



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Desenvolvimento e testes de uma instalação laboratorial para o estudo do comportamento térmico de materiais de mudança de fase (PCM)

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

Autor

Paulo Alexandre Fidalgo de Barros Pais

Orientadores

Professor Doutor José Joaquim da Costa

Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar

Júri

Presidente Professor Doutor António Rui de Almeida Figueiredo
Professor Associado com Agregação da Universidade de Coimbra

Vogal Professor Doutor Divo Augusto Alegria Quintela
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2013

“Depressa e bem, não há quem”

“Devagar se vai ao longe”

(Adágios populares portugueses)

Ao meu pai.

Agradecimentos

O trabalho que aqui se apresenta só foi possível graças à colaboração e apoio de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Agradeço em primeiro lugar aos meus orientadores Professor Doutor José Joaquim da Costa e Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar; pela constante disponibilidade, competência, incentivo e espírito crítico, o meu muito obrigado.

De seguida, agradeço ao engenheiro Nelson Soares, por todo o auxílio prestado ao longo deste trabalho, pela constante disponibilidade e pela preciosa ajuda na interpretação de vários conceitos.

Agradeço também ao professor Virgílio Monteiro, do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, pelo precioso empréstimo da bomba de circulação, que nos era imprescindível.

Por fim, agradeço a toda a minha família pelo constante apoio e pela força que me deram para ultrapassar todos os obstáculos e realizar com sucesso este trabalho.

Resumo

O objetivo principal deste trabalho é avaliar, por via experimental, o efeito combinado da transferência de calor com mudança de fase, envolvendo condução e convecção natural em regime transiente. Pretende-se também avaliar a influência do efeito de alheta na transferência de calor. Para tal, construiu-se no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra (FCTUC) uma instalação laboratorial para avaliar a transferência de calor através de provetes prismáticos em alumínio (30×30×3 cm) contendo diferentes tipos de materiais de mudança de fase (PCM) no seu interior.

Foram realizados ensaios de fusão e de solidificação com um PCM microencapsulado (Micronal DS 5001 X) e com um PCM livre (RT21 – parafina comercial). Os provetes de alumínio foram posicionados verticalmente na instalação, para simular soluções a serem integradas em elementos da envolvente vertical de edifícios.

No ensaio de fusão induziu-se um fluxo de calor horizontal numa das faces do provete através de uma resistência elétrica. No ensaio de solidificação utilizou-se uma placa fria, arrefecida por um circuito de água proveniente de um reservatório termostaticado. Durante a fusão do PCM RT21 verificou-se que, numa primeira fase, a condução foi o modo de transferência de calor dominante. A partir de determinado momento, a convecção natural passou a ser dominante. Devido à convecção natural e à variação da densidade das duas fases presentes, ocorre uma estratificação térmica, que leva a que o PCM comece a fundir na parte superior. Na fusão do Micronal DS 5001 X apenas se verificou a transferência de calor por condução. Durante a solidificação dos dois PCMs, o modo de transferência de calor por condução foi dominante. Verificou-se ainda o fenómeno de sub-arrefecimento durante a solidificação do PCM RT21. Através da incorporação de alhetas nos provetes observou-se uma diminuição do tempo necessário para fundir ou solidificar o volume de PCM. O mesmo se verifica relativamente ao efeito do aumento do fluxo de calor durante a fusão do PCM. Os resultados obtidos comprovaram o grande potencial termorregulador dos PCMs.

Palavras-chave: Material de mudança de fase, PCM, Transferência de calor, Calor latente, Instalação experimental, Convecção natural.

Abstract

This work aims to experimentally evaluate the heat transfer coupled with melting/solidification of a phase change material (PCM) contained in single or stacked vertical cavities for building envelope applications. The effect of adding metallic fins, associated with decreasing the height of the cavities, is also analyzed in terms of the solidification and melting processes. For this purpose, an experimental apparatus was designed and built in the Mechanical Engineering Department of the Faculty of Sciences and Technology of the University of Coimbra. Several test samples made of aluminium were built with outer dimensions of 30×30×3 cm and different number of cavities, to be filled with two kinds of PCMs: a microencapsulated PCM, resembling a white powder (Micronal DS 5001 X), and a non-encapsulated PCM consisting of a commercial paraffin wax (RT21).

During the fusion process, a horizontal heat flux was imposed by way of an electrically heated hot plate in contact with one of the sample's faces. During the solidification, a cold plate thermally controlled by cold water from a thermostatic bath was used. It was found that during the melting process of the RT21, conduction was initially the dominant mode of heat transfer, as indicated by an almost linear increase of the PCM temperature. After some time, the free-convection flow ensued in the liquid phase becomes the dominant heat transfer mode and gives rise to a significant thermal stratification in the PCM domain, more pronounced in the sample with a single, tall vertical cavity. The melting of the Micronal DS 5001 X and the solidification of both PCMs are essentially conduction-dominated processes. The incorporation of fins reduces the time needed for the complete fusion and solidification of both PCMs.

Keywords: Phase Change Material, PCM, Heat transfer, Latent heat, Experimental setup, Natural convection.

Índice

| | |
|---|-------|
| Índice de Figuras | xi |
| Índice de Tabelas | xv |
| Simbologia e Siglas | xvii |
| Simbologia..... | xvii |
| Siglas | xviii |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. Enquadramento | 1 |
| 1.2. Motivação | 3 |
| 1.3. Objetivos do trabalho | 3 |
| 1.4. Metodologia..... | 4 |
| 1.5. Estrutura da dissertação | 5 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 7 |
| 2.1. Materiais de mudança de fase (PCMs) | 7 |
| 2.1.1. Propriedades | 8 |
| 2.1.2. Classificação..... | 10 |
| 2.1.3. Encapsulamento..... | 11 |
| 2.2. Avaliação da transferência de calor em elementos com PCMs..... | 12 |
| 2.2.1. Análise numérica e experimental do aumento da condutância térmica de elementos com PCMs..... | 12 |
| 3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL..... | 23 |
| 3.1. Descrição geral | 23 |
| 3.2. Modelo geométrico | 24 |
| 3.2.1. Módulo de aquecimento | 25 |
| 3.2.2. Módulo de arrefecimento..... | 29 |
| 3.2.3. Módulo do Provete | 33 |
| 3.3. Instrumentação e Medida..... | 37 |
| 3.3.1. Sensores de temperatura | 37 |
| 3.3.2. Sensores de fluxo de calor..... | 38 |
| 3.3.3. Aquisição e tratamento de dados..... | 38 |
| 3.4. Protocolo experimental..... | 39 |
| 3.4.1. Disposição dos sensores no provete | 39 |
| 3.4.2. Ensaio de aquecimento | 40 |
| 3.4.3. Ensaio de arrefecimento | 41 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 43 |
| 4.1. Ensaio de aquecimento | 43 |
| 4.1.1. PCM RT21..... | 43 |
| 4.1.2. PCM Micronal DS 5001 X..... | 45 |
| 4.1.3. Análise e interpretação dos resultados..... | 46 |
| 4.2. Ensaio de arrefecimento..... | 49 |
| 4.2.1. PCM RT21..... | 49 |
| 4.2.2. PCM Micronal DS 5001 X..... | 50 |

| | |
|---|----|
| 4.2.3. Análise e interpretação dos resultados..... | 52 |
| 5. CONCLUSÃO..... | 55 |
| 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 57 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 59 |
| ANEXO A – PERDAS DE CARGA NO CIRCUITO DE ARREFECIMENTO | 63 |
| ANEXO B – PORMENORES CONSTRUTIVOS E ILUSTRAÇÕES DOS PROVETES CONSTRUÍDOS | 67 |
| ANEXO C – ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES..... | 71 |
| ANEXO D – ILUSTRAÇÕES ADICIONAIS | 75 |
| ANEXO E – CICLOS DE CARGA E DESCARGA | 77 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Curvas teóricas da relação temperatura – armazenamento de energia térmica de um PCM puro: (a) Fase de aquecimento, (b) Fase de arrefecimento. | 2 |
| Figura 2.1. Representação esquemática dos processos de mudança de estado físico da água. | 8 |
| Figura 2.2. Temperatura e entalpia de fusão dos diferentes grupos de PCMs [6]..... | 10 |
| Figura 2.3. Encapsulamento dos PCMs: (a) Ciclo de mudança de fase numa microcápsula; (b) Macro-cápsulas tubulares e retangulares. | 12 |
| Figura 2.4. Instalação experimental: (a) esquema da montagem experimental; (b) alhetas para introduzir na unidade de armazenamento de calor (adaptado de [11]). | 13 |
| Figura 2.5. “ <i>Honeycomb panel</i> ” em alumínio, com parafina inserida nos alvéolos [12]. .. | 14 |
| Figura 2.6. Parafina incorporada em “ <i>metal foams</i> ”, neste caso de cobre [13]..... | 14 |
| Figura 2.7. Diferentes configurações geométricas: (a) padrões de fusão em três instantes sucessivos; (b) padrões de distribuição da temperatura e campos de fluxo [14]. .. | 15 |
| Figura 2.8. Esquema da instalação experimental: fonte de calor imposta na parte superior do provete – fluxo de calor vertical e descendente [18]..... | 17 |
| Figura 2.9. Esquema da instalação experimental de caracterização térmica de materiais sólidos que contêm microcápsulas de PCM [19]. | 18 |
| Figura 2.10. Esquema da instalação experimental, para determinação do comportamento térmico de <i>wallboards</i> contendo PCMs [21]..... | 19 |
| Figura 2.11. Esquema da instalação experimental para o estudo de um PCM, baseada na medição de temperaturas e fluxos de calor durante o processo de mudança de fase [23]. | 20 |
| Figura 2.12. Esquema da unidade de armazenamento térmico [24]..... | 21 |
| Figura 2.13. Esquema da unidade de armazenamento térmico [25]: (a) sem alhetas; (b) com duas alhetas..... | 22 |
| Figura 3.1. Esquema preliminar da instalação experimental desenvolvida..... | 23 |
| Figura 3.2. Desenho esquemático da instalação experimental. | 24 |
| Figura 3.3. Instalação laboratorial (Laboratório de Climatização e Ambiente, FCTUC-DEM)..... | 25 |
| Figura 3.4. Módulo de aquecimento: (a) distribuição dos termopares na superfície da placa quente; (b) inclusão da película de regularização; (c) vista do módulo de aquecimento..... | 26 |
| Figura 3.5. Placa quente, contendo a resistência elétrica. | 27 |
| Figura 3.6. (a) <i>Variac - Lübcke Vario</i> ; (b) Wattímetro digital; (c) Estabilizador de tensão. | 28 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.7. Módulo de arrefecimento: (a) distribuição dos termopares na superfície da placa fria; (b) inclusão da película de regularização; (c) Vista do módulo de arrefecimento..... | 30 |
| Figura 3.8. Placa fria: (a) face que está em contacto com o provete; (b) face isolada da placa fria; (c) secção em corte da placa fria, mostrando o circuito de água..... | 31 |
| Figura 3.9. Banho termostaticado para calibrações..... | 31 |
| Figura 3.10. Bomba de circulação <i>Grundfos</i> UPE 25-60..... | 32 |
| Figura 3.11. Módulo do provete..... | 33 |
| Figura 3.12. Provetes de dimensões 30×30×3 cm: (a) provete com 5 células internas; (b) provete com 15 células internas; (c) provete com uma só célula interna. Provetes de dimensões 30×30×2.5 cm: (d) provete com 6 células internas; (e) provete com uma só célula interna..... | 34 |
| Figura 3.13. Sistema de medição da temperatura no interior dos provetes: (a) termopares inseridos nos invólucros perfurados das esferográficas; (b) esquema do provete em corte com o sistema de medição no seu interior; (c) ilustração do local de medição da temperatura, no centro da célula (a 15 cm dos topos laterais)..... | 35 |
| Figura 3.14. Microcápsulas de PCM - <i>Micronal® DS 5001 X</i> | 35 |
| Figura 3.15. Recipiente com o PCM RT21 da <i>Rubitherm</i> e proveta graduada..... | 36 |
| Figura 3.16. Material utilizado para o enchimento dos provetes..... | 37 |
| Figura 3.17. Disposição dos sensores no provete: (a) Coordenadas para fixação dos sensores no provete de 5 células (① - Sensores de fluxo de calor; ② - Termopares do tipo-K); (b) sensores montados no provete de 5 células..... | 39 |
| Figura 4.1. Ensaio de aquecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de uma só célula interna (sem alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\phi=378$ W/m ²); (b) 67.5 W ($\phi=750$ W/m ²)..... | 43 |
| Figura 4.2. Ensaio de aquecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 5 células internas (4 alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\phi=378$ W/m ²); (b) 67.5 W ($\phi=750$ W/m ²)..... | 44 |
| Figura 4.3. Ensaio de aquecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 15 células internas (14 alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\phi=378$ W/m ²); (b) 67.5 W ($\phi=750$ W/m ²)..... | 44 |
| Figura 4.4. Fluxos de calor obtidos durante os ensaios de aquecimento do PCM RT21, com uma potência elétrica constante de 34 W, nos provetes: (a) de uma só célula; (b) de 5 células internas; (c) de 15 células internas..... | 45 |
| Figura 4.5. Ensaio de aquecimento do PCM <i>Micronal DS 5001 X</i> (microencapsulado) a uma potência elétrica constante de 34 W ($\phi=378$ W/m ²), com os provetes de: (a) uma célula; (b) 15 células..... | 45 |
| Figura 4.6. Fluxos de calor obtidos durante os ensaios de aquecimento do PCM <i>Micronal DS 5001 X</i> , com uma potência constante de 34 W nos provetes: (a) de uma só célula; (b) de 15 células..... | 46 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.7. Ensaio de aquecimento com os provetes sem PCM no seu interior, para a potência constante de 34 W ($\phi=378 \text{ W/m}^2$). Provete com: (a) uma só cavidade interna; (b) 5 células internas; (c) 15 células internas..... | 48 |
| Figura 4.8. Ensaio de arrefecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de uma só cavidade interna (sem alhetas), depois do aquecimento a uma potência constante de 34 W ($\phi=378 \text{ W/m}^2$)..... | 49 |
| Figura 4.9. Ensaio de arrefecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 5 cavidades internas (4 alhetas), depois do aquecimento a uma potência constante de 34 W ($\phi=378 \text{ W/m}^2$)..... | 49 |
| Figura 4.10. Ensaio de arrefecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 15 cavidades internas (14 alhetas), depois do aquecimento a uma potência constante de 34 W ($\phi=378 \text{ W/m}^2$)..... | 50 |
| Figura 4.11. Fluxos de calor obtidos durante os ensaios de arrefecimento do PCM RT21, depois do aquecimento a uma potência constante de 34 W nos provetes: (a) de uma só célula interna; (b) de 5 células internas; (c) de 15 células internas. | 50 |
| Figura 4.12. Ensaio de arrefecimento depois de um aquecimento a uma potência constante de 34 W ($\phi=378 \text{ W/m}^2$) do PCM microencapsulado Micronal DS 5001 X, macroencapsulado no provete: (a) de uma só célula interna; (b) de 15 células internas. | 51 |
| Figura 4.13. Fluxos de calor obtidos durante os ensaios de arrefecimento do PCM Micronal DS 5001 X, depois de um aquecimento a uma potência constante de 34 W nos provetes: (a) de uma só célula interna; (b) de 15 células internas..... | 51 |
| Figura 4.14. Ensaio de arrefecimento com os provetes sem PCM no seu interior, depois do aquecimento a uma potência constante de 34 W ($\phi=378 \text{ W/m}^2$). (a) Provete de uma só cavidade; (b) provete de 5 células internas; (c) provete de 15 células internas. | 52 |
| Figura A. 1. Numeração das perdas de carga localizadas no circuito da placa fria. | 64 |
| Figura B. 1. Desenhos de apoio ao fabrico do provete 30×30×3 cm (uma secção): (a) esquema sem topos; (b) esquema com topos..... | 67 |
| Figura B. 2. Desenhos de apoio ao fabrico do provete 30×30×3 cm (5 células): (a) esquema sem topos; (b) esquema com topos..... | 68 |
| Figura B. 3. Desenhos de apoio ao fabrico do provete 30×30×3 cm (15 células): (a) esquema sem topos; (b) esquema com topos..... | 68 |
| Figura B. 4. Desenhos de apoio ao fabrico do provete 30×30×2.5 cm (uma só célula): (a) esquema sem topos; (b) esquema com topos..... | 69 |
| Figura B. 5. Desenhos de apoio ao fabrico do provete 30×30×2.5 cm (6 células): (a) esquema sem topos; (b) esquema com topos..... | 69 |
| Figura B. 6. Provetes acabados de soldar. | 70 |
| Figura B. 7. Provetes depois do acabamento superficial..... | 70 |
| Figura B. 8. Introdução dos termopares no interior dos provetes e colocação dos tampões de selagem. | 70 |

| | |
|--|----|
| Figura C. 1. Retas de calibração dos termopares utilizados na instalação experimental. ... | 73 |
| Figura D. 1. Uniformização da temperatura do PCM e pré-aquecimento da placa quente. | 75 |
| Figura D. 2. Início do ensaio de aquecimento e uniformização da temperatura da placa fria. | 75 |
| Figura D. 3. Início do ensaio de arrefecimento. | 76 |
| Figura E. 1. Ensaio completo do PCM RT21 macroencapsulado no provete de uma só cavidade (sem alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\phi=378$ W/m ²); (b) 67.5 W ($\phi=750$ W/m ²). | 77 |
| Figura E. 2. Ensaio completo do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 5 células internas (4 alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\phi=378$ W/m ²); (b) 67.5 W ($\phi=750$ W/m ²). | 78 |
| Figura E. 3. Ensaio completo do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 15 células internas (14 alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\phi=378$ W/m ²); (b) 67.5 W ($\phi=750$ W/m ²). | 78 |
| Figura E. 4. Ensaio completo a uma potência constante de 34 W ($\phi=378$ W/m ²) do PCM Micronal DS 5001 X, macroencapsulado no provete: (a) de uma só cavidade; (b) de 15 células internas. | 79 |
| Figura E. 5. Variação da temperatura ao longo do ensaio no provete de uma só cavidade, com PCM RT21 à potência de 34 W: (a) nas superfícies da resistência elétrica e da placa fria; (b) nas faces aquecida e arrefecida do provete (c) na face exterior do isolamento amovível e do ambiente da sala. | 79 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1. Vantagens e desvantagens dos diferentes grupos de PCMs [9]..... | 11 |
| Tabela 3.1. Características da placa quente..... | 27 |
| Tabela 3.2. Características do <i>Variac</i> e do estabilizador de tensão..... | 28 |
| Tabela 3.3. Características técnicas dos isolamentos térmicos..... | 29 |
| Tabela 3.4. Características técnicas do banho termostatizado..... | 32 |
| Tabela 3.5. Características da bomba de circulação..... | 33 |
| Tabela 3.6. Principais características dos provetes..... | 34 |
| Tabela 3.7. Propriedades termofísicas dos PCMs utilizados (dados do fabricante)..... | 36 |
| Tabela 3.8. Características técnicas do PICO TC-08..... | 38 |
| Tabela 3.9. Temperaturas de referência para o ensaio de aquecimento..... | 41 |
| Tabela 3.10. Temperaturas de referência para o ensaio de arrefecimento..... | 41 |
| Tabela C. 1. Média das temperaturas medidas por cada termopar ou conjunto de termopares para 8 temperaturas de calibração..... | 71 |

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

| | | |
|------------------|--|---|
| μ | Viscosidade dinâmica | [Pa.s] |
| A | Área da secção transversal da tubagem | [m ²] |
| d | Diâmetro da tubagem | [m] |
| f | Fator de atrito | [] |
| g | Aceleração da gravidade | [m.s ⁻²] |
| k | Condutibilidade térmica | [W.m ⁻¹ . °C ⁻¹] |
| K_{total} | Coefficiente de perda de carga total | [] |
| L | Calor latente de fusão | [J.kg ⁻¹] |
| l | Comprimento da tubagem | [m] |
| Q | Caudal volúmico | [m ³ .s ⁻¹] |
| R | Resistência térmica | [m ² . °C.W ⁻¹] |
| Re | Número de Reynolds | [] |
| T | Temperatura | [°C] |
| t | Duração do ensaio em horas | [h] |
| T_B | Temperatura do banho | [°C] |
| T_f | Temperatura de fusão | [°C] |
| T_{fm} | Temperatura de fusão média | [°C] |
| T_i | Temperatura medida com os termopares, $i \in \{1, \dots, 25\}$ | [°C] |
| T_{PCM} | Temperatura do PCM dentro do provete | [°C] |
| $T_{S/PCM}$ | Temperatura do ar no interior do provete – Provete sem PCM | [°C] |
| v | Velocidade de circulação da água | [m.s ⁻¹] |
| ΔH | Altura manométrica | [m] |
| ΔP | Perda de carga | [Pa] |
| ΔT | Intervalo de temperaturas de mudança de fase | [°C] |
| ε_a | Rugosidade absoluta | [m] |
| ε_r | Rugosidade relativa | [m] |
| ρ | Massa volúmica | [kg.m ⁻³] |
| φ | Fluxo de calor | [W.m ⁻²] |
| $\varphi_{aq.}$ | Fluxo de calor medido na face aquecida do provete | [W.m ⁻²] |
| $\varphi_{arr.}$ | Fluxo de calor medido na face arrefecida do provete | [W.m ⁻²] |

Siglas

| | |
|------------------|---|
| 3D | <i>Three dimensional</i> (tridimensional) |
| ADAI | Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial |
| CAD | <i>Computer Aided Design</i> (desenho assistido por computador) |
| CH ₄ | Metano |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| DEM | Departamento de Engenharia Mecânica |
| DSC | <i>Differential Scanning Calorimeter</i> (calorimetria diferencial de varrimento) |
| DTA | <i>Differential Thermal Analysis</i> (análise térmica diferencial) |
| FCTUC | Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra |
| GEE | Gases com efeito de estufa |
| LHS | <i>Latent Heat Storage</i> (armazenamento de calor latente) |
| N ₂ O | Óxido Nitroso |
| PCM | <i>Phase Change Material</i> (material de mudança de fase) |
| SHS | <i>Sensible Heat Storage</i> (armazenamento de calor sensível) |
| XPS | Espuma rígida de poliestireno extrudido |

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo faz-se um breve enquadramento deste trabalho, apresentam-se os principais objetivos e a metodologia adotada. Apresenta-se também a estrutura desta dissertação.

1.1. Enquadramento

A energia é essencial em todos os setores da atividade económica. Nos últimos anos, a sua procura aumentou exponencialmente devido aos elevados consumos nos diferentes setores. Uma das consequências relativas ao exagerado consumo é o elevado recurso a combustíveis fósseis. Esta realidade contribui para o aquecimento global, decorrente do lançamento de grandes quantidades de gases responsáveis pelo efeito de estufa (GEE) para a atmosfera, como por exemplo o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). Perante este cenário pessimista exige-se um uso mais racional da energia e o recurso a fontes de energia alternativas, nomeadamente energias renováveis.

Nos países desenvolvidos, o consumo de energia nos edifícios tem vindo a aumentar ao longo dos anos, motivado pelo aumento do padrão de qualidade de vida e das exigências de conforto dos ocupantes, principalmente ao nível do conforto térmico (aquecimento e arrefecimento).

Uma das formas de contribuir para a redução do consumo de energia para climatização é através da incorporação de materiais de mudança de fase (PCMs, do inglês “*Phase Change Materials*”) em soluções construtivas, aumentando assim a eficiência energética dos edifícios. Estes materiais são capazes de armazenar e restituir energia térmica a uma temperatura aproximadamente constante, ditada pelo seu ponto de mudança de fase. Este armazenamento de energia não só reduz o desequilíbrio entre a oferta e a procura, como também pode melhorar o desempenho dos sistemas de climatização [1].

A energia pode ser armazenada sob a forma de energia mecânica, energia elétrica, energia térmica e energia química. Relativamente à energia térmica, esta pode ser armazenada na envolvente construtiva de um edifício, principalmente sob a forma de calor

sensível (SHS, do inglês “*Sensible Heat Storage*”) e sob a forma de calor latente (LHS, do inglês “*Latent Heat Storage*”) [1,2].

Durante séculos, o armazenamento de calor sensível tem sido utilizado nos edifícios de forma a armazenar e liberar a energia térmica de forma passiva. Porém, é necessário um volume de material muito maior para armazenar a mesma quantidade de energia, comparativamente com o armazenamento de calor latente [2]. Com a utilização dos PCMs é possível armazenar de cinco a catorze vezes mais calor por unidade de volume, relativamente aos materiais utilizados para armazenar calor sensível, como por exemplo a água, o betão, as rochas, ou as usuais paredes de alvenaria [1].

O princípio da utilização dos materiais de mudança de fase (PCMs) é simples. Com o aumento da temperatura, o material muda de fase de sólido para líquido (fusão – processo endotérmico) absorvendo calor. Da mesma maneira, com a diminuição da temperatura, o material torna a mudar de fase de líquido para sólido (solidificação – processo exotérmico), sendo, assim, libertado o calor armazenado. Durante o processo de mudança de fase, a temperatura do PCM mantém-se praticamente constante.

Na Figura 1.1 representam-se as curvas teóricas das fases de aquecimento e de arrefecimento de um PCM. Estas são curvas típicas de um material puro, uma vez que os processos de mudança de fase são isotérmicos. No caso dos PCMs comerciais, geralmente misturas de vários compostos, a mudança de fase não ocorre a uma temperatura constante, mas sim num intervalo limitado de temperatura, ΔT . Para além disso, em PCMs não puros ocorre ainda o fenómeno de histerese, isto é, o ΔT do processo de fusão é diferente do ΔT do processo de solidificação.

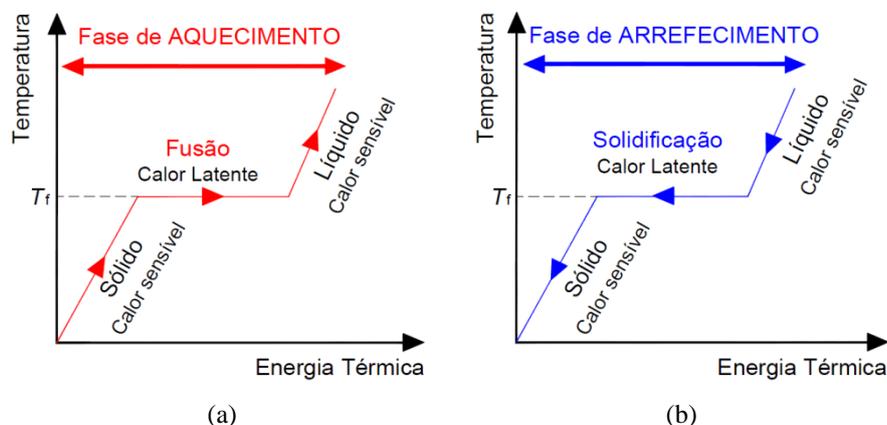


Figura 1.1. Curvas teóricas da relação temperatura – armazenamento de energia térmica de um PCM puro: (a) Fase de aquecimento, (b) Fase de arrefecimento.

A integração de PCMs na envolvente dos edifícios tem várias vantagens, tais como, aumentar a capacidade de armazenamento de energia, aumentar a inércia térmica do edifício, manter a temperatura na zona de conforto mais estável ao reduzir as flutuações da temperatura, contribuindo ainda para racionalizar o consumo de energia [3].

1.2. Motivação

O ponto de partida para este estudo situa-se no plano de trabalhos do mestre Nelson Soares no âmbito do seu doutoramento em Sistemas Sustentáveis de Energia pela Universidade de Coimbra, subordinado ao tema "*Passive thermal energy storage systems with phase change materials for the improvement of lightweight buildings' energy efficiency*". Neste contexto, considerou-se interessante e oportuno desenvolver uma instalação laboratorial para iniciar a investigação experimental sobre a problemática da incorporação de PCMs em edifícios, que se encontra em curso no DEM da FCTUC. Assim, para além do agrado pelo tema que lhe foi proposto, o autor encontrou uma fonte de motivação acrescida através da sua contextualização e inserção nas atividades e nas equipas de investigação do DEM da FCTUC.

1.3. Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem como finalidade avaliar experimentalmente a transferência de calor de elementos construtivos que contenham PCMs, associada à mudança de fase que nestes ocorre. Desta forma, um dos objetivos deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma instalação laboratorial para analisar a transferência de calor horizontal, envolvendo processos de mudança de fase, combinados com condução de calor e convecção natural na fase fundida do PCM. Em cada ensaio, é aplicada uma potência constante a uma resistência elétrica, para induzir um fluxo de calor horizontal através dos provetes de teste (cavidades retangulares – macrocápsulas de alumínio), que no seu interior contêm um PCM. Serão estudados dois tipos de PCMs: um PCM microencapsulado (Micronal DS 5001 X) e outro não microencapsulado (RT21). De modo a obter um fluxo de calor horizontal, salvaguarda-se a verticalidade dos provetes de teste na instalação experimental, assim como das placas aquecedora e arrefecedora.

Outro objetivo deste trabalho passa por avaliar o efeito de alheta nos processos de mudança de fase de PCMs. Para tal, serão utilizados dois tipos de provetes: sem alhetas

e com alhetas no seu interior. A introdução de alhetas no interior do provete faz com que ocorra uma variação da dimensão e do número de células retangulares (macrocápsulas).

Por fim, pretende-se ainda analisar algumas das potencialidades das soluções construtivas que incluem PCMs, tais como a regulação da temperatura e o tempo que estes levam a armazenar e a libertar energia, em função da sua configuração geométrica e do tipo de PCM utilizado.

1.4. Metodologia

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

- Revisão bibliográfica relativa ao tema em estudo;
- Análise e esboço de possíveis configurações para a instalação experimental e para os provetes;
- Elaboração de um desenho esquemático tridimensional em *SolidWorks* de toda a instalação experimental;
- Listagem e aquisição do material necessário para o desenvolvimento da instalação laboratorial;
- Fabrico de termopares do tipo-K e posterior calibração com o auxílio de um banho termostaticado da *Heto Lab Equipment*. Preparação dos sensores de fluxo de calor (*Omega HFS-4*);
- Configuração do sistema de aquisição de dados (*PicoLog Data Acquisition*);
- Fabrico dos provetes a partir de perfis retangulares de alumínio;
- Desenvolvimento de alguns componentes e montagem final da instalação experimental;
- Realização de testes em provetes com diferentes secções internas, contendo PCM (não microencapsulado) com uma temperatura de fusão de 21 °C;
- Realização de testes em provetes com diferentes secções internas, contendo PCM microencapsulado com uma temperatura de fusão de 26 °C;
- Tratamento dos resultados obtidos;
- Discussão dos resultados.

1.5. Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em sete capítulos. De seguida apresenta-se a descrição resumida de cada um dos capítulos.

No primeiro capítulo, procura-se justificar o tema desenvolvido e a sua relevância a nível ambiental, nomeadamente na redução das emissões dos GEE e no aumento da eficiência energética dos edifícios.

No segundo capítulo, faz-se uma breve revisão das principais características e propriedades termofísicas dos PCMs. Faz-se também uma revisão de alguns trabalhos realizados por autores nacionais e internacionais, no campo do armazenamento de energia térmica.

O capítulo três apresenta uma descrição detalhada da instalação experimental concebida e construída para o presente trabalho. Descrevem-se todas as propriedades e características dos seus componentes.

No capítulo quatro, expõe-se o protocolo experimental para a realização dos ensaios, sendo este dividido em três etapas (disposição dos sensores, fase de aquecimento e fase de arrefecimento).

O capítulo cinco é referente à apresentação e discussão dos resultados obtidos, relativos aos ensaios realizados com diferentes provetes e diferentes PCMs.

No sexto capítulo, apresenta-se a síntese conclusiva deste trabalho.

O capítulo sete é dedicado a sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, apresentam-se os Anexos, onde se encontram os resultados da calibração dos termopares, tais como as respetivas curvas de calibração. Apresentam-se também alguns dos resultados obtidos nos ensaios realizados com os diferentes provetes e os diferentes PCMs, assim como o cálculo da perda de carga a vencer pela bomba de circulação (circuito de água fria) e algumas figuras esquemáticas dos provetes e da instalação experimental.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, é efetuada uma breve revisão das principais características e propriedades termofísicas dos PCMs, assim como de alguns trabalhos realizados por autores nacionais e internacionais, no campo do armazenamento de energia térmica utilizando PCMs.

2.1. Materiais de mudança de fase (PCMs)

Na literatura [3-9], podem ser encontrados vários estudos de revisão dos diferentes tipos de PCMs disponíveis, dos principais métodos para a sua aplicação em edifícios ou noutros tipos de aplicações e, ainda, dos diferentes modos de os embalar ou incorporar diretamente em diversos materiais.

Como já foi referido, os PCMs podem ser definidos de uma forma simples, como materiais com a capacidade de alterar o seu estado físico num determinado intervalo de temperatura, absorvendo ou libertando energia do meio envolvente.

Os Iglus utilizados pelos esquimós são o melhor exemplo de uma construção com PCMs, adaptada a condições climáticas específicas, pelo que o conceito de PCM pode ser facilmente explicado através da água. Como é do conhecimento geral, a água pode-se apresentar em três estados físicos – estado sólido (gelo), estado líquido e ainda estado gasoso (vapor de água). O processo de transição do estado sólido para o estado líquido denomina-se de fusão e o processo inverso, de solidificação, ocorrendo ambos à temperatura de 0 °C. Da mesma forma, a transição do estado líquido para o estado de vapor denomina-se de vaporização, enquanto o processo inverso se denomina de condensação, ocorrendo ambos à temperatura de 100 °C, à pressão atmosférica [10]. A cada um destes processos de mudança de fase está associada uma quantidade de energia, geralmente denominada de entalpia ou simplesmente calor latente de fusão, de condensação, etc. Quando a mudança de fase está completa, o aquecimento/arrefecimento contínuo resulta num aumento/diminuição da temperatura, através da acumulação/libertação de calor sensível, de forma gradual e definida por uma propriedade denominada de calor específico. A Figura 2.1 apresenta os conceitos descritos anteriormente, para o caso da água.

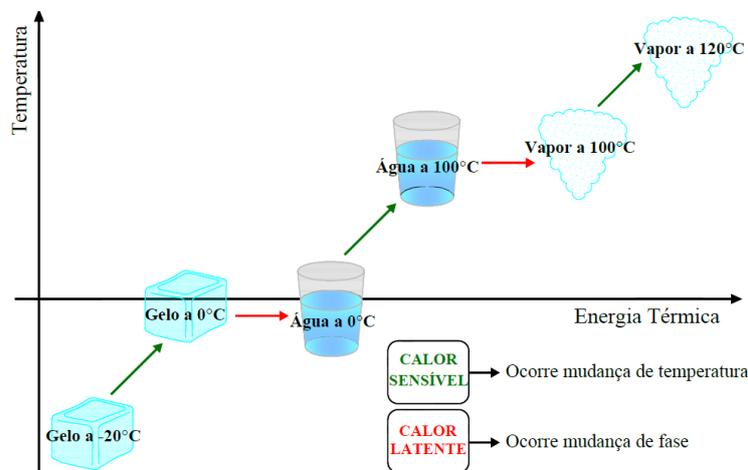


Figura 2.1. Representação esquemática dos processos de mudança de estado físico da água.

No caso dos PCMs, as transições de estado sólido-líquido e líquido-sólido são as mais interessantes para os processos de armazenamento de energia em edifícios, pois são aquelas que provocam menores alterações de volume e de pressão.

2.1.1. Propriedades

De entre os PCMs conhecidos, existe uma vasta gama de temperaturas de fusão. Facilmente se pode escolher um PCM cuja temperatura de fusão é a mais adequada para uma determinada aplicação. No caso da construção, os PCMs mais interessantes são aqueles que têm uma temperatura de transição de fase próxima da gama das temperaturas de conforto térmico. No entanto, para que seja possível a utilização destes materiais no armazenamento de energia, estes devem apresentar boas propriedades termofísicas, cinéticas e químicas. Além destas propriedades, o preço e a disponibilidade do material são também fatores importantes a considerar.

2.1.1.1. Propriedades termofísicas

As propriedades termofísicas que os PCMs devem apresentar são as seguintes:

- A temperatura de mudança de fase deve estar situada no intervalo de temperaturas de operação desejado;
- O calor latente de fusão deve ser elevado, de modo a armazenar o máximo de energia;
- A massa volúmica deve ser elevada, de modo a que a energia armazenada por unidade de volume seja elevada;

- O calor específico deve ser elevado, de modo a fornecer uma capacidade adicional de armazenamento de energia (calor sensível);
- A condutibilidade térmica deve ser relativamente elevada, tanto no estado sólido como no estado líquido, de modo a promover a transferência de calor nos ciclos de carga e de descarga de energia;
- A variação de volume durante a transição de fase (sólido-líquido) deve ser reduzida, de modo a diminuir os problemas com a sua contenção;
- O PCM deve fundir coerentemente, de modo a ter uma capacidade de armazenamento constante em cada ciclo de fusão/solidificação [8].

Para determinar algumas das propriedades termofísicas dos PCMs são utilizadas as seguintes técnicas: calorimetria diferencial de varrimento (DSC, do inglês “*Differential Scanning Calorimetry*”), análise térmica diferencial (DTA, do inglês “*Differential Thermal Analysis*”) e o método *T-history*. As duas primeiras técnicas são as mais utilizadas [6].

2.1.1.2. Propriedades cinéticas

As propriedades cinéticas que os PCMs devem apresentar são as seguintes:

- A velocidade de cristalização deve ser elevada, de modo a ser capaz de responder às solicitações do meio envolvente e para que o sub-arrefecimento¹ da fase líquida não se verifique [8].

2.1.1.3. Propriedades químicas

As propriedades químicas que os PCMs devem apresentar são as seguintes:

- Os ciclos de carga e descarga devem ser totalmente reversíveis;
- Não deverá ocorrer degradação após um elevado número de ciclos de fusão/solidificação;
- Por motivos de segurança, não devem ser inflamáveis, corrosivos, tóxicos ou explosivos [8].

¹ Sub-arrefecimento é o fenómeno que se verifica quando o PCM começa a solidificar abaixo da temperatura de solidificação, provocando a libertação da energia latente a temperaturas mais baixas (eventualmente fora da gama de operação desejada).

2.1.2. Classificação

Os PCMs são divididos em subcategorias, tendo em conta as suas diferentes composições químicas. Geralmente são classificados em três grupos: compostos orgânicos, inorgânicos e misturas eutéticas. O grupo dos compostos orgânicos pode ser dividido em parafinas e ácidos gordos, enquanto os compostos inorgânicos dividem-se em sais hidratados e metálicos. Por outro lado, as misturas eutéticas são combinações de dois ou mais componentes que fundem e cristalizam coerentemente. Na Figura 2.2 pode verificar-se que cada grupo tem a sua gama típica de temperaturas e entalpias de fusão.

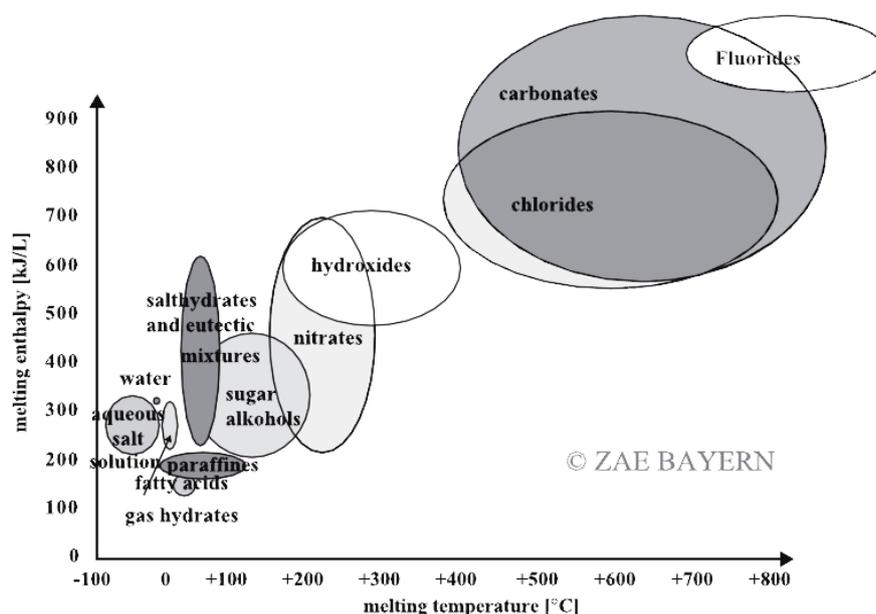


Figura 2.2. Temperatura e entalpia de fusão dos diferentes grupos de PCMs [6].

Geralmente utilizam-se gamas de temperatura específicas para determinados tipos de aplicação. Os materiais que mudam de fase abaixo de 15 °C são utilizados para armazenamento de frio, em sistemas de ar condicionado. Os que fundem acima dos 90 °C são utilizados para arrefecimento por absorção. Todos os outros materiais, que mudam de fase entre estas duas temperaturas, podem ser aplicados em sistemas de aquecimento solar e sobretudo na termorregulação dos edifícios [5].

Cada um destes grupos tem os seus prós e contras. A comparação das vantagens e desvantagens dos materiais orgânicos, inorgânicos e eutéticos é feita na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Vantagens e desvantagens dos diferentes grupos de PCMs [9].

| | PCMs Orgânicos | PCMs Inorgânicos | PCMs Eutécticos |
|--------------|--|---|---|
| Vantagens | <ul style="list-style-type: none"> • Têm uma vasta gama de temperaturas de fusão; • Apresentam muito pouco sub-arrefecimento durante a solidificação; • Fundem de forma congruente; • São compatíveis com a maioria dos materiais de construção; • Não têm segregação; • São quimicamente estáveis; • Têm um elevado calor latente de fusão; • São seguros e não reativos; • São recicláveis. | <ul style="list-style-type: none"> • São de fácil disponibilidade e têm um baixo custo; • Têm uma boa condutibilidade térmica (cerca de 0.5 W/m.°C); • Têm um elevado calor latente de fusão; • Apresentam pequenas variações de volume ao mudar de fase; • Não são inflamáveis. | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentam uma elevada temperatura de fusão; • Têm uma elevada capacidade de armazenamento de calor latente por unidade de volume. |
| Desvantagens | <ul style="list-style-type: none"> • Têm uma baixa condutibilidade térmica (cerca de 0.2 W/m.°C); • Apresentam significativas variações de volume na mudança de fase; • São inflamáveis. | <ul style="list-style-type: none"> • Apresentam algum sub-arrefecimento durante a fase de solidificação; • São corrosivos em contacto com alguns materiais. | <ul style="list-style-type: none"> • Inexistência de dados relativos a propriedades termofísicas devido à recente utilização destes materiais. |

2.1.3. Encapsulamento

Os PCMs devem ser encapsulados para garantir que durante a fase líquida estes não se derramam do local onde foram aplicados. Genericamente, existem dois métodos de encapsulamento: o microencapsulamento e o macroencapsulamento.

O microencapsulamento baseia-se em pequenas microcápsulas constituídas por um núcleo de PCM e uma parede composta por um filme polimérico fino (ver Figura 2.3 (a)). O diâmetro das microcápsulas pode variar entre 1 e 1000 μm , contudo, a sua distribuição encontra-se situada preferencialmente entre 1 e 60 μm .

O macroencapsulamento consiste na inclusão de PCM em sistemas de contenção. Neste caso o PCM é inserido num recipiente, que pode ter várias formas, tais como esférica, tubular, cilíndrica ou retangular (ver Figura 2.3 (b)). O material que serve de macrocápsula tem, por norma, uma elevada condutibilidade térmica, e não pode reagir com o PCM.

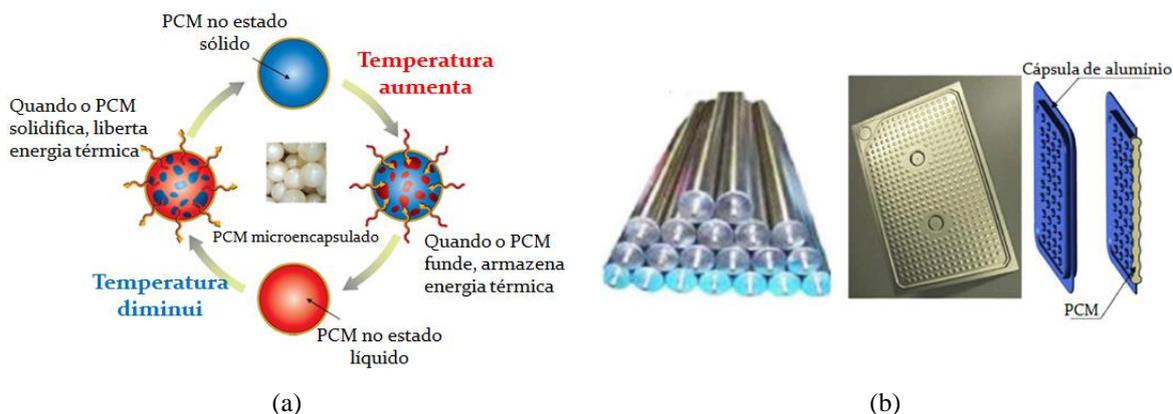


Figura 2.3. Encapsulamento dos PCMs: (a) Ciclo de mudança de fase numa microcápsula; (b) Macro-cápsulas tubulares e retangulares.

2.2. Avaliação da transferência de calor em elementos com PCMs

Nesta secção apresentam-se vários estudos numéricos e experimentais para a avaliação da transferência de calor em elementos com PCMs.

2.2.1. Análise numérica e experimental do aumento da condutância térmica de elementos com PCMs

O potencial dos PCMs implementados em dispositivos com a finalidade de armazenar energia térmica é muitas vezes limitado devido à sua reduzida condutibilidade térmica ($k = 0.2-0.5 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$), que é relativamente próxima da dos materiais isolantes. Deste modo, torna-se fulcral a integração de materiais de interface com elevada condutibilidade térmica, permitindo assim acelerar as trocas de calor com o PCM através do aumento da área de contato, de modo a maximizar o desempenho do sistema durante o ciclo de carga e descarga.

Vários estudos foram realizados sobre esta questão [11-14], mostrando a influência da escolha do material e do tipo de configuração da interface, na quantidade de energia armazenada e na quantidade de PCM fundida/solidificada durante o seu ciclo de funcionamento.

Stritih [11] realizou um estudo experimental para comparar a transferência de calor num módulo de armazenamento de calor latente com alhetas no seu interior e num módulo sem alhetas, tendo em conta os processos de fusão e solidificação. O autor utilizou uma parafina com um ponto de fusão de 30 °C , apropriada para a utilização em edifícios. A

instalação experimental (ver Figura 2.4) tem uma zona onde ocorre o armazenamento de calor (1), devidamente isolada, em contato com um permutador de calor (2), através do qual flui água aquecida ou arrefecida, conforme se esteja a fundir ou a solidificar o PCM, respetivamente. Através da medição do caudal de água e das temperaturas de entrada e de saída, é possível avaliar o armazenamento de calor.

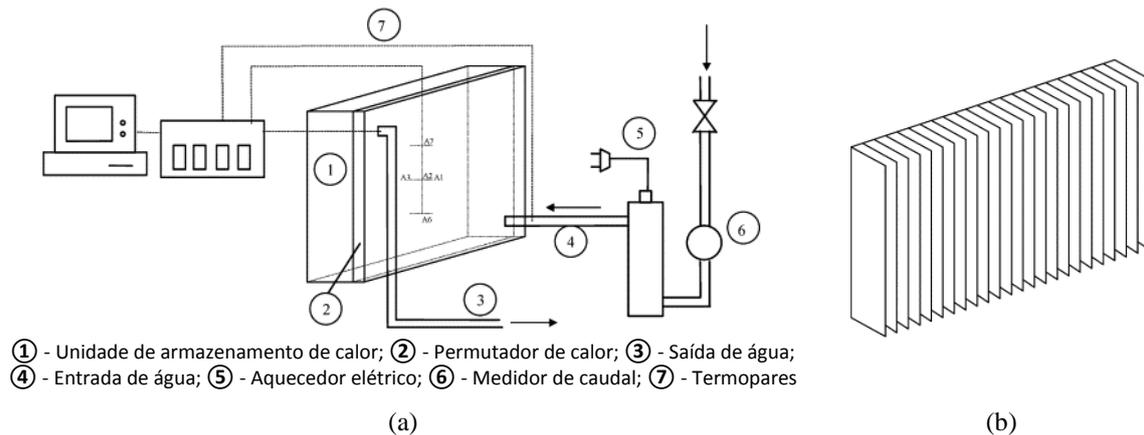


Figura 2.4. Instalação experimental: (a) esquema da montagem experimental; (b) alhetas para introduzir na unidade de armazenamento de calor (adaptado de [11]).

O autor verificou que, durante a fusão, o efeito da convecção natural no PCM fundido é dominante e aumenta a transferência de calor, sendo esse efeito diminuído com a incorporação de alhetas metálicas. Por outro lado, durante a solidificação, o efeito das alhetas fez-se sentir sobretudo no tempo de libertação de energia, que foi reduzido cerca de 40%, sendo nesse caso a condução o principal modo de transferência de calor.

Tal como a quantidade de alhetas ou a distância entre elas, também a sua configuração geométrica tem influência nos resultados, como verificaram vários autores [12-14].

Hasse et al. [12] estudaram o comportamento térmico de um painel de “favos de abelha” em alumínio (ver Figura 2.5) preenchido com parafina (ponto de fusão de 27 °C) para armazenar energia térmica a curto prazo. A utilização deste tipo de estrutura não só permite a melhoria da condutância térmica, devido à grande área de contato, como também tem um efeito de contenção, evitando possíveis fugas. A fim de comparar a resposta térmica, os autores estudaram experimentalmente três amostras: uma contendo água, outra contendo ar e outra contendo o PCM.

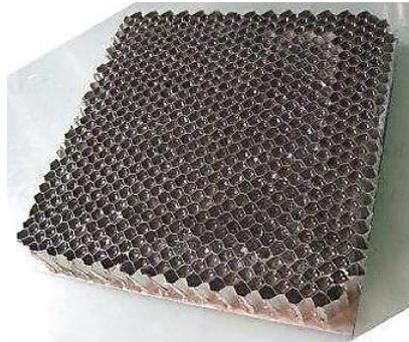


Figura 2.5. “Honeycomb panel” em alumínio, com parafina inserida nos alvéolos [12].

Através da medição do fluxo de calor e da temperatura em cada face dos provetes, os autores concluíram que a amostra que contém parafina é capaz de armazenar cerca de três vezes mais energia relativamente à amostra que contém água, aumentando claramente a inércia térmica.

Zhao et al. [13] realizaram um estudo numérico e experimental, com o objetivo de melhorar a transferência de calor numa unidade de armazenamento térmico, utilizando uma cera parafínica comercial incorporada em esponjas metálicas (ver Figura 2.6), que posteriormente foi comparada com uma amostra simples desse material (apenas PCM). Os autores concluíram que a incorporação de uma esponja metálica aumenta de 3 a 10 vezes a transferência de calor global durante a fusão, dependendo da estrutura daquele meio poroso e do metal que o constitui. Relativamente ao processo de solidificação, concluíram que é possível reduzir o tempo de solidificação em mais de metade.



Figura 2.6. Parafina incorporada em “metal foams”, neste caso de cobre [13].

Tan et al. [14] realizaram um estudo numérico e experimental, com o objetivo de avaliar as características da fusão de um PCM, contido dentro de um perfil retangular de

alumínio dotado de alhetas com diferentes formas geométricas (em Y, T, cruz e retas). Para tal, sujeitaram a base do modelo a um fluxo de calor constante de 1000 W/m^2 . A Figura 2.7 (a) mostra os diferentes padrões de fusão obtidos, para as diferentes configurações geométricas das alhetas utilizadas, para etapas de fusão de 1000, 2000 e 4000 segundos. Os autores observaram que os padrões de fusão são irregulares devido à convecção natural. Com efeito, os gradientes de temperatura dentro da zona fundida, principalmente na zona em que existem alhetas na horizontal e a 45° (geometria T e Y, respetivamente - ver Figura 2.7), originam correntes de convecção natural (vórtices), que são também fortemente influenciadas pelo fluxo de calor imposto na base do modelo. Por outro lado a geometria em cruz mostra que existe forte vorticidade na sua parte superior, sendo a parte inferior carente de vórtices recirculantes.

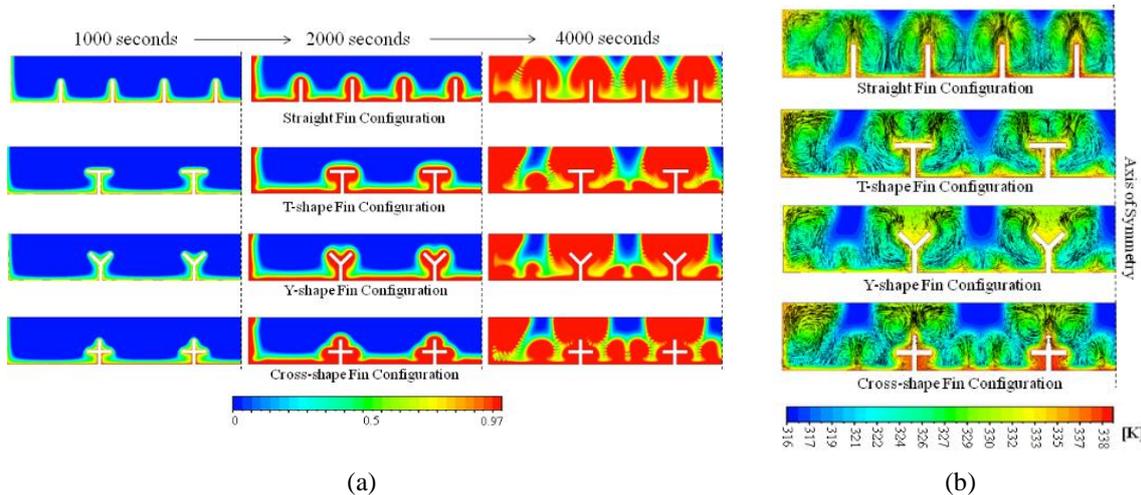


Figura 2.7. Diferentes configurações geométricas: (a) padrões de fusão em três instantes sucessivos; (b) padrões de distribuição da temperatura e campos de fluxo [14].

Os autores concluíram que o aumento do número de alhetas inibia de forma significativa o efeito da convecção natural, e que, relativamente às alhetas retas convencionais, as outras formas geométricas eram capazes de oferecer um desempenho compatível, ocorrendo igualmente um aumento da taxa de transferência de calor.

Um outro aspeto bastante importante foi estudado numericamente por Ye et al. [15]. Estes autores analisaram o efeito provocado pela alteração de volume de PCM numa cavidade retangular de uma unidade de armazenamento de calor latente, no processo da transferência de calor. Foram simuladas diferentes frações de volume de PCM na cavidade (de 35% a 95% de PCM), e analisados diferentes parâmetros de desempenho, tais como a

taxa de expansão volumétrica, o tempo total de armazenamento térmico, o fluxo de calor, a fração de líquido e os campos de velocidade e de temperatura.

Os autores verificaram um aumento da convecção natural, com o aumento de volume de PCM nas cavidades, sendo que, para a fração de 85% de PCM, ocorria a formação de acentuadas correntes de convecção natural (vórtices) na parte inferior, que melhoravam significativamente a taxa de transferência de calor. Além disso, a taxa de expansão diminuiu com o aumento do volume de PCM, enquanto o tempo total de armazenamento aumentou.

Huang et al. [16] e Longeon et al. [17] realizaram estudos com parafinas comerciais para avaliar o efeito da convecção natural na eficiência da transferência de calor em cavidades retangulares e em cavidades tubulares, respetivamente. Nos dois casos, os autores verificaram que a transferência de calor aumenta à medida que a frente de fusão avança, sendo esta potenciada pelas correntes de convecção natural. Verificaram também uma estratificação das temperaturas ao longo das cavidades, fazendo com que o PCM fundisse de cima para baixo.

Como se verificou nos estudos anteriores, a convecção natural afeta de forma significativa a fase de fusão dos PCMs, sendo causada pela variação de densidade do PCM no estado líquido, devido aos gradientes de temperatura. Muitas das instalações experimentais analisadas têm por base montagens do tipo “*Guarded hot plate*”, em que a fonte de calor é imposta na face inferior/superior do provete (proвете na horizontal – fluxo de calor vertical). No entanto, de modo a estudar outro tipo de configurações, muitos autores aplicam a fonte de calor de modo a desencadear um fluxo de calor horizontal (proвете na vertical – fluxo de calor horizontal). Estas configurações são particularmente interessantes para avaliar o comportamento de elementos a incorporar nas fachadas verticais dos edifícios.

2.2.1.1. Fonte de calor horizontal – Fluxo de calor Vertical

Numa investigação realizada por Darkwa e Zhou [18], comparou-se um composto de alumínio e hexadecano, com amostras de hexadecano puro. Para tal os autores recorreram ao equipamento de testes representado esquematicamente na Figura 2.8. Este é do tipo “*guarded hot plate*” e consiste numa placa quente que impõe um fluxo de calor (neste caso de cima para baixo) através do provete de teste, e numa placa fria na base,

com os respetivos sensores a meio. Colocaram ainda uma folha de silicone entre as amostras e os sensores de fluxo de calor de modo a eliminar possíveis resistências de contacto.

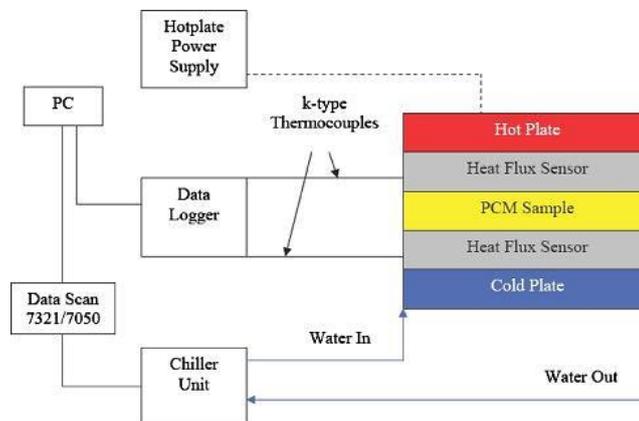


Figura 2.8. Esquema da instalação experimental: fonte de calor imposta na parte superior do provete – fluxo de calor vertical e descendente [18].

Os resultados revelaram uma resposta térmica mais rápida pelo compósito de alumínio e hexadecano em relação à amostra de hexadecano puro. A condutibilidade térmica aumentou de 0.15 W/m.K (hexadecano puro) para cerca de 1.25 W/m.K (compósito alumínio e hexadecano), fazendo com que ocorresse uma melhoria na taxa de fluxo de calor de cerca de 10% no período de carga e de 15% no período de libertação de calor. Contudo, no total da energia térmica libertada pelo sistema, houve um decréscimo de cerca de 5%, o que indica que a capacidade térmica efetiva foi reduzida pela presença das partículas de alumínio.

Uma outra investigação, realizada por Borreguero et al. [19], utiliza uma instalação experimental (ver Figura 2.9) com o objetivo de obter a caracterização térmica de materiais sólidos que contêm um PCM microencapsulado. A zona onde ocorre a transferência de calor é constituída por uma célula oca de alumínio, de dimensões 10×6×3 cm com uma espessura de parede de 1.0 mm, através do qual flui constantemente água desmineralizada de um banho termostatizado, por meio de uma bomba peristáltica. No seu interior incorporara-se ainda uma placa difusora, de modo a melhorar a distribuição do escoamento, evitando que este percorra trajetórias preferenciais. Em cima desta célula coloca-se uma amostra de gesso com PCM, com as mesmas dimensões.

Por fim, as duas células são isoladas com uma placa de cortiça com 2 cm de espessura. Foram instalados sensores de fluxo e termopares de modo a serem medidos os fluxos de calor e as temperaturas nos locais que os autores pretendiam.

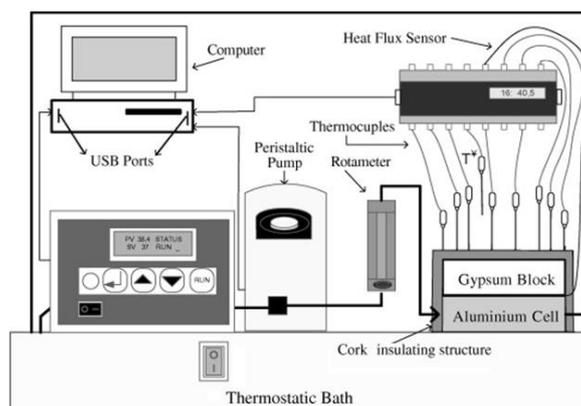


Figura 2.9. Esquema da instalação experimental de caracterização térmica de materiais sólidos que contêm microcápsulas de PCM [19].

2.2.1.2. Fonte de calor vertical – Fluxo de calor horizontal

Vários estudos foram realizados, de modo a simular o comportamento térmico dos PCMs submetidos a uma fonte de calor vertical. Nestas condições os provetes são sujeitos a fluxos de calor horizontais, sendo possível simular, por exemplo, o efeito dos PCMs numa envolvente exterior vertical sujeita a radiação solar, ou numa envolvente interior sujeita a cargas internas.

Hoje em dia, é frequente utilizarem-se nas envolventes dos edifícios painéis de gesso prensado também conhecidos por *wallboards*, especialmente em “edifícios leves”. Estes *wallboards* são extremamente adequados para a incorporação de PCMs, são bastante económicos e muito simples de aplicar. No entanto, para garantir uma boa eficiência destes elementos, é necessário ter em conta alguns fatores, tais como: a forma como o PCM é incorporado no gesso, a orientação das paredes, as condições climáticas, os ganhos solares diretos, os ganhos internos, a cor da superfície, a taxa de ventilação, o PCM escolhido e a sua temperatura de mudança de fase e, ainda, a capacidade de calor latente por unidade de área da parede [20].

Três tipos de *wallboards* contendo PCM foram estudados por Ahmad et al. [21]. Para tal os autores desenvolveram uma montagem experimental, de modo a determinarem a resposta térmica do elemento com PCMs a solicitações térmicas, testando

especialmente a sua capacidade de armazenar calor e de atenuar as oscilações de temperatura. A montagem experimental representada na Figura 2.10, mostra que os painéis são estudados na vertical (1), colocados entre dois permutadores de calor em aço inoxidável (2), que são alimentados por água proveniente de banhos termostatizados (3 e 4). O caudal e a temperatura da água são monitorizados à entrada e à saída através de termopares e medidores de caudal (5). Entre o painel e cada permutador de calor são instalados cinco sensores de fluxo com cinco termopares (6), incorporados numa camada fina de espuma de borracha condutora, de modo a garantir um bom contacto térmico sem ocorrer deterioração dos sensores de fluxo.

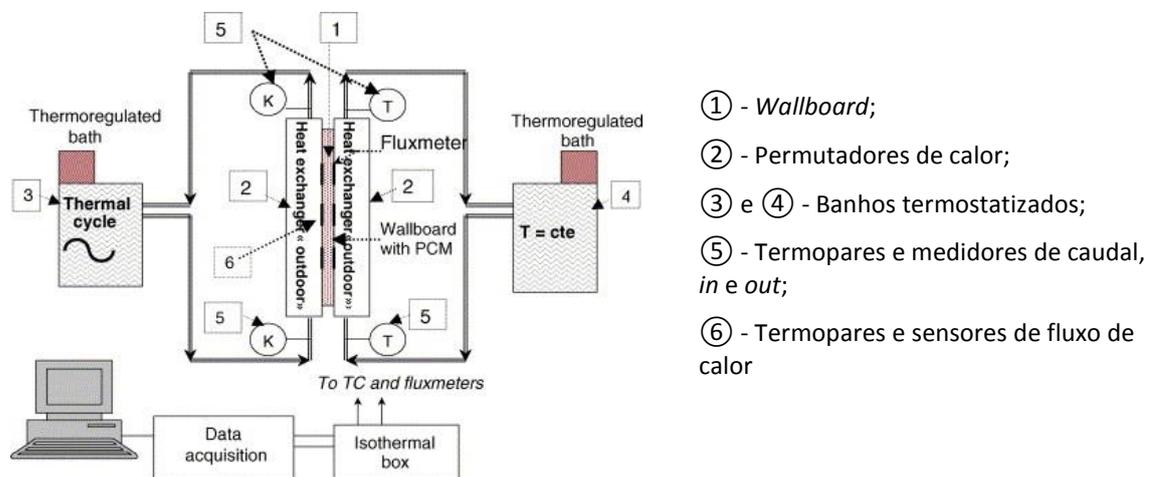


Figura 2.10. Esquema da instalação experimental, para determinação do comportamento térmico de *wallboards* contendo PCMs [21].

Os resultados experimentais foram comparados com os obtidos por simulação numérica, e os autores determinaram qual dos três *wallboards* era o mais conveniente para a finalidade pretendida. Eles concluíram que, ao fim de mais de 400 ciclos térmicos de carga e descarga, o PCM mantinha as mesmas características, não ocorrendo qualquer tipo de deterioração.

Outros estudos revelam a existência de uma espessura ótima para o *wallboard*. Kuznik et al. [22], tendo como finalidade aumentar a capacidade de armazenamento de calor com a menor quantidade de PCM possível, realizaram um estudo para otimizar a espessura de um *wallboard* com PCM para aplicar em edifícios. Os autores preveniram que se a espessura for exagerada, o tempo necessário para que o calor penetre todo o PCM é maior do que o número total de horas em que o sol está disponível, sendo o processo de

armazenamento comprometido. Os autores, através dos resultados obtidos relativamente à energia armazenada num dia completo em função da espessura do PCM, chegaram à espessura ótima de 1 cm, sendo que esta era capaz de duplicar a inércia térmica, em comparação com uma camada de gesso tradicional.

Uma outra instalação experimental foi utilizada por Joulin et al [23]. Esta baseia-se na medição das temperaturas e dos fluxos de calor trocados entre as duas faces laterais de uma amostra de PCM, de modo a obter o calor total armazenado durante o processo de mudança de fase. A montagem experimental (ver Figura 2.11) consiste em duas placas permutadoras de calor verticais de alumínio (5) de dimensões 500×500×19 mm com uma amostra de tijolo com PCM (6) no meio com a dimensão de 210×140×25 mm. A temperatura em cada face da amostra é assegurada por meio de um banho termostaticado (3), que assegura a regulação da temperatura com uma precisão de 0.1 °C. Entre a placa e a amostra encontram-se os sensores de fluxo de calor e os termopares (4). Por fim, as faces laterais são devidamente isoladas (2), sendo as partes superior e inferior isoladas por uma espuma de poliuretano de 10 cm (1).

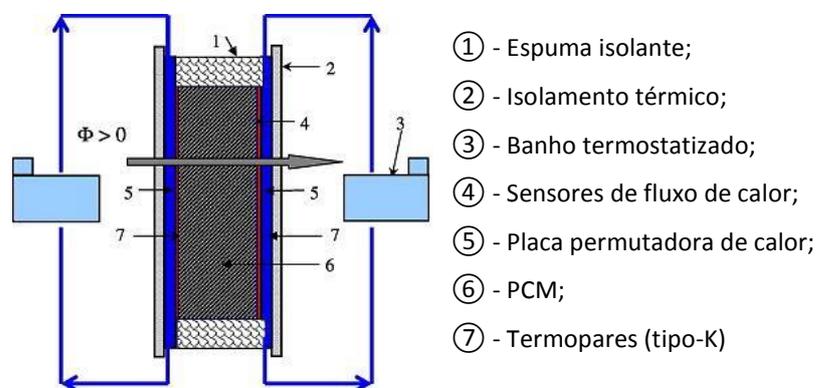


Figura 2.11. Esquema da instalação experimental para o estudo de um PCM, baseada na medição de temperaturas e fluxos de calor durante o processo de mudança de fase [23].

P. D. Silva et al. [24] e P. Lamberg et al. [25] realizaram estudos relativamente à fusão e solidificação de ceras parafínicas incorporadas em recipientes de geometria retangular, orientados verticalmente. Os primeiros autores [24] utilizaram o modelo experimental apresentado na Figura 2.12. A unidade de armazenamento de secção retangular, consiste em duas paredes de alumínio paralelas com 4 mm de espessura, separadas por um espaço de 3 cm, sendo as restantes paredes de acrílico, de modo a permitir a visualização do interior. O aquecimento é realizado numa das paredes através de

um circuito elétrico que fornece um fluxo de calor constante. Por outro lado, na parede oposta realiza-se o arrefecimento; para tal, paralelamente a essa parede existe outra parede constituída por poliuretano com 15 cm de espessura, criando assim um canal com 5 mm de espessura por onde flui o fluido de arrefecimento (ar). Os autores realizaram ainda medições no interior da unidade de armazenamento, recorrendo a termopares do tipo-T colocados em três níveis distintos.

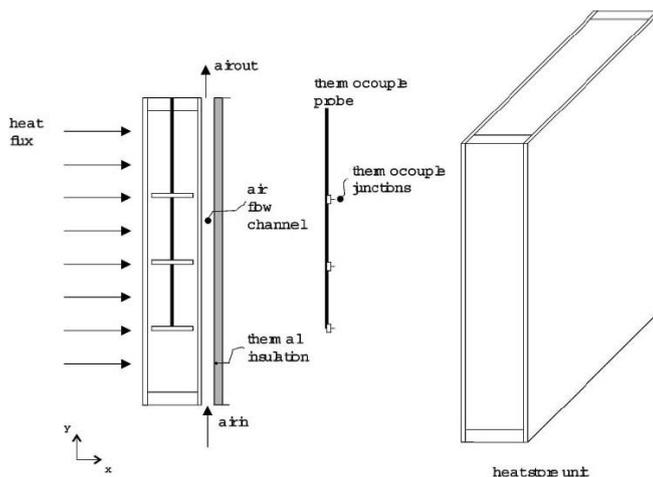


Figura 2.12. Esquema da unidade de armazenamento térmico [24].

Os autores concluíram que o processo de transferência de calor por condução controla a fase inicial da fusão e quase toda a fase de solidificação; por outro lado, o processo de convecção natural desencadeia uma estratificação térmica e um gradiente de temperaturas vertical no interior da unidade de armazenamento de calor.

Na outra investigação [25], os autores utilizam uma unidade de armazenamento de secção retangular idêntica à anterior e, ainda, outra configuração que inclui duas alhetas no interior da cavidade retangular, de modo a aumentar a transferência de calor, como se pode verificar na Figura 2.13. Foram também realizadas medições de temperatura no interior das cavidades, utilizando termopares do tipo-K separados entre si por 2 mm e posicionados de forma ascendente, no sentido do fluxo de calor.

Os autores verificaram que, no início da fusão, a velocidade de mudança de fase do PCM devido às forças de flutuação é pequena; contudo, com o decorrer do ensaio, esta tende a aumentar de forma significativa. Verificaram ainda que a convecção natural é predominante na fase de fusão, e atua sobre o PCM fundido provocando uma taxa de fusão superior na parte de cima das cavidades.

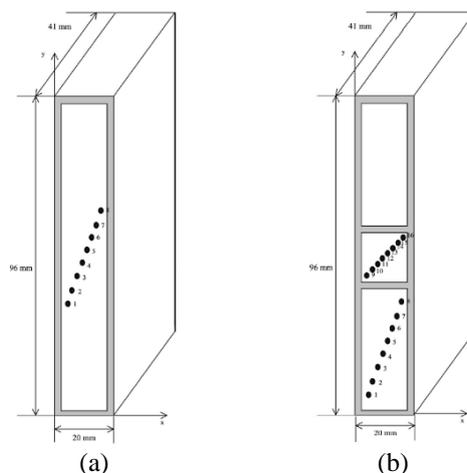


Figura 2.13. Esquema da unidade de armazenamento térmico [25]: (a) sem alhetas; (b) com duas alhetas.

Como se constatou através dos artigos anteriores, os modelos numéricos e experimentais propostos pelos investigadores são desenvolvidos na vertical ou na horizontal. Se o objetivo for simular um elemento de uma parede vertical de um edifício (aquecimento imposto pela lateral), o fluxo de calor aplicado terá de ser horizontal e perpendicular à força de gravidade. Por outro lado, se o objetivo for simular uma laje (aquecimento pela base ou pelo topo), o fluxo de calor aplicado deverá ser vertical e com o mesmo sentido da força de gravidade (ou contrário). Sempre que o fluxo de calor é imposto na base do modelo, os gradientes de temperatura influenciam fortemente o efeito da convecção natural, criando vórtices que potenciam a transferência de calor, sendo que a convecção natural aumenta à medida que o PCM funde.

A densidade dos PCMs decresce em função do aumento da temperatura. Esta variação da densidade provoca um efeito de flutuação [14]. Assim sendo, ao atingir a sua temperatura de fusão, o PCM funde e conseqüentemente a sua densidade reduz-se significativamente. Como a zona fundida está menos densa, esta tende a subir, fazendo uma recirculação com o auxílio das correntes de convecção natural.

Existe uma grande dificuldade em analisar estes sistemas, devido à não linearidade da interface líquido-sólido, uma vez que a frente de fusão está em constante movimento ao longo do tempo, e também devido à não homogeneidade dos materiais. Muitos investigadores recorrem a hipóteses de simplificação de modo a facilitar a análise numérica dos problemas. Todavia, a obtenção de resultados experimentais é fundamental para melhor compreender os fenómenos de transferência de calor envolvidos, e para validar os modelos numéricos desenvolvidos.

3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, é efetuada uma descrição detalhada da instalação experimental desenvolvida. Todas as propriedades e características dos seus componentes são devidamente descritas.

3.1. Descrição geral

Concebeu-se uma instalação laboratorial destinada ao estudo da transferência de calor na direção horizontal em cavidades retangulares com diferentes secções, contendo PCMs no seu interior. O PCM no interior do provete está sujeito a processos de condução de calor e de convecção natural, durante o seu ciclo de mudança de fase. A verticalidade da instalação experimental foi assegurada, sendo assim possível garantir um fluxo de calor horizontal. O fluxo de calor pode-se considerar essencialmente unidirecional, uma vez que todos os módulos possuem isolamento térmico (cortiça) com 15 centímetros de espessura, em todo o perímetro.

Um esboço preliminar da instalação laboratorial é apresentado na Figura 3.1, onde se pode verificar que esta é dividida em três módulos – módulo de aquecimento (A), módulo do provete (B) e módulo de arrefecimento (C).

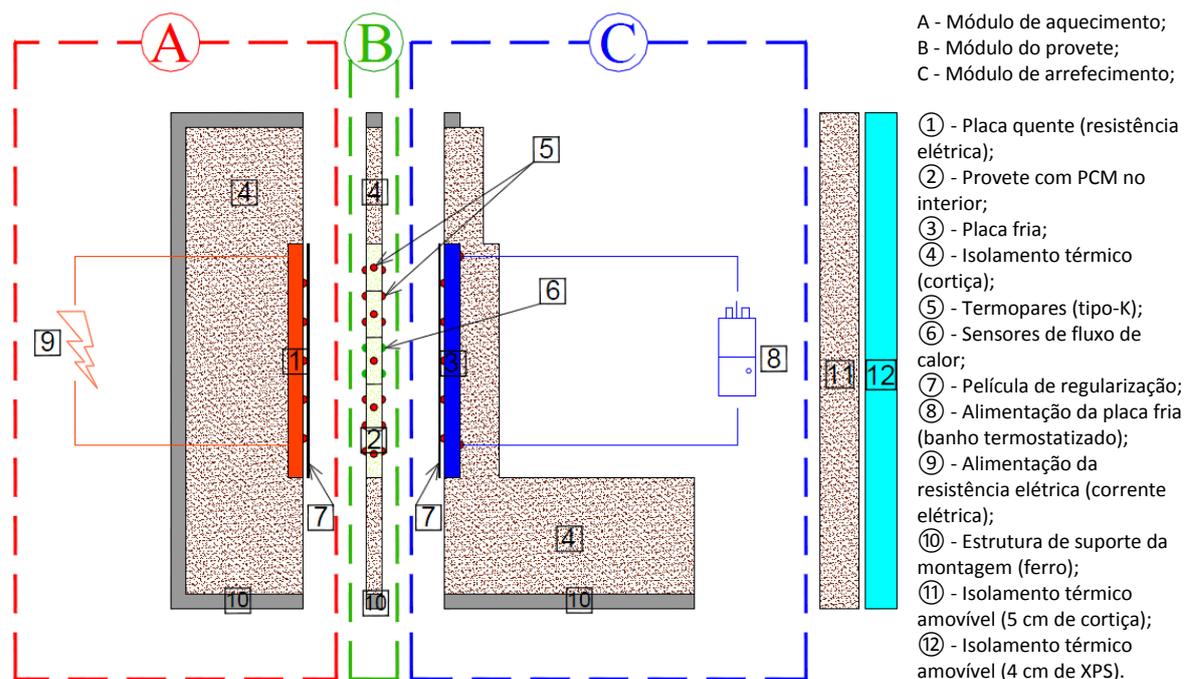


Figura 3.1. Esquema preliminar da instalação experimental desenvolvida.

Para estudar um ciclo de carga e descarga de um PCM é necessário aquecê-lo, numa primeira fase, e posteriormente arrefecê-lo, de modo a que seja possível determinar o tempo que ele demora a fundir/solidificar e quantificar a energia térmica acumulada/restituída. Portanto, numa primeira abordagem ao esquema anterior, podem-se considerar dois tipos de funcionamento: o aquecimento e o arrefecimento.

A fusão do PCM acontece quando se impõe numa das faces do provete uma fonte de calor. Por outro lado, a solidificação do PCM dá-se quando se estabelece o contato com uma fonte fria. O aquecimento é providenciado por uma resistência elétrica, e o arrefecimento por uma placa fria refrigerada por um circuito de água fria, proveniente de uma unidade termostatizada. É no módulo central (B) que se encontra o provete contendo o PCM, sendo nele que ocorre a mudança de fase. São realizadas medições de temperatura e dos fluxos de calor. Todos os módulos são isolados termicamente.

3.2. Modelo geométrico

Na Figura 3.2, apresenta-se um desenho esquemático da instalação laboratorial realizado através do *software* de CAD 3D *SolidWorks*, que serviu de base para a elaboração da montagem final.

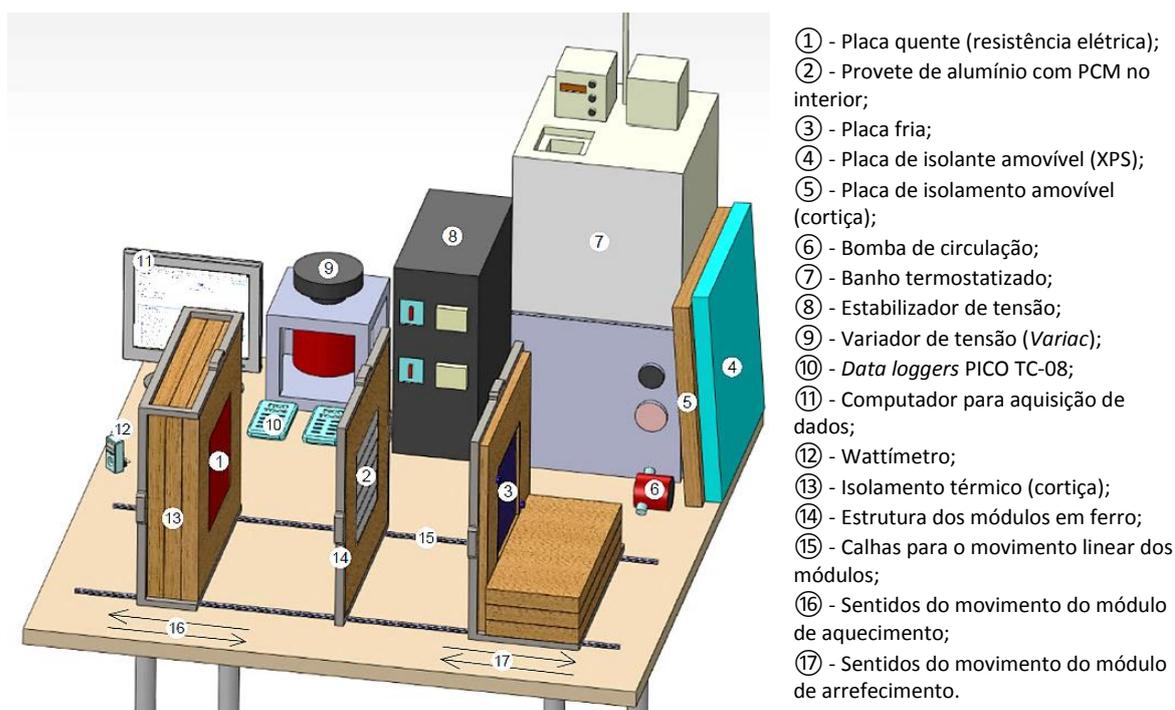


Figura 3.2. Desenho esquemático da instalação experimental.

Na Figura 3.3. apresenta-se uma imagem da montagem experimental final, localizada no laboratório de Climatização e Ambiente do DEM da FCTUC.



Figura 3.3. Instalação laboratorial (Laboratório de Climatização e Ambiente, FCTUC-DEM).

Como se pode verificar, a estrutura que sustenta os módulos foi unida a um sistema de calhas que permitem o movimento linear, possibilitando assim uma fácil movimentação de cada módulo. No entanto, apenas os módulos de aquecimento e arrefecimento possuem a capacidade de se movimentar linearmente, uma vez que o módulo do provete é estático, encontrando-se unido à mesa de suporte.

3.2.1. Módulo de aquecimento

É neste módulo que se encontra a placa quente (30×30 cm) que fornece um fluxo de calor ao provete, até que ocorra a fusão do PCM nele contido. Esta placa quente é baseada numa resistência elétrica, que está ligada a um variador de tensão (*Variac*) de modo a ser possível controlar a potência que ela fornece. Estes componentes estão ligados a um estabilizador de tensão, que elimina possíveis picos de corrente ou qualquer outra anomalia da rede. Por sua vez, o valor da potência é lido a cada instante, por meio de um wattímetro digital.

Procedeu-se à colocação de termopares na superfície da placa quente, ligados em paralelo na mesma ficha, permitindo conhecer a sua temperatura média. Na Figura 3.4 (a), apresenta-se a distribuição dos cinco termopares na superfície da placa quente, tendo estes sido posicionados em cruz. Um dos termopares encontra-se no centro da placa e os restantes a uma distância de 7.5 cm das arestas laterais.

De modo a minimizar o efeito da presença dos fios dos termopares, nefasto em termos do contato térmico entre a placa quente e o provete, colocou-se uma película de regularização em cima da placa quente, uniformizando assim a sua superfície, ver Figura 3.4 (b). Por fim, na Figura 3.4 (c) apresenta-se a versão final do módulo de aquecimento.

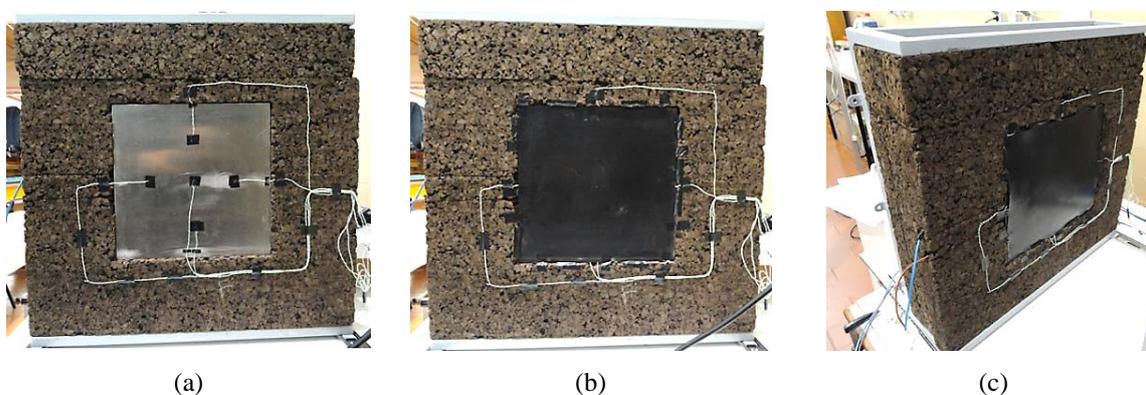


Figura 3.4. Módulo de aquecimento: (a) distribuição dos termopares na superfície da placa quente; (b) inclusão da película de regularização; (c) vista do módulo de aquecimento.

A caracterização dos componentes relativos ao módulo de aquecimento é realizada de seguida.

3.2.1.1. Placa quente

A placa quente, representada na Figura 3.5, foi fabricada pela Crussel e tem as dimensões de 30×30 cm. Esta é essencialmente constituída por duas placas de alumínio com 8 mm de espessura cada, para uniformização da temperatura, tendo intercalado o elemento de aquecimento – a resistência elétrica. O isolamento elétrico entre as placas de alumínio e a resistência é feito por folhas de mica. As principais características da placa quente são apresentadas na Tabela 3.1.

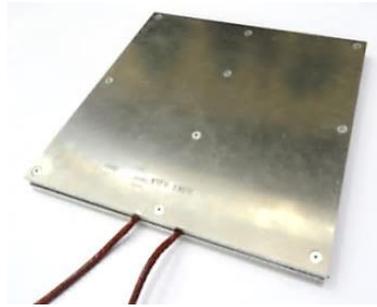


Figura 3.5. Placa quente, contendo a resistência elétrica.

Tabela 3.1. Características da placa quente.

| Características da placa quente | |
|-----------------------------------|--------------|
| Potência máxima | 100 W |
| Tensão nominal | 230 V |
| Resistência elétrica ² | 530 Ω |
| Frequência nominal | 50 Hz |

3.2.1.2. Película de regularização de superfície

Esta película serve essencialmente para eliminar qualquer irregularidade, como as causadas pelos fios dos sensores, e garantir um bom contato entre as superfícies da placa quente e do provete. Trata-se de uma película lisa de borracha macia, com dimensões iguais ao contorno da placa quente e cerca de 1 mm de espessura. A mesma película é também utilizada na placa fria pelas mesmas razões.

3.2.1.3. Componentes elétricos

A placa quente está ligada a um variador de tensão (“*Variac*”) da marca *Lübcke* (ver Figura 3.6 (a)). Com este aparelho pode-se variar a potência que a resistência está a fornecer, sendo assim possível realizar ensaios com diferentes fluxos de calor. Uma vez que a variável controlada com o *Variac* é a tensão elétrica de saída, uma forma cómoda de obter a potência instantânea consiste em utilizar um Wattímetro digital, Figura 3.6 (b). Para além da potência instantânea, pode-se também consultar outras características da corrente elétrica, como a tensão e a frequência. O funcionamento da resistência elétrica é protegido por um estabilizador de tensão, da marca *Projecontrol* e modelo EET406/5 kVA, Figura 3.6 (c). Este equipamento tanto elimina eventuais picos de corrente, como pequenas anomalias da rede elétrica, fazendo com que a potência se mantenha praticamente constante ao longo do ensaio.

² Valor medido através de um multímetro da marca Fluke, modelo 85 III.

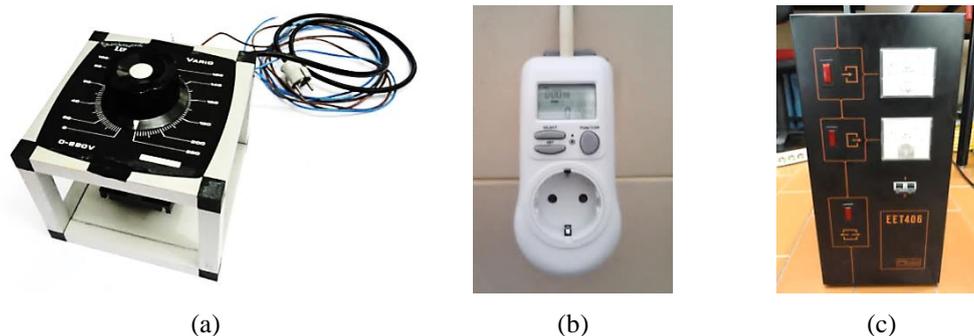


Figura 3.6. (a) Variac - Lübecke Vario; (b) Wattímetro digital; (c) Estabilizador de tensão.

As principais características do *Variac* e do estabilizador de tensão apresentam-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Características do *Variac* e do estabilizador de tensão.

| Características do <i>Variac</i> | | Características do estabilizador de tensão | |
|----------------------------------|-------------|--|-----------------------|
| Tensão no primário | 220 V | Número de série | 406/5/96 |
| Tensão no secundário | 0 – 220 V | Entrada | 220 V – 50 Hz – 25 A |
| Frequência | 50 – 400 Hz | Saída | 220 V – 50 Hz – 5 kVA |
| Intensidade | 6.3 A | | |

3.2.1.4. Isolamentos térmicos

Para o isolamento térmico de todos os módulos utilizaram-se placas de aglomerado de cortiça expandida, da Amorim Isolamentos, S.A.

Numa primeira abordagem, equacionou-se a utilização de poliestireno extrudido (XPS) para isolamento térmico de todos os módulos; no entanto, a temperatura máxima admissível por este material é de cerca de 75 °C. Assim sendo, apenas na fase de arrefecimento se utiliza uma placa deste material com 40 mm de espessura como isolamento amovível (proporciona um bom contacto com o provete). Para ser possível cobrir uma vasta gama de temperaturas de fusão, optou-se pela utilização de aglomerado de cortiça. Tendo em conta a espessura prevista para os provetes e para a estrutura de suporte, utilizaram-se placas de aglomerado de cortiça com uma espessura de 25 e 50 mm.

Segundo o fabricante, são as seguintes as principais vantagens deste produto: é um excelente isolante térmico, tem uma vasta gama de temperaturas de utilização (de -200 °C a 130 °C), proporciona um ambiente saudável, é totalmente reciclável e tem uma durabilidade ilimitada sem perda de eficácia. Na Tabela 3.3 são apresentadas algumas das propriedades das placas de aglomerado de cortiça utilizadas e do XPS.

Tabela 3.3. Características técnicas dos isolamentos térmicos.

| Características técnicas | Placas de aglomerado de cortiça | | Poliestireno extrudido |
|---------------------------------|--|--------------------------|-------------------------------|
| Espessura nominal | 25 mm | 50 mm | 40 mm |
| Comprimento nominal | 1000 mm | 1000 mm | 2600 mm |
| Largura nominal | 500 mm | 500 mm | 600 mm |
| Condutibilidade térmica | 0.037/0.040 W/m.K | 0.037/0.040 W/m.K | 0.035 W/m.K |
| Resistência térmica declarada | 0.625 m ² .K/W | 1.25 m ² .K/W | 0.85 m ² .K/W |
| Massa volúmica | 120 kg/m ³ | 120 kg/m ³ | 30 kg/m ³ |
| Reação ao fogo | Euroclasse E | Euroclasse E | Euroclasse E |
| Deformação | 10% | 10% | - |

3.2.1.5. Estrutura de suporte e sistema de calhas

Cada um dos módulos tem uma estrutura metálica de suporte, que assenta num sistema de calhas comum em todos os módulos. A construção da estrutura da montagem foi concebida através de perfis retangulares (25×20 mm) de ferro negro. Esta foi projetada de acordo com as dimensões pretendidas para o isolamento térmico e de modo a acomodar esse material bem como os restantes constituintes. A estrutura possui ainda três anilhas de chapa soldadas lateralmente, de forma a ser possível um aperto uniforme sempre que se associem os módulos. O aperto é realizado manualmente através de “porcas de orelhas” associadas a varões roscados.

Relativamente ao sistema de calhas, este foi adaptado de um sistema de abertura de gavetas. O seu funcionamento permite o deslocamento linear dos módulos de forma simples e bastante rápida. Este foi acoplado à parte inferior da estrutura esquelética, sendo posteriormente aparafusado ao tampo da mesa de trabalho.

3.2.2. Módulo de arrefecimento

É através deste módulo que se procede ao arrefecimento do provete, para que todo o PCM que está no seu interior solidifique e liberte toda a energia armazenada. Para tal, utiliza-se uma placa fria, que tem um circuito interno em dupla espiral, por onde circula água fria proveniente de uma unidade termostatzada, por ação de uma bomba de circulação.

Analogamente ao que se verificou no módulo de aquecimento, também neste módulo foram colocados termopares na superfície da placa fria, de modo a ser possível determinar a sua temperatura média. Na Figura 3.7 (a), apresenta-se a distribuição de cinco

termopares na superfície da placa fria, tendo estes sido posicionados também em cruz. Relativamente às posições, um dos termopares encontra-se no centro da placa fria e os restantes a uma distância de 7.75 cm das arestas.

De modo a minimizar o efeito da presença dos fios dos termopares, colocou-se também uma película de regularização em cima da placa fria, uniformizando assim a sua superfície (ver Figura 3.7 (b)). Na Figura 3.7 (c) apresenta-se a versão final do módulo de arrefecimento.

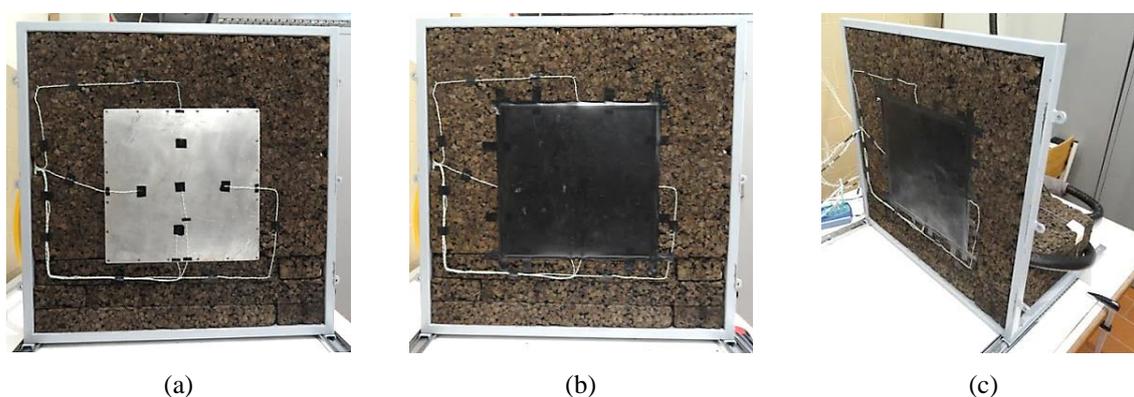


Figura 3.7. Módulo de arrefecimento: (a) distribuição dos termopares na superfície da placa fria; (b) inclusão da película de regularização; (c) Vista do módulo de arrefecimento.

Como foi referido anteriormente, também este módulo possui uma estrutura de ferro acoplada ao sistema de calhas, sendo igualmente preenchida com isolamento térmico de aglomerado de cortiça. A caracterização dos componentes relativos ao módulo de arrefecimento que ainda não foram expostos é realizada de seguida.

3.2.2.1. Placa fria

A placa fria exibida na Figura 3.8 (a), pertence a uma montagem experimental de medição da condutibilidade térmica de materiais (*Guarded hot plate*) [26], existente no laboratório de Transmissão de Calor do DEM da FCTUC. A superfície da placa em contacto com o provete é de alumínio, com 5 cm de espessura, sendo a parte oposta constituída por uma folha de cortiça de 4 mm de espessura sobre a qual foi fixada uma placa de fibra de vidro de 10 mm de espessura. No seu interior, a placa contém uma serpentina em tubo de cobre com 10 mm de diâmetro externo e 2 mm de espessura (ver Figura 3.8 (c)). No interior desta serpentina circula o fluido arrefecedor, que neste caso é água destilada. Todo o restante espaço no interior da placa é preenchido com limalha de

alumínio, permitindo assim a uniformização da temperatura da superfície da placa. A dimensão total da placa é de 31×31 cm.

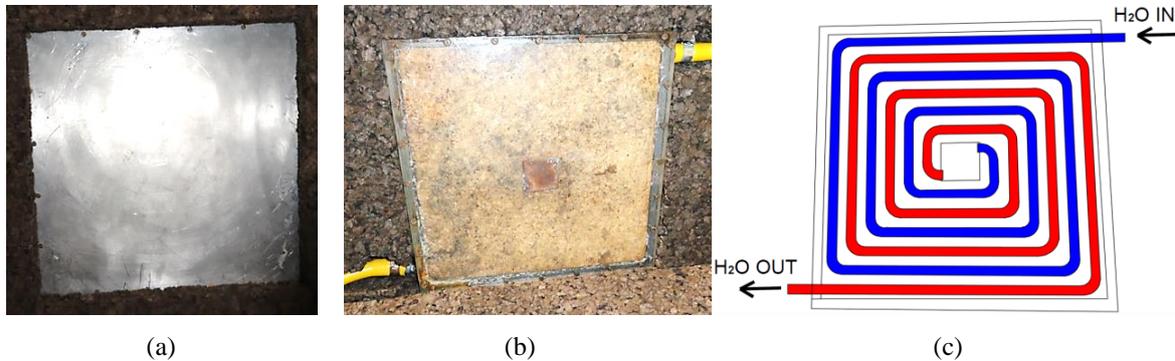


Figura 3.8. Placa fria: (a) face que está em contacto com o provete; (b) face isolada da placa fria; (c) secção em corte da placa fria, mostrando o circuito de água.

3.2.2.2. Banho termostaticado

O equipamento utilizado é da marca *Heto Lab Equipment*, tipo DBT KB21 e trata-se de um banho termostaticado agitado (ver Figura 3.9). Este equipamento possui um sistema de aquecimento (resistência elétrica) e um sistema de refrigeração, sendo dotado de uma unidade de controlo de temperatura de leitura digital. É frequentemente utilizado para calibração de sensores de temperatura, devido à sua elevada estabilidade de temperatura ($\pm 0.005\text{ }^{\circ}\text{C}/0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$).



Figura 3.9. Banho termostaticado para calibrações.

Este equipamento possibilita ainda a utilização de vários líquidos, podendo assim cobrir uma vasta gama de temperaturas ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Neste caso será utilizada água destilada, cuja temperatura recomendada de utilização varia entre 1 e $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tal como foi visto anteriormente, é ele que fornece a água à temperatura desejada (neste caso água destilada a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$), que vai circular pela placa fria de modo a

baixar a temperatura do provete e a retirar toda a energia armazenada pelo PCM. As principais características do equipamento são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4. Características técnicas do banho termostatzado.

| Características técnicas – DBT KB 21 | | Características técnicas – Agitador 106-3 FOH 920 | | Características técnicas – Controlador 01 DBT 200 | |
|--------------------------------------|--------------|---|----------|---|---------------|
| Temperatura de trabalho | -30 a 100 °C | Potência de aquecimento | 440 W | Gama de temperaturas lidas | -120 a 200 °C |
| Estabilidade de temperatura | ±0.005/0.001 | Potência consumida pelo motor de agitação | 40 W | Potência | 1240 W |
| Volume | 7 litros | Rotação | 2800 rpm | Frequência | 50 Hz |
| Frequência | 50 Hz | Frequência | 50 Hz | Tensão | 230 V |
| Tensão | 230 V | Tensão | 230 V | | |
| Corrente | 1.2 A | | | | |
| Potência consumida | 145 W | | | | |
| Líquido refrigerante | R134a | | | | |
| Quantidade de líquido refrigerante | 165 g | | | | |

3.2.2.3. Bomba de circulação e tubagens

Através dos cálculos realizados relativos às perdas de carga na placa fria e nas tubagens de ligação (ANEXO A), selecionou-se a bomba mais adequada para realizar a circulação da água. A escolha recaiu numa bomba de circulação da marca *Grundfos* tipo UPE 25-60, Figura 3.10. Estas bombas são normalmente utilizadas em instalações de aquecimento central, e são apropriadas para vencer elevadas perdas de carga.



Figura 3.10. Bomba de circulação *Grundfos* UPE 25-60.

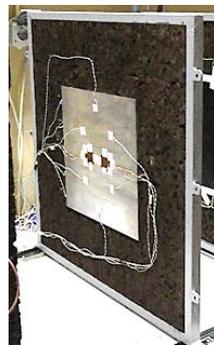
Relativamente às tubagens, a água chega até à placa fria através de manguerias de borracha de 15 mm de diâmetro exterior e 3 mm de espessura. Estas foram devidamente isoladas para evitar condensações no exterior (e perdas de frio para o ambiente). Para assegurar a uniformização da temperatura na placa fria, garante-se um caudal de circulação de cerca de 4 litros/minuto (escoamento turbulento). Na Tabela 3.5 apresentam-se algumas das características da bomba de circulação.

Tabela 3.5. Características da bomba de circulação.

| Características técnicas – Grundfos UPE 25-60 | |
|--|---------------|
| Modelo | UPE 25-60 180 |
| Classe | H |
| Tensão | 230-240 V |
| Frequência | 50 Hz |
| Capacidade elétrica | 2.5 μ F |
| Potência mínima | 40 W |
| Potência máxima | 100 W |

3.2.3. Módulo do Proвете

Conforme referido anteriormente, o módulo do provete é estático, uma vez que está fixo à mesa de suporte. Ele é constituído por um provete que está termicamente isolado com aglomerado de cortiça em todo o seu perímetro, estando depois dependente dos outros módulos para a realização dos ensaios de aquecimento e de arrefecimento (ver Figura 3.11). Foram construídos cinco provetes com diferentes secções, para serem posteriormente preenchidos e testados com PCMs. Os provetes fabricados e os PCMs utilizados são expostos nos pontos seguintes.

**Figura 3.11.** Módulo do provete.

3.2.3.1. Provetes

Os provetes foram fabricados a partir de perfis retangulares de alumínio, da empresa Extrusal, cujas dimensões foram selecionadas de modo a obter cavidades de secção retangular com as dimensões globais de 30×30 cm. Com o auxílio de uma máquina de corte, localizada nas instalações da Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI), procedeu-se ao corte dos perfis e de pequenas chapas para posteriormente soldar nos seus topos. Essas pequenas chapas de topo são furadas de modo a que seja possível encher os recipientes e realizar medições no seu interior. Após

terem sido soldados todos os componentes, foi realizado um acabamento superficial, de forma a retirar todo o excedente de solda, obtendo-se assim uma superfície totalmente lisa. Os desenhos que serviram de orientação para o fabrico dos provetes encontram-se no ANEXO B, tal como algumas figuras relativas aos provetes fabricados.

Como já foi referido, a condutibilidade térmica dos PCMs é bastante baixa, sendo mesmo equiparada à dos materiais isolantes. Assim, como o material dos perfis é um bom condutor de calor (alumínio: $k = 204 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$ [27]), a condutibilidade térmica efetiva do sistema será aumentada de forma significativa, essencialmente pelo efeito de alheta. Todos os provetes possuem a mesma espessura de parede (2 mm), contudo têm diferentes secções internas, permitindo assim estudar o efeito de alheta. Na Tabela 3.6 podem-se observar as principais características dos diferentes provetes e na Figura 3.12 a sua configuração.

Tabela 3.6. Principais características dos provetes.

| Provete Figura 3.12 | Dimensões externas do provete [mm] | Número de células internas | Perfil de alumínio utilizado [mm] | Espessura da parede dos perfis [mm] |
|------------------------|--|-------------------------------|---|---|
| (a) | 300×300×30 | 5 | 60×30 | 2 |
| (b) | 300×300×30 | 15 | 30×20 | |
| (c) | 300×300×30 | 1 | 95×30 | |
| (d) | 300×300×25 | 6 | 50×25 | |
| (e) | 300×300×25 | 1 | 120×25 | |

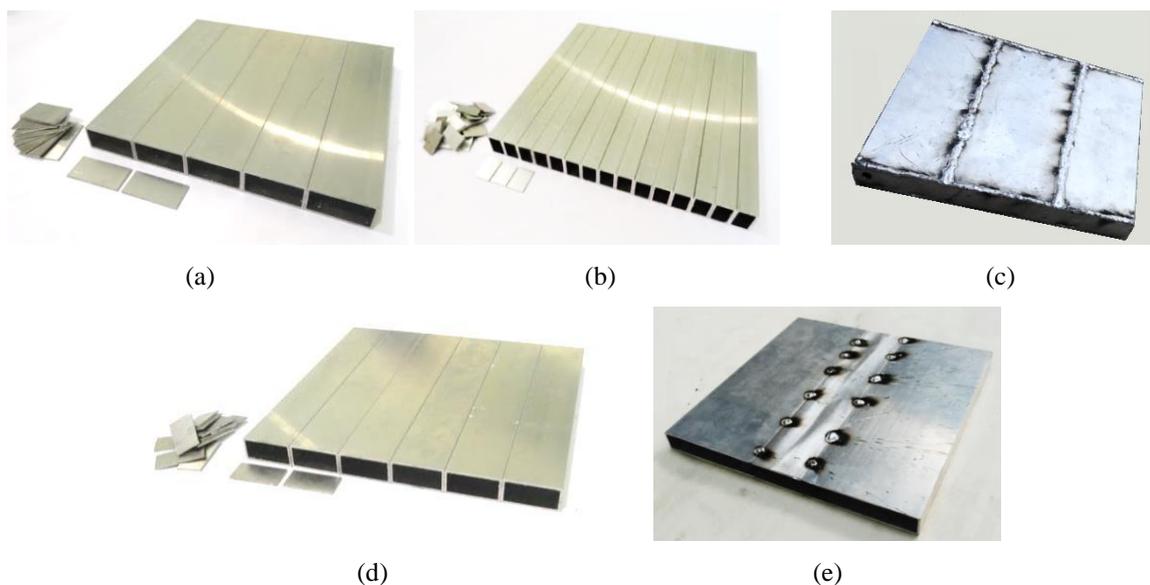


Figura 3.12. Provetes de dimensões 30×30×3 cm: (a) provete com 5 células internas; (b) provete com 15 células internas; (c) provete com uma só célula interna. Provetes de dimensões 30×30×2.5 cm: (d) provete com 6 células internas; (e) provete com uma só célula interna.

Para se obter a temperatura no interior dos provetes, desenvolveu-se um sistema que consiste na inserção de termopares encaminhados pelo interior de invólucros de esferográficas perfurados³, (ver Figura 3.13 (a)), que posteriormente são introduzidos nos orifícios no topo dos provetes possibilitando a realização de medições de temperatura no seu interior, mais precisamente no centro das células (ver Figura 3.13 (b) e (c)).

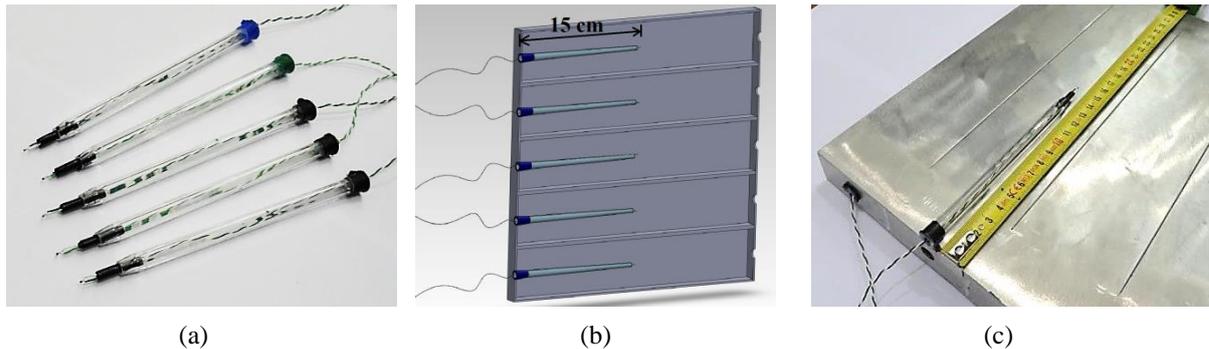


Figura 3.13. Sistema de medição da temperatura no interior dos provetes: (a) termopares inseridos nos invólucros perfurados das esferográficas; (b) esquema do provete em corte com o sistema de medição no seu interior; (c) ilustração do local de medição da temperatura, no centro da célula (a 15 cm dos topos laterais).

3.2.3.2. Material de mudança de fase (PCM)

Nos ensaios experimentais são utilizados dois tipos de PCMs. O primeiro é uma parafina comercial microencapsulada (*Micronal*[®] *DS 5001 X*), produzida pela *BASF The Chemical Company* (ver Figura 3.14). O material é constituído por microcápsulas de polimetacrilato de metilo contendo uma mistura de ceras de parafina. O produto assemelha-se a um pó com um diâmetro de partículas que se situa entre 2 e 20 μm , tem uma temperatura nominal de transição de 26 $^{\circ}\text{C}$ e tem 110 kJ/kg de calor latente.



Figura 3.14. Microcápsulas de PCM - *Micronal*[®] *DS 5001 X*.

³ O invólucro de cada esferográfica é perfurado para que o PCM preencha o seu interior, evitando a resistência térmica proporcionada pela cavidade da caneta totalmente preenchida de ar e tornando, assim, o sistema menos invasivo.

O outro material utilizado é o RT21 da *Rubitherm*, que é uma parafina com uma temperatura de mudança de fase típica de 21 °C. Vem acondicionado em recipientes plásticos, como se pode ver na Figura 3.15, pois com as oscilações da temperatura ambiente, facilmente muda de fase. Este PCM será posteriormente macroencapsulado, isto é, introduzido nas cavidades dos provetes fabricados.



Figura 3.15. Recipiente com o PCM RT21 da *Rubitherm* e proveta graduada.

Na Tabela 3.7 são apresentadas as principais propriedades termofísicas destes PCMs.

Tabela 3.7. Propriedades termofísicas dos PCMs utilizados (dados do fabricante).

| Propriedades | RT21 | Micronal DS 5001 X |
|-------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Temperatura de fusão média [°C] | 21 °C | 26 °C |
| Temperatura de ebulição [°C] | ≈ 154 °C | - |
| Condutibilidade térmica [W/m.°C] | 0.2 W/m.°C | - |
| Massa volúmica [kg/m ³] | 761 kg/m ³ | ≈ 250-350 kg/m ³ |
| Calor latente de fusão [kJ/kg] | 134 kJ/kg | 110 kJ/kg |

3.2.3.3. Enchimento e selagem dos provetes

Relativamente ao enchimento dos provetes, o PCM microencapsulado, *Micronal DS 5001 X*, não causa qualquer complicação, pois quer este esteja no estado sólido, quer esteja no estado líquido, as suas variações de volume são desprezáveis, sendo a própria microcápsula que se adapta às pequenas variações. Por outro lado, o PCM RT21 necessita de se encontrar no estado líquido para ser introduzido no provete, pois é no estado líquido que ele apresenta o seu volume máximo. No entanto, deixa-se uma pequena almofada de ar no topo de cada célula do provete (5% do volume total da cavidade), para que o PCM se acomode às variações de volume associadas aos ciclos de fusão e solidificação.

Antes de o PCM microencapsulado ser introduzido no provete, determinou-se a massa necessária para o preenchimento das cavidades, utilizando para o efeito uma balança

de precisão da marca A&D, modelo GF-3000 (precisão de 0.01 g). Relativamente ao volume de parafina a introduzir no provete, este foi previamente calculado (95% do volume total), sendo cada célula dos provetes posteriormente cheia com o auxílio de uma proveta graduada. A selagem dos orifícios de enchimento foi efetuada recorrendo a pequenas tampas plásticas devidamente coladas.



Figura 3.16. Material utilizado para o enchimento dos provetes.

3.3. Instrumentação e Medida

A instrumentação da instalação laboratorial é composta por dois tipos de sensores: sensores de temperatura e sensores de fluxo de calor. Para adquirir e tratar os dados obtidos, todos os sensores foram conectados a *data loggers Pico TC-08*.

3.3.1. Sensores de temperatura

A medição da temperatura foi efetuada através de termopares. Estes são constituídos por dois fios com metais diferentes, unidos entre si numa das extremidades. Quando a união dos dois metais é aquecida ou arrefecida é produzida uma força eletromotriz, cuja tensão pode ser correlacionada com a temperatura.

Nesta montagem experimental foram utilizados termopares do tipo-K (Cromel/Alumel), com baixa inércia térmica (fio de 0.15 a 0.2 mm de diâmetro). Estes são de fácil fabrico, têm um tempo de resposta muito pequeno e podem abranger uma vasta gama de temperaturas (entre os -200 °C e os 1200 °C), tendo uma sensibilidade de aproximadamente 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

Foi realizada a calibração dos termopares fabricados, mergulhando-os simultaneamente num banho termostatizado de água agitada e adquirindo a temperatura registada por cada um. Os termopares estavam ligados nos respetivos canais do *data-logger*, através de um conector “macho” IEC K, da marca RS. A aquisição da temperatura

foi feita em intervalos de 10 segundos durante 5 minutos, sendo esta repetida para 8 níveis de temperatura (10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 e 45 °C). No ANEXO C encontram-se as retas de calibração (com 8 pontos cada uma).

3.3.2. Sensores de fluxo de calor

Os fluxos de calor superficiais foram medidos com quatro sensores HFS-4, da *Omega Engineering*. Estes sensores têm a forma de uma fina película e são projetados para medir de forma precisa a transferência de calor através de qualquer material, podendo ser montados em superfícies planas ou curvas.

A sua sensibilidade nominal é de 2.0635 μV por cada W/m^2 . Os fluxos de calor são obtidos diretamente a partir dos sinais fornecidos pelos sensores de fluxo, em mV, multiplicados pelo fator de sensibilidade 484.614 W/m^2 por cada mV.

3.3.3. Aquisição e tratamento de dados

Para adquirir e tratar os sinais medidos, os sensores foram conectados a três *data logger PICO TC-08* operados pelo *software PicoLog*, da *Pico Technology*. Cada *data logger* tem 8 canais e compensação automática de junta fria. Estes são apropriados para adquirir e converter sinais provenientes de termopares de diversos tipos (ex. termopar tipo-K), ou de outros sensores com resposta em mV (ex. sensor de fluxo de calor). A sua gama de entrada é de ± 70 mV. As principais características deste equipamento são apresentadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8. Características técnicas do PICO TC-08.

| Características técnicas – PICO TC-08 | |
|---------------------------------------|---|
| Resolução | 20 bits |
| Termopares suportados | Tipo - B, E, J, K, N, R, S, T |
| Número de canais/número máximo | 8 canais/160 canais |
| Tempo de conversão - por canal ativo | 100 ms |
| Precisão da temperatura não calibrada | Soma de $\pm 0.2\%$ da leitura e ± 0.5 °C |
| Precisão da voltagem não calibrada | Soma de $\pm 0.2\%$ da leitura e ± 10 μV |
| Escala de entrada | ± 70 mV |
| Proteção contra sobretensão | ± 30 V |
| Impedância de entrada | 2 M Ω |
| Temperatura de operação (ambiente) | 0 a 50 °C |
| Dimensões | 201×104×34 mm |
| <i>Software</i> | <i>PicoLog</i> para <i>Windows</i> versão 5.22.8 |

3.4. Protocolo experimental

O protocolo experimental pode ser dividido em três etapas. A primeira é relativa à disposição dos sensores no provete, a segunda referente ao ensaio de fusão do PCM e a última relativa ao ensaio de solidificação.

3.4.1. Disposição dos sensores no provete

Depois de colocar um dos provetes no módulo central da instalação laboratorial, procede-se à fixação dos termopares e dos sensores de fluxo nas suas faces. Para tal, escolheram-se pontos estratégicos para realizar as medições, tendo estes a mesma localização em todos os provetes, para ser possível uma comparação fidedigna. Como se pode verificar na Figura 3.17, são colocados 8 termopares e dois sensores de fluxo de calor em ambas as faces do provete.

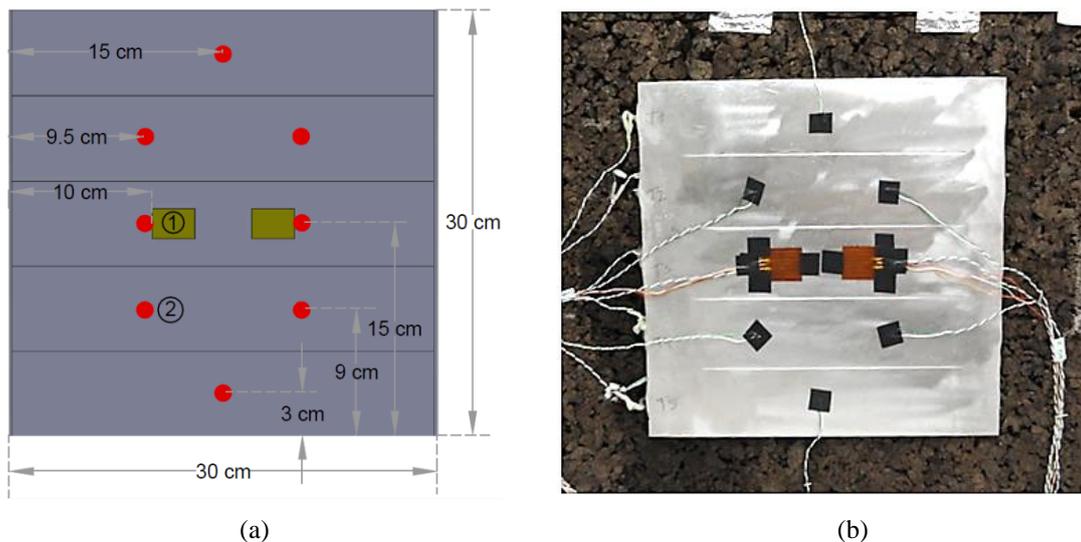


Figura 3.17. Disposição dos sensores no provete: (a) Coordenadas para fixação dos sensores no provete de 5 células (① - Sensores de fluxo de calor; ② - Termopares do tipo-K); (b) sensores montados no provete de 5 células.

Como foi visto, para além da temperatura das faces do provete, também a temperatura interior (temperatura do PCM) é medida. Assim, sempre que se altera o provete é necessário corrigir as curvas de calibração dos termopares que estão no interior, uma vez que os termopares ligados ao *data logger* são substituídos com o respetivo provete.

3.4.2. Ensaio de aquecimento

Os ensaios de aquecimento foram realizados com duas potências elétricas diferentes: 34 W e 67.5 W. Estas potências são capazes de impor fluxos de calor de 378 W/m² e 750 W/m², respetivamente.

No entanto, antes de iniciar o ensaio de aquecimento é necessário garantir que o PCM está a uma temperatura o mais uniforme possível e inferior à sua temperatura de fusão, ou seja, no estado sólido. Para arrefecer o provete, uma das suas faces é posta em contacto com o módulo de arrefecimento, sendo a outra coberta (e pressionada) por uma placa de isolamento térmico (fronteira adiabática), de modo a só existirem trocas de calor com a placa fria. Depois, basta aguardar até que o PCM descarregue totalmente e se atinja uma temperatura de cerca de 13.5 °C, sendo esta a temperatura inicial para todos os ensaios a realizar.

Da mesma forma, a temperatura da placa quente tem de estar o mais uniforme possível antes de se encostar ao provete. Para tal, aquece-se a placa quente até aos 50 °C, com a resistência elétrica na sua potência máxima; ao atingir esse valor, reduz-se com o *Variac* a voltagem da corrente de alimentação para que a resistência elétrica debite a potência desejada, deixando, então, que a placa quente estabilize até uma temperatura de cerca de 55 °C.

Após estarem garantidas todas as condições iniciais, numa das faces do provete encosta-se o módulo de aquecimento e, na outra face (aquela que inicialmente estava encostada à placa fria), isolamento térmico, de forma a garantir uma fronteira adiabática. Através do conjunto de varões roscados e porcas, apertam-se os módulos entre si, garantindo uma boa pressão de contacto nas superfícies relevantes (provetes-placa quente). Inicia-se, assim, o processo transiente de aquecimento. Durante o ensaio monitorizam-se os fluxos de calor (na face aquecida do provete e na face isolada) e várias temperaturas, tais como a temperatura superficial da placa quente, a temperatura das faces do provete (face aquecida e face isolada), as temperaturas no seio do PCM no interior do provete, a temperatura do isolamento térmico amovível (face em contacto com o exterior) e a temperatura ambiente. O ensaio de aquecimento termina quando a temperatura de todo o conjunto atingir uma temperatura no intervalo de 45 °C a 50 °C, ou seja, quando o PCM esteja todo fundido e todas as temperaturas medidas sejam próximas e estáveis. Na Tabela

3.9 encontra-se um pequeno resumo das condições necessárias para o ensaio de aquecimento, e no ANEXO D apresentam-se figuras elucidativas do processo.

Tabela 3.9. Temperaturas de referência para o ensaio de aquecimento.

| Condição | Temperatura de referência |
|-------------------------------------|---------------------------|
| Temperatura inicial do provete/PCM | ≈ 13.5 °C |
| Temperatura inicial da placa quente | ≈ 55 °C |
| Temperatura final do provete/PCM | Entre 45 °C e 50 °C |

3.4.3. Ensaio de arrefecimento

Também neste ensaio é necessário garantir previamente uma condição: a temperatura da água à entrada do circuito da placa fria tem de ser o mais uniforme possível, na ordem dos 10.5 °C. Para tal, insere-se um *setpoint* de 10 °C no banho termostaticado, de modo a compensar possíveis ganhos de temperatura (bomba de circulação, tubagens). A temperatura inicial da placa fria deve rondar os 11 °C, para se dar início ao ensaio de arrefecimento.

Quando todas as temperaturas resultantes do ensaio de aquecimento estão estáveis e a condição anterior assegurada, dá-se início ao ensaio de arrefecimento. Para isso, basta retirar o módulo de aquecimento, colocando isolamento térmico no seu lugar, e encostar o módulo de arrefecimento na face oposta do provete, cujo bom contacto é garantido pelo sistema de aperto acima referido. Durante o ensaio monitorizam-se os fluxos de calor (na face arrefecida do provete e na face isolada) e várias temperaturas, tais como a temperatura superficial da placa fria, a temperatura das faces do provete (face arrefecida e face isolada), a temperatura do PCM no interior do provete, a temperatura do isolamento térmico amovível (face em contacto com o exterior), as temperaturas de entrada e de saída da água na placa fria e a temperatura ambiente. O ensaio de arrefecimento termina quando a temperatura de todo o conjunto atingir cerca de 13.5 °C, ou seja, quando o PCM estiver totalmente solidificado e todas as temperaturas medidas forem próximas e estáveis. Na Tabela 3.10 encontra-se um pequeno resumo das condições necessárias para o ensaio de arrefecimento e no ANEXO D podem-se ver figuras elucidativas do processo.

Tabela 3.10. Temperaturas de referência para o ensaio de arrefecimento.

| Condição | Temperatura de referência |
|---|---------------------------|
| Temperatura inicial do provete/PCM | Entre 45 °C e 50 °C |
| Temperatura inicial da placa fria | ≈ 11 °C |
| Temperatura inicial da água que passa na placa fria | ≈ 10.5 °C |
| Temperatura final do provete/PCM | ≈ 13.5 °C |

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos ensaios experimentais utilizaram-se os provetes com 30 mm de espessura. Estes têm as seguintes configurações: uma célula única (sem alhetas), 5 células internas (4 alhetas) e 15 células internas (14 alhetas), ilustradas na Figura 3.12. De seguida, são apresentados os resultados das medições efetuadas, relativamente aos ensaios de fusão e de solidificação dos PCMs RT21 e Micronal DS 5001 X.

4.1. Ensaio de aquecimento

4.1.1. PCM RT21

Em primeiro lugar são expostos os resultados da fusão da parafina no provete de uma só célula (Figura 4.1), seguindo-se os resultados no provete de 5 células (Figura 4.2) e, por último, no de 15 células (Figura 4.3), em cada um dos casos para as potências elétricas constantes de 34 e 67.5 W – respetivamente, (a) e (b) nas figuras. Como foi descrito, as medições iniciam-se com o PCM a uma temperatura de cerca de 13.5 °C, quando se encosta e aperta ao provete a placa quente, esta encontra-se a uma temperatura de aproximadamente 55 °C. As temperaturas foram medidas em vários pontos, dos quais cinco são dentro do provete (pontos A, B, C, D, E).

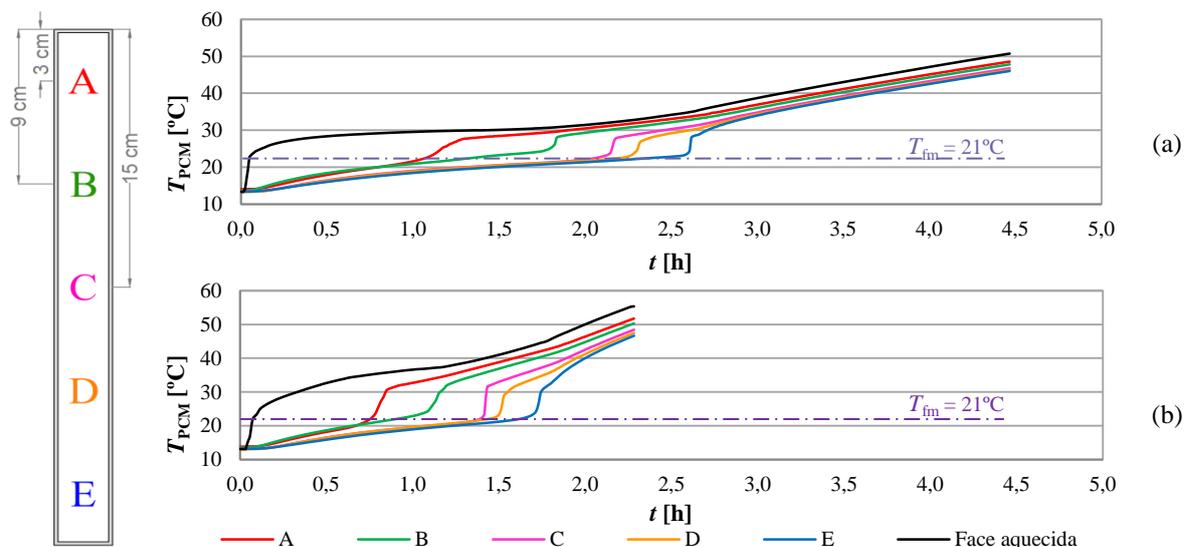


Figura 4.1. Ensaio de aquecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de uma só célula interna (sem alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\varphi=378 \text{ W/m}^2$); (b) 67.5 W ($\varphi=750 \text{ W/m}^2$).

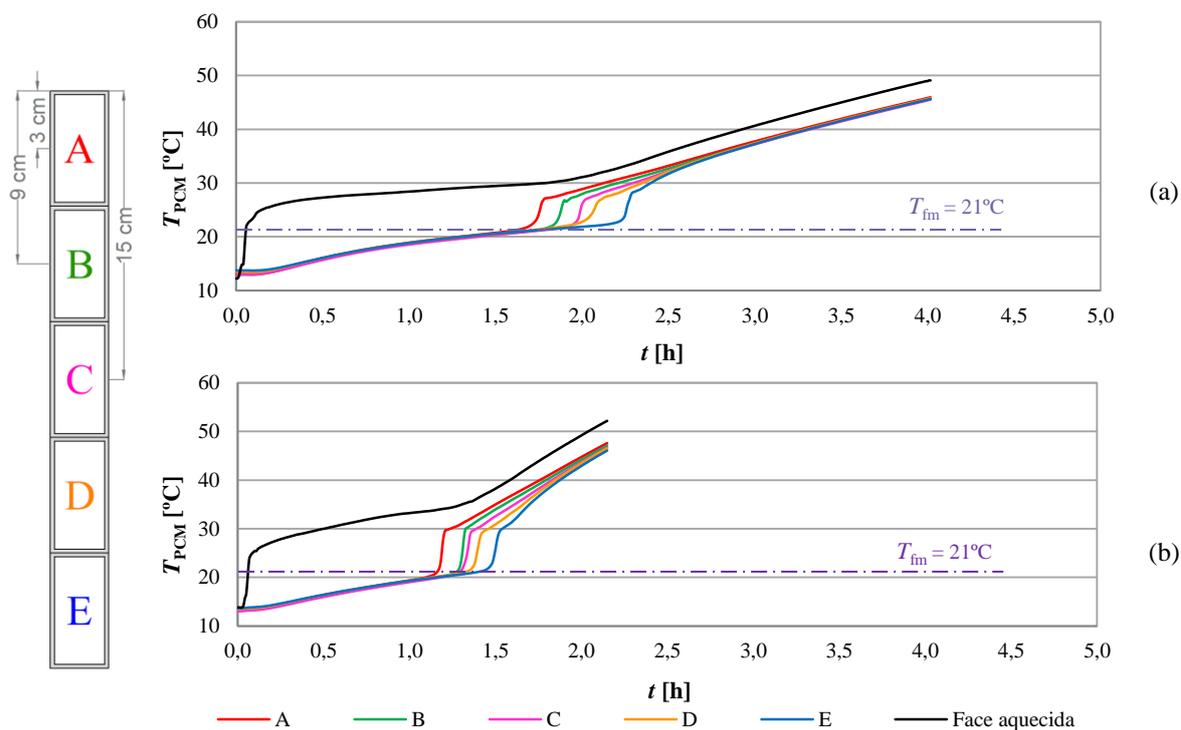


Figura 4.2. Ensaio de aquecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 5 células internas (4 alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\varphi=378$ W/m²); (b) 67.5 W ($\varphi=750$ W/m²).

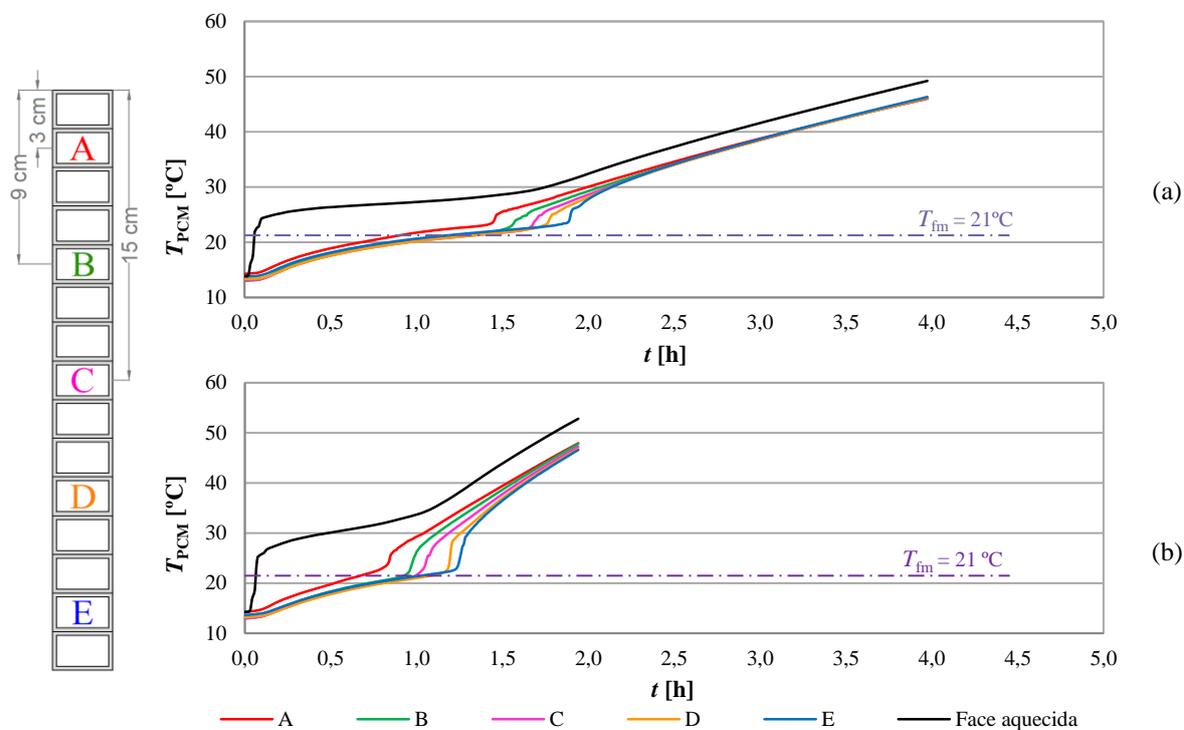


Figura 4.3. Ensaio de aquecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 15 células internas (14 alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\varphi=378$ W/m²); (b) 67.5 W ($\varphi=750$ W/m²).

A Figura 4.4 apresenta os fluxos de calor superficiais obtidos durante o ensaio de aquecimento do PCM RT21, pela média dos valores medidos com os dois sensores de fluxo colocados na face aquecida de cada um dos três provetes testados.

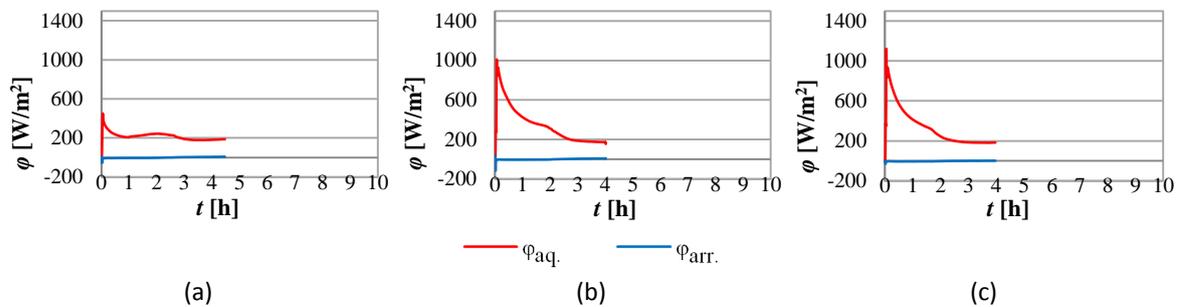


Figura 4.4. Fluxos de calor obtidos durante os ensaios de aquecimento do PCM RT21, com uma potência elétrica constante de 34 W, nos provetes: (a) de uma só célula; (b) de 5 células internas; (c) de 15 células internas.

4.1.2. PCM Micronal DS 5001 X

Seguidamente são expostos os resultados dos ensaios de fusão do PCM microencapsulado (Micronal DS 5001 X), partindo das mesmas condições iniciais descritas na secção 4.1.1. As figuras apresentadas são relativas aos testes realizados nos provetes de uma só célula interna (Figura 4.5 (a)) e de 15 células internas (Figura 4.5 (b)), para uma potência elétrica constante de 34 W.

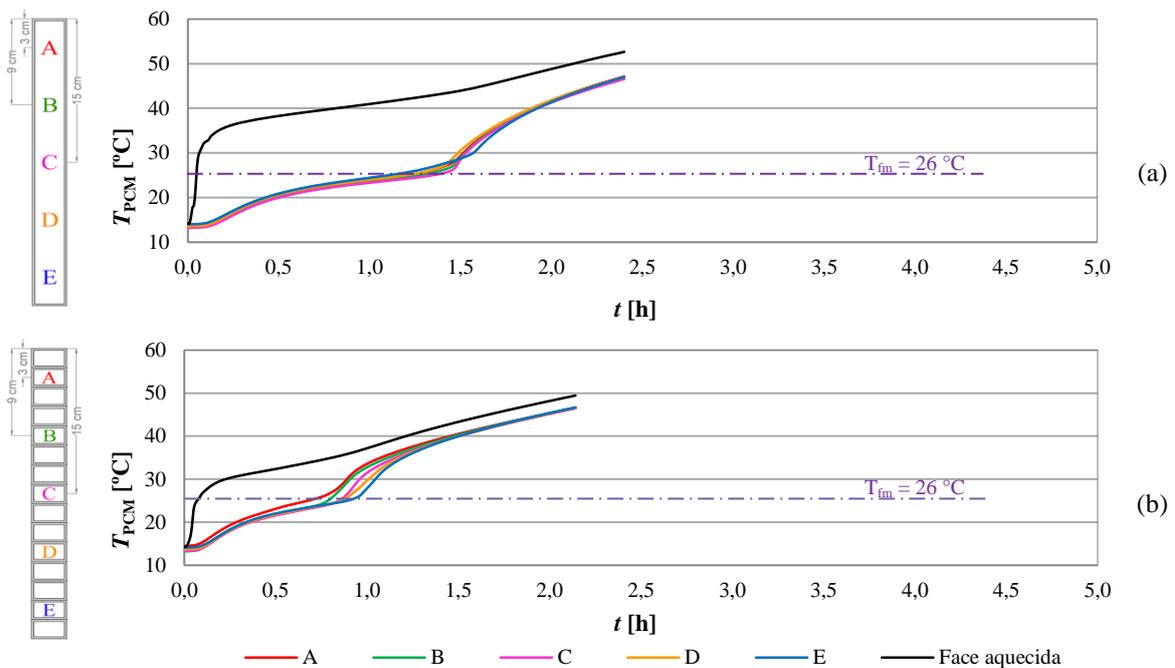


Figura 4.5. Ensaio de aquecimento do PCM Micronal DS 5001 X (microencapsulado) a uma potência elétrica constante de 34 W ($\varphi=378 \text{ W/m}^2$), com os provetes de: (a) uma célula; (b) 15 células.

A Figura 4.6 apresenta os fluxos de calor superficiais obtidos durante o ensaio de aquecimento do PCM Micronal DS 5001 X, para os dois provetes testados.

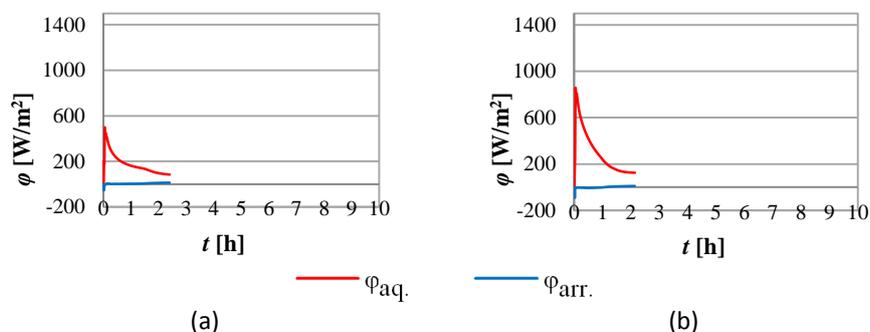


Figura 4.6. Fluxos de calor obtidos durante os ensaios de aquecimento do PCM Micronal DS 5001 X, com uma potência constante de 34 W nos provetes: (a) de uma só célula; (b) de 15 células.

4.1.3. Análise e interpretação dos resultados

Como se pode verificar pelos gráficos da Figura 4.4 e da Figura 4.6, pouco depois de se encostar e apertar a placa quente ao provete, os fluxos de calor medidos na face aquecida deste último apresentam um aumento súbito até um valor máximo (devido à grande diferença inicial de temperaturas entre placa quente e provete), a que se segue um decréscimo progressivo ao longo do ensaio, com tendência assintótica para um fluxo constante. No entanto, nos ensaios com o PCM RT21 (a parafina macroencapsulada, Figura 4.4), verifica-se uma inflexão nessa evolução, associado a um decréscimo mais acentuado do fluxo de calor superficial medido, na fase final do processo de fusão do PCM. No caso do provete de uma só célula, a Figura 4.4 (a) mostra mesmo um pequeno aumento do fluxo de calor medido durante o período de mudança de fase ($t \approx 1$ h a 3 h, aproximadamente; cf. Figura 4.1 (a)). Este facto pode estar associado ao efeito das correntes de convecção natural que se estabelecem na fase líquida, promovendo o aumento da velocidade de fusão do PCM. Esta justificação precisará de ser sustentada com investigação mais aprofundada; contudo, está em concordância com registos de outros trabalhos, inclusive numéricos, segundo os quais é relevante o efeito da convecção natural na fase fundida para o desenrolar de todo o processo.

Através de uma análise detalhada dos resultados obtidos durante os ensaios de aquecimento dos dois PCMs, pode-se verificar que a mudança de fase ocorre na zona da curva onde a temperatura sobe de forma mais suave. Nos ensaios realizados com o PCM

microencapsulado, no provete de uma só cavidade (Figura 4.5 (a)), a evolução temporal das temperaturas medidas indicam uma boa uniformidade instantânea ao longo do plano central (vertical). A transmissão de calor através do meio microporoso ocorre por condução apenas, segundo a direção horizontal, sendo de supor que a mudança de fase do PCM microencapsulado decorre segundo uma frente de fusão – essencialmente, um plano vertical, que se desloca da face aquecida do provete para a oposta. Ao contrário deste, no provete de 15 células (Figura 4.5 (b)) as evoluções das temperaturas medidas indicam a existência de um efeito de estratificação térmica, durante o processo de mudança de fase. Esta estratificação não era espectável à partida, visto que, mesmo após a fusão do PCM microencapsulado, não se trata de transmissão de calor num meio líquido contínuo, mas sim através de um meio microporoso, sem efeitos de convecção natural. De momento não se encontrou uma explicação consistente para estes resultados. De modo a esclarecer este resultado, será necessário aprofundar este tema numa investigação futura.

Nos ensaios realizados com a parafina (RT21), constatou-se que a fase inicial do processo é dominada pela condução de calor, sendo depois a convecção natural predominante à medida que o PCM funde, potenciando de forma significativa a transferência de calor. Durante o aquecimento é notória, em todos os gráficos, uma estratificação térmica. Tomando como exemplo o provete sem alhetas (ver Figura 4.1 (a)), pode-se verificar que, na fase inicial a temperatura do PCM no plano central sobe de forma praticamente linear (durante a mudança de fase), predominando a condução de calor. Depois de cerca de uma hora, são notórios os efeitos de convecção, verificando-se um considerável aumento de temperatura na parte superior da cavidade⁴ (ponto A). Com efeito, as correntes convectivas ascendentes que se desenvolvem no lado interior da parede aquecida do provete dão origem a uma zona mais quente de PCM fundido na parte superior da cavidade, fazendo com que a frente de fusão aí progrida de forma mais rápida. Este fenómeno é sugerido pela sequência (do ponto A para o ponto E) observada nas evoluções de temperatura medidas no plano central. Pode-se ainda verificar que a estratificação é mais notória quando a potência de aquecimento é mais elevada (ver Figura 4.1 (b)) e, comparando com os gráficos da Figura 4.2 e da Figura 4.3, que a estratificação é mais

⁴ Este aumento de temperatura varia entre 5 °C e 10 °C, aproximadamente. A temperatura do PCM tende a ficar próxima da temperatura da face aquecida do provete (curva representada a preto em todos os gráficos).

visível quando não existem alhetas nos provetes, devido ao maior efeito global da convecção natural.

Através do incremento do número de alhetas nos provetes, aumenta-se o efeito da condução de calor e diminui-se o efeito da convecção natural⁵. Este efeito manifesta-se principalmente pela menor duração dos ensaios e do tempo que o PCM demora a fundir. Estes efeitos são também verificados quando se altera a potência fornecida: verifica-se em todos os ensaios uma diminuição do tempo necessário para a mudança de fase quando se passa de uma potência de 34 W para uma potência de 67.5 W.

Com o intuito de analisar o efeito termorregulador dos PCMs, realizaram-se ensaios de aquecimento com os provetes vazios. A Figura 4.7 mostra o efeito da convecção natural nas diferentes configurações de cavidades retangulares preenchida por ar durante o aquecimento.

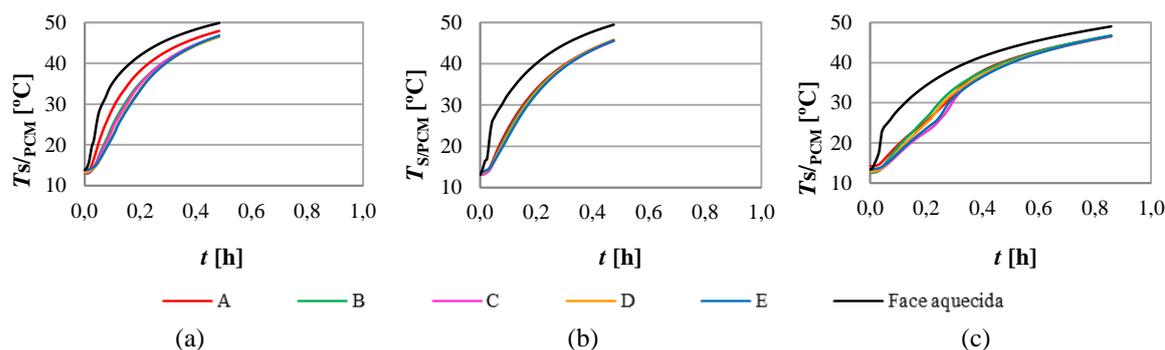


Figura 4.7. Ensaio de aquecimento com os provetes sem PCM no seu interior, para a potência constante de 34 W ($\phi=378$ W/m²). Provete com: (a) uma só cavidade interna; (b) 5 células internas; (c) 15 células internas.

Verifica-se que, sem PCM no seu interior, a macrocápsula de alumínio rapidamente atinge a temperatura estipulada para o fim do ensaio (entre 45 e 50 °C). A temperatura do ar no seu interior é muito próxima da temperatura da face que está a ser aquecida. Por outro lado, com PCM no interior do provete, enquanto as fases sólida e líquida coexistem, o valor da temperatura da face aquecida sobe lentamente, podendo-se concluir que o PCM tem um efeito de proteção térmica durante este período. Logo que a fase sólida desaparece, a temperatura da face aquecida começa a subir de forma mais acentuada.

⁵ Verifica-se apenas no PCM RT21, uma vez que o modo de transferência de calor predominante no PCM Micronal DS 5001 X é a condução de calor.

4.2. Ensaio de arrefecimento

4.2.1. PCM RT21

Em primeiro lugar são expostos os resultados da solidificação da parafina no provete de uma só cavidade (ver Figura 4.8), seguindo-se os resultados no provete de 5 células (ver Figura 4.9) e, por último, no de 15 células (ver Figura 4.10). Após ser retirado o módulo de aquecimento, inicia-se o ensaio de arrefecimento. Para tal, encosta-se e aperta-se a placa de arrefecimento (com uma temperatura de cerca de 11 °C) ao provete quando a temperatura do PCM ronda os 45-50 °C. As temperaturas foram medidas em vários pontos, dos quais cinco são dentro do provete (pontos A, B, C, D, E), tal como nos ensaios de aquecimento. Como as condições iniciais de temperatura são as mesmas em todos os ensaios, apresentam-se apenas os resultados do arrefecimento que sucedem os ensaios de aquecimento a uma potência constante de 34 W.

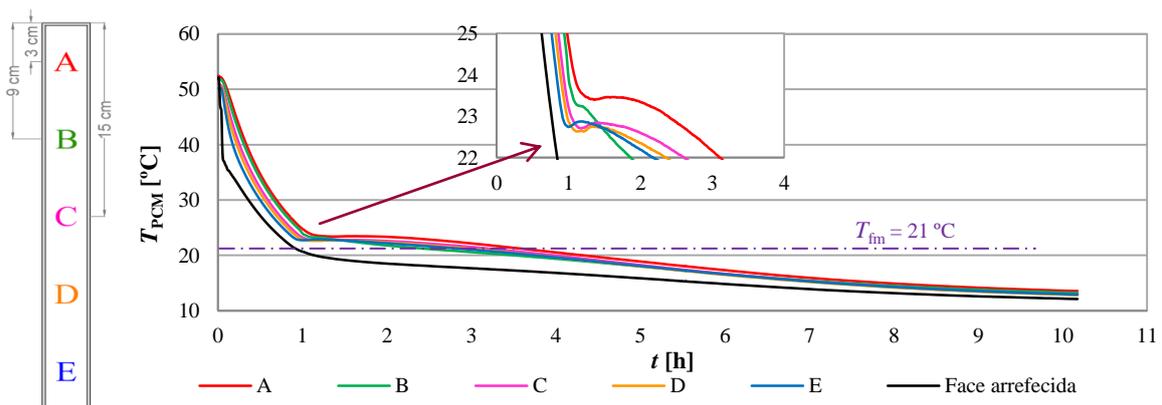


Figura 4.8. Ensaio de arrefecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de uma só cavidade interna (sem alhetas), depois do aquecimento a uma potência constante de 34 W ($\varphi=378 \text{ W/m}^2$).

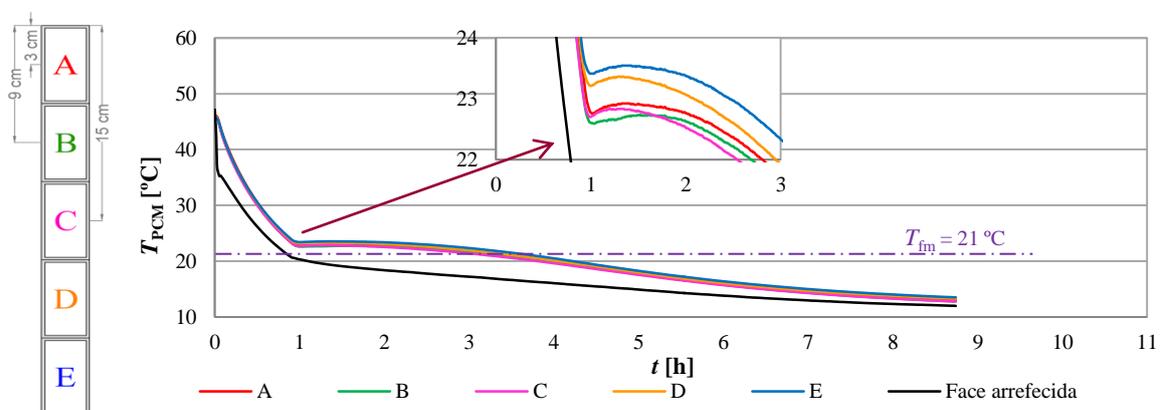


Figura 4.9. Ensaio de arrefecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 5 cavidades internas (4 alhetas), depois do aquecimento a uma potência constante de 34 W ($\varphi=378 \text{ W/m}^2$).

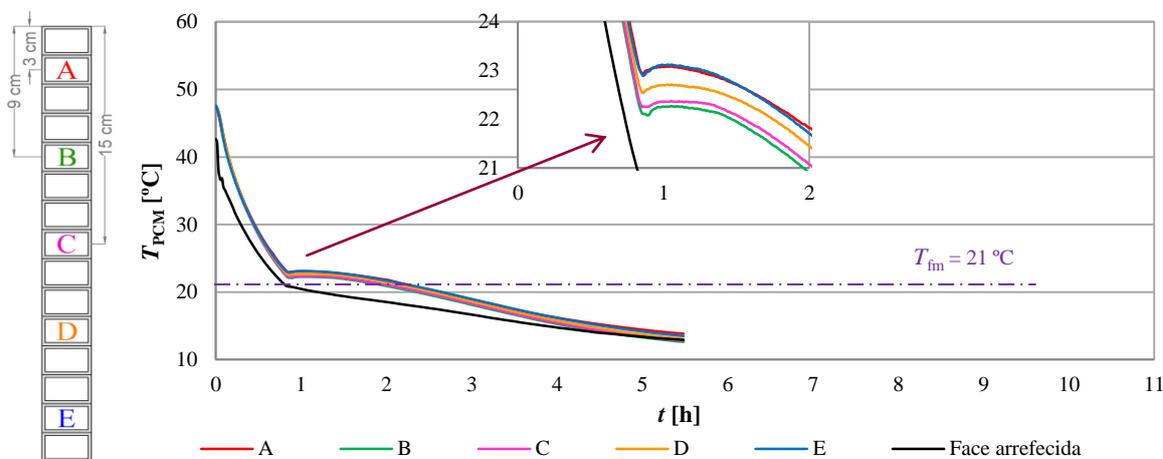


Figura 4.10. Ensaio de arrefecimento do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 15 cavidades internas (14 alhetas), depois do aquecimento a uma potência constante de 34 W ($\phi=378$ W/m²).

A Figura 4.11 apresenta os fluxos de calor superficiais obtidos durante o ensaio de arrefecimento do PCM RT21, para os três provetes testados.

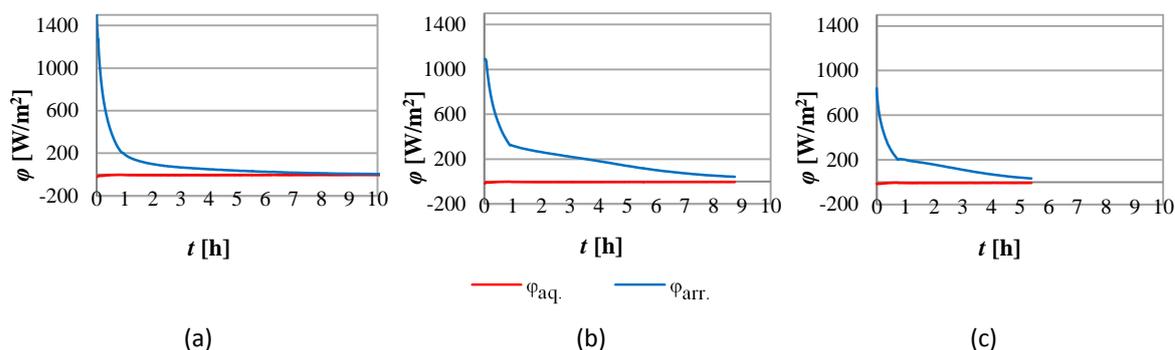


Figura 4.11. Fluxos de calor obtidos durante os ensaios de arrefecimento do PCM RT21, depois do aquecimento a uma potência constante de 34 W nos provetes: (a) de uma só célula interna; (b) de 5 células internas; (c) de 15 células internas.

4.2.2. PCM Micronal DS 5001 X

Nesta secção são expostos os resultados dos ensaios de solidificação do PCM microencapsulado (Micronal DS 5001 X), nas mesmas condições iniciais que o anterior. As figuras apresentadas de seguida são relativas aos testes realizados nos provetes de uma (Figura 4.12 (a)) e de 15 células (Figura 4.12 (b)), depois do aquecimento a uma potência constante de 34 W.

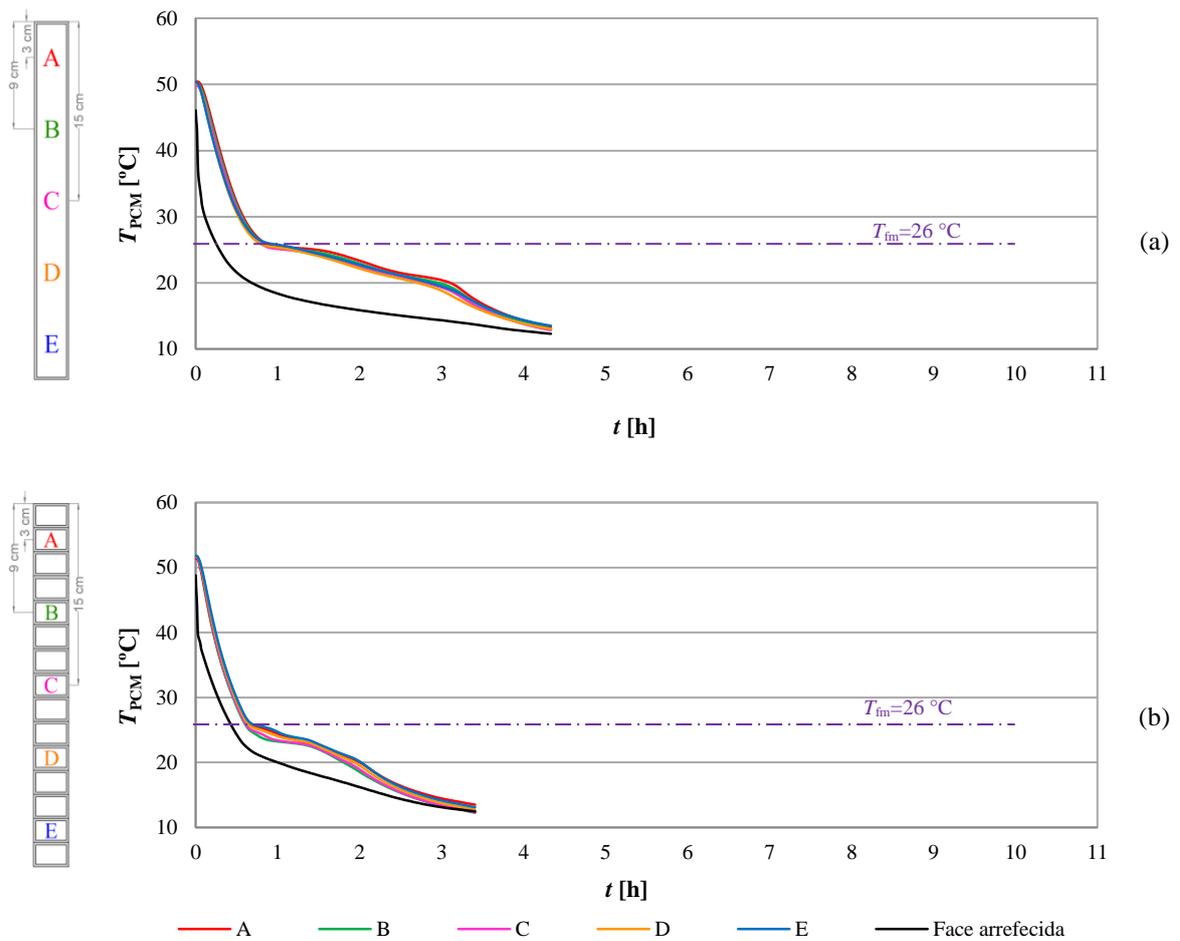


Figura 4.12. Ensaio de arrefecimento depois de um aquecimento a uma potência constante de 34 W ($\varphi=378 \text{ W/m}^2$) do PCM microencapsulado Micronal DS 5001 X, macroencapsulado no provete: (a) de uma só célula interna; (b) de 15 células internas.

A Figura 4.13 apresenta os fluxos de calor superficiais obtidos durante o ensaio de arrefecimento do PCM Micronal DS 5001 X, para os dois provetes testados.

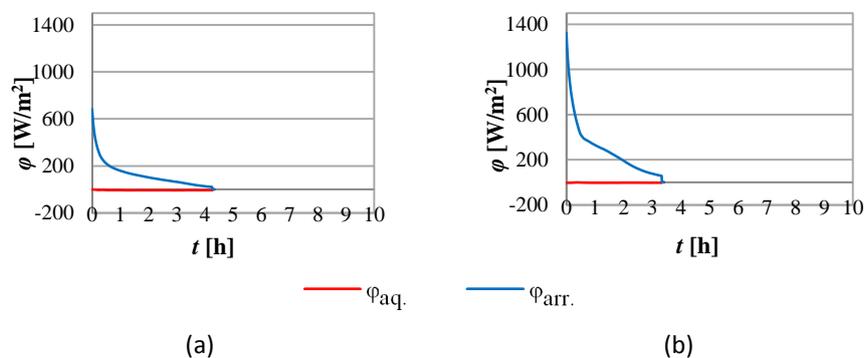


Figura 4.13. Fluxos de calor obtidos durante os ensaios de arrefecimento do PCM Micronal DS 5001 X, depois de um aquecimento a uma potência constante de 34 W nos provetes: (a) de uma só célula interna; (b) de 15 células internas.

4.2.3. Análise e interpretação dos resultados

Como se pode verificar pelos gráficos da Figura 4.11 e da Figura 4.13, assim que se encosta a placa fria ao provete, os fluxos de calor medidos na face arrefecida apresentam um valor máximo (devido à grande diferença de temperatura), decrescendo ao longo do ensaio. Podem-se destacar duas fases distintas durante o decréscimo do valor do fluxo de calor: uma inicial, de decréscimo mais acentuado, e outra de diminuição mais suave, sendo a mudança de fase coincidente com a transição entre cada zona.

Analisando os resultados do arrefecimento dos dois PCMs, pode-se verificar que a mudança de fase ocorre na zona da curva onde a temperatura desce de forma mais suave. Nos ensaios realizados com os dois PCMs, verificou-se que, durante a solidificação, os efeitos da convecção natural na fase (ainda) líquida são muito menos acentuados do que no processo de fusão, embora seja, ainda assim, perceptível alguma estratificação térmica (ver, e.g., Figura 4.8).

Durante a solidificação da parafina (RT21), verificou-se o fenómeno de sub-arrefecimento. Este pode ser visto com mais detalhe nas ampliações realizadas nas Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, onde se observa que o PCM começa a solidificar abaixo da sua temperatura de solidificação.

Verifica-se em todos os ensaios que o aumento do número de alhetas diminui o tempo necessário para que o PCM solidifique e liberte a energia que armazenou. Para analisar o efeito termorregulador dos PCMs realizaram-se ensaios de arrefecimento com os provetes vazios. Estes podem ser analisados na Figura 4.14.

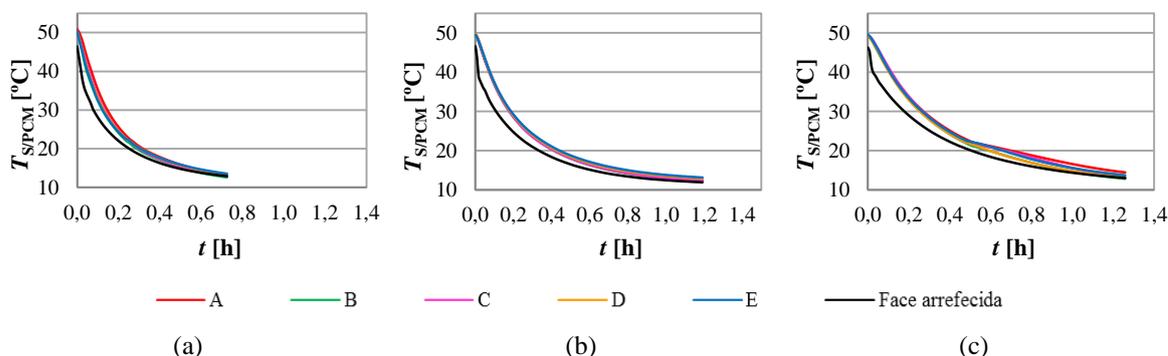


Figura 4.14. Ensaio de arrefecimento com os provetes sem PCM no seu interior, depois do aquecimento a uma potência constante de 34 W ($\phi=378$ W/m²). (a) Provette de uma só cavidade; (b) provete de 5 células internas; (c) provete de 15 células internas.

Verifica-se que, sem PCM no seu interior, a macrocápsula de alumínio rapidamente atinge a temperatura estipulada para o fim do ensaio (cerca de 13.5 °C), contrariamente ao que acontece quando existe PCM no seu interior.

Por fim, no ANEXO E podem-se consultar os gráficos com o ciclo de aquecimento e arrefecimento acoplados, para os diferentes PCMs e provetes utilizados. São também apresentados diversos gráficos relativos às medições efetuadas durante os ensaios.

5. CONCLUSÃO

Nesta dissertação foi desenvolvida uma instalação experimental para estudar o comportamento térmico de PCMs inseridos em macrocápsulas retangulares de alumínio, orientadas verticalmente. Os ensaios de fusão e de solidificação realizados permitiram analisar a transferência de calor com mudança de fase, em regime transiente. Foram avaliados os efeitos da condução e da convecção natural ao longo do tempo, assim como o efeito do tamanho das cavidades combinado com o efeito de alheta.

Concluiu-se que, com a utilização do PCM microencapsulado Micronal DS 5001 X, a transferência de calor durante a fusão é dominada pela condução. Com o PCM RT21, a transferência de calor na fase de fusão é inicialmente dominada pela condução, passando a ser dominada pela convecção natural à medida que aumenta a fração de PCM fundido. Observou-se ainda uma estratificação térmica significativa durante o processo de fusão do PCM RT21, essencialmente provocada pelas correntes convectivas. A solidificação de ambos os PCMs mostrou ser mais dominada pela condução, observando-se o fenômeno de sub-arrefecimento na solidificação do PCM RT21.

Concluiu-se também que a incorporação de alhetas nos provetes diminui de forma significativa o tempo necessário para fundir todo o PCM, assim como aumenta o fluxo de calor medido na superfície aquecida do provete (para igual potência elétrica fornecida), durante o processo de fusão. Por último, concluiu-se que os PCMs têm um grande potencial termorregulador que pode ser utilizado para aumentar a eficiência energética dos edifícios, quando aplicados em elementos da envolvente vertical dos edifícios e – não menos importante – proporcionar diretamente uma melhoria significativa no conforto térmico dos ocupantes.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho apenas se realizaram testes com os provetes de 30 mm de espessura, ou seja, com três dos cinco provetes construídos. Para comparar e avaliar o efeito da espessura do provete (e respetivo volume do PCM) nos tempos de fusão e solidificação, será importante realizar ensaios com os restantes provetes (com espessura de 25 mm). Da mesma forma, será importante realizar testes com PCMs que apresentem pontos de fusão diferentes. Note-se que alguns PCMs já foram adquiridos pelo DEM da FCTUC, nomeadamente o RT28 HC da *Rubitherm*.

Outra questão que ficou pendente é a quantificação da energia armazenada e da energia restituída pelo PCM em cada ciclo completo de carga e descarga. Uma possível solução passa por integrar os fluxos de calor medidos ao longo dos ensaios. Os resultados experimentais obtidos poderão também ser utilizados para a validação de resultados numéricos futuros.

Num estudo futuro poderá também procurar-se uma justificação para a existência da estratificação térmica identificada durante o ensaio de fusão do PCM microencapsulado, de forma mais notória no provete multicelular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, Feb. 2009.
- [2] S. D. Sharma and K. Sagara, “Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review,” *International Journal of Green Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 1–56, Jan. 2005.
- [3] F. Kuznik, D. David, K. Johannes, and J.-J. Roux, “A review on phase change materials integrated in building walls,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 379–391, Jan. 2011.
- [4] A. M. Khudhair and M. M. Farid, “A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials,” *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 2, pp. 263–275, Jan. 2004.
- [5] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, and S. Al-Hallaj, “A review on phase change energy storage: materials and applications,” *Energy Conversion and Management*, vol. 45, no. 9–10, pp. 1597–1615, Jun. 2004.
- [6] L. F. Cabeza, a. Castell, C. Barreneche, a. de Gracia, and a. I. Fernández, “Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, Apr. 2011.
- [7] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, and H. Di, “Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook,” *Building and Environment*, vol. 42, no. 6, pp. 2197–2209, Jun. 2007.
- [8] V. V. Tyagi and D. Buddhi, “PCM thermal storage in buildings: A state of art,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 6, pp. 1146–1166, Aug. 2007.
- [9] D. Zhou, C. Y. Zhao, and Y. Tian, “Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications,” *Applied Energy*, vol. 92, pp. 593–605, Apr. 2012.
- [10] N. Silva, “Incorporação de Materiais de Mudança de Fase em Materiais de Construção,” Tese de Mestrado em Materiais, Reabilitação e Sustentabilidade das Construções. Departamento de Engenharia Civil - Universidade do Minho, 2009.
- [11] U. Stritih, “An experimental study of enhanced heat transfer in rectangular PCM thermal storage,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, no. 12–13, pp. 2841–2847, Jun. 2004.

- [12] C. Hasse, M. Grenet, A. Bontemps, R. Dendievel, and H. Sallée, “Realization, test and modelling of honeycomb wallboards containing a Phase Change Material,” *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 1, pp. 232–238, Jan. 2011.
- [13] C. Y. Zhao, W. Lu, and Y. Tian, “Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs),” *Solar Energy*, vol. 84, no. 8, pp. 1402–1412, Aug. 2010.
- [14] L. Tan, Y. Kwok, A. Date, and A. Akbarzadeh, “Numerical Analysis of Natural Convection Effects in Latent Heat Storage Using Different Fin Shapes,” *International Journal of Energy Science*, vol. 1, no. 3, pp. 162–168, 2011.
- [15] W.-B. Ye, D.-S. Zhu, and N. Wang, “Fluid flow and heat transfer in a latent thermal energy unit with different phase change material (PCM) cavity volume fractions,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 42, pp. 49–57, Sep. 2012.
- [16] M. J. Huang, P. C. Eames, B. Norton, and N. J. Hewitt, “Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 95, no. 7, pp. 1598–1603, Jul. 2011.
- [17] M. Longeon, A. Soupart, J.-F. Fourmigué, A. Bruch, and P. Marty, “Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection,” *Applied Energy*, vol. 112, pp. 175–184, Dec. 2013.
- [18] J. Darkwa and T. Zhou, “Enhanced laminated composite phase change material for energy storage,” *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 2, pp. 810–815, Feb. 2011.
- [19] A. M. Borreguero, M. Luz Sánchez, J. L. Valverde, M. Carmona, and J. F. Rodríguez, “Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 3, pp. 930–937, Mar. 2011.
- [20] N. Soares, J. J. Costa, A. R. Gaspar, and P. Santos, “Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings’ energy efficiency,” *Energy and Buildings*, vol. 59, pp. 82–103, Jan. 2013.
- [21] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée, and D. Quenard, “Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material,” *Energy and Buildings*, vol. 38, no. 4, pp. 357–366, Apr. 2006.
- [22] F. Kuznik, J. Virgone, and J. Noel, “Optimization of a phase change material wallboard for building use,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, no. 11–12, pp. 1291–1298, Aug. 2008.

- [23] A. Joulin, Z. Younsi, L. Zalewski, S. Lassue, D. R. Rousse, and J.-P. Cavrot, “Experimental and numerical investigation of a phase change material: Thermal-energy storage and release,” *Applied Energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2454–2462, Jul. 2011.
- [24] P. Silva, L. Goncalves, and L. Pires, “Transient behaviour of a latent-heat thermal-energy store: numerical and experimental studies,” *Applied energy*, vol. 73, pp. 83–98, 2002.
- [25] P. Lamberg, R. Lehtiniemi, and A.-M. Henell, “Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage,” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 43, no. 3, pp. 277–287, Mar. 2004.
- [26] J. M. P. Monteiro, “Medição de condutibilidade térmica. Projecto, construção e ensaio de um aparelho,” Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade de Coimbra, 1986.
- [27] C. R. Chen and A. Sharma, “Numerical investigation of melt fraction of PCMs in a latent heat storage system,” *Journal of Engineering & Applied Sciences*, vol. 1, no. 4, pp. 437–444, 2006.

ANEXO A – PERDAS DE CARGA NO CIRCUITO DE ARREFECIMENTO

Os cálculos apresentados de seguida são referentes às perdas de carga no circuito em espiral da placa fria e nas tubagens de ligação. Estes cálculos serviram de base para a seleção da bomba de circulação apropriada.

• Perda de carga no circuito da placa fria:

O cálculo das perdas de carga neste circuito foi realizado para um caudal de 4 litros/minuto, um comprimento da tubagem interna de 4 metros e um diâmetro interno de 8 milímetros.

Da expressão do caudal facilmente se retira a velocidade do escoamento:

$$Q = v \times A$$

$$\Leftrightarrow v = \frac{Q}{A} \quad (\text{A. 1})$$

onde Q é o caudal em [m³/s], v a velocidade de circulação da água em [m/s] e A a área da secção transversal da tubagem em [m²].

Substituindo valores na equação (A. 1) vem:

$$v = \frac{0,0667 \times 10^{-3}}{\pi \times \left(\frac{0,008}{2}\right)^2} \Leftrightarrow v = 1,33 \text{ m/s}$$

As perdas de carga são dadas pela equação (A. 2):

$$\Delta P = K_{\text{Total}} \times \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \quad (\text{A. 2})$$

onde ΔP é a perda de carga em [Pa], ρ é a massa volúmica em [kg/m³] e K_{Total} é o coeficiente de perda de carga total, que compreende as perdas de carga localizadas e as perdas de carga contínuas, como mostra a equação (A. 3):

$$K_{\text{Total}} = \sum K_i + \frac{4 \times f \times l}{d} \quad (\text{A. 3})$$

onde $\sum K_i$ corresponde ao somatório das perdas de carga localizadas, f é o fator de atrito, l o comprimento da conduta em [m] e d o diâmetro da conduta em [m].

Substituindo valores na equação (A. 3) vem:

$$K_{\text{Total}} = 1 + 1 + 0,5 + 0,5 + 22 \times 0,7 + \frac{4 \times f \times 4}{0,008} \Leftrightarrow$$

$$K_{\text{Total}} = 18,4 + 2000 \times f \quad (\text{A. 4})$$

Os valores do $\sum K_i$ foram obtidos tendo em conta a configuração do circuito interno da placa fria, como se pode ver na Figura A. 1.

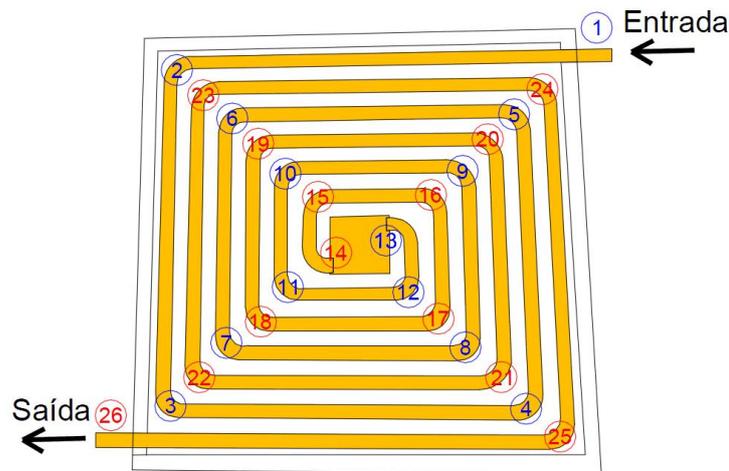


Figura A. 1. Numeração das perdas de carga localizadas no circuito da placa fria.

Para determinar o fator de atrito, recorre-se ao diagrama de Moody, tendo como parâmetros de entrada o número de Reynolds e a rugosidade relativa:

$$\begin{cases} Re = \frac{\rho \times v \times d}{\mu} \\ \varepsilon_r = \frac{K_a}{d} \end{cases}$$

onde Re é o número de Reynolds, μ é a viscosidade dinâmica em [Pa.s)], ε_r é a rugosidade relativa e K_a é a rugosidade absoluta.

Substituindo valores vem:

$$\begin{cases} Re = \frac{1000 \times 1,33 \times 0,008}{10^{-3}} = 10640 \\ \varepsilon_r = \frac{0,0015 \times 10^{-3}}{0,008} = 0,000188 \end{cases}$$

Através do diagrama de Moody, vem que $f = 0,031$.

Voltando à equação (A. 4) e substituindo o valor do fator de atrito, f , obtém-se um $K_{\text{Total}} = 80,4$. Portanto, substituindo todos os valores na equação (A. 2) a perda de carga será:

$$\Delta P = 80,4 \times \frac{1}{2} \times 1000 \times 1,33^2 = 71 \times 10^3 \text{ Pa}$$

A altura manométrica mínima que a bomba terá de ter para vencer as perdas de carga calculadas, é dada pela equação por:

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\rho \times g} \quad (\text{A. 5})$$

onde ΔH é a altura manométrica em [m] e g a aceleração da gravidade em [m/s^2].

Substituindo valores vem:

$$\Delta H = \frac{71 \times 10^3}{1000 \times 9,81} = 7,24 \text{ m}$$

• **Perdas de carga nas tubagens de ligação (mangueiras):**

O cálculo das perdas de carga nas mangueiras foi realizado para um caudal de 4 litros/minuto, um comprimento de 4 metros e um diâmetro interno de 12 milímetros.

Recorrendo à equação (A. 1), calcula-se a velocidade do escoamento. Esta é de $v = 0,59 \text{ m/s}$.

Recorrendo à equação (A. 3), vem:

$$K_{\text{Total}} = 0 + \frac{4 \times f \times 4}{0,012} \Leftrightarrow$$

$$K_{\text{Total}} = 1333,33 \times f \quad (\text{A. 6})$$

Para determinar o fator de atrito, recorre-se novamente ao ábaco de Moody, tendo como parâmetros de entrada o número de Reynolds e a rugosidade relativa:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Re} = \frac{1000 \times 0,59 \times 0,012}{10^{-3}} = 7080 \\ \varepsilon_r = \frac{0}{0,008} = 0 \end{array} \right.$$

Através do diagrama de Moody, vem que $f = 0,034$.

Recorrendo à equação (A. 6), substituindo o valor do fator de atrito, f , obtém-se um $K_{\text{Total}} = 45,33$. Portanto, através da equação (A. 2), a perda de carga será:

$$\Delta P = 45,33 \times \frac{1}{2} \times 1000 \times 0,59^2 = 7,9 \times 10^3 \text{ Pa}$$

Por fim, a altura manométrica é calculada através da equação (A. 5):

$$\Delta H = \frac{7,9 \times 10^3}{1000 \times 9,81} = 0,81 \text{ m}$$

Logo a bomba a selecionar terá de ser capaz de vencer:

- uma altura manométrica total de: $\Delta H = 7,24 + 0,81 = 8,08 \text{ m}$.
- uma perda de carga total de: $\Delta P = 71 \times 10^3 + 7,9 \times 10^3 = 78,9 \times 10^3 \text{ Pa}$.



Figura B. 6. Provetes acabados de soldar.



Figura B. 7. Provetes depois do acabamento superficial.

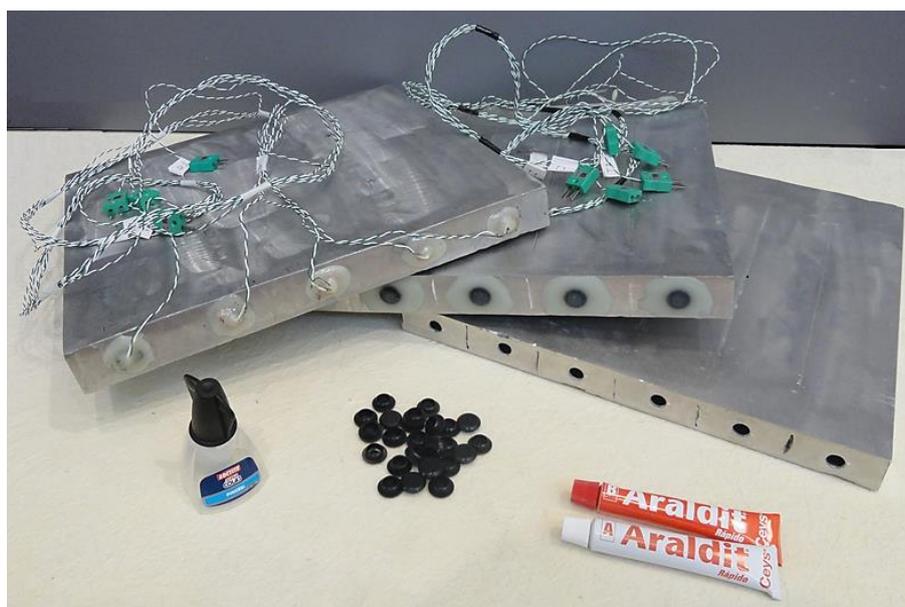


Figura B. 8. Introdução dos termopares no interior dos provetes e colocação dos tampões de selagem.

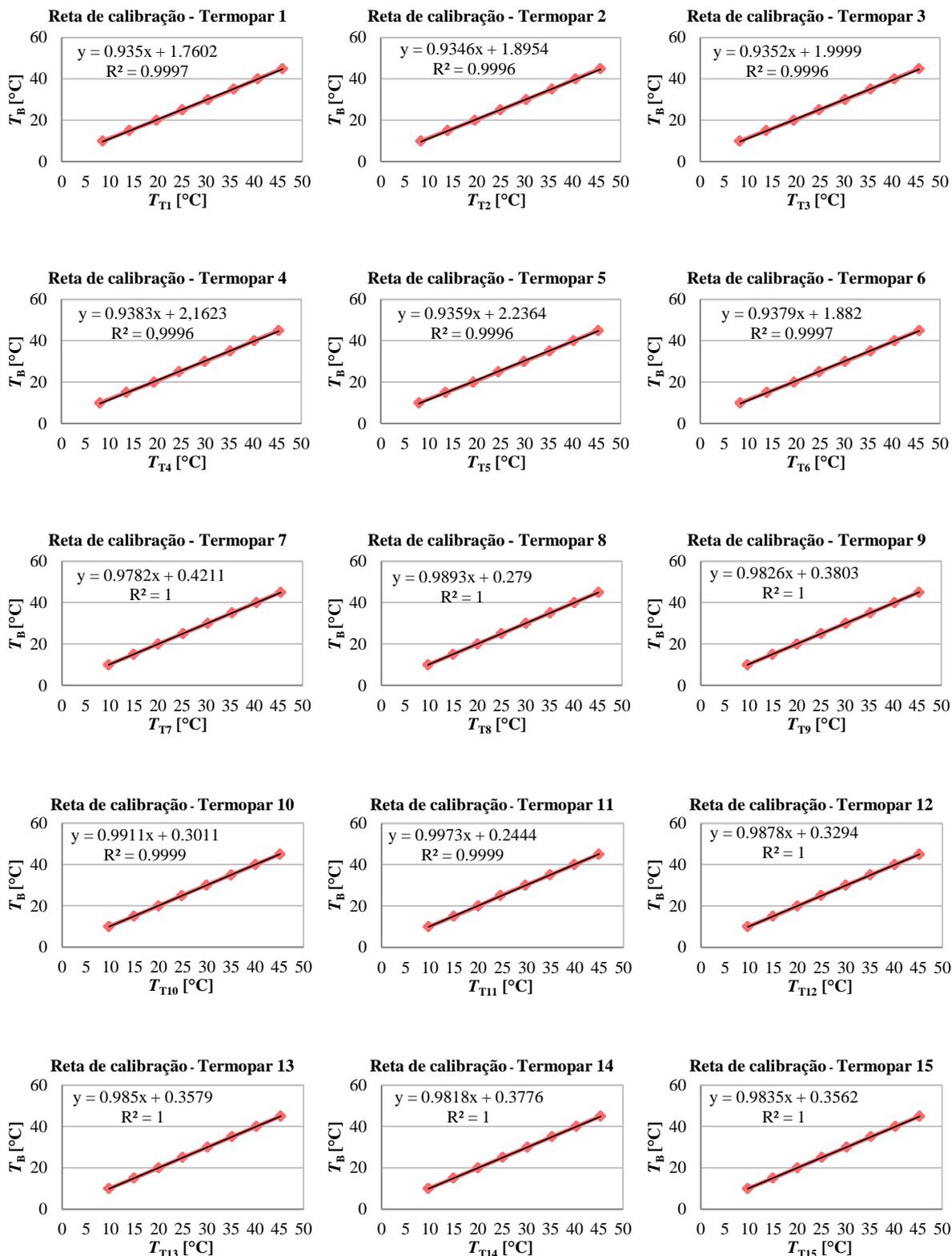
ANEXO C – ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

A Tabela C. 1 apresenta os resultados dos ensaios de calibração dos termopares do tipo-K utilizados na instalação laboratorial.

Tabela C. 1. Média das temperaturas medidas por cada termopar ou conjunto de termopares para 8 temperaturas de calibração.

| Temperatura do banho termostaticado (Temperatura de referência) | 10 °C | 15 °C | 20 °C | 25 °C | 30 °C | 35 °C | 40 °C | 45 °C | |
|--|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Termopar n.º 1 | 8.51 | 14.06 | 19.71 | 25.05 | 30.43 | 35.79 | 40.76 | 45.92 | |
| Termopar n.º 2 | 8.36 | 13.91 | 19.59 | 24.92 | 30.31 | 35.67 | 40.63 | 45.79 | |
| Termopar n.º 3 | 8.23 | 13.78 | 19.50 | 24.79 | 30.18 | 35.52 | 40.49 | 45.65 | |
| Termopar n.º 4 | 8.02 | 13.55 | 19.31 | 24.53 | 29.90 | 35.22 | 40.19 | 45.32 | |
| Termopar n.º 5 | 7.95 | 13.51 | 19.28 | 24.51 | 29.90 | 35.22 | 40.21 | 45.37 | |
| Termopar n.º 6 | 8.35 | 13.89 | 19.54 | 24.82 | 30.20 | 35.52 | 40.51 | 45.68 | |
| Termopar n.º 7 | 9.70 | 14.92 | 20.01 | 25.18 | 30.32 | 35.38 | 40.43 | 45.50 | |
| Termopar n.º 8 | 9.48 | 14.69 | 19.86 | 25.05 | 30.18 | 35.26 | 40.29 | 45.38 | |
| Termopar n.º 9 | 9.19 | 14.41 | 19.60 | 24.79 | 29.93 | 35.02 | 40.04 | 45.13 | |
| Termopar n.º 10 | 8.98 | 14.18 | 19.39 | 24.60 | 29.74 | 34.84 | 39.88 | 44.94 | |
| Termopar n.º 11 | 9.30 | 14.52 | 19.70 | 24.91 | 30.03 | 35.11 | 40.16 | 45.22 | |
| Média das temperaturas registadas pelos termopares [°C] | Termopar n.º 12 | 9.38 | 14.60 | 19.77 | 24.97 | 30.10 | 35.19 | 40.25 | 45.29 |
| | Termopar n.º 13 | 9.58 | 14.80 | 19.91 | 25.12 | 30.23 | 35.29 | 40.34 | 45.38 |
| | Termopar n.º 14 | 9.56 | 14.79 | 19.91 | 25.08 | 30.21 | 35.24 | 40.29 | 45.33 |
| | Termopar n.º 15 | 9.55 | 14.73 | 19.86 | 25.00 | 30.08 | 35.11 | 40.14 | 45.14 |
| | Termopares n.º 16 | 9.46 | 14.78 | 19.91 | 25.07 | 30.15 | 35.25 | 40.30 | 45.33 |
| | Termopares n.º 17 | 9.43 | 14.75 | 19.89 | 25.04 | 30.07 | 35.17 | 40.26 | 45.27 |
| | Termopares n.º 18 | 9.30 | 14.60 | 19.74 | 24.91 | 29.92 | 35.03 | 40.14 | 45.17 |
| | Termopares n.º 19 | 9.11 | 14.37 | 19.51 | 24.67 | 29.66 | 34.77 | 39.89 | 44.92 |
| | Termopares n.º 20 | 9.06 | 14.26 | 19.39 | 24.50 | 29.59 | 34.73 | 39.74 | 44.79 |
| | Termopares n.º 21 | 9.27 | 14.48 | 19.60 | 24.72 | 29.88 | 35.01 | 40.00 | 45.04 |
| | Termopares n.º 22 | 9.77 | 15.74 | 20.43 | 25.82 | 30.99 | 35.40 | 40.18 | 45.70 |
| | Termopares n.º 23 | 9.34 | 15.78 | 20.67 | 25.99 | 30.93 | 35.18 | 40.71 | 45.79 |
| | Termopares n.º 24 | 9.19 | 15.60 | 20.83 | 25.19 | 30.19 | 35.40 | 40.25 | 45.62 |
| | Termopares n.º 25 | 9.32 | 15.68 | 20.42 | 25.74 | 30.25 | 35.12 | 40.04 | 45.29 |

Através dos resultados apresentados na Tabela C. 1, traçaram-se as retas de calibração para cada um dos termopares, como se pode verificar na Figura C. 1. No eixo das abcissas encontram-se representados os valores médios da temperatura, lidos pelos termopares devidamente conectados ao *data-logger*. Por outro lado, no eixo das ordenadas encontram-se os valores medidos pelo termómetro do banho termostaticado (temperatura de referência).



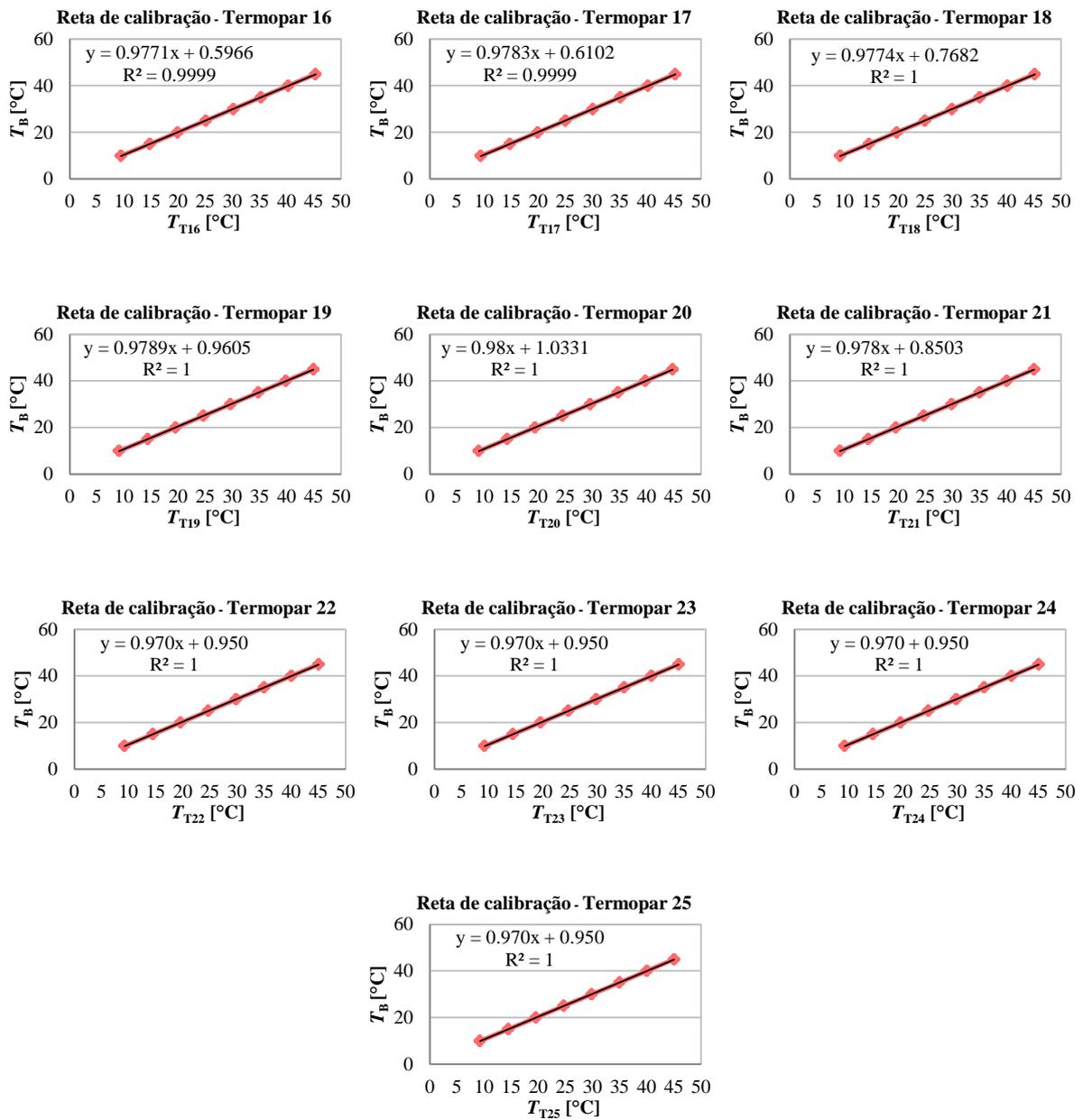


Figura C. 1. Retas de calibração dos termopares utilizados na instalação experimental.

ANEXO D – ILUSTRAÇÕES ADICIONAIS

- Ensaio de aquecimento

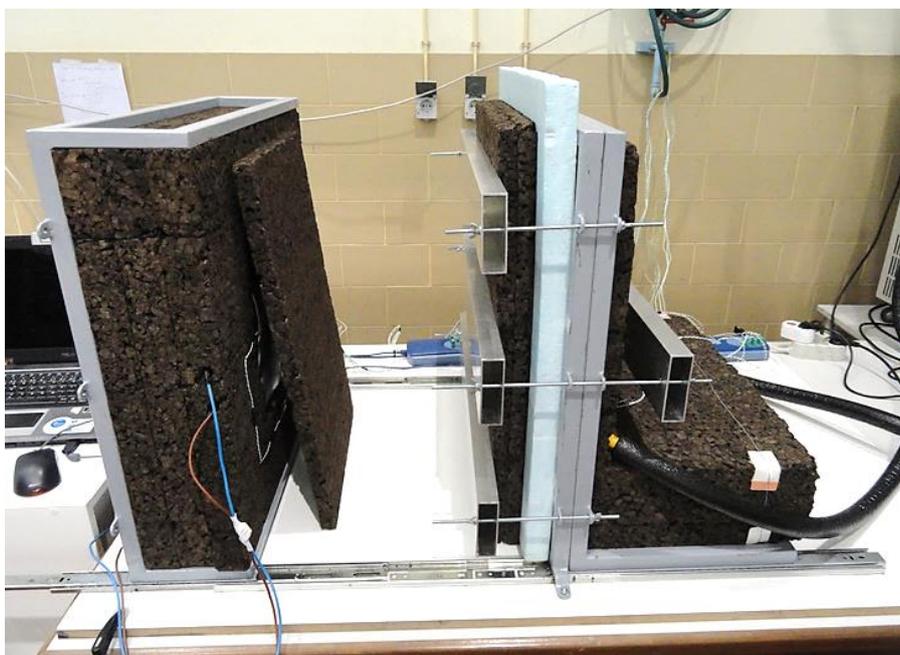


Figura D. 1. Uniformização da temperatura do PCM e pré-aquecimento da placa quente.



Figura D. 2. Início do ensaio de aquecimento e uniformização da temperatura da placa fria.

- **Ensaio de arrefecimento**

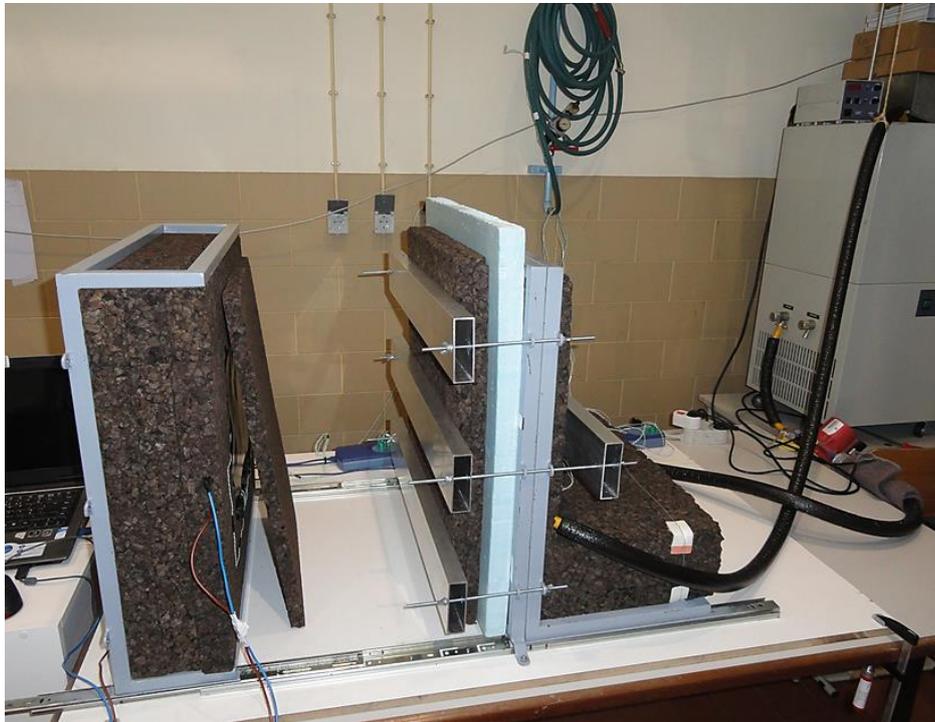


Figura D. 3. Início do ensaio de arrefecimento.

ANEXO E – CICLOS DE CARGA E DESCARGA

Os gráficos representados nas figuras seguintes são relativos às medições de temperatura realizadas durante os ciclos de carga e descarga dos PCMs. Estes dizem respeito à temperatura das superfícies da resistência elétrica e da placa fria, às temperaturas medidas no interior do provete durante todo o ensaio (aquecimento e arrefecimento), à temperatura das faces do provete (face aquecida e face arrefecida), à temperatura ambiente e à temperatura do isolamento térmico amovível (face em contacto com o exterior).

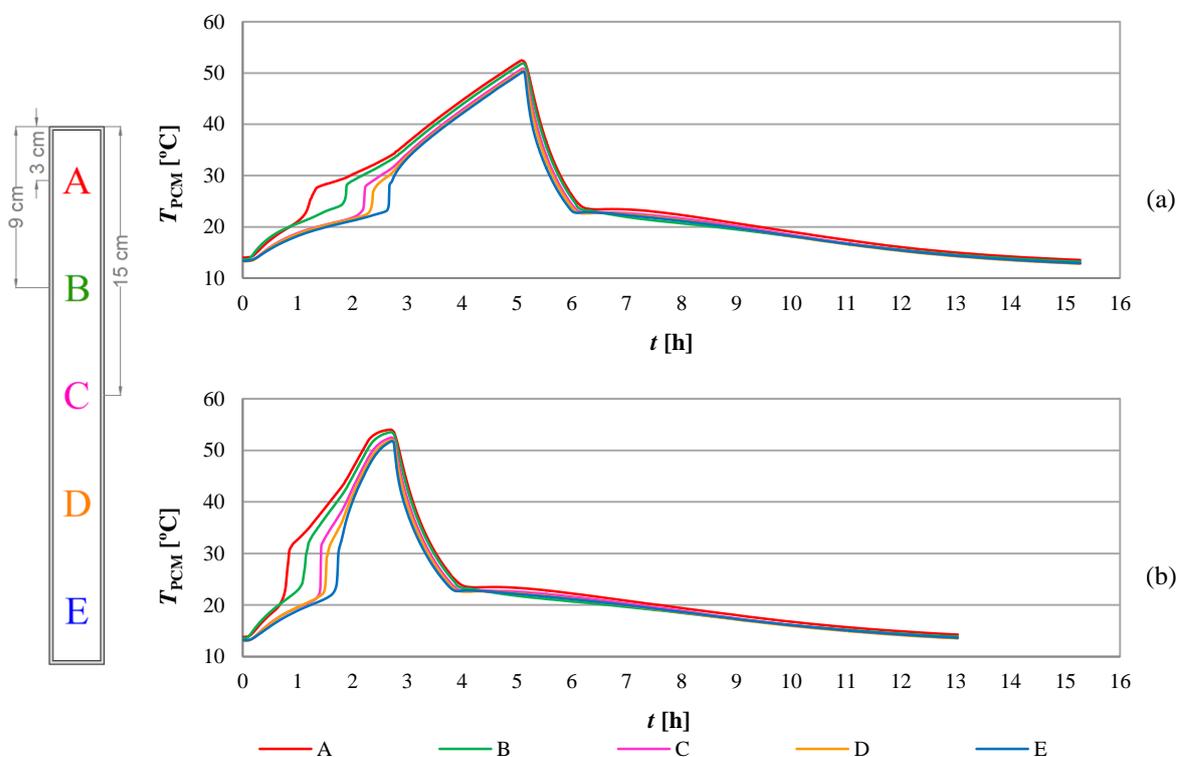


Figura E. 1. Ensaio completo do PCM RT21 macroencapsulado no provete de uma só cavidade (sem alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\varphi=378 \text{ W/m}^2$); (b) 67.5 W ($\varphi=750 \text{ W/m}^2$).

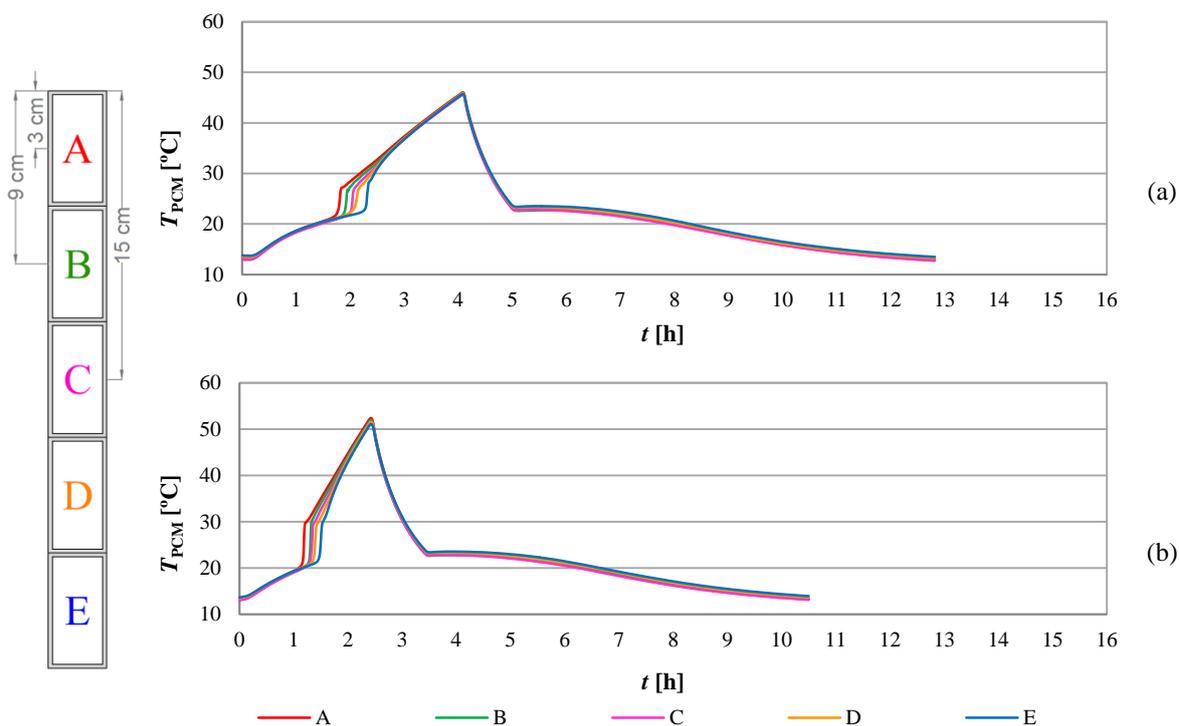


Figura E. 2. Ensaio completo do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 5 células internas (4 alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\varphi=378 \text{ W/m}^2$); (b) 67.5 W ($\varphi=750 \text{ W/m}^2$).

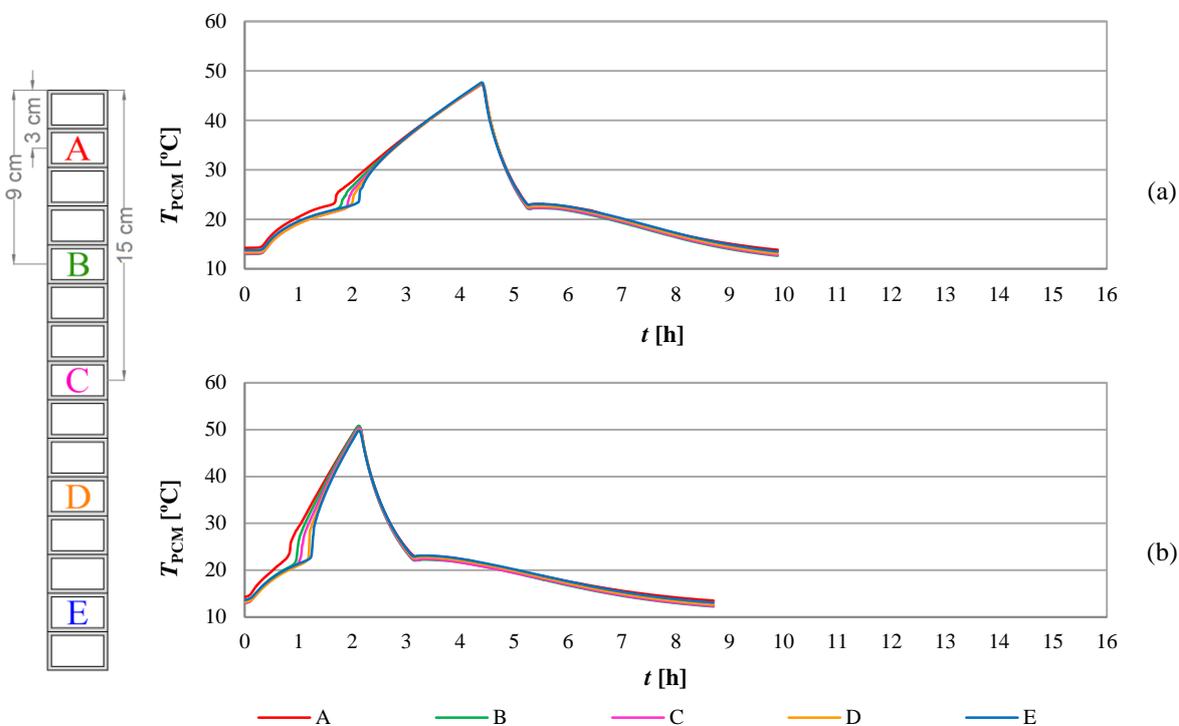


Figura E. 3. Ensaio completo do PCM RT21 macroencapsulado no provete de 15 células internas (14 alhetas), para as potências constantes de: (a) 34 W ($\varphi=378 \text{ W/m}^2$); (b) 67.5 W ($\varphi=750 \text{ W/m}^2$).

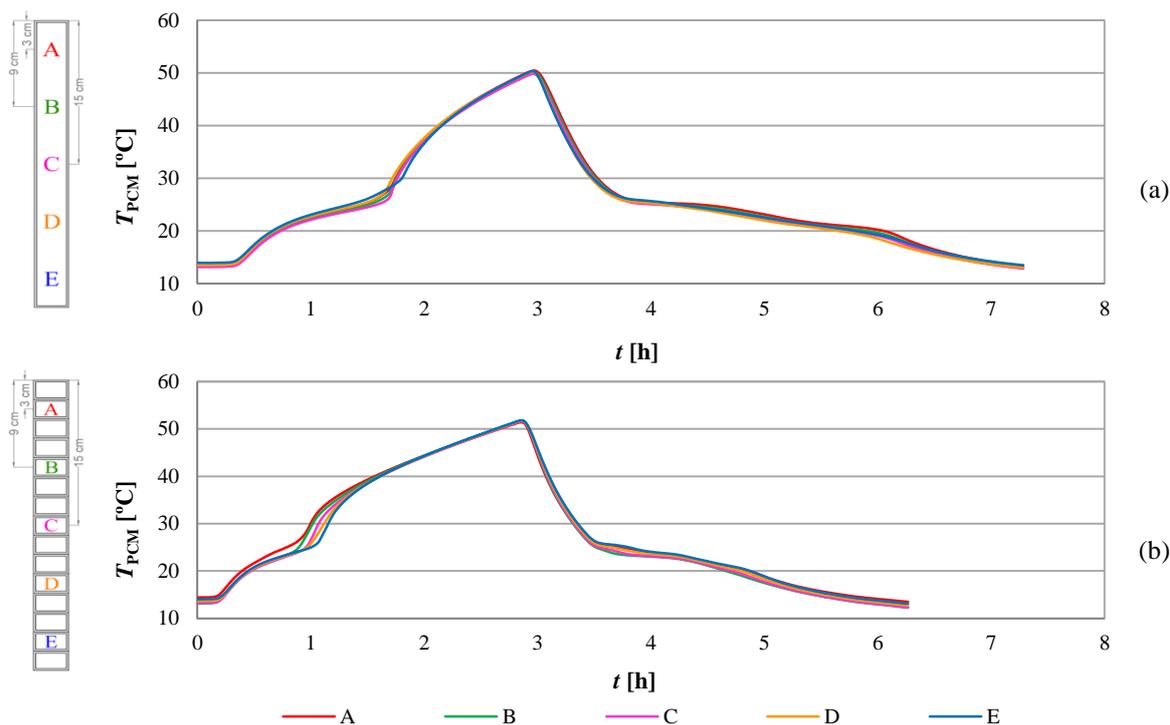


Figura E. 4. Ensaio completo a uma potência constante de 34 W ($\varphi=378 \text{ W/m}^2$) do PCM Micronal DS 5001 X, macroencapsulado no provete: (a) de uma só cavidade; (b) de 15 células internas.

As figuras apresentadas de seguida são referentes ao ensaio realizado com o PCM RT21 com a potência de aquecimento constante de 34 W e posterior arrefecimento.

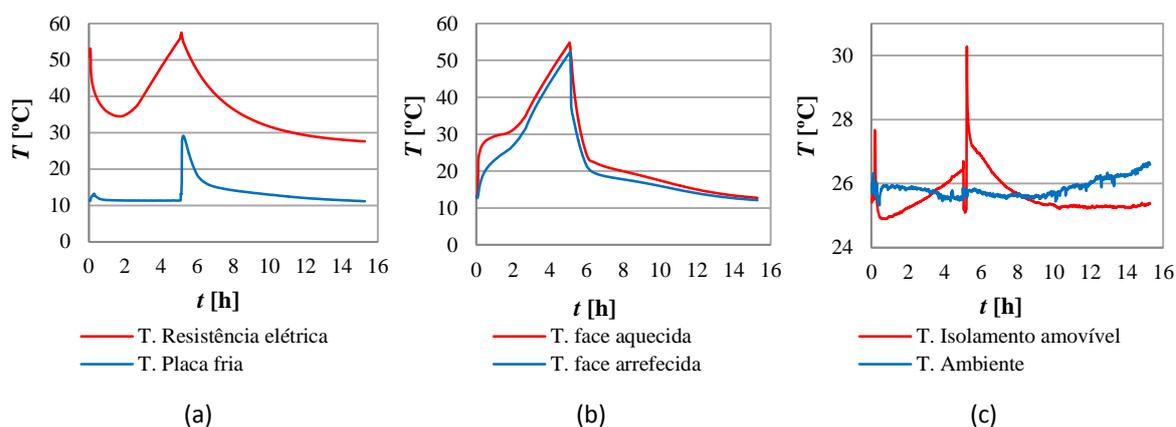


Figura E. 5. Variação da temperatura ao longo do ensaio no provete de uma só cavidade, com PCM RT21 à potência de 34 W: (a) nas superfícies da resistência elétrica e da placa fria; (b) nas faces aquecida e arrefecida do provete (c) na face exterior do isolamento amovível e do ambiente da sala.

