] H. Peng *et al.*, «A review on synthesis, characterization and application of nanoencapsulated phase change materials for thermal energy storage systems», *Appl Therm Eng*, vol. 185, Fev.

- 2021, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116326.
- [35] B. Y. Yun, S. Yang, H. M. Cho, S. J. Chang, e S. Kim, «Design and analysis of phase change material based floor heating system for thermal energy storage», *Environ Res*, vol. 173, pp. 480–488, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.envres.2019.03.049.
- [36] V. M. Swami, A. T. Autee, e A. T. R., «Experimental analysis of solar fish dryer using phase change material», *J Energy Storage*, vol. 20, pp. 310–315, Dez. 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.09.016.
- [37] T. Bouhal, T. el Rhafiki, T. Kousksou, A. Jamil, e Y. Zeraouli, «PCM addition inside solar water heaters: Numerical comparative approach», *J Energy Storage*, vol. 19, pp. 232–246, Out. 2018, doi: 10.1016/j.est.2018.08.005.
- [38] V. V. Tyagi e D. Buddhi, «PCM thermal storage in buildings: A state of art», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, n. 6. pp. 1146–1166, Agosto de 2007. doi: 10.1016/j.rser.2005.10.002.
- [39] S. Nishad e I. Krupa, «Phase change materials for thermal energy storage applications in greenhouses: A review», *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52. Elsevier Ltd, 1 de Agosto de 2022. doi: 10.1016/j.seta.2022.102241.
- [40] F. Hassan *et al.*, «Recent advancements in latent heat phase change materials and their applications for thermal energy storage and buildings: A state of the art review», *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 49, Fev. 2022, doi: 10.1016/j.seta.2021.101646.
- [41] H. Mehling, M. Brütting, e T. Haussmann, «PCM products and their fields of application - An overview of the state in 2020/2021», *J Energy Storage*, vol. 51, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104354.
- [42] Q. Al-Yasiri e M. Szabó, «Selection of phase change material suitable for building heating applications based on qualitative decision matrix», *Energy Conversion and Management: X*, vol. 12, Dez. 2021, doi: 10.1016/j.ecmx.2021.100150.
- [43] M. Iten, S. Liu, e A. Shukla, «A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61. Elsevier Ltd, pp. 175–186, 1 de Agosto de 2016. doi:

- 10.1016/j.rser.2016.03.007.
- [44] Q. Al-Yasiri e M. Szabó, «Incorporation of phase change materials into building envelope for thermal comfort and energy saving: A comprehensive analysis», *Journal of Building Engineering*, vol. 36. Elsevier Ltd, 1 de Abril de 2021. doi: 10.1016/j.jobbe.2020.102122.
- [45] A. Mourid, M. el Alami, e F. Kuznik, «Experimental investigation on thermal behavior and reduction of energy consumption in a real scale building by using phase change materials on its envelope», *Sustain Cities Soc*, vol. 41, pp. 35–43, Ago. 2018, doi: 10.1016/j.scs.2018.04.031.
- [46] K. Kant, A. Shukla, e A. Sharma, «Heat transfer studies of building brick containing phase change materials», *Solar Energy*, vol. 155, pp. 1233–1242, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.07.072.
- [47] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, e D. Quenard, «Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material», *Energy Build*, vol. 38, n. 6, pp. 673–681, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.enbuild.2005.11.002.
- [48] S. Liu e Y. Li, «Heating performance of a solar chimney combined PCM: A numerical case study», *Energy Build*, vol. 99, pp. 117–130, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.04.020.
- [49] «DuPont™ EnErgain® Energy-saving thermal mass systems».
- [50] E. Meng, H. Yu, e B. Zhou, «Study of the thermal behavior of the composite phase change material (PCM) room in summer and winter», *Appl Therm Eng*, vol. 126, pp. 212–225, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.07.110.
- [51] Z. Dong, H. Cui, W. Tang, D. Chen, e H. Wen, «Development of hollow steel ball macro-encapsulated PCM for thermal energy storage concrete», *Materials*, vol. 9, n. 1, 2016, doi: 10.3390/ma9010059.
- [52] A. Figueiredo, F. Rebelo, A. Samagaio, R. Vicente, e J. Lira, «Design and Thermal Characterization of Two Construction Solutions with and without Incorporation of Macroencapsulated PCM», *Infrastructures (Basel)*, vol. 7, n. 3, Mar. 2022, doi: 10.3390/infrastructures7030027.
- [53] B. Larwa, S. Cesari, e M. Bottarelli, «Study on thermal

- performance of a PCM enhanced hydronic radiant floor heating system», *Energy*, vol. 225, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120245.
- [54] Q. Al-Yasiri e M. Szabó, «Energetic and thermal comfort assessment of phase change material passively incorporated building envelope in severe hot Climate: An experimental study», *Appl Energy*, vol. 314, Mai. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118957.
- [55] «American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers», 2020. https://ashrae.iwrapper.com/ASHRAE_PREVIEW_ONLY_STANDARDS/STD_55_2020 (acedido 22 de Janeiro de 2022).
- [56] A. Real, V. García, L. Domenech, J. Renau, N. Montés, e F. Sánchez, «Improvement of a heat pump based HVAC system with PCM thermal storage for cold accumulation and heat dissipation», *Energy Build*, vol. 83, pp. 108–116, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.04.029.
- [57] L. F. Cabeza, M. Ibáñez, C. Solé, J. Roca, e M. Nogués, «Experimentation with a water tank including a PCM module», *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, n. 9, pp. 1273–1282, Mai. 2006, doi: 10.1016/j.solmat.2005.08.002.
- [58] H. Mehling, L. F. Cabeza, S. Hippeli, e S. Hiebler, «PCM-module to improve hot water heat stores with stratification», 2003. [Em linha]. Disponível em: www.elsevier.com/locate/renene
- [59] A. Saxena, N. Agarwal, e E. Cuce, «Thermal performance evaluation of a solar air heater integrated with helical tubes carrying phase change material», *J Energy Storage*, vol. 30, Ago. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101406.
- [60] P. Dolado, A. Lazaro, J. M. Marin, e B. Zalba, «Characterization of melting and solidification in a real scale PCM-air heat exchanger: Numerical model and experimental validation», *Energy Convers Manag*, vol. 52, n. 4, pp. 1890–1907, Abr. 2011, doi: 10.1016/j.enconman.2010.11.017.
- [61] N. Stathopoulos, M. el Mankibi, R. Issoglio, P. Michel, e F. Haghghat, «Air-PCM heat exchanger for peak load management: Experimental and simulation», *Solar Energy*, vol. 132, pp. 453–

- 466, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.03.030.
- [62] G. Gholamibozanjani e M. Farid, «Application of an active PCM storage system into a building for heating/cooling load reduction», *Energy*, vol. 210, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118572.
- [63] «Thermal Energy Storage, TES, integrated thermal management applications».
https://www.pcmproducts.net/Thermal_Energy_Storage.htm
(acedido 21 de Janeiro de 2022).
- [64] «Rubitherm GmbH».
<https://www.rubitherm.eu/index.php/produktkategorie/organische-pcm-rt> (acedido 22 de Janeiro de 2022).
- [65] R. Ansuini, R. Larghetti, A. Giretti, e M. Lemma, «Radiant floors integrated with PCM for indoor temperature control», *Energy Build*, vol. 43, n. 11, pp. 3019–3026, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.07.018.
- [66] G. Wang, C. Xu, G. Wei, e X. Du, «Numerical study of a novel dual-PCM thermal energy storage structure filled with inorganic salts and metal alloy as the PCMs», em *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 4423–4428. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.774.
- [67] N. Morovat, A. K. Athienitis, J. A. Candanedo, e V. Dermardiros, «Simulation and performance analysis of an active PCM-heat exchanger intended for building operation optimization», *Energy Build*, vol. 199, pp. 47–61, Set. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.06.022.
- [68] G. Gholamibozanjani e M. Farid, «Experimental and mathematical modeling of an air-PCM heat exchanger operating under static and dynamic loads», *Energy Build*, vol. 202, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109354.
- [69] M. Palacio, C. Ramírez, M. Carmona, e C. Cortés, «Effect of phase-change materials in the performance of a solar air heater», *Solar Energy*, vol. 247, pp. 385–396, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.solener.2022.10.046.
- [70] M. A. Said e H. Hassan, «Impact of energy storage of new hybrid system of phase change materials combined with air-conditioner on its heating and cooling performance», *J Energy Storage*, vol. 36, Abr. 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102400.

- [71] L. F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, e A. I. Fernández, «Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n. 3. pp. 1675–1695, Abril de 2011. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.018.
- [72] «PCM-ClimSel». <https://www.climator.com/en/pcm-climsel> (acedido 23 de Janeiro de 2022).
- [73] «CRISTOPIA : Solução de armazenamento de energia térmica - THERMOFIN». <https://thermofin.net/products/cristopia-thermal-energy-storage/> (acedido 23 de Janeiro de 2022).
- [74] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, e D. P. Dewitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7ed. 2014.
- [75] M. Thonon, G. Fraisse, L. Zalewski, e M. Pailha, «Towards a better analytical modelling of the thermodynamic behaviour of phase change materials», *J Energy Storage*, vol. 32, Dez. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101826.

Anexos

Os anexos da presente dissertação incluem os desenhos ortográficos com as diferentes vistas das placas de alumínio, HDPE e XPS, desenhadas em Solidworks (Anexo A: Solidworks CAD), e os respectivos desenhos técnicos (Anexo B: Desenhos técnicos). Posteriormente, apresentam-se os aparatos experimentais das experiências realizadas para as duas placas, alumínio e HDPE (Anexo C: Experiências realizadas). O último anexo destina-se à análise paramétrica realizada para eleger a experiência mais eficiente para cada uma das placas, a partir da qual se realizou o estudo do macroencapsulamento ao longo dos processos de carga e descarga do PCM (Anexo D: Análise paramétrica).

Anexo A: Solidworks CAD

Nesta secção são apresentados os desenhos ortográficos com as vistas de frente, de trás e a representação isométrica das placas de alumínio e HDPE (Figura A.1 a Figura A.7), bem como dos respetivos moldes de XPS (Figura A.8 a Figura A.10), desenhados em 3D, com recurso ao *software* Solidworks.

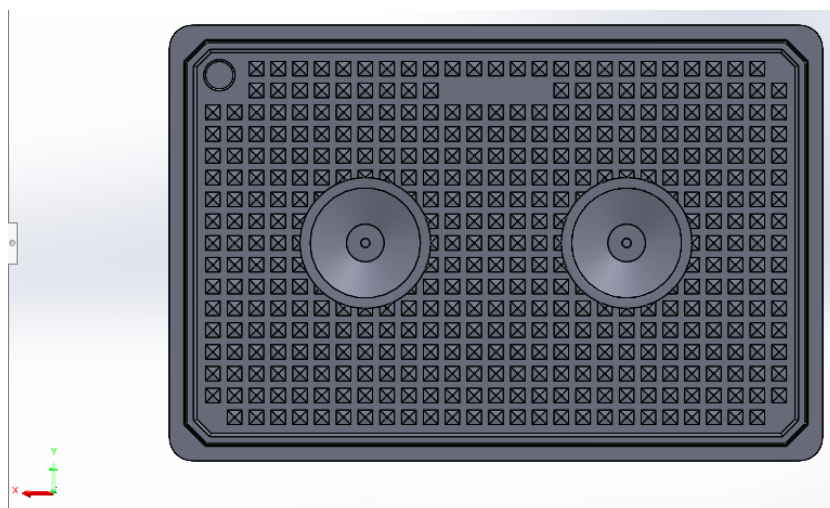


Figura A.1 Vista de trás da placa de alumínio (*Solidworks*).

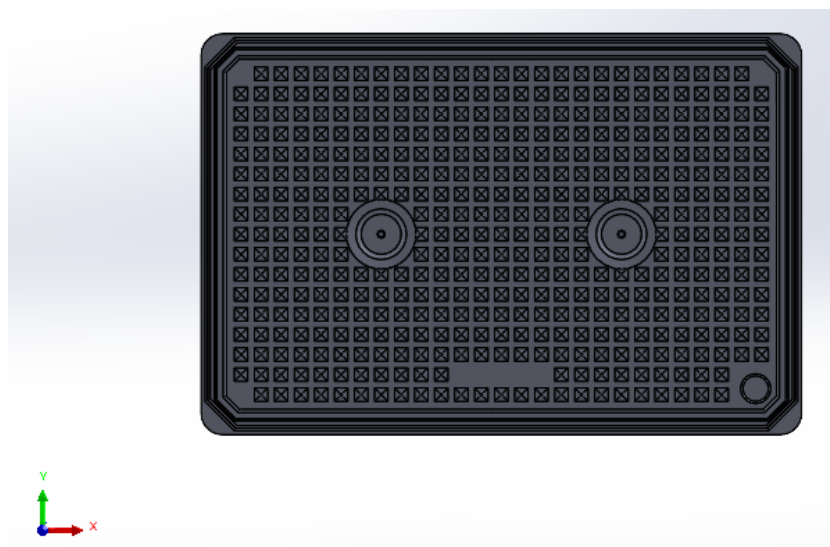


Figura A.2 Vista de frente da placa de alumínio (*Solidworks*).

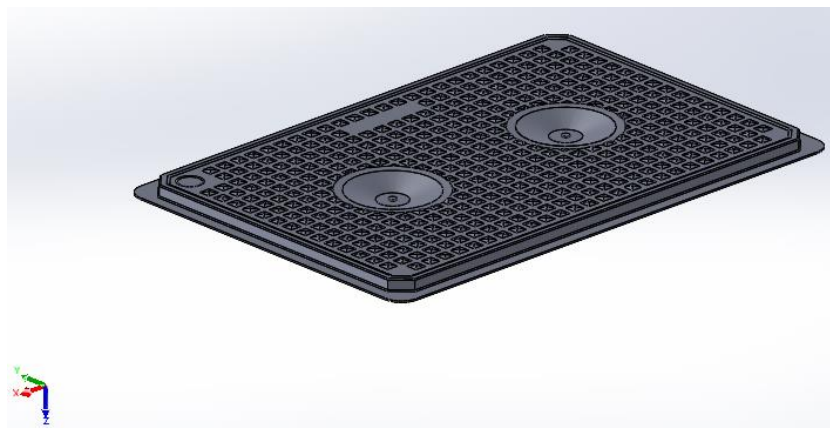


Figura A.3 Representação isométrica da placa de alumínio vista de trás (Solidworks).

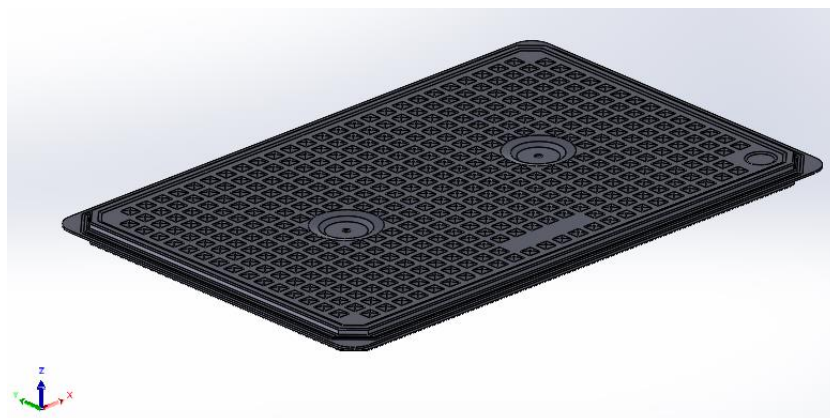


Figura A.4 Representação isométrica da placa de alumínio vista de frente (Solidworks).

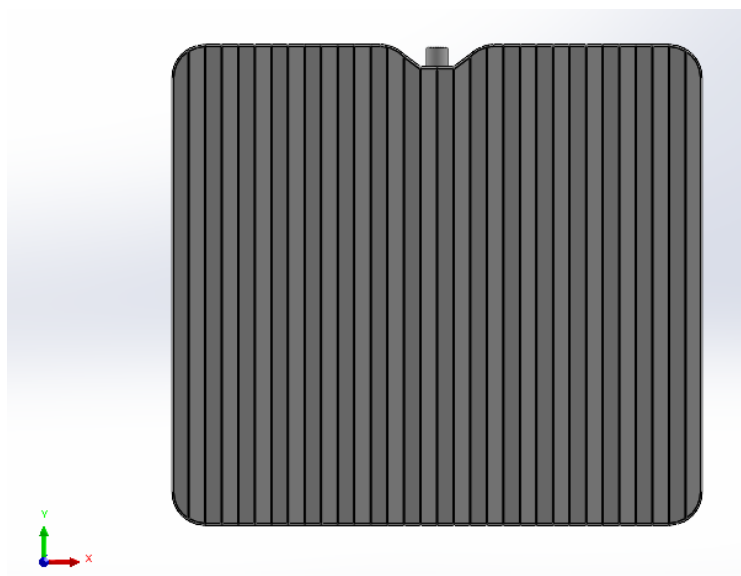


Figura A.5 Vista de frente da placa de HDPE (Solidworks).

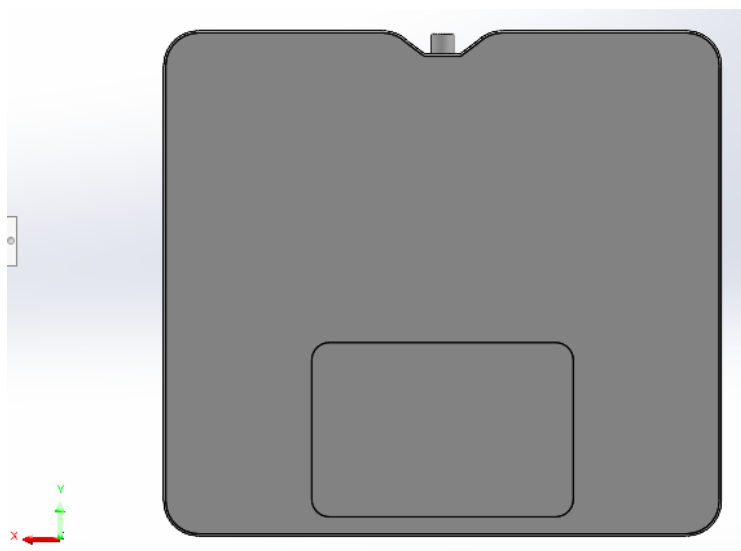


Figura A.6 Vista de trás da placa de HDPE (Solidworks).

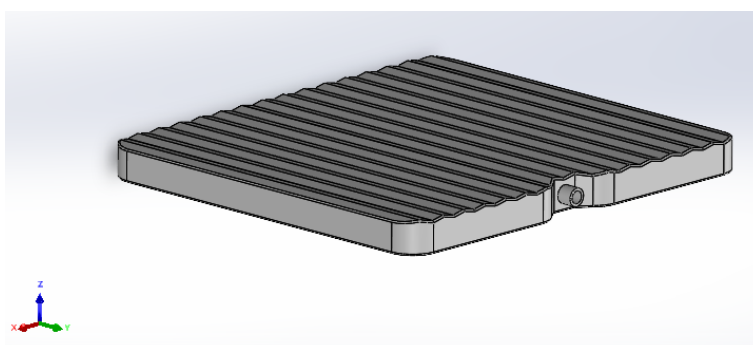


Figura A.7 Representação isométrica da placa de HDPE (Solidworks).

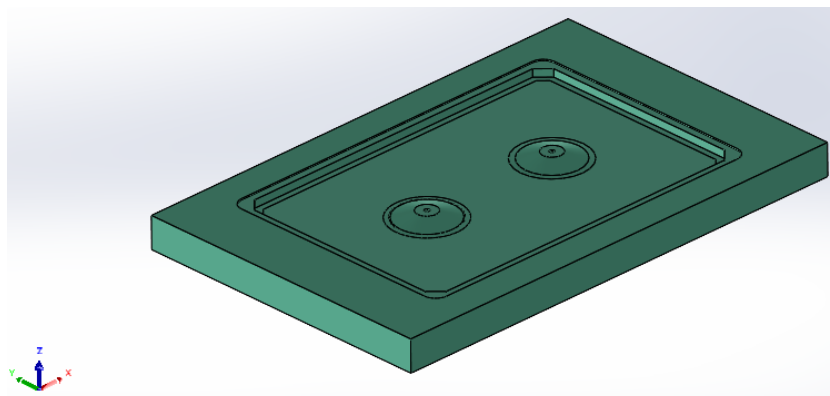


Figura A.8 Representação isométrica do molde inferior da placa de alumínio (*Solidworks*).

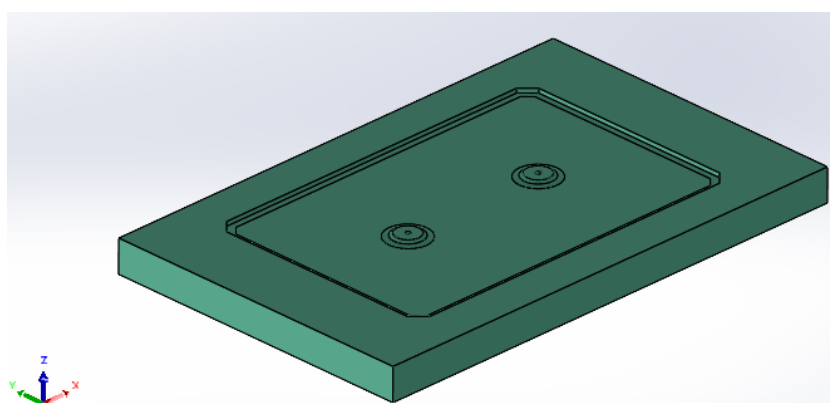


Figura A.9 Representação isométrica do molde superior da placa de alumínio (*Solidworks*).

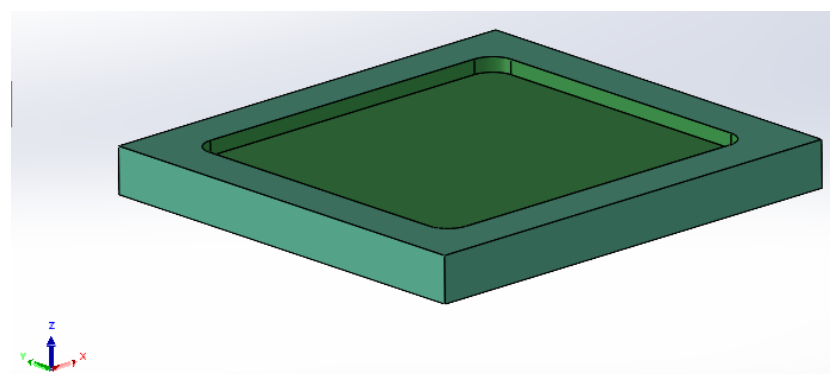


Figura A.10 Representação isométrica do molde superior/inferior da placa de HDPE (*Solidworks*).

Anexo B: Desenhos técnicos

Este apêndice inclui os desenhos técnicos das macrocápsulas e dos moldes de XPS (Figura B.1 a Figura B.5).

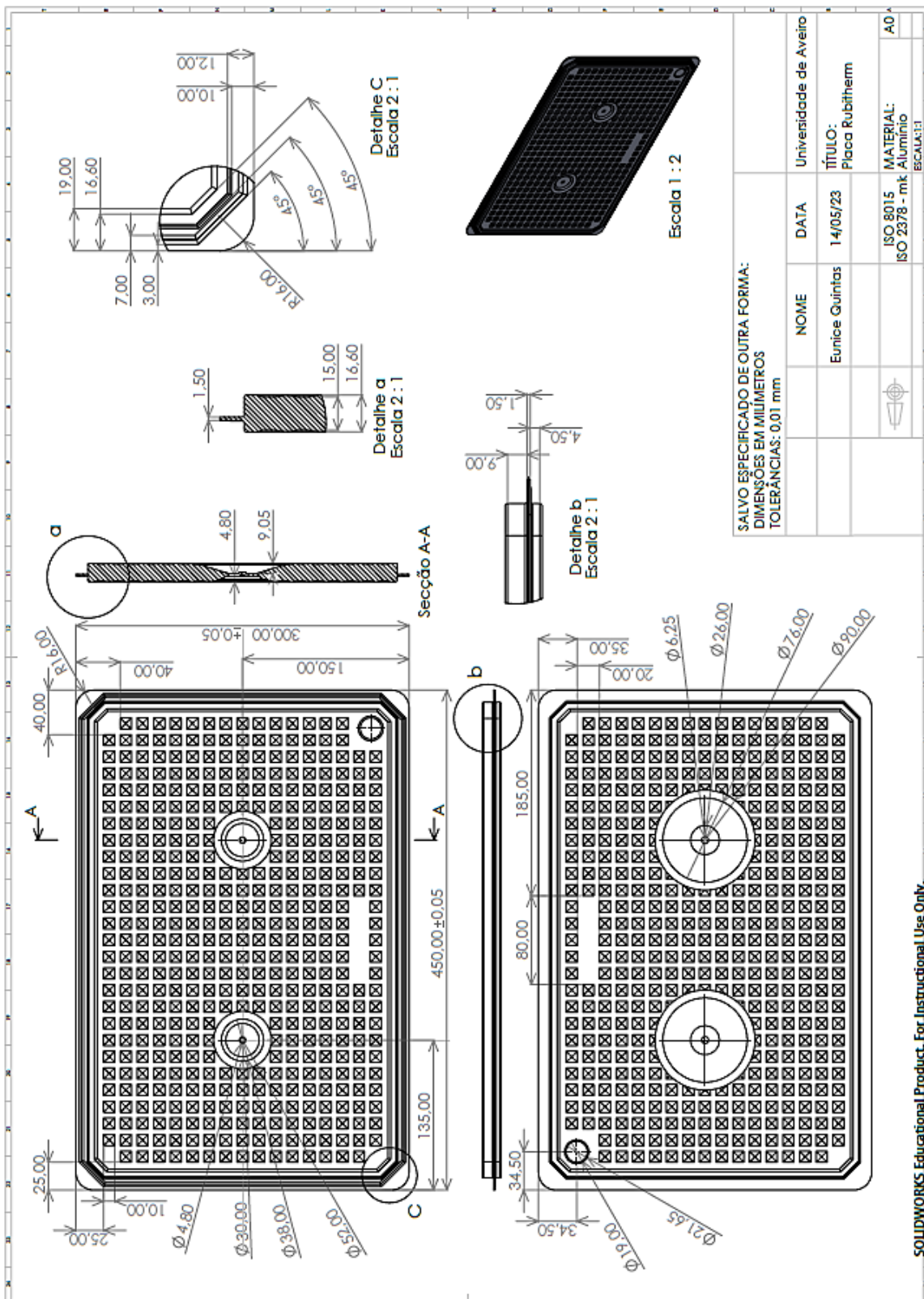


Figura B.1 Desenho técnico da placa de alumínio.

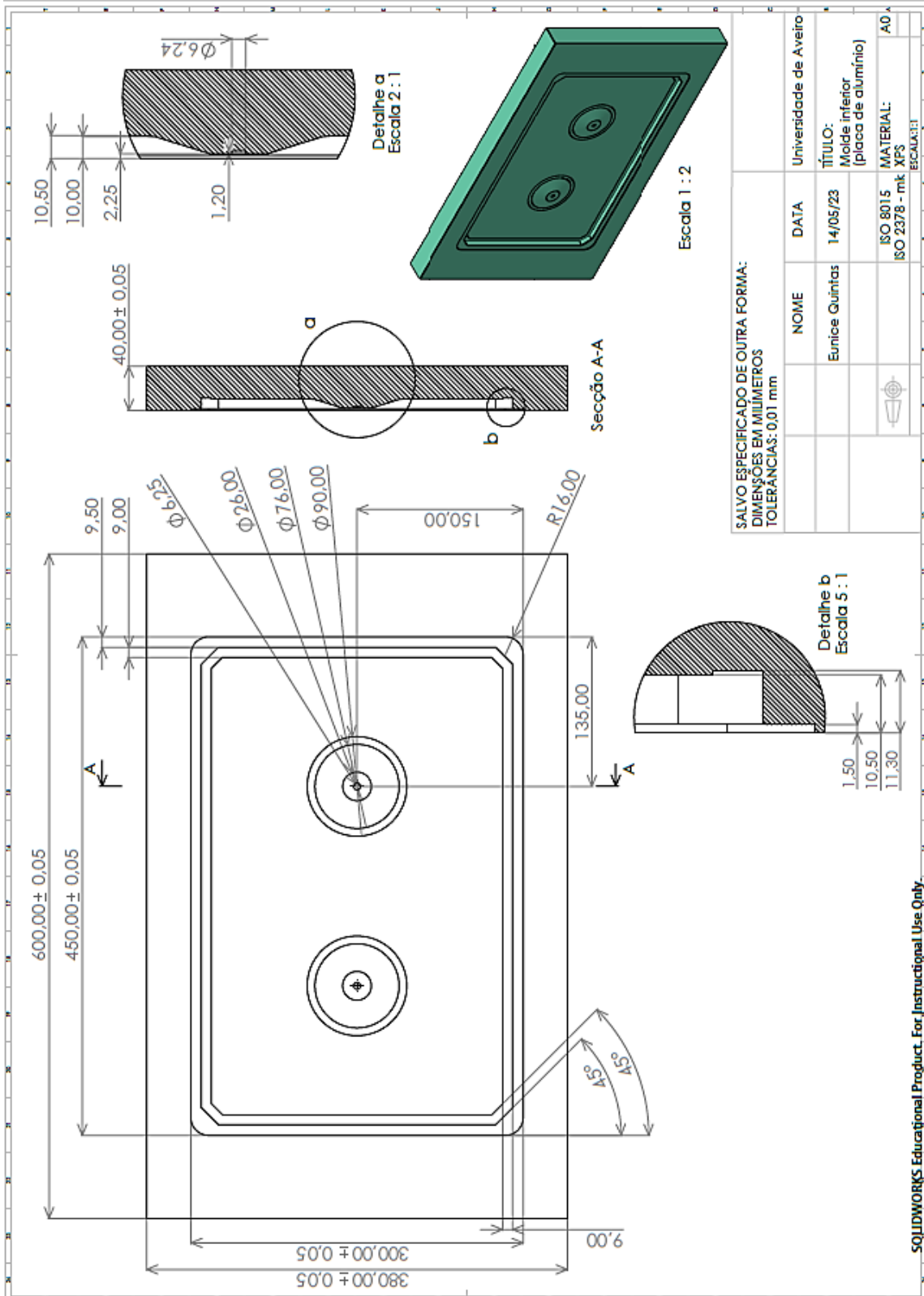


Figura B.2 Desenho técnico do molde inferior de XPS para a placa de alumínio.

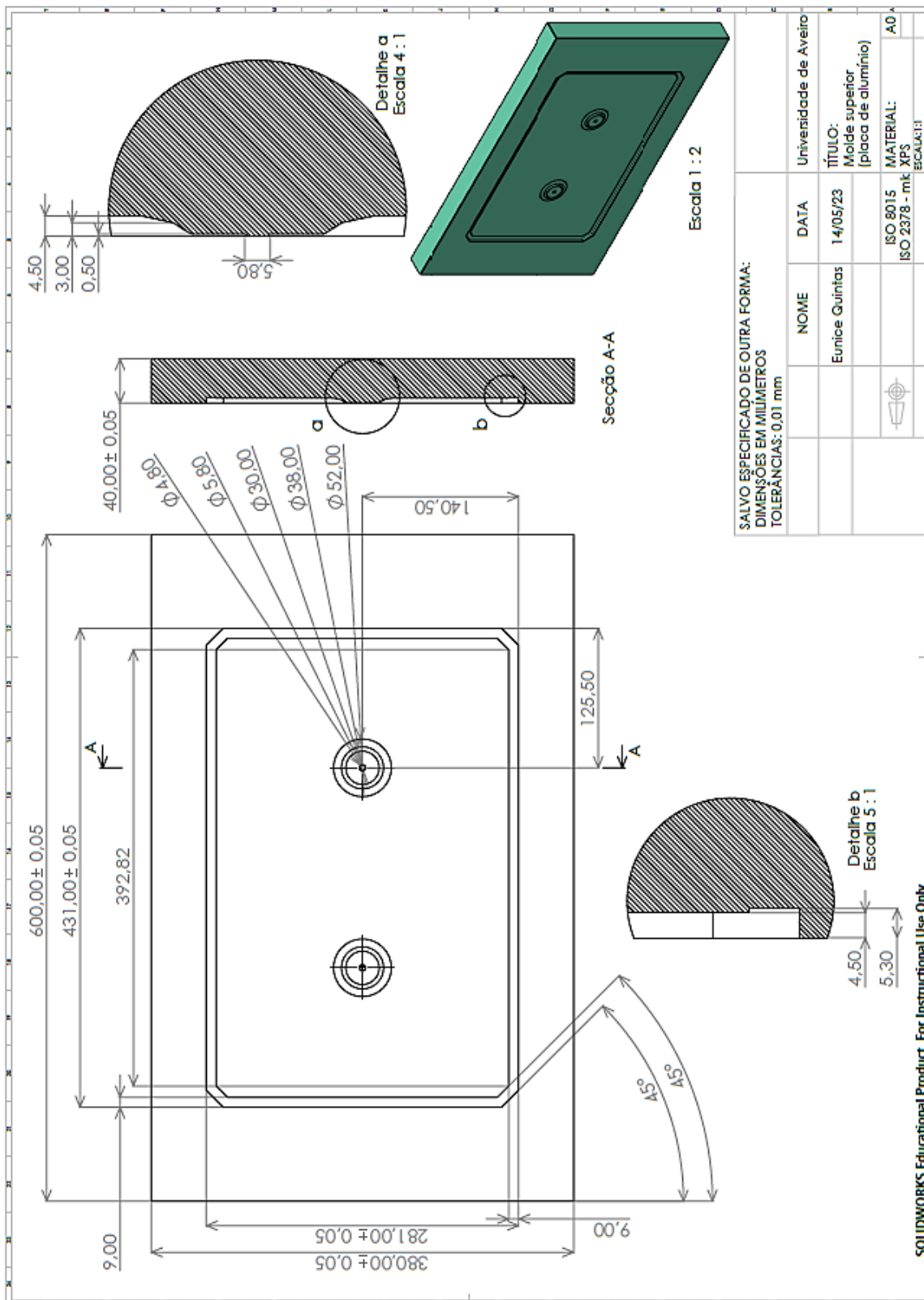


Figura B.3 Desenho técnico do molde superior de XPS para a placa de alumínio.

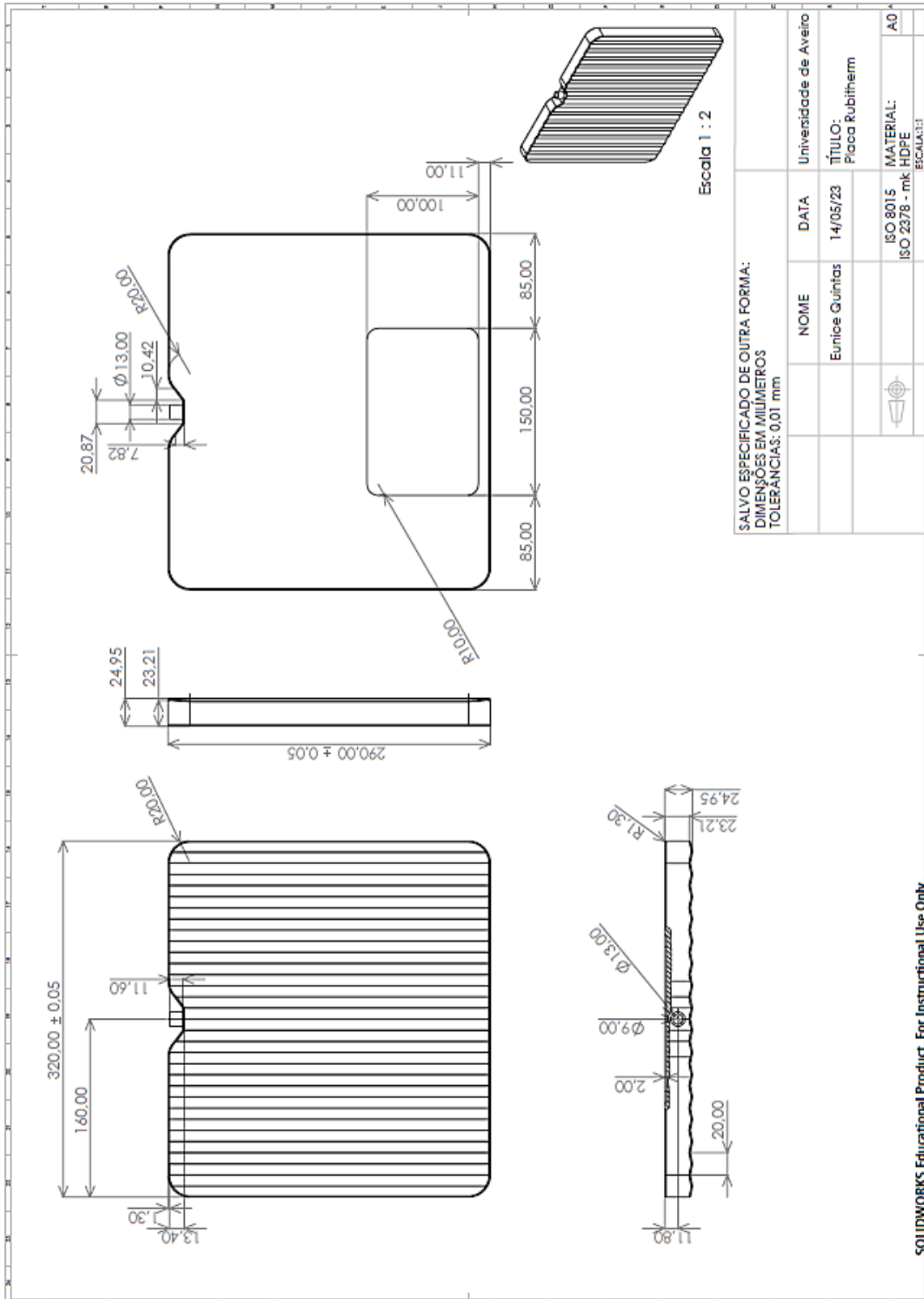


Figura B.4 Desenho técnico da placa de HDPE.

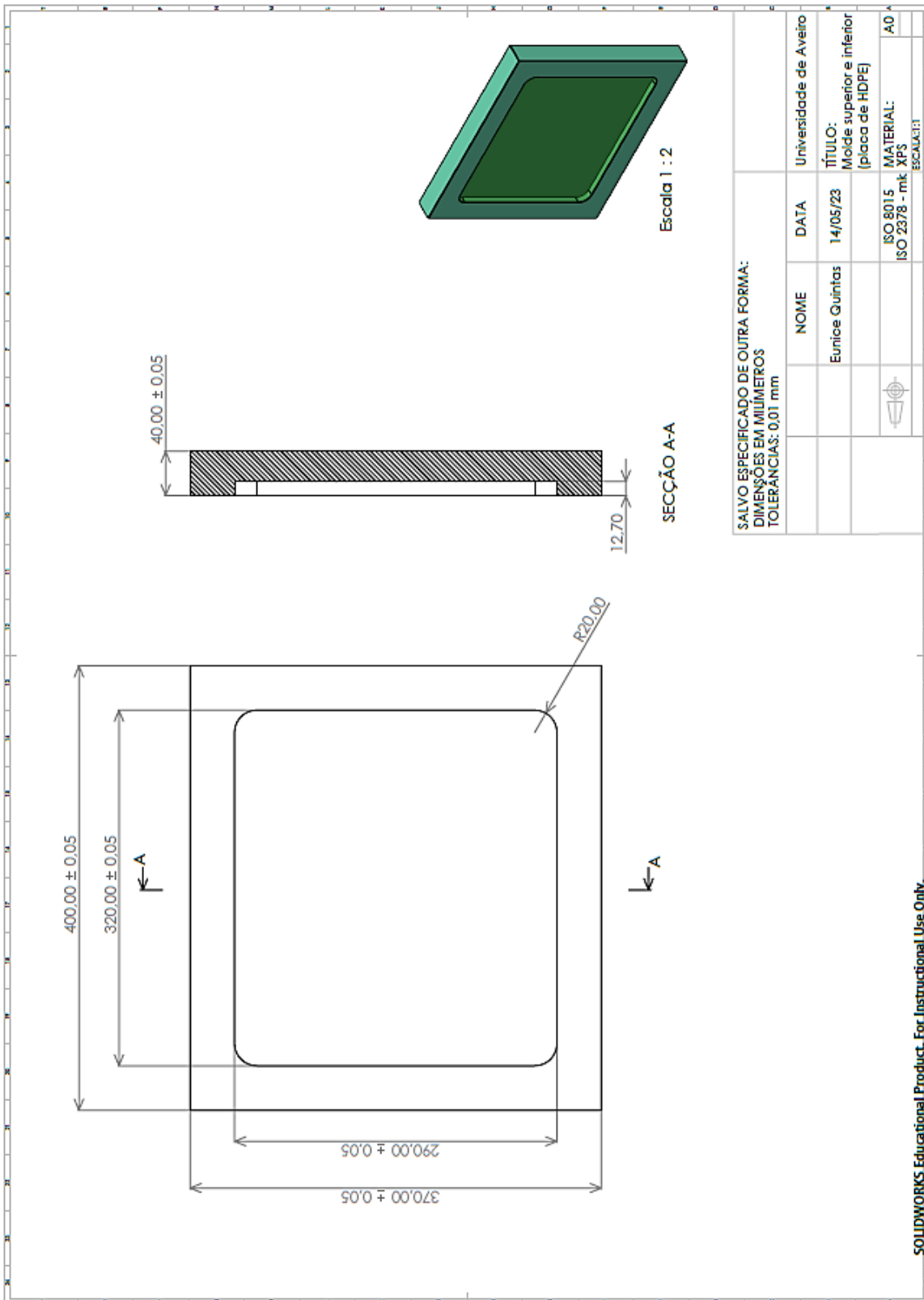


Figura B.5 Desenho técnico do molde superior/inferior de XPS para a placa de HDPE.

Anexo C: Experiências realizadas

Descarga

As Figura C.1 e Figura C.2 ilustram o aparato experimental do processo de descarga do PCM em todas as experiências, com um ST de -5°C , mas também podem representar o processo de carga da experiência 1 de cada placa, com o ST do banho térmico a 40°C .

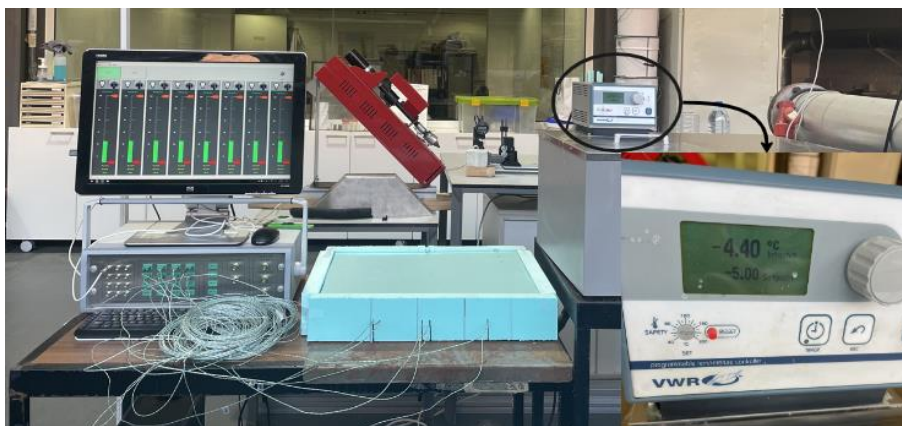


Figura C.1 Aparato experimental da experiência 1 (descarga), para a placa de alumínio.



Figura C.2 Aparato experimental da experiência 1 (descarga), para a placa de HDPE.

Carga

Experiência 2

A Figura C.3 representa o ensaio efetuado para realizar a carga do PCM na experiência 2, para a placa de alumínio, totalmente isolada com XPS, que se deu com a placa aquecedora de IV. Na Figura C.4 observa-se o mesmo processo, mas para a placa de HDPE.



Figura C.3 Aparato experimental da experiência 2 (carga), para a placa de alumínio.

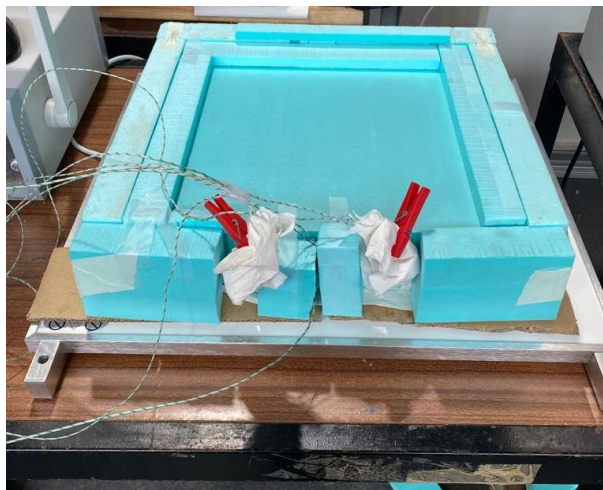


Figura C.4 Aparato experimental da experiência 2 (carga), para a placa de HDPE.

Experiência 3

Na experiência 3, as fontes de calor responsáveis pela carga do PCM foram a serpentina com fluido refrigerante a 40°C e a placa aquecedora de IV, com 300W. As placas de alumínio (Figura C.5) e de HDPE (Figura C.6) encontravam-se totalmente isoladas com XPS.



Figura C.5 Aparato experimental da experiência 3 (carga), para a placa de alumínio.

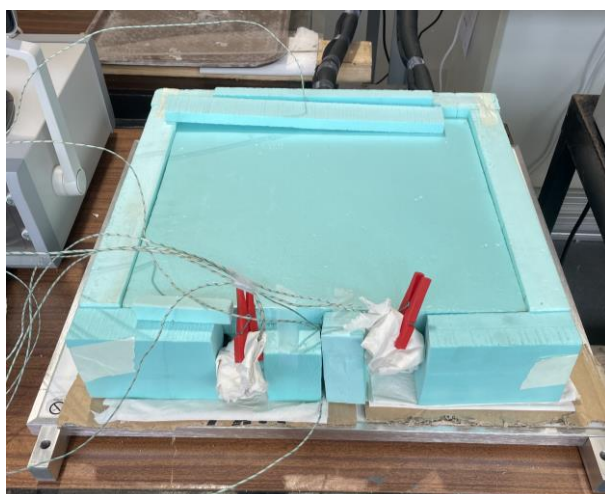


Figura C.6 Aparato experimental da experiência 3 (carga), para a placa de HDPE.

Experiência 4

Para as últimas experiências em cada placa, o PCM foi carregado apenas com a placa IV, mas sem isolamento na parte superior da placa com PCM (ver Figura C.7 e Figura C.8).



Figura C.7 Aparato experimental da experiência 4 (carga), para a placa de alumínio.



Figura C.8 Aparato experimental da experiência 4 (carga), para a placa de HDPE.

Anexo D: Análise paramétrica

Nesta secção são descritos os resultados alcançados em cada experiência e o propósito com que foi realizada cada uma delas. Tendo como objetivo otimizar o produto com PCM macroencapsulado, primeiramente, analisaram-se as três experiências realizadas, fazendo apenas variar a fonte de calor. Depois de determinar a melhor solução até então estudada, segue-se o estudo da influência do isolamento da placa de PCM. A experiência mais eficiente foi usada para estudar a influência do macroencapsulamento nos processos de carga e descarga do PCM.

Antes de prosseguir para a análise dos resultados, é importante recordar a posição dos termopares no interior de ambas as placas. Para as placas de alumínio e HDPE, a demonstração da posição estimada dos termopares encontra-se nas Figura D.1 e Figura D.2, respetivamente. Considera-se que todos os sensores no interior da placa estão posicionados a meio da espessura da mesma. Relativamente à posição efetiva dos fios condutores dos termopares, não foi possível aferir, após a sua colocação, a posição efetiva de cada um na placa de alumínio pelo facto de ser opaca, mas, é possível confirmar que ficaram nas posições estimadas pela uniformidade das temperaturas correspondentes, como demonstra a Figura D.4, referente à carga do PCM na experiência 1. Os valores do sensor "PCM_dir_cima" são ligeiramente superiores aos restantes pelo facto do termopar estar na posição mais próxima da entrada do tudo na placa, com o fluido refrigerante a 40°C. Por outro lado, como a placa de HDPE é translúcida, foi possível verificar antes de iniciar as experiências, que 3 dos termopares (o central e os dois inferiores) ficaram enviesados e em contato com a parte de cima da cápsula (ver Figura D.3), o que distorceria consideravelmente os dados esperados, principalmente quando o PCM se encontrasse no estado líquido, uma vez que o volume do PCM é menor quando este se encontra carregado, e o material fica distribuído na metade inferior da cápsula. Assim, os 3 sensores referidos não estarão a medir a temperatura do PCM, como pode verificar-se no gráfico da Figura D.5. Deste modo, e uma vez que os valores do termopar central foram úteis para o cálculo da taxa de transferência de calor nas experiências, foram usadas, por aproximação, as temperaturas registadas pelo sensor "PCM_dir_cima".

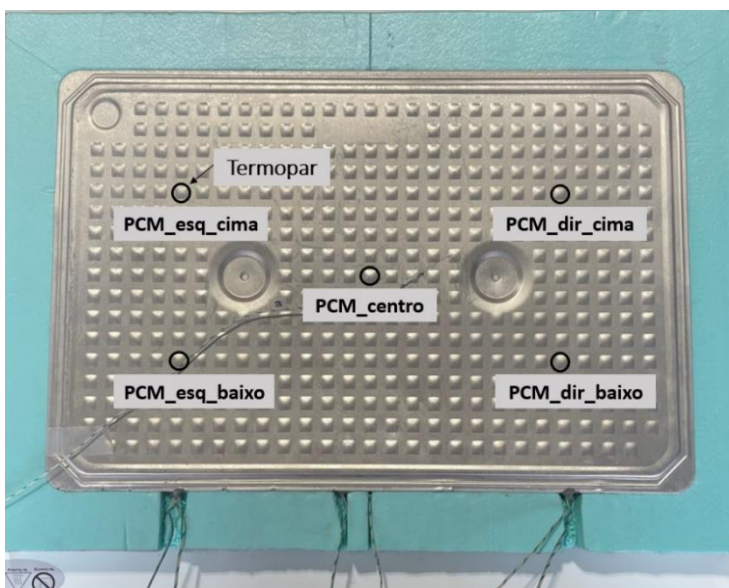


Figura D.1 Posição estimada dos 5 termopares tipo-K no interior da placa de alumínio.

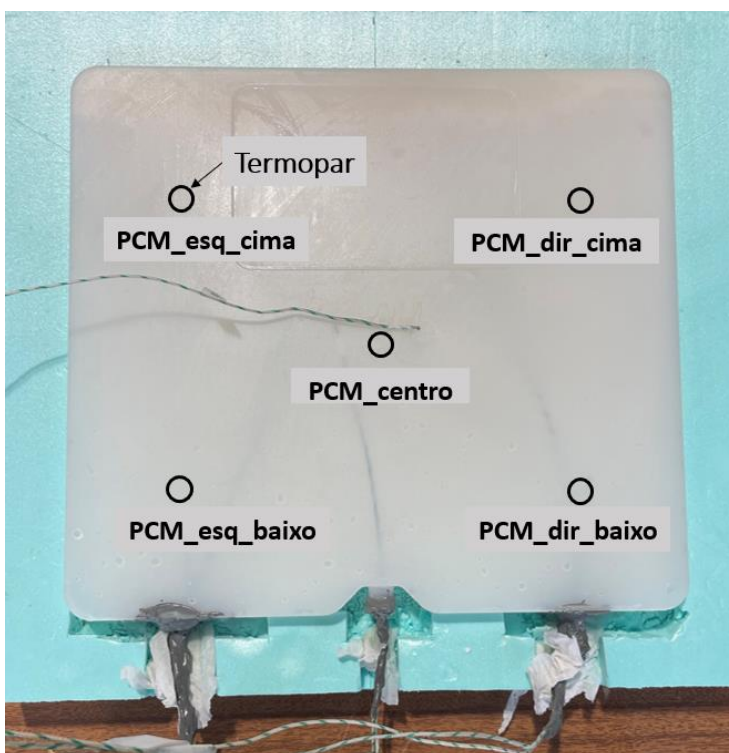


Figura D.2 Posição estimada dos 5 termopares tipo-K no interior da placa de HDPE.

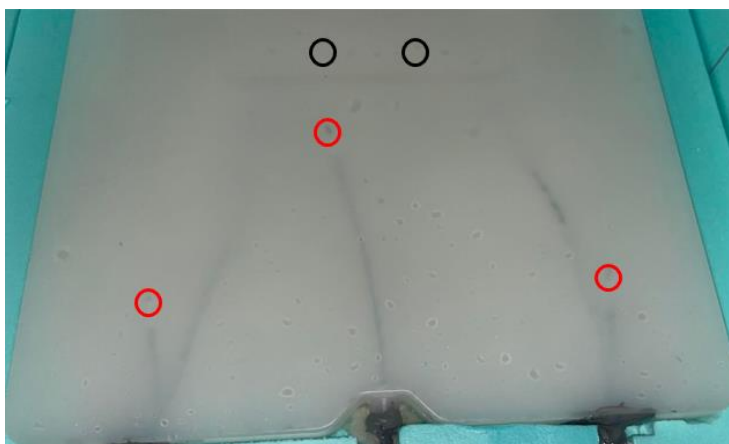


Figura D.3 Posição efetiva dos 5 termopares tipo-K no interior da placa de HDPE.

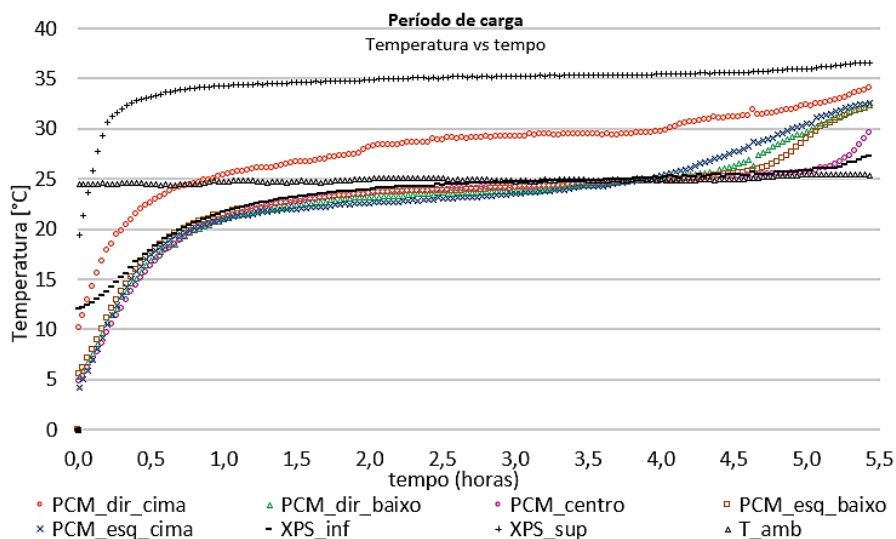


Figura D.4 Processo de carga da experiência 1, para a placa de alumínio.

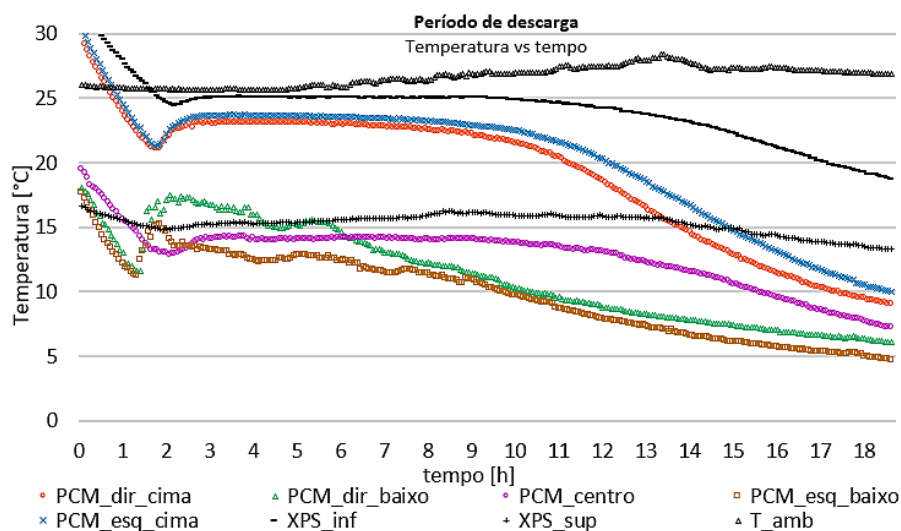


Figura D.5 Processo de descarga da experiência 2, para a placa de HDPE.

D.1 Seleção do modo de aquecimento

Relativamente à fonte de calor responsável pelo fornecimento de energia para carregar o PCM, a ideia inicial seria recorrer ao mesmo permutador de calor usado para o processo de descarga do material. Para a placa de alumínio, como se pode verificar na Figura D.6, o processo de aquecimento com serpentina foi suficiente, e ainda que tenha sido mais demoroso, a taxa de transferência de calor foi consideravelmente inferior. No entanto, para a placa de HDPE, o método de aquecimento só com a serpentina não foi suficiente para fundir a massa de PCM na sua totalidade, como se pode constatar observando as curvas do gráfico (Figura D.7), e seria um processo demasiado lento para efetuar todas as experiências.

De forma a tornar o processo de carga das experiências subsequentes mais rápido, o modo de aquecimento eleito poderia ter sido, desse ponto de vista, o da experiência 3, onde foram usadas duas fontes de calor (serpentina com fluido refrigerante a 40°C e placa IV de 300W). Todavia, para além da taxa de transferência de calor nas experiências onde foi usada como fonte de calor apenas a placa IV não ser muito superior ao da experiência com as duas fontes, o tempo de carga para as duas placas não foi muito superior. Além disso, variar por vezes consecutivas o ST do banho térmico de -5°C para 40°C, e vice-versa, só iria degradar o fluido refrigerante, o que seria completamente desnecessário uma vez que foi encontrada uma alternativa que serve o propósito. Portanto, tendo em conta os argumentos mencionados, para carregar o PCM nas experiências subsequentes, recorreu-se à placa IV.

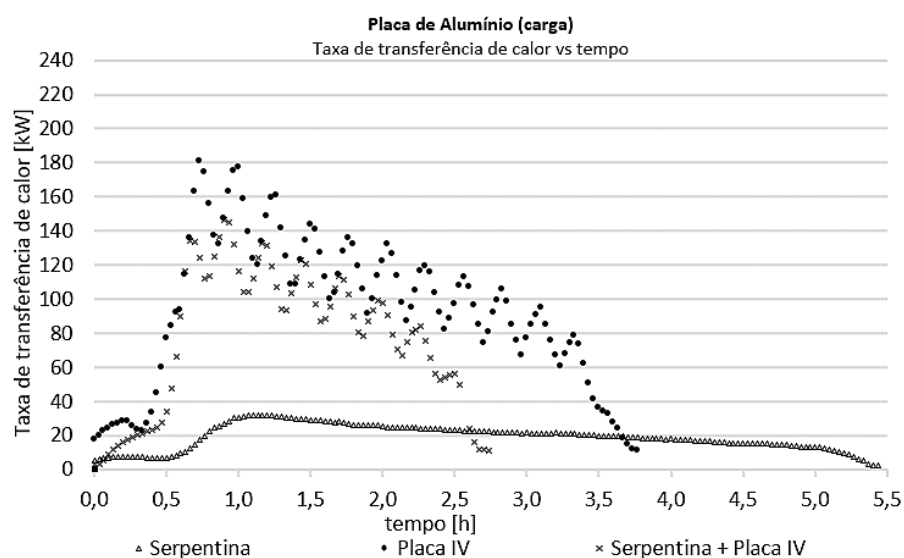


Figura D.6 Processo de carga das experiências 1, 2 e 3, para a placa de alumínio.

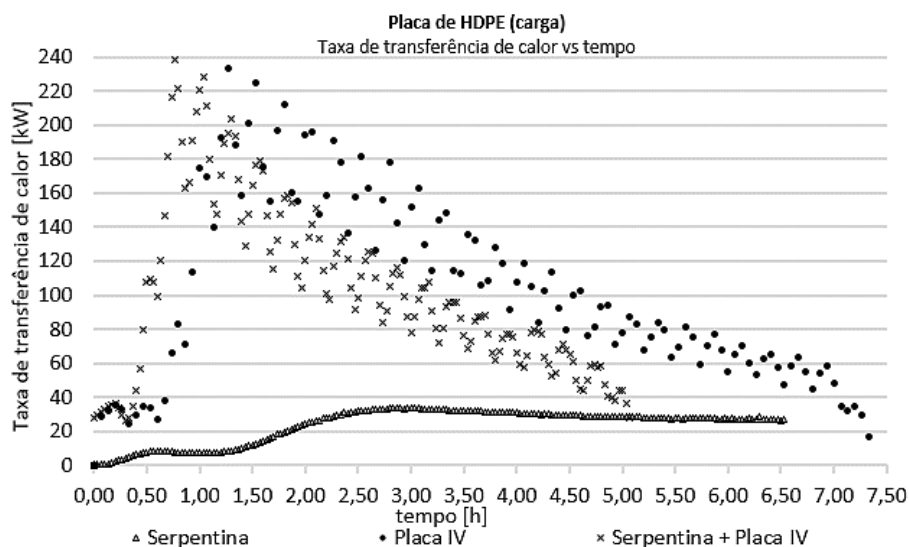


Figura D.7 Processo de carga das experiências 1, 2 e 3, para a placa de HDPE.

D.2 Estudo da influência do isolamento do sistema

O estudo da influência do isolamento do sistema teve por base a realização de uma quarta experiência, onde foi retirada do aparato experimental a placa de XPS superior, deixando a placa de PCM exposta à temperatura ambiente.

Em primeiro lugar, foram analisados os resultados relativos à fração líquida e calor específico efetivo, na carga e descarga, apenas para a experiência 2, uma vez que o PCM não varia. Depois, para a placa de alumínio, estudou-se os valores da taxa de transferência de calor carga do PCM para ambas as experiências, com e sem isolamento. Para a descarga analisaram-se apenas os dados de uma das experiências, visto que a descarga foi realizada nas mesmas condições para ambas. Posteriormente, aplicou-se uma abordagem similar para analisar os dados relativos à placa de HDPE.

O gráfico da Figura D.8 representa a evolução da fração líquida do PCM ao longo do processo de carga e descarga na experiência 2, e foi analisado no capítulo 5 ("Análise e discussão de resultados").

A evolução do calor específico efetivo do PCM ao longo do período de aquecimento e arrefecimento encontra-se representada na Figura D.9. A tendência de cada curva, aproximada à forma da função gaussiana, é a mesma que no artigo estudado [75]. Os resultados não são os mesmos em termos quantitativos, uma vez que o PCM em questão não é o mesmo, logo, os parâmetros da equação que define o calor específico efetivo, diferem. No entanto, qualitativamente, os gráficos são similares, a tendência das curvas é a mesma, ou seja, os gráficos são válidos e estão de acordo com o que os autores propuseram. Quando o PCM se encontra em estado sólido puro, os valores do calor específico efetivo são ligeiramente maiores do que quando o mesmo está em estado líquido, uma vez que o C_{ps} é superior ao C_{pL} (4,533 kJ/kg·K e 2,311 kJ/kg·K, respetivamente). Não seria possível prever que o

máximo da curva ocorresse à temperatura de fusão do PCM, até porque os gráficos de calorimetria não são totalmente simétricos (Figura 24), mas pode afirmar-se que o C_{eff} máximo ocorre na região típica da mudança de fase deste PCM. O PCM absorve calor de forma crescente até à temperatura de mudança de fase, e depois desse ponto vai diminuindo.

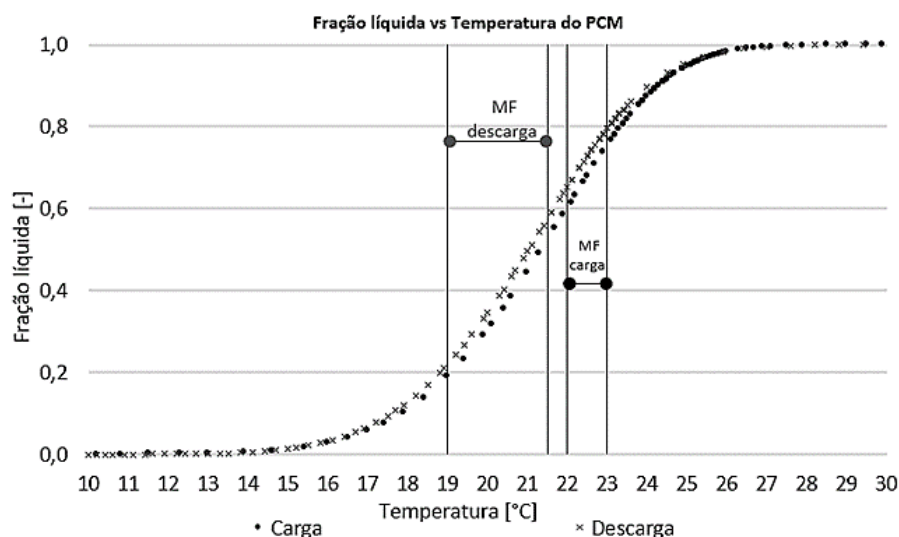


Figura D.8 Evolução da fração líquida do PCM ao longo dos processos de carga e descarga.

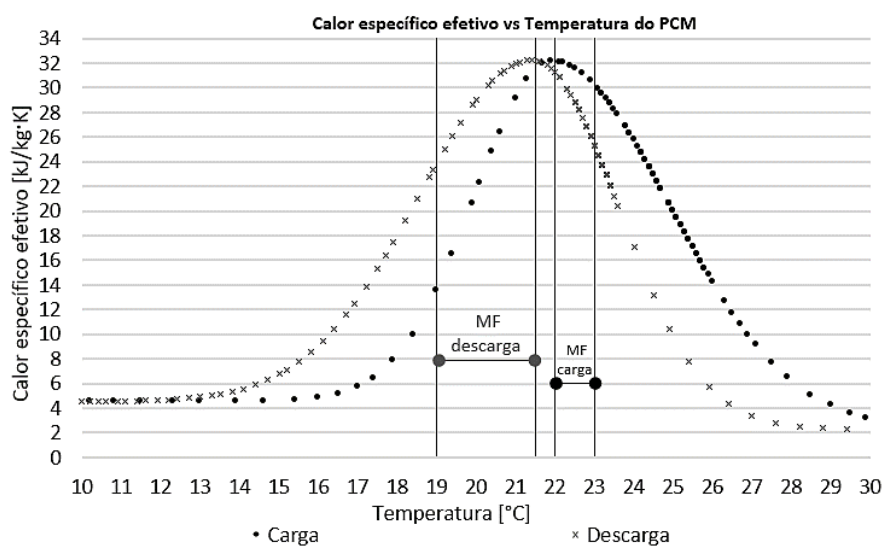


Figura D.9 Evolução do calor específico efetivo do PCM ao longo dos processos de carga e descarga.

Placa de alumínio

O gráfico da Figura D.10 mostra a evolução da taxa de transferência de calor ao longo do processo de carga do PCM, bem como da sua temperatura medida pelo termopar central e a evolução da temperatura ambiente, nas experiências 2 e 4. O aumento da taxa de transferência de calor é consistente com o aumento da temperatura do PCM, ou seja, com a absorção de calor por parte do mesmo. As oscilações da taxa de transferência de calor do PCM visíveis nos gráficos devem-se às características da fonte de calor. A placa IV fornece energia sob a forma de calor a uma potência constante, e ao atingir os 90°C, desliga, voltando a ligar-se quando a superfície da mesma chega aos 70°C e, portanto, a sua temperatura superficial oscila dentro da gama 70-90°C. Mais uma vez, não seria possível prever exatamente a que temperatura o PCM atingisse o pico de taxa de transferência de calor, mas pode dizer-se que tal acontece na zona típica de mudança de fase indicada pelo teste *T-history* (Figura 24), e considerada para o modelo analítico (22°C). No caso da experiência com isolamento, a taxa de transferência de calor máxima ocorreu quando o material atingiu os 21,40°C, e sem isolamento, aos 21,90°C. Na experiência 2 foi desprezada a influência da temperatura ambiente devido ao facto da placa de PCM estar completamente isolada, e na experiência 4, apesar de não estar presente a placa de XPS que representaria um acréscimo à resistência térmica, considerou-se a resistência por convecção do ar ambiente.

Comparando os dois gráficos, verifica-se que a taxa de transferência de calor máxima no ensaio laboratorial com isolamento é ligeiramente superior ao do ensaio onde a placa de PCM se encontra exposta ao ar ambiente, assim como os picos consecutivos, apresentando diferenças pouco significativas. No entanto, nos últimos picos, o gráfico mostra de forma mais notória que é necessário fornecer mais energia ao sistema sem isolamento para o PCM completar a mudança de fase, o que revela que o ar ambiente oferece uma resistência térmica maior do que a placa de XPS. Com uma temperatura ambiente de 22-24°C, o processo de fusão sem isolamento superior é mais lento do que com a presença do mesmo em 16,4%, uma vez que o XPS serve precisamente para mitigar as perdas térmicas.

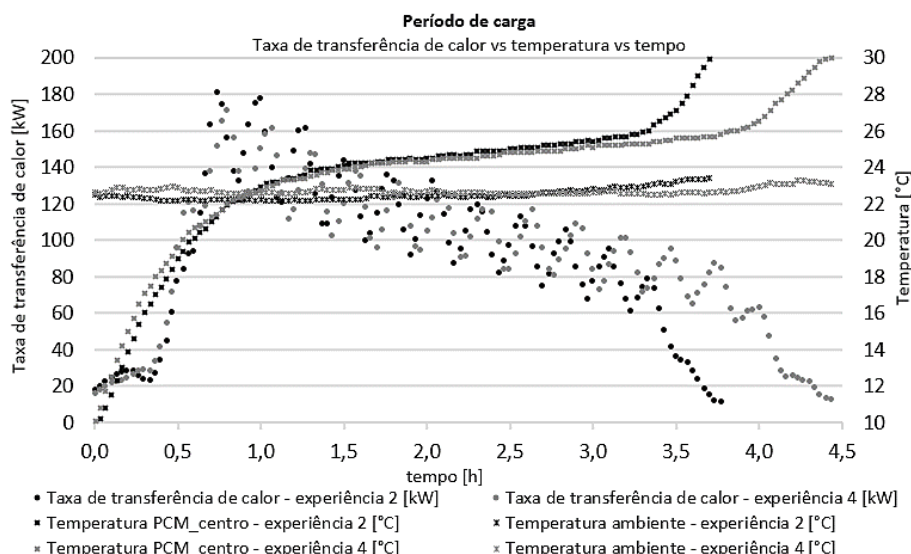


Figura D.10 Evolução da taxa de transferência de calor no PCM ao longo do processo de carga, nas experiências 2 e 4, para a placa de alumínio.

No gráfico da Figura D.11, a taxa de transferência de calor apresenta um decréscimo contínuo, consistente com a temperatura constante da fonte fria e com uma libertação de calor do PCM, característica de um processo de descarga, que sucede até o PCM atingir a temperatura de mudança de fase. Observa-se um pico anterior, que se deve ao facto de anteceder à experiência em análise a remoção da placa aquecedora, fonte de calor ao longo do processo de carga, o que provocou inicialmente uma descida da temperatura do PCM de forma mais abrupta.

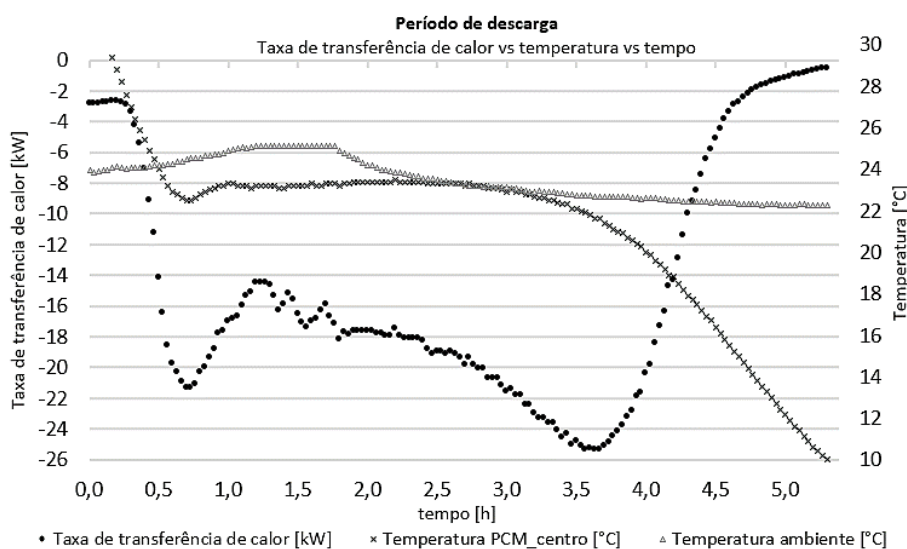


Figura D.11 Evolução da taxa de transferência de calor do PCM ao longo do processo de descarga, na experiência 2, para a placa de alumínio.

Placa de HDPE

Relativamente à placa de HDPE, comparando as curvas de taxa de transferência de calor do gráfico da Figura D.12, que caracteriza o ciclo de carga do PCM nas experiências com e sem isolamento superior, bem como as temperaturas do PCM respetivas e a temperatura ambiente, é de salientar que o tempo de carga no ensaio sem isolamento foi inferior ao da experiência com a placa de PCM totalmente isolada, em mais de uma hora. Porém, os picos consecutivos de potência na experiência 2 continuam a ser inferiores, ainda que sem grandes diferenças a assinalar. O facto da experiência com a placa de XPS superior (2) ter sido mais longa justifica-se pelo facto das experiências terem sido realizadas em dias de muito calor, num ambiente cuja temperatura (26-28°C) foi superior à normal (21-25°C). Neste caso, para a placa de HDPE, a resistência térmica do XPS teve maior influência, do ponto de vista negativo, no tempo de carga, uma vez que houve mais perdas térmicas. Em ambos os gráficos, o pico da curva ocorreu a uma temperatura que se enquadra, aproximadamente, na gama específica da temperatura de fusão do material (21,90°C e 22,40°C), e as oscilações são justificadas pelas características funcionais da fonte de calor, já explicadas anteriormente.

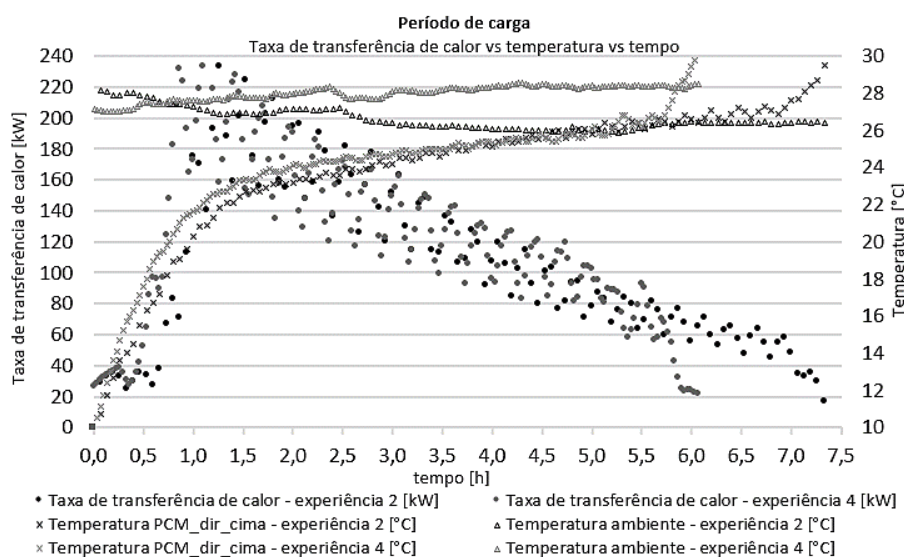


Figura D.12 Evolução da taxa de transferência de calor do PCM ao longo do processo de carga, nas experiências 2 e 4, respetivamente, para a placa de HDPE.

Observando o gráfico que representa o ciclo de descarga do PCM na experiência 4, na qual a placa de PCM esteve exposta à temperatura ambiente (ver Figura D.13), verificam-se dois picos. O primeiro, como justificado para o processo de descarga do PCM na placa de alumínio, deve-se ao facto de ter sido retirada a fonte de calor da experiência que precedeu, na qual o PCM terá sido carregado. O segundo pico, ocorreu a uma temperatura dentro da zona típica de mudança de fase do PCM (22,40°C). Mais uma vez, o decréscimo contínuo da taxa de transferência de calor é coerente com uma libertação de calor por parte do PCM, própria de um processo de descarga, até o PCM atingir

a sua temperatura de mudança de fase. Ainda que as fontes de aquecimento e arrefecimento nos ciclos de carga e descarga, respetivamente, não sejam as mesmas, é de sublinhar que, para a placa de HDPE, o ciclo de descarga do PCM foi 11 horas superior (36%, aproximadamente) ao ciclo de carga. Apesar da elevada capacidade de armazenamento de calor latente do PCM, a sua condutividade térmica é muito baixa, podendo ser comparada à de um isolante térmico. A condutividade térmica do SP21EK é, aproximadamente, 0,500 W/m·K, e a do XPS, por exemplo, material usado como isolante térmico nos ensaios laboratoriais, 0,033 W/m·K. Esta característica do PCM faz com que o calor retido demore muito tempo a ser transferido, pela sua baixa difusividade térmica.

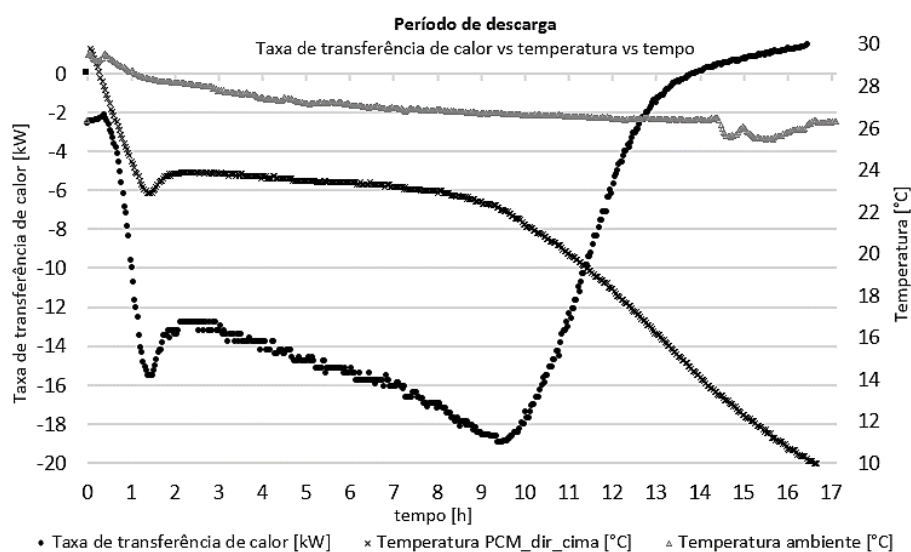


Figura D.13 Evolução da taxa de transferência de calor do PCM ao longo do processo de descarga, na experiência 4, para a placa de HDPE.