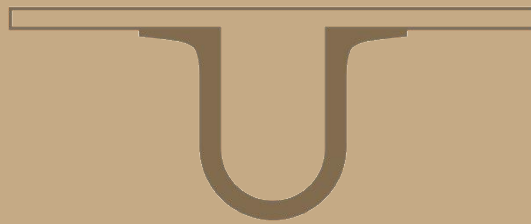




UNIVERSIDADE DE
COIMBRA



Sérgio Miguel dos Santos Carvalho

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA
TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM PLACAS DE
GESSO COM MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE**

Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica no ramo de Energia e Ambiente orientada pelo Professor Doutor José Joaquim da Costa e pelo Professor Doutor Nelson Miguel Lopes Soares e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciência e Tecnologia

Fevereiro de 2019



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

FACULDADE
DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA

Avaliação experimental da transferência de calor em placas de gesso com materiais de mudança de fase

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

Experimental evaluation of the heat exchange in gypsum wallboards with phase change materials

Autor

Sérgio Miguel dos Santos Carvalho

Orientadores

Professor Doutor José Joaquim da Costa

Professor Doutor Nelson Miguel Lopes Soares

Júri

Presidente	Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Nelson Miguel Lopes Soares Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Colaboração Institucional



Coimbra, Fevereiro, 2019

"Aprendi muito mais com os meus erros do que com os meus acertos."

Thomas Edison

Aos meus pais.

Agradecimentos

O trabalho apresentado nesta dissertação só foi possível devido à colaboração e apoio de algumas pessoas às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Ao Professor Doutor Nelson Miguel Lopes Soares e ao Professor Doutor José Joaquim da Costa, pela disponibilidade para me orientarem durante este período.

Aos meus amigos por todos os momentos que me proporcionaram durante esta fase e por todo o apoio durante os piores momentos.

A toda a minha família, por sempre acreditarem em mim, em alguns momentos até mais do que eu.

Por fim, um especial agradecimento aos meus pais por me proporcionarem esta oportunidade e pelo apoio sempre constante sem que nunca me faltasse nada, sem eles nunca teria conseguido.

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



Resumo

O objetivo principal deste trabalho é avaliar, por via experimental, a transferência de calor com mudança de fase em regime transiente numa placa de gesso comercial que contém na sua matriz um material de mudança de fase (PCM) microencapsulado (*Micronal*[®] *DS 5001 X*) – placa *Alba*[®] *balance 25* fornecida pela *Placo*[®] – Saint-Gobain. Para tal, foi utilizada uma instalação laboratorial existente no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC).

Os PCMs (do inglês *phase change materials*) são materiais que fundem/solidificam a uma temperatura aproximadamente constante, armazenando/restituindo grandes quantidades de calor devido ao calor latente envolvido nos processos de mudança de fase. Deste modo, os PCMs podem ser usados tanto no armazenamento de energia térmica como na termorregulação de diferentes sistemas. Na literatura, são descritas várias formas para incorporar os PCMs em soluções construtivas, nomeadamente através do macro- e do microencapsulamento. No caso de um PCM microencapsulado, o material é confinado em microcápsulas poliméricas de forma a evitar a perda de material líquido. O material microencapsulado pode depois ser misturado, ou impregnado, noutros materiais de construção, como por exemplo em placas de gesso.

Foram realizados ensaios de fusão (carga) e de solidificação (descarga) em duas placas de gesso com dimensões 300 mm × 300 mm × 25 mm: na placa *Alba*[®] *balance 25* (temperatura de mudança de fase do PCM aproximadamente 25 °C), e numa placa de gesso laminado cartonado com reação ao fogo melhorada *GYPFOR FIRE*. Pretendeu-se assim, comparar o comportamento térmico das duas soluções construtivas (com e sem PCMs) sujeitas às mesmas condições de ensaio. No ensaio de carga foi imposto um fluxo de calor horizontal numa das faces do provete por meio de uma resistência elétrica. No ensaio de descarga, foi encostada à outra superfície vertical do provete uma placa fria arrefecida por um circuito de água alimentado por um banho termostaticado. Os provetes foram posicionados verticalmente para simular soluções construtivas a serem integradas em elementos da envolvente vertical de edifícios (fluxo de calor horizontal). Relativamente aos

ensaios de carga da placa de gesso com o PCM, verificou-se um comportamento típico de um PCM (considerando a condução de calor como o processo de transferência de calor dominante), ou seja, foi possível identificar os três padrões na curva de evolução da temperatura nos pontos de monitorização correspondentes às fases sólida e líquida, e ao "patamar" de mudança de fase sólido-líquido. No entanto, como a solução comercial ensaiada é constituída por uma matriz de gesso com uma pequena percentagem de PCM incorporada, o efeito da mudança de fase nos resultados obtidos apresenta uma expressão relativamente ténue. Na placa de gesso *GYPFOR FIRE* os resultados obtidos correspondem ao típico aquecimento de um material sólido. Relativamente aos ensaios de descarga das duas placas de gesso testadas, a transferência de calor ocorre também por condução. Na placa de gesso com PCM é possível identificar o "patamar" mudança de fase líquido-sólido, apesar deste ser pouco significativo.

Verificou-se também que o aumento da potência fornecida durante a carga, bem como o aumento da temperatura inicial da placa quente provocam uma diminuição no tempo de fusão do PCM presente na amostra. Quanto aos ensaios de descarga foi possível verificar que quanto maiores forem a temperatura inicial da amostra e a temperatura inicial da placa fria, maior o tempo necessário para a solidificação do material. Os resultados obtidos neste trabalho comprovam o potencial termorregulador da placa de gesso com o PCM, mesmo que este seja reduzido.

Palavras-chave: Material de mudança de fase, PCM microencapsulado, Transferência de calor, Calor latente, Instalação experimental, Placas de gesso.

Abstract

This dissertation aims to experimentally analyse the heat transfer with transient phase change of a plasterboard (Alba[®]balance 25 supplied by Placo[®] – Saint-Gobain) which contains a microencapsulated phase change material (PCM) (*Micronal[®] DS 5001 X*). In order to do this study, a previously installed experimental setup was adapted in the Department of Mechanical Engineering of the Faculty of Sciences and Technology of the University of Coimbra.

PCM's are materials that melt/solidify at an approximately constant temperature, storing/restoring large amounts of heat due to the latent heat involved in the phase change processes. Thus, PCM's can be used for the storage of thermal energy as well as for the thermoregulations of different systems.

There are several ways described in literature to incorporate the PCM's into constructive solutions, namely macro- and microencapsulation. In the latter, the material is confined to polymeric microcapsules in order to avoid the loss of liquid material. The microencapsulated material can then be mixed or impregnated in other construction materials, such as plasterboard.

Fusion and solidification tests (charging and discharging, respectively) were performed in two plasterboards with 300 mm × 300 mm × 25 mm: one of which was the Alba[®]balance 25 plasterboard (temperature of phase change transition at approximately 25°C) while the other one was a regular plasterboard with enhanced fire resistance *GYPFOR FIRE*.

The intent was to compare the thermal behaviour of the two constructive solutions (with and without PCM's) when subjected to the same test conditions. In the fusion test, the sample was leaned against a hot plate and subjected to a horizontal heat flux in one of its faces, supplied by a heat resistor. In the solidification tests, a plate cooled by water supplied by a thermostated bath was leaned against the sample.

The samples were positioned vertically to emulate the constructive solutions to be integrated in the vertical envelope of buildings. Regarding the charging tests with the PCM plasterboard, the typical behaviour of PCM's was observed, (considering heat

conduction as the main method of heat transfer), that is to say, it was possible to identify the standard behaviour of the heating curve regarding the three intervals: solid, the phase change from solid to liquid, and liquid. However, since the commercial solution tested is constituted by a gypsum matrix with a low percentage of PCM, the heating curve is more subtle in the phase change, relatively to the theoretical heating curve of PCM's. As for the *GYPFOR FIRE* plasterboard, the results corresponded to the typical heating of a solid. Regarding the discharging tests of the two plasterboards, the heat transfer was performed by heat conduction as well. Despite being subtle, it was still possible to observe the phase change plateau in the heating curve, regarding the PCM plasterboard.

It was also determined that the increase in electrical power during the charging test, as well as higher starting temperatures of the hot plate resulted in a decrease of the time required to melt all the PCM present in the sample. Regarding the discharge tests, it was possible to verify that with higher starting temperatures, and starting temperature of the cooling plate, more time was needed to solidify the PCM. The results of this dissertation verify the thermoregulatory capacity of the PCM plasterboard, despite showing modest results.

Keywords: Phase Change Material, PCM, Heat transfer, Latent heat, Experimental setup, Samples, Gypsum wallboard, Plasterboard.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xiii
Simbologia e Siglas	xv
Simbologia.....	xv
Siglas	xvi
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação	3
1.3. Objetivos	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	9
2.1.3. Técnicas de confinamento	9
2.2. Transferência de calor em materiais com PCMs microencapsulados.....	10
3. Instalação Experimental	13
3.1. Descrição geral da instalação experimental	13
3.2. Componentes da instalação	15
3.2.1. Módulo de aquecimento	15
3.2.2. Módulo de arrefecimento.....	18
3.2.3. Módulo de teste	22
3.2.4. Estrutura de suporte e sistema de calhas	23
3.3. Monitorização e aquisição de dados	23
3.3.1. Sistema de aquisição de dados.....	23
3.3.2. Sensores de temperatura	24
3.3.3. Sensores de fluxo de calor	25
3.4. Provetes em estudo	25
3.5. Domínio físico e variáveis de controlo	27
3.5.1. Módulos de aquecimento e arrefecimento	27
3.5.2. Módulo de teste	28
3.6. Protocolo experimental e ensaios realizados	29
3.6.1. Ensaio de carga.....	29
3.6.2. Ensaio de descarga.....	31
4. Resultados e discussão	35
4.1. Ensaio de carga.....	35
4.2. Ensaio de descarga	39
4.3. Ensaio suplementar	44

5. Conclusões e trabalhos futuros.....	47
5.1. Conclusões.....	47
5.2. Sugestões para trabalhos futuros	48
Referências Bibliográficas	49
Anexo I – Calibração dos termopares – Resultados.....	53
Anexo II – Resultados dos ensaios de carga	59
Anexo III – Resultados dos ensaios de descarga.....	63
Anexo IV – Ilustrações adicionais	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Apresentação do projeto “PCMs4Buildings” – Sistemas com cavidades retangulares com materiais de mudança de fase (PCMs) para o aproveitamento de energia solar térmica em edifícios [5].	2
Figura 2.1 – Caracterização do funcionamento de um material com PCMs: (a) comportamento quando sujeito a aquecimento; (b) comportamento quando sujeito a arrefecimento.	7
Figura 3.1 – Representação esquemática (em corte) da instalação experimental (adaptado de [8]).	13
Figura 3.2 – Esquema 3D da instalação experimental adaptado de [8].	14
Figura 3.3 – Instalação experimental instalada no Laboratório de Climatização e Ambiente do DEM-FCTUC.	14
Figura 3.4 – (a) Distribuição dos 9 termopares tipo-K na superfície da placa quente. (b) Regularização da superfície de contacto através da incorporação de uma película de borracha.	16
Figura 3.5 – Placa quente com a resistência elétrica.	16
Figura 3.6 – (a) Variac; (b) Wattímetro; (c) Estabilizador de tensão.	17
Figura 3.7 – Módulo de arrefecimento: (a) disposição dos termopares tipo-K na superfície da placa fria; (b) placa fria com a película de regularização.	19
Figura 3.8 – (a) Superfície de alumínio da placa fria em contacto com o provete; (b) vista em corte da placa fria, com representação do circuito de água (Figura adaptada de [8]).	20
Figura 3.9 – Banho termostaticado tipo DBT KB21 da <i>Heto Lab Equipment</i> .	20
Figura 3.10 – Bomba de circulação <i>GRUNDFOS MAGNA 3 25-100</i> (adaptado de [22]).	22
Figura 3.11 – Módulo de teste com a amostra fixa e sistema de recolha de dados acoplado.	23
Figura 3.12 - Sensor de fluxo de calor do tipo <i>HFS-3</i> e <i>HFS-4</i> da Omega (adaptado de [27]).	25
Figura 3.13 – Placa de gesso com PCM microencapsulado (à direita); Placa de gesso com reação ao fogo melhorada (à esquerda).	26
Figura 3.14 – Aspeto macroscópico do PCM microencapsulado <i>Micronal® DS 5001 X</i> .	27
Figura 3.15 – Representação da distribuição dos termopares tipo-K (a) na placa quente e (b) na placa fria.	28
Figura 3.16 – Representação da disposição dos termopares na amostra: (a) vista das faces verticais principais do provete; (b) vista lateral da amostra em corte, com	

representação dos orifícios onde devem ser colocados os termopares em profundidade.	29
Figura 3.17 – Ensaio de carga (aquecimento) realizados na placa de gesso Alba®balance 25.	30
Figura 3.18 – Ensaio de carga (aquecimento) realizados na placa de gesso sem PCMs. ...	30
Figura 3.19 – Ensaio de descarga (arrefecimento) realizados para a placa de gesso Alba®balance 25.	32
Figura 3.20 – Ensaio de descarga (arrefecimento) realizados para a placa de gesso sem PCMs.	32
Figura 4.1 – Ensaio de carga da placa de gesso Alba®balance 25, quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura inicial $T_{PQ} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e para uma potência constante de: (a) 20W; (b) 34W;	35
Figura 4.2 – Fluxo de calor no decorrer do ensaio de carga da placa de gesso com PCM Alba®balance 25, com potência elétrica constante fornecida à placa de 20W. ...	37
Figura 4.3 – Ensaio de carga com a placa de gesso sem PCMs <i>GYPFOR FIRE</i> , quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura inicial $T_{PQ} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e para uma potência constante de: (a) 20 W; (b) 34 W.	38
Figura 4.4 - Fluxo de calor no decorrer do ensaio de carga com a placa de gesso sem PCMs <i>GYPFOR FIRE</i> para a potência constante de 20 W.	39
Figura 4.5 – Ensaio de descarga da placa de gesso com PCM Alba®balance 25, inicialmente a uma temperatura de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ quando colocada em contacto com a placa fria a: (a) $T_{PF} = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $T_{PF} = 17\text{ }^{\circ}\text{C}$	40
Figura 4.6 – Fluxos de calor no decorrer do ensaio de descarga da placa de gesso Alba®balance 25, com temperatura inicial da amostra de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e com condição inicial da placa fria de $T_{PF} = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$	42
Figura 4.7 – Ensaio de descarga da placa de gesso sem PCMs <i>GYPFOR FIRE</i> , inicialmente a uma temperatura de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ quando colocada em contacto com a placa fria a: (a) $T_{PF} = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $T_{PF} = 17\text{ }^{\circ}\text{C}$	43
Figura 4.8 – Fluxos de calor no decorrer do ensaio de descarga da placa de gesso sem PCMs <i>GYPFOR FIRE</i> para a temperatura inicial da amostra de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e com condição inicial da placa fria de $T_{PF} = 14\text{ }^{\circ}\text{C}$	44
Figura 4.9 – Ensaio suplementar realizado na placa de gesso com PCMs Alba®balance 25: (a) ensaio de aquecimento (carga); (b) ensaio de arrefecimento (descarga).	45
Figura I.1 – Retas de calibração dos termopares utilizados na instalação experimental. ...	58
Figura II.1 – Ensaio de carga (aquecimento) com a temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura $T_{PQ} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ com potência constante fornecida à placa de: (a) 20 W; (b) 34 W.	59
Figura II.2 – Ensaio de carga (aquecimento) com temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma	

temperatura $T_{PQ} = 30\text{ °C}$ com potência constante fornecida à placa de: (a) 20 W; (b) 34 W.....	59
Figura II.3 – Ensaio de carga (aquecimento) com temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura $T_{PQ} = 35\text{ °C}$ com potência constante fornecida à placa de: (a) 20 W; (b) 34 W.....	60
Figura II.4 – Ensaio de carga (aquecimento) com temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura $T_{PQ} = 55\text{ °C}$ com potência constante fornecida à placa de 34 W.	60
Figura II.5 – Ensaio de carga (aquecimento) com temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura $T_{PQ} = 27\text{ °C}$ com potência constante fornecida à placa de: (a) 20 W; (b) 34 W.....	61
Figura II.6 – Ensaio de carga (aquecimento) com temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura $T_{PQ} = 30\text{ °C}$ com potência constante fornecida à placa de: (a) 20 W; (b) 34 W.....	61
Figura III.1 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de 27 °C e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura: (a) $T_{PF} = 14\text{ °C}$; (b)) $T_{PF} = 17\text{ °C}$	63
Figura III.2 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de 30 °C e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura: (a)) $T_{PF} = 14\text{ °C}$; (b)) $T_{PF} = 17\text{ °C}$	63
Figura III.3 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de 35 °C e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura: (a)) $T_{PF} = 14\text{ °C}$; (b)) $T_{PF} = 17\text{ °C}$	64
Figura III.4 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de 55 °C e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura $T_{PF} = 14\text{ °C}$	64
Figura III.5 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de 27 °C e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura: (a) $T_{PF} = 14\text{ °C}$; (b) $T_{PF} = 17\text{ °C}$	65
Figura III.6 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de 30 °C e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura: (a) $T_{PF} = 14\text{ °C}$; (b) $T_{PF} = 17\text{ °C}$	65
Figura IV.1 – Montagem experimental no decorrer de um ensaio de descarga.	67
Figura IV.2 – Montagem experimental durante um ensaio de descarga.	68
Figura IV.3 – Vista da instalação experimental e dos seus componentes.	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades genéricas desejadas para os PCMs, adaptado de [10].....	8
Tabela 3.1 – Características da placa quente.....	16
Tabela 3.2 – Propriedades das placas de isolamento térmico utilizadas na instalação experimental.....	18
Tabela 3.3 – Características do banho termostaticado da <i>Heto Lab Equipment</i> [8].....	21
Tabela 3.4 – Especificações da bomba de circulação <i>MAGNA 3 25-100 da GRUNDFOS</i> [23].	22
Tabela 3.5 – Características técnicas dos <i>data loggers PICO TC-08</i> [24].	24
Tabela 3.6 – Fatores de conversão dos sinais obtidos pelos sensores de fluxo de calor.	25
Tabela 3.7 – Propriedades da placa de gesso com PCM microencapsulado na matriz – <i>Alba®balance 25</i> [28].	26
Tabela 3.8 – Propriedades da placa de gesso <i>standard</i> com reação ao fogo melhorada da <i>GYPFOR FIRE</i> [29].	26
Tabela 3.9 - Propriedades do PCM utilizado incorporado nas placas de gesso <i>Alba®balance 25</i> [30].	27
Tabela 4.1 – Tempo para a completa fusão do PCM na amostra, t_F , para todos os ensaios de carga realizados com a placa de gesso com PCM <i>Alba®balance 25</i>	37
Tabela 4.2 – Tempos de solidificação, t_S , para todos os ensaios de descarga realizados com a placa de gesso com PCM <i>Alba®balance 25</i>	42
Tabela I.1 – Média das temperaturas lidas pelos termopares para as 9 temperaturas de calibração.....	53

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

ΔT – Intervalo de temperatura em que ocorre a transição de fase [°C]

FC – Fator de conversão

P_{aq} – Potência elétrica imposta no ensaio de carga [W]

t_F – Tempo necessário para a fusão do PCM [s]

t_S – Tempo necessário para a solidificação do PCM [s]

T_1 – Temperatura média de dois pontos a 8.3 mm de profundidade (da esquerda para a direita) [°C]

T_2 – Temperatura média de dois pontos a 12.5 mm de profundidade (da esquerda para a direita) [°C]

T_3 – Temperatura média de dois pontos a 20.8 mm de profundidade (da esquerda para a direita) [°C]

T_{am} – Temperatura da amostra [°C]

T_{amb} – Temperatura ambiente média medida na sala aquando à realização de cada ensaio [°C]

T_{bt} – Temperatura do banho termostaticado [°C]

T_f – Temperatura de transição de fase [°C]

T_{ref} – Temperatura de referência imposta pelo banho termostaticado [°C]

T_{L-} – Temperatura lida pelo respetivo termopar [°C]

T_F – Temperatura média da superfície da face arrefecida [°C]

T_{PF} – Temperatura média na superfície da placa fria [°C]

T_{PQ} – Temperatura média na superfície da placa quente [°C]

T_Q – Temperatura média da superfície da face aquecida [°C]

Siglas

3D – Tridimensional

AVAC – Aquecimento, ventilação e ar condicionado

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

EUA – Estados Unidos da América

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

GEE – Gases com efeito de estufa

PCMs – Materiais de mudança de fase (do inglês *Phase Change Materials*)

PEAD – Polietileno de alta densidade

UC – Universidade de Coimbra

UE – União Europeia

XPS – Poliestireno extrudido

1. INTRODUÇÃO

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

1.1. Enquadramento

A energia tornou-se um recurso imprescindível com o aumento do padrão de qualidade de vida e das exigências de conforto térmico. Esta necessidade incessante de energia leva à queima de combustíveis fósseis gerando altos índices de poluição atmosférica, sendo estes poluentes responsáveis pelo efeito de estufa e pelo aquecimento global. Assim, são cada vez mais urgentes novas políticas para a redução de emissões de poluentes e que promovam um desenvolvimento mais sustentável. Estas políticas devem promover um uso mais racional da energia e fomentar fontes de energia renováveis. Nos países "ditos" desenvolvidos, 20 – 40% do consumo total de energia é gasto em edifícios. Na União Europeia este valor é mesmo de 40%, sendo que 75% destes edifícios são ineficientes devido a uma recorrente falta de investimento na requalificação energética destes, e à falta de mão de obra especializada [1]. Se a taxa de renovação atual se mantiver (1% dos edifícios ao ano), será necessário um século para se alcançar o objetivo proposto pela Comissão Europeia de edifícios com balanço energético aproximadamente nulo [2]. Prevê-se também que o consumo de energia continue a aumentar devido às fortes alterações climáticas (aparecimento de verões mais quentes e invernos mais frios), aumento da população e aumento dos padrões de qualidade de vida. Assim, a União Europeia tem como uma das suas prioridades a diminuição da energia consumida em edifícios.

Pérez-Lombard *et al.* [3] afirmam que grande parte do total de energia consumida mundialmente é no setor dos edifícios, dentro deste, a maior parte é utilizada no controlo da temperatura interior dos espaços em edifícios procurando o conforto térmico dos seus ocupantes, sendo que no caso dos EUA este valor chega aos 53%, valor que na União Europeia chega mesmo aos 68%. A restante percentagem da energia consumida nos edifícios é utilizada para aquecimento de água e para iluminação dos espaços, nos EUA (17% e 30%)

e na UE (14% e 18%) respetivamente. Estes valores mostram claramente que atuar no setor da climatização dos espaços em edifícios irá conduzir a uma redução do consumo de energia. Nesta perspectiva, é desenvolvido este trabalho que visa analisar a capacidade de uma solução construtiva com PCMs (do inglês *Phase Change Materials*) por forma a ser utilizada na termorregulação de edifícios.

Este trabalho enquadra-se nos trabalhos em curso no âmbito do projeto "PCMs4Buildings", que tem como objetivo principal estudar sistemas com PCMs para o aproveitamento de energia solar térmica em edifícios. O projeto encontra-se dividido em seis tarefas principais, como é mostrado na Figura 1.1. O trabalho desenvolvido nesta dissertação enquadra-se na Tarefa 3 – *Ensaio num aparato experimental de pequenas dimensões*. Os resultados provenientes destes ensaios serão utilizados posteriormente na validação dos resultados numéricos obtidos no âmbito da Tarefa 2 – *Modelação numérica da transferência de calor com mudança de fase*. Mais detalhes acerca do projeto "PCMs4Buildings" podem ser consultados em [4].

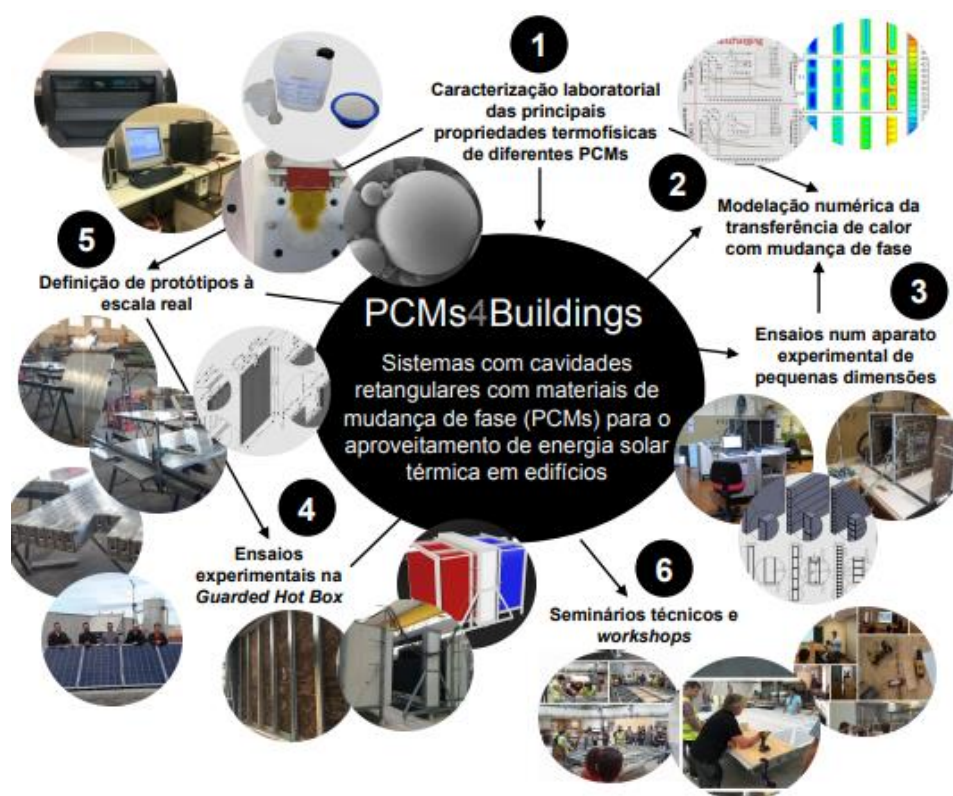


Figura 1.1 – Apresentação do projeto "PCMs4Buildings" – Sistemas com cavidades retangulares com materiais de mudança de fase (PCMs) para o aproveitamento de energia solar térmica em edifícios [5].

Assim, foram realizados ensaios de carga e descarga numa placa de gesso Alba[®]balance 25, que incorpora o PCM *Micronal*[®] DS 5001 X na sua composição. O comportamento desta placa foi comparado ao de outra placa de gesso sem PCMs com as mesmas dimensões e sujeita às mesmas condições de ensaio. Durante os ensaios foram monitorizadas as temperaturas nas superfícies das amostras e em vários pontos no interior das amostras, bem como os valores do fluxo de calor nas superfícies verticais principais, por forma a ser possível comparar o comportamento térmico das duas soluções construtivas.

1.2. Motivação

Este trabalho surge no âmbito do projeto "PCMs4Buildings" e pretende adaptar uma instalação experimental já existente no DEM-UC para avaliar a transferência de calor com mudança de fase em regime transiente através de uma placa de gesso com PCMs microencapsulados – Alba[®]balance 25 (de dimensões 300 mm x 300 mm x 25 mm) – fornecida pela empresa *Placo*[®] – *Saint-Gobain*. O comportamento térmico de uma placa de gesso laminado cartonado com reação ao fogo melhorada *GYPFOR FIRE* com as mesmas dimensões foi também foi avaliado.

No âmbito do projeto "PCMs4Buildings", foram já realizados ensaios para avaliar o comportamento térmico de pequenas unidades de armazenamento de energia térmica, constituídas por uma macrocápsula de alumínio preenchida com o mesmo PCM microencapsulado [6]. As unidades são constituídas por várias secções retangulares empilhadas verticalmente, por forma a avaliar-se o efeito de alheta na transmissão de calor com mudança de fase. Resultados sobre este estudo foram apresentados por Soares *et al.* em [6], [7].

1.3. Objetivos

Esta dissertação tem como principal objetivo avaliar experimentalmente a transferência de calor com mudança de fase em regime transiente numa placa de gesso com PCMs microencapsulados – Alba[®]balance 25. Pretende-se ainda comparar o comportamento térmico desta placa, com o comportamento de uma placa de gesso sem PCMs – *GYPFOR FIRE*, quando as placas são sujeitas às mesmas condições de carga e descarga. Para a

implementação do protocolo experimental, foi usada uma instalação laboratorial existente no DEM – FCTUC [8] devidamente readaptada para o propósito deste trabalho. Por fim, pretende-se tirar conclusões sobre o efeito termorregulador dos PCMs, e o tempo que estes levam fundir e solidificar, em função das condições experimentais impostas.

1.4. Metodologia

De maneira a atingir os objetivos enunciados na secção anterior, foi estabelecida a seguinte metodologia de trabalho:

- Revisão bibliográfica sobre o tema em estudo e enquadramento do problema físico;
- Revisão dos trabalhos experimentais desenvolvidos anteriormente pela equipa do projeto "PCMs4Buildings" e familiarização com a instalação e protocolo experimentais;
- Verificação das condições da instalação experimental existente no DEM;
- Listagem e aquisição do material em falta na instalação experimental;
- (Re)montagem da instalação experimental existente e (re)definição do protocolo experimental;
- Preparação dos provetes;
- Fabrico e posterior calibração de termopares do tipo-K com auxílio de um banho termostatizado da *Heto Lab Equipment*;
- Preparação dos sensores de fluxo de calor (*Omega HFS-4*);
- Preparação e configuração do sistema de aquisição de dados (*PicoLog Data Acquisition*);
- Implementação do protocolo experimental e realização de ensaios;
- Realização dos testes numa amostra de gesso com o PCM microencapsulado com temperatura de fusão de aproximadamente 25 °C;
- Realização dos testes numa amostra de gesso sem PCM, com reação ao fogo melhorada;
- Monitorização e tratamento dos resultados obtidos;
- Discussão dos resultados.

1.5. Estrutura da dissertação

Esta dissertação divide-se em 6 capítulos. Nesta secção apresenta-se uma descrição resumida de cada um dos capítulos.

No primeiro capítulo, procura-se explicar a importância e os objetivos do trabalho desenvolvido. No segundo capítulo faz-se uma revisão sobre o funcionamento dos PCMs, bem como das suas principais características, classificação e das várias maneiras de os incorporar em soluções construtivas. Faz-se também uma revisão de alguns trabalhos realizados por autores nacionais e internacionais, no campo do armazenamento de energia térmica utilizando soluções com PCMs. O terceiro capítulo apresenta uma descrição dos principais componentes da instalação experimental e do protocolo experimental implementado para os ciclos de carga e de descarga. O quarto capítulo reserva-se para a apresentação e discussão dos resultados obtidos. No quinto capítulo apresentam-se as principais conclusões desta dissertação e fazem-se algumas sugestões para trabalhos futuros. Finalmente, no Anexo I apresentam-se os resultados da calibração dos termopares (retas de calibração). No Anexo II apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de carga realizados para as duas amostras em teste, sendo os resultados dos ensaios de descarga apresentados no Anexo III. Ainda no Anexo IV apresentam-se algumas imagens ilustrativas da instalação no decorrer dos ensaios.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita uma revisão das principais características dos PCMs, dos diferentes modos de os incorporar em soluções construtivas e da sua aplicação em sistemas de armazenamento de energia térmica. São também apresentados vários estudos numéricos e experimentais para melhor enquadrar a problemática desta dissertação.

2.1. Materiais de mudança de fase (PCMs)

Os PCMs são materiais que têm a capacidade de alterar o seu estado físico (de sólido para líquido e/ou *vice-versa*) num determinado intervalo de temperatura, absorvendo ou libertando calor latente. Sharma *et al.* [9] definem ainda os PCMs como materiais com elevado calor latente de fusão e uma temperatura de transição de fase conhecida *à priori* e próxima da do campo de aplicação desejado. Deste modo, os PCMs podem ser aplicados no armazenamento de energia térmica e na termorregulação de diferentes sistemas conforme indicado na Figura 2.1.

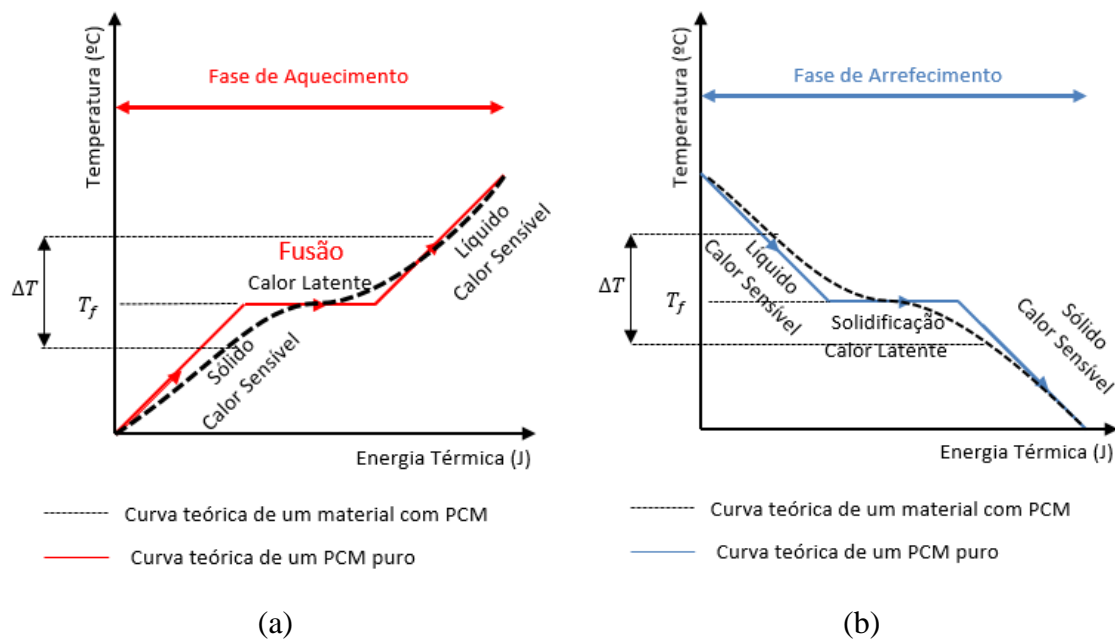


Figura 2.1 – Caracterização do funcionamento de um material com PCMs: (a) comportamento quando sujeito a aquecimento; (b) comportamento quando sujeito a arrefecimento [4].

2.1.1. Propriedades

Os PCMs apresentam um grande potencial, como o efeito termorregulador e o armazenamento de grandes quantidades de energia numa pequena quantidade de material, que os colocam como soluções muito interessantes em aplicações para armazenamento de energia térmica. Os PCMs podem apresentar várias gamas de temperatura de transição de fase, entre elas gamas perto das gamas de temperatura de conforto térmico. Assim, os PCMs podem ser utilizados em muitas aplicações em edifícios, no entanto, para que seja aceitável o uso de PCMs no sector da construção, é necessário que estes materiais apresentem boas propriedades termofísicas, químicas e cinéticas (Tabela 2.1). É também importante ter em conta o preço e disponibilidade destes materiais. Uma boa aplicação de um determinado PCM depende da escolha acertada do próprio PCM (e da respetiva temperatura de mudança de fase), e da garantia que as características do PCM são as mais adequadas para a aplicação em causa.

Tabela 2.1 – Propriedades genéricas desejadas para os PCMs, adaptado de [10].

Propriedades Termofísicas	Temperatura de mudança de fase na gama de temperaturas desejada; Elevado calor latente de fusão; Elevada condutibilidade térmica; Elevado calor específico; Baixa variação de volume durante a mudança de fase; Fusão e solidificação congruentes; Estabilidade térmica a longo prazo.
Propriedades Químicas	Ciclos de fusão/solidificação completamente reversíveis; Estabilidade química a longo prazo.
Propriedades Cinéticas	Elevada taxa de cristalização; Elevada taxa de nucleação (para evitar o subarrefecimento).
Outras	Disponíveis em grandes quantidades e a baixo custo; Rentáveis; Facilidade de separação dos materiais e potencial de reciclagem.

2.1.2. Classificação

Os PCMs podem ser divididos quanto ao tipo de transição de fase sobre o qual operam: sólido – sólido, sólido – líquido e líquido – gasoso. Nesta dissertação é estudado um PCM do segundo grupo. Estes podem apresentar baixa condutibilidade térmica (por volta de 0.2 W/m.K) e alguma variação de volume durante a mudança de fase. No entanto, apresentam uma larga gama de temperaturas de utilização, elevado calor latente de fusão e uma boa compatibilidade com outros materiais [11]. Os PCMs orgânicos dividem-se em parafinas e não parafinas. Neste trabalho usa-se um PCM do tipo parafina com transição sólido – líquido, uma vez que é muito adequado para aplicações na envolvente térmica dos edifícios.

2.1.3. Técnicas de confinamento

Na literatura, existem várias técnicas descritas para o confinamento dos PCMs por forma a evitar-se o vazamento de material líquido. Memom [12], identifica as cinco principais formas de incorporar os PCMs em soluções construtivas: incorporação direta, imersão, encapsulamento, estabilização de forma e PCMs compósitos de forma estável.

A incorporação direta é o método mais simples, prático e económico. Neste método os PCMs são misturados diretamente com os outros materiais de construção aquando da produção da solução construtiva. No entanto, esta técnica apresenta como principal desvantagem a possível perda de material líquido durante a mudança de fase e a incompatibilidade dos PCMs com alguns materiais de construção.

Na técnica de imersão, são utilizados materiais porosos, como o gesso, tijolos, blocos de cimento, etc. [11]. Estes materiais porosos são mergulhados no PCM líquido, sendo este absorvido através da superfície dos materiais. Nesta técnica poderá haver alteração das propriedades do PCM após muitos ciclos de carga e descarga e alguma fuga de material líquido [12].

No que diz respeito ao encapsulamento como técnica de confinamento, este pode dividir-se em macro- e microencapsulamento. No macroencapsulamento o PCM é inserido em recipientes, podendo estes ter a forma de tubos, bolsas, esferas, etc. [13]. Estes recipientes são depois incorporados nas soluções construtivas. O macroencapsulamento evita a perda de material e falta de compatibilidade do PCM com outros materiais, uma vez que o recipiente cria uma barreira com o exterior. Algumas desvantagens desta técnica poderão ser a baixa

transferência de calor para o PCM, a solidificação do material nos bordos do recipiente, e a difícil integração das macrocápsulas em soluções construtivas [11]. Relativamente à técnica de microencapsulamento, o PCM é inserido numa microcápsula polimérica onde fica preso, evitando-se a perda de material líquido [14]. O aspeto final deste produto assemelha-se a um "pó" que pode ser misturado *à posteriori* com outros materiais de construção.

Na técnica de estabilização de forma, são usados como estabilizadores vários suportes como polietileno de alta densidade (PEAD), estireno e butadieno. O PCM e os materiais de suporte são derretidos e misturados a altas temperaturas, de seguida há um arrefecimento do material de suporte abaixo da temperatura de transição vítrea até que haja transformação para o estado sólido [12]. Apesar de minimizar o problema da perda de material, esta técnica tem como maior vantagem ter acima de 80% de PCM na sua constituição o que leva a uma grande capacidade de armazenamento de energia [15]. Ainda, em comparação com o encapsulamento, esta técnica confere um material com grande calor específico, condutibilidade apropriada e manutenção da forma "sólida" durante a transição de fase [12].

A mais recente técnica de formação de PCMs é a de compósitos de forma estável e esta pode ser obtida por imersão ou impregnação a vácuo. O método de imersão é mais fácil e simples. No entanto a capacidade de retenção dos materiais para armazenar energia é baixa. O método de impregnação a vácuo apresenta resultados com maior taxa de retenção. Neste método podem ser usados como suporte à formação do PCM os seguintes materiais: diatomite, perlite expandida, grafite expandida, sílica ativa ou microsílca, vermiculite e resíduos de vidro [12].

2.2. Transferência de calor em materiais com PCMs microencapsulados

Nesta secção faz-se uma breve revisão de estudos numéricos e experimentais sobre a avaliação da transferência de calor em elementos com PCMs, com mais evidência em elementos com PCMs microencapsulados. A revisão das várias aplicações e das principais propriedades dos PCMs foi feita por Vadhera *et al.* [16], nomeadamente de aplicações como o aquecimento de águas sanitárias, estufas amigas do ambiente e aplicações em edifícios (como em paredes ou sistemas de refrigeração).

Soares *et al.* [7] estudaram experimentalmente um conjunto vertical de cavidades de alumínio (pequenas unidades de armazenamento de energia) com o objetivo de avaliar a transferência de calor através deste. Os autores utilizaram um PCM livre e outro PCM microencapsulado para encher as cavidades do contentor metálico, tendo sido conduzidos ensaios de carga e descarga na amostra. Foi também avaliada a influência do fator de forma e do número de cavidades. Com o aumento do número de cavidades retangulares, os autores verificaram uma diminuição no tempo necessário para a fusão de todo o PCM livre, devido à alta condutibilidade térmica das alhetas em alumínio. Os autores observaram que durante o ensaio de carga do PCM microencapsulado, a condução era o processo de transferência de calor dominante. Em relação aos ensaios de descarga, para o PCM microencapsulado, os autores concluíram que o efeito da convecção natural e o fenómeno de subarrefecimento podem ser desprezados. A adição de alhetas permitiu melhorar os resultados obtidos nos ensaios de descarga. No entanto os autores concluíram que para aplicações em edifícios, quanto maior o número de alhetas menor será o volume de PCM, diminuindo-se o potencial de armazenar/restituir energia, e mais pesado será o sistema, o que pode ser um obstáculo à aplicação em paredes verticais. A amostra com PCM microencapsulado mostrou-se mais atrativa no controlo da temperatura (maior potencial termorregulador).

Recorrendo ao software *Energy Plus*, Ascione *et al.* [17] conduziram um estudo para avaliar o impacto da incorporação de uma placa de gesso com PCM com 3 cm de espessura em cinco cidades Europeias, com diferentes condições climáticas. Foram obtidas poupanças na ordem dos 7% numa das cidades (Ancara, Turquia). Com este estudo foi também possível perceber que com a utilização da placa de gesso com PCM, verifica-se um aumento do período de conforto térmico em todas as cidades testadas, sendo que numa delas há um aumento de 51%.

Aketouane *et al.* [18] estudaram tijolos com PCMs microencapsulados para aplicação em construções em várias cidades de Marrocos, de maneira a avaliar possíveis poupanças de energia e a redução do pico de fluxo de calor para o interior dos edifícios durante o verão. Neste estudo foram considerados quatro PCMs com temperaturas de transição de 24 °C, 27 °C, 32 °C e 37 °C, implementados em soluções construtivas em edifícios com três tipologias diferentes: residência familiar simples (2 andares), bloco de apartamentos (5 andares), hotel (15 andares). Os resultados mostraram que o PCM com 32 °C de temperatura de transição foi bastante eficiente para reduzir o pico de fluxo de calor no

hotel, enquanto que para as restantes tipologias o PCM mais eficiente foi o de 37 °C. Quanto às poupanças de energia, quando se impõe uma temperatura interior de 26 °C, o PCM com 27 °C de temperatura de transição de fase apresenta valores de 40% de poupanças de energia numa das cidades em estudo. Os autores concluíram que a solução construtiva com PCMs pode ser implementada em novos edifícios que venham a ser construídos em Marrocos.

Ling *et al.* [19] usaram um conjunto de indicadores, estudando alguns numericamente e outros experimentalmente, para avaliar a contribuição dos PCMs no melhoramento do controlo térmico dentro de uma estufa durante 61 dias em Beijing na China. Os autores concluíram que os PCMs têm uma contribuição positiva em todos os indicadores controlados. Verificou-se também que as condições meteorológicas diárias têm grande impacto no desempenho dos PCMs, sendo que dias de sol são mais favoráveis para obter eficiências superiores.

Biswas *et al.* [20] estudaram em Charleston (EUA), um protótipo de uma placa de gesso melhorada com um nano-PCM de forma estável, comparando-a numérica e experimentalmente com uma placa de gesso regular. Os estudos numéricos visaram comparar ganhos e perdas térmicas bem como o uso de energia para arrefecimento do espaço. Este estudo foi feito num período anual e para três diferentes set-points: 19–21 °C; 20–22 °C; e 20–23.3 °C. Verificou-se uma redução dos ganhos térmicos com o nano-PCM de 20,73%, 24,65% e 23,49% face à placa de gesso regular, para os set-points respetivos. Quanto ao uso de energia para arrefecimento do espaço, os resultados mostraram-se mais uma vez a favor da placa de gesso com nano-PCM, apresentando uma redução de 21,12%, 21,90% e 20,78%, para os set-points respetivos. Os autores concluíram que é possível atrasar o uso de equipamentos AVAC permitindo que estes atinjam maiores eficiências. Os resultados mostraram também o potencial dos PCMs para reduzir o consumo de eletricidade para o acondicionamento do espaço. Outros autores conduziram estudos sobre PCMs confinados pela técnica de forma estável [21].

3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é feita uma descrição detalhada da instalação experimental utilizada e do protocolo experimental adotado para os ciclos de aquecimento (carga) e arrefecimento (descarga).

3.1. Descrição geral da instalação experimental

Para este trabalho adaptou-se uma instalação laboratorial já existente no DEM concebida com o objetivo de estudar a transferência de calor em provetes com PCMs na sua composição por recurso a um fluxo de calor horizontal, *i.e.*, salvaguarda-se a verticalidade dos três módulos constituintes da instalação e considera-se que todos os módulos possuem em sua volta isolamento térmico de cortiça com 150 mm de espessura. Na Figura 3.1 apresenta-se uma representação esquemática da instalação experimental onde se podem identificar os três módulos: módulo de aquecimento (A), módulo de suporte do provete (B) e módulo de arrefecimento (C). Na Figura 3.2, apresenta-se ainda um esquema da instalação experimental, onde se listam os principais componentes da instalação. Na Figura 3.3 apresenta-se uma imagem real da instalação experimental localizada no Laboratório de Climatização e Ambiente do DEM.

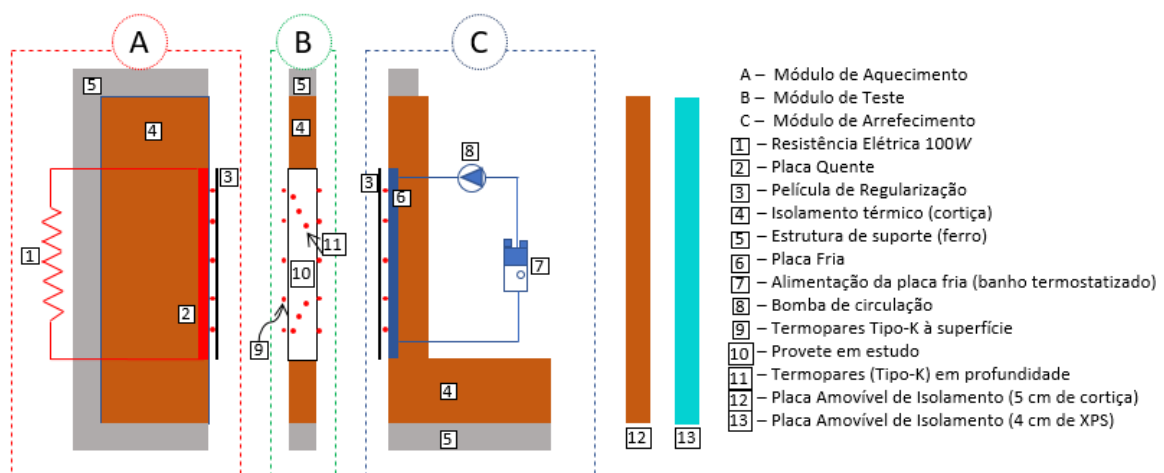


Figura 3.1 – Representação esquemática (em corte) da instalação experimental (adaptado de [8]).

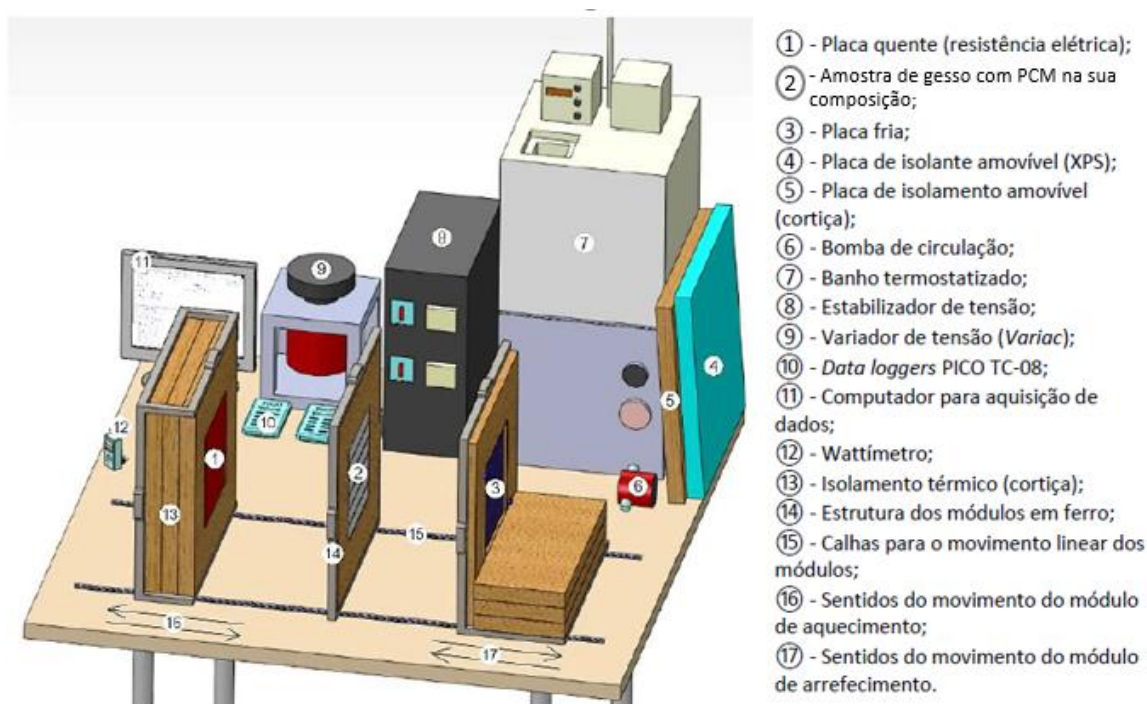


Figura 3.2 – Esquema 3D da instalação experimental adaptado de [8].

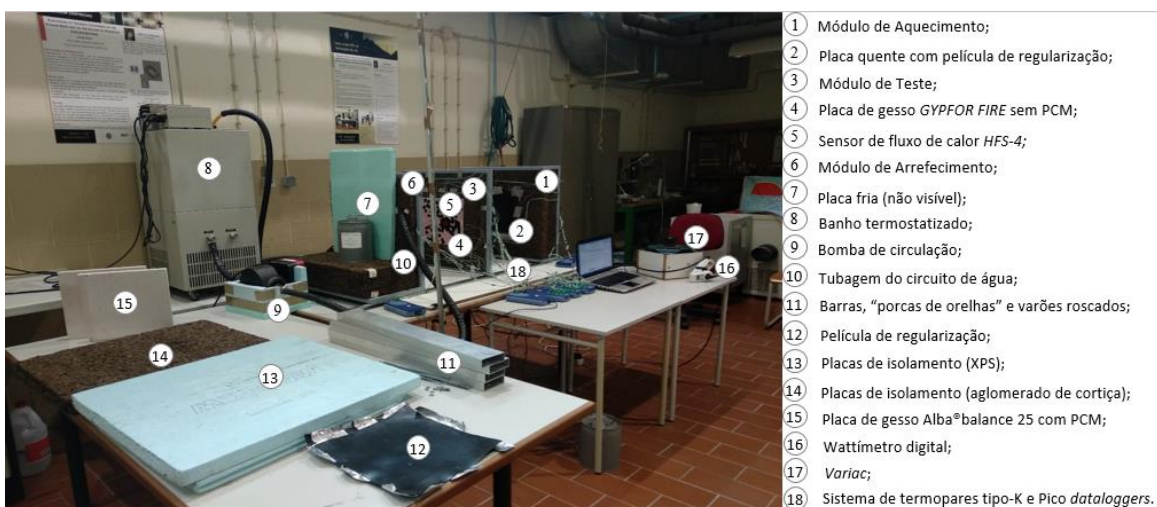


Figura 3.3 – Instalação experimental instalada no Laboratório de Climatização e Ambiente do DEM-FCTUC.

Para analisar o comportamento do PCM é preciso sujeitar o material ao aquecimento e ao arrefecimento, dando assim origem ao ciclo de carga e descarga. Inicialmente efetua-se o ciclo de carga, aquecendo o provete para determinar o tempo que o PCM demora a fundir e a energia térmica acumulada. Posteriormente, efetua-se o ciclo de descarga, arrefecendo o provete para determinar o tempo que o PCM demora a solidificar e a quantidade de energia térmica restituída. Assim, há dois eventos de grande importância no estudo do comportamento do PCM, a fusão e a solidificação do material. No aquecimento, é imposto numa das faces verticais do provete um fluxo de calor horizontal proveniente de

uma fonte de calor (resistência elétrica) – o módulo A é comprimido ao módulo B – e na outra face do provete é acoplado uma placa de isolante térmico. No arrefecimento, o provete é posto em contacto com a placa fria (circuito de água fria alimentado pelo banho termostaticado) restituindo-se o calor armazenado – o módulo C é comprimido ao módulo B – e na outra face do provete é colocada uma placa de isolante térmico. Durante os ciclos de carga e descarga são monitorizados e registados os valores da temperatura em determinados pontos e dos fluxos de calor nas faces do provete. A estrutura que sustenta os módulos foi unida a um sistema de calhas que permite um movimento linear dos módulos A e C para facilitar a movimentação e união dos módulos. O módulo B que sustenta o provete tem uma posição fixa.

3.2. Componentes da instalação

3.2.1. Módulo de aquecimento

O módulo de aquecimento contém uma placa quente que é responsável por fornecer o fluxo de calor ao provete de ensaio. A placa quente é alimentada por uma resistência elétrica de 100 W, que está ligada a um variador de tensão (*Variac*) para que seja possível controlar a potência fornecida à placa quente. É também utilizado um wattímetro digital para se monitorizar o valor da potência que está a ser fornecida à placa a cada instante.

Na superfície da placa quente foram colocados 9 termopares para monitorizar a temperatura média na placa quente durante o ensaio de carga. Estes foram ligados em paralelo (distribuídos por duas fichas) conforme esquematizado na Figura 3.4 (a). Para regularizar a superfície de contacto coloca-se uma película de borracha sobre a placa quente (Figura 3.4 (b)).



Figura 3.4 – (a) Distribuição dos 9 termopares tipo-K na superfície da placa quente. (b) Regularização da superfície de contacto através da incorporação de uma película de borracha.

3.2.1.1. Placa quente

Na Figura 3.5 apresenta-se a placa quente utilizada na instalação experimental. Esta foi fabricada pela Crussel e tem as dimensões de 300 mm × 300 mm. A placa é constituída por duas placas de alumínio de 8 mm de espessura cada (para uniformização da temperatura) e entre elas é integrada uma resistência elétrica. O isolamento elétrico entre as placas de alumínio e a resistência é feito por folhas de mica. Na Tabela 3.1 são apresentadas as características da placa quente.

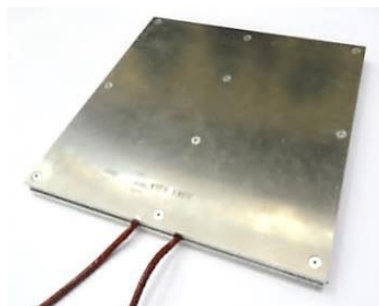


Figura 3.5 – Placa quente com a resistência elétrica.

Tabela 3.1 – Características da placa quente.

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

3.2.1.2. Componentes elétricos

A potência fornecida à placa quente é controlada por um *Variac* (Figura 3.6 (a)). Este equipamento serve para variar a potência que a resistência está a fornecer, sendo assim possível a realização de ensaios com diferentes potências impostas. O *Variac* controla a tensão elétrica de saída numa escala percentual e por isso usa-se um Wattímetro digital (Figura 3.6 (b)) para se fazer uma leitura imediata da potência que está a ser fornecida à resistência. O funcionamento da resistência elétrica é protegido por um estabilizador de tensão, da marca *Projecontrol* e modelo EET406/5 kVA (Figura 3.6 (c)).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.6 – (a) Variac; (b) Wattímetro; (c) Estabilizador de tensão.

3.2.1.1. Película de regularização de superfície

Conforme foi referido anteriormente para se garantir um bom contacto entre as superfícies da placa quente e da amostra é utilizada uma película lisa de borracha macia, com dimensões iguais ao contorno da placa quente e com cerca de 1 mm de espessura. Esta película é também utilizada na placa fria pelas mesmas razões.

3.2.1.2. Isolamento térmico

No isolamento térmico de todos os módulos foram utilizadas placas de aglomerado de cortiça expandida de 25 mm e 50 mm de espessura, da Amorim Isolamentos, S.A., uma vez que este material pode ser utilizado a temperaturas relativamente elevadas. Segundo o fabricante, as placas de aglomerado de cortiça têm como principais vantagens: (i) serem um excelente isolante térmico; (ii) apresentarem uma grande gama de temperaturas de utilização (de -200°C a 130°C) e (iii) serem totalmente recicláveis e terem uma durabilidade ilimitada sem perda das propriedades termofísicas. Como complemento são

usadas placas amovíveis de poliestireno extrudido (XPS). Na Tabela 3.3 são apresentadas as principais propriedades das placas de aglomerado de cortiça e de XPS.

Tabela 3.2 – Propriedades das placas de isolamento térmico utilizadas na instalação experimental.

Propriedades	Placas de aglomerado de cortiça expandida		Placas de XPS
	25 mm	50 mm	
Espessura	25 mm	50 mm	40 mm
Comprimento	1000 mm		2600 mm
Largura	500 mm		600 mm
Condutibilidade térmica	0.037 – 0.040 W/m.K		0.035 W/m.K
Resistência térmica	0.625 m ² .K/W	1.25 m ² .K/W	0.85 m ² .K/W
Massa volúmica	120 kg/m ³		30 kg/ m ³
Resistência ao fogo	Euroclasse E		Euroclasse E
Deformação	10%		-

3.2.2. Módulo de arrefecimento

Este módulo é responsável pelo arrefecimento da amostra. Durante a fase de descarga é assegurada a solidificação de todo o PCM contido na amostra, e a consequente libertação do calor armazenado durante a fase de carga. É utilizada uma placa fria com um circuito interno em dupla espiral, por onde circula água fria vinda de uma unidade termostatzada, por ação de uma bomba de circulação.

Foram colocados 9 termopares tipo-K na superfície da placa fria virada para o módulo B, de modo a ser possível monitorizar a sua temperatura média durante o ensaio de descarga (Figura 3.7 (a)).

O módulo C possui uma estrutura de ferro solidária com o sistema de calhas e preenchida com isolamento térmico de aglomerado de cortiça. Os componentes que fazem parte deste módulo são caracterizados de seguida.

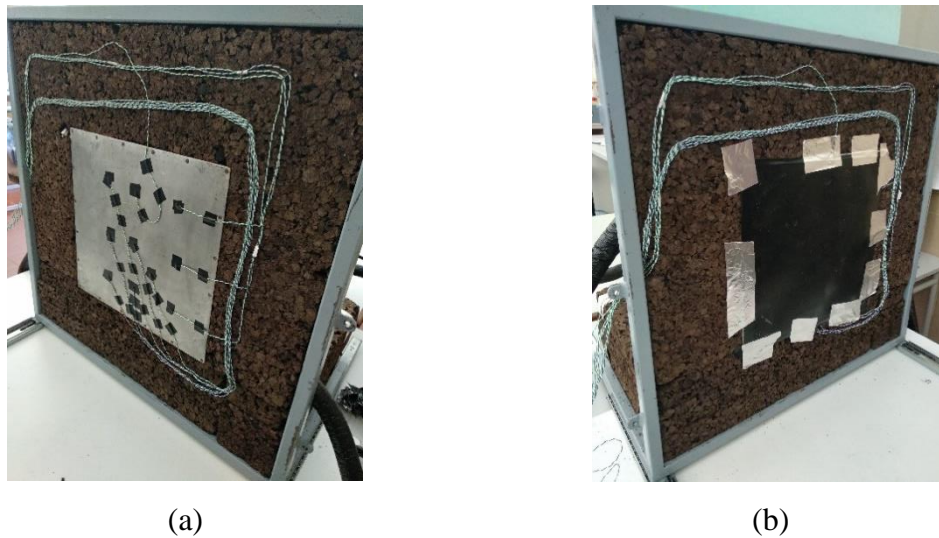


Figura 3.7 – Módulo de arrefecimento: (a) disposição dos termopares tipo-K na superfície da placa fria; (b) placa fria com a película de regularização.

3.2.2.1. Placa fria

A superfície da placa fria em contacto com a amostra é feita de alumínio (Figura 3.8 (a)), com 5 mm 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 interior da placa foi colocada uma serpentina em tubo de cobre de 10 mm de diâmetro externo e 2 mm de espessura, como é mostrado na Figura 3.8 (b). É no interior desta serpentina que circula a água fria responsável pelo arrefecimento da amostra. O restante espaço no interior da placa fria é preenchido com limalhas de alumínio, de forma a garantir-se a uniformização da temperatura na superfície da placa. A placa tem uma dimensão de 310 mm × 310 mm.

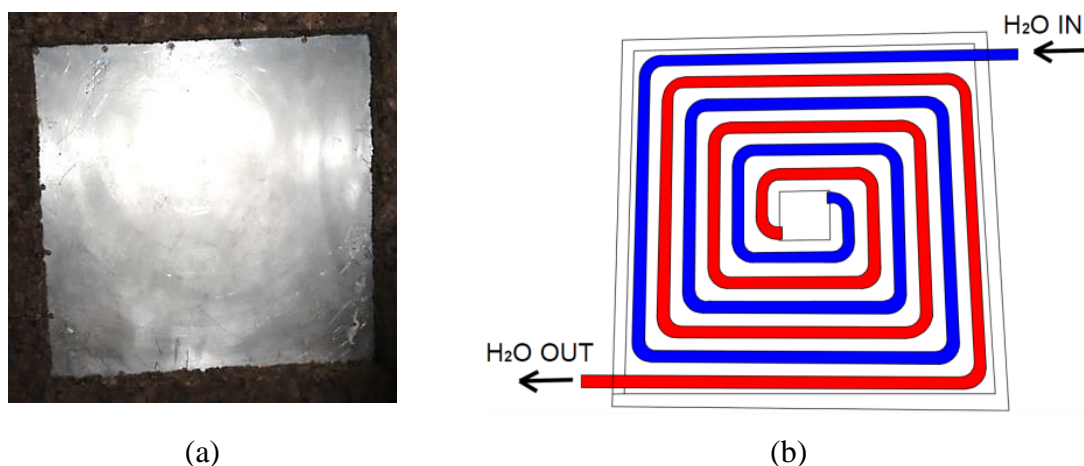


Figura 3.8 – (a) Superfície de alumínio da placa fria em contacto com o provete; (b) vista em corte da placa fria, com representação do circuito de água (Figura adaptada de [8]).

3.2.2.2. Banho termostatzado

Para controlar a temperatura da água que circula na placa fria usa-se um banho termostatzado agitado da marca *Heto Lab Equipment*, tipo DBT KB21 (Figura 3.9). Este equipamento possui um sistema de aquecimento (resistência elétrica) e um sistema de refrigeração, tendo 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 ($\pm 0.005\text{ }^{\circ}\text{C}/0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$). Na Tabela 3.3 apresentam-se as principais características do banho termostatzado.



Figura 3.9 – Banho termostatzado tipo DBT KB21 da *Heto Lab Equipment*.

Tabela 3.3 – Características do banho termostatzado da *Heto Lab Equipment* [8].

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	Rotação	2800 rpm	Gama de temperaturas lidas	-120 a 200 °C
Volume	7 litros	Tensão	230 V	Potência	1240 W
Potência consumida	145 W	Frequência	50 Hz	Tensão	230 V
Tensão	230 V	Potência de aquecimento	440 W	Frequência	50 Hz
Corrente	1.2 A	Potência consumida pelo motor de agitação	40 W		
Frequência	50 Hz				
Fluido refrigerante	R134a				
Quantidade de fluido refrigerante	165g				

3.2.2.3. Bomba de circulação e tubagens

A bomba de circulação tem como função criar um circuito de água fechado entre o banho termostatzado e a placa fria. A bomba utilizada é uma *MAGNA 3 25-100*, da *GRUNDFOS* (Figura 3.10). Esta bomba de circulação apresenta uma elevada eficiência e um modo de funcionamento bastante inteligente e com vários modos de controlo, permitindo limitar o caudal imposto e evitar o uso de válvulas reguladoras de caudal. Permite ainda o ajuste da velocidade de funcionamento do rotor em função das condições da instalação, temperaturas de funcionamento do fluido de trabalho entre -10 e 110 °C, altura manométrica máxima de 10 m e uma pressão máxima de 1000 kPa. As principais especificações da bomba de circulação são apresentadas na Tabela 3.4.



Figura 3.10 – Bomba de circulação *GRUNDFOS MAGNA 3 25-100* [22].

Tabela 3.4 – Especificações da bomba de circulação *MAGNA 3 25-100 da GRUNDFOS* [23].

Características da Bomba de Circulação	
Potência máxima	153 W
Tensão nominal	230 V
Frequência nominal	50 Hz
Gama de temperatura do líquido	- 10 °C a 110 °C
Temperatura máxima do líquido em funcionamento	60 °C
Pressão máxima em funcionamento	1000 kPa
Altura manométrica	10 m
Caudal máximo	6.2 m ³ /h

A ligação banho termostaticado – bomba de circulação – placa fria é feita por tubagens, nomeadamente mangueiras de borracha com 15 mm de diâmetro e 3 mm de espessura. As mesmas foram isoladas termicamente para que não haja condensação e para garantir a manutenção da temperatura do fluido circulante. Foi determinado o caudal mínimo de 4 l/min, para garantir o escoamento turbulento necessário para assegurar a uniformização da placa fria. Assim, foi utilizado o modo de funcionamento *Curva Constante* que mantém um caudal constante de 6,67 l/min, garantindo assim o pressuposto inicial para assegurar a uniformização da temperatura da placa fria.

3.2.3. Módulo de teste

É neste módulo que se coloca o provete a ser ensaiado. Este módulo é fixo e amarrado à mesa de suporte (Figura 3.11). Em volta da amostra é colocado isolamento térmico de aglomerado de cortiça por forma a garantir uma fronteira aproximadamente adiabática.



Figura 3.11 – Módulo de teste com a amostra fixa e sistema de recolha de dados acoplado.

3.2.4. Estrutura de suporte e sistema de calhas

Os três módulos estão ligados a uma estrutura metálica que serve de suporte colocada sobre um sistema de calhas, sendo este comum a todos os módulos. A estrutura metálica foi construída com perfis retangulares de ferro com dimensões 25 mm × 20 mm. As dimensões da estrutura foram escolhidas de forma a acomodar o material de isolamento térmico em cada módulo juntamente com a placa quente, a placa fria e o provete. Para permitir a junção dos módulos, a instalação possui três anilhas de chapa soldadas em cada lado de cada módulo. Após a junção, são utilizadas um conjunto de "porcas de orelhas" e varões roscados para garantir a compressão dos módulos. O sistema de calhas permite o deslocamento dos módulos A e C de forma linear, rápida e fácil.

3.3. Monitorização e aquisição de dados

3.3.1. Sistema de aquisição de dados

Para recolher e tratar os sinais medidos, os sensores de temperatura e fluxo de calor foram ligados a seis data logger *PICO TC-08* operados pelo software *PicoLog*, da *Pico Technology*. Cada aparelho tem 8 entradas e compensação automática de junta fria. Estes equipamentos são amplamente utilizados para medir e converter sinais provenientes de termopares ou de outros sensores com resposta em mV. Neste trabalho, são conectados 66 termopares do tipo-K divididos por 25 fichas e 2 sensores de fluxo de calor do tipo *HFS-4*. Na Tabela 3.5 são apresentadas as principais características deste equipamento.

Tabela 3.5 – Características técnicas dos *data loggers* PICO TC-08 [24].

Características técnicas – PICO TC-08	
Número de canais/Número máximo	8 canais/160 canais
Resolução	20 bits
Tipo de termopares suportado	B, E, J, K, N, R, S, T
Impedância	2 M Ω
Escala de entrada	± 70 mV
Proteção contra sobretensão	± 30 V
Precisão de temperatura	Soma de $\pm 0.2\%$ da leitura ± 0.5 °C
Precisão da voltagem	Soma de $\pm 0.2\%$ da leitura ± 10 μ V
Tempo de conversão	100 ms (por canal)
Temperatura de operação	0 a 50 °C
Dimensões	201 \times 104 \times 34 mm
<i>Software</i>	<i>PicoLog 6</i> para Windows

3.3.2. Sensores de temperatura

O controlo da temperatura foi efetuado através de um conjunto de termopares do tipo-K. Um termopar é constituído por dois fios de metais diferentes sendo estes unidos numa das extremidades. Quando uma das extremidades é aquecida, dá-se a formação de uma corrente contínua que flui no circuito termoelétrico, a tensão neste circuito é função da temperatura da extremidade e da composição dos dois metais. Assim, quando ocorre aquecimento ou arrefecimento da extremidade em contacto com a superfície, é produzida uma tensão que pode ser relacionada com a temperatura da mesma [25].

Neste trabalho foram utilizados termopares do tipo-K (Cromel/Alumel) por terem um tempo de resposta muito baixo e poderem abranger uma vasta gama de temperaturas (entre os -200 °C e os 1200 °C). Estes termopares também têm uma baixa inércia térmica (fio de 0.15 a 0.2 mm de diâmetro) e uma sensibilidade de aproximadamente 41 μ V/°C. A ligação dos termopares aos canais do *datalogger* foi feita através de um conector "macho" IEC K, da marca RS. Os termopares foram previamente calibrados utilizando um banho termostatizado de água agitada. Durante a calibração, a temperatura foi monitorizada durante 5 minutos em intervalos de 10 segundos, tendo este procedimento sido repetido para 9 temperaturas de referência entre os 10 °C e os 50 °C, com um incremento de 5 °C. Os valores recolhidos durante a calibração e as respetivas retas de calibração obtidas para cada termopar podem ser consultadas no Anexo I – Calibração dos termopares – Resultados.

3.3.3. Sensores de fluxo de calor

A medição dos fluxos de calor nas duas superfícies verticais da amostra foi feita recorrendo a dois sensores *HFS-4*, da *Omega Engineering* (Figura 3.12). Estes sensores são concebidos para medir de forma precisa a transferência de calor através de qualquer material, tendo a forma de uma película fina que podem ser montados sobre uma superfície plana ou curva e funcionam numa gama de temperaturas de -200 a 150 °C [26]. Na Tabela 3.6 apresentam-se os fatores de conversão fornecidos pela *Omega Engineering*, utilizados para se obterem os valores do fluxo de calor em W/m^2 .



Figura 3.12 - Sensor de fluxo de calor do tipo *HFS-3* e *HFS-4* da Omega (adaptado de [27])

Tabela 3.6 – Fatores de conversão dos sinais obtidos pelos sensores de fluxo de calor.

	FC [$\mu V/BTU/ft^2.hr$]	FC [$\mu V/W/m^2$]
<i>HFS1</i>	6.1	1.9
<i>HFS2</i>	5.6	1.7

3.4. Provetes em estudo

Foram realizados ensaios de carga e descarga em dois tipos de materiais: numa placa de gesso Alba[®]balance 25 de dimensões $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ (placa de gesso com um PCM microencapsulado na matriz), e numa placa de gesso com reação ao fogo melhorada *GYPFOR FIRE* com as mesmas dimensões (Figura 3.13). Na Tabela 3.7 apresentam-se as principais propriedades da placa de gesso Alba[®]balance 25. Na Tabela 3.8 apresentam-se as propriedades da placa de gesso sem PCMs.

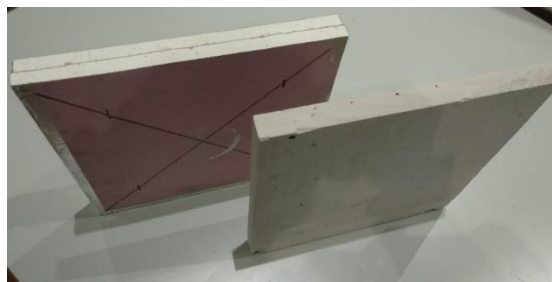


Figura 3.13 – Placa de gesso com PCM microencapsulado (à direita); Placa de gesso com reação ao fogo melhorada (à esquerda).

Tabela 3.7 – Propriedades da placa de gesso com PCM microencapsulado na matriz – Alba®balance 25 [28].

Características técnicas – Placa de gesso com PCM microencapsulado	
Temperatura de transição de fase	25 °C
Calor latente específico	330 kJ/m ²
Condutibilidade térmica	0.27 W/m.K
Densidade	1000 kg/m ²
Calor específico	28.3 kJ/m ² .K
Capacidade de armazenamento (10-30 °C)	866 kJ/m ²

Tabela 3.8 – Propriedades da placa de gesso *standard* com reação ao fogo melhorada da GYPFOR FIRE [29].

Características técnicas – Placa de gesso sem PCM	
Densidade	800 kg/m ²
Condutibilidade térmica	0.25 W/m.K
Reação ao fogo	A2-s1,d0 (B)

As placas de gesso Alba®balance 25 contêm na sua composição uma parafina comercial microencapsulada (*Micronal® DS 5001 X*), produzida pela *BASF The Chemical Company*. O PCM é constituído por microcápsulas de polimetacrilato de metilo contendo uma mistura de ceras de parafina e a sua aparência compara-se a um pó, como se pode observar na Figura 3.14. Na Tabela 3.9 apresentam-se as principais propriedades termofísicas do PCM.



Figura 3.14 – Aspeto macroscópico do PCM microencapsulado *Micronal® DS 5001 X*.

Tabela 3.9 - Propriedades do PCM utilizado incorporado nas placas de gesso Alba®balance 25 [30].

Propriedades	<i>Micronal® DS 5001 X</i>
Temperatura de fusão média [°C]	25 °C
Diâmetro de partículas [µm]	2 a 20 µm
Massa volúmica [kg/m ³]	≈ 250 – 350 kg/m ³
Calor latente de fusão [kJ/kg]	110 kJ/kg

3.5. Domínio físico e variáveis de controlo

Nesta secção apresenta-se a disposição de todos os componentes que compõe o domínio físico a ser estudado. São também listadas as variáveis que são monitorizadas durante os ensaios.

3.5.1. Módulos de aquecimento e arrefecimento

Nestes dois módulos são colocados 9 termopares tipo-K, conforme discutido anteriormente e esquematizado na Figura 3.15 (a) para a placa quente, e na Figura 3.15 (b) para a placa fria. Assim, é possível monitorizar as temperaturas médias nas superfícies da placa quente (T_{PQ}) e da placa fria (T_{PF}).

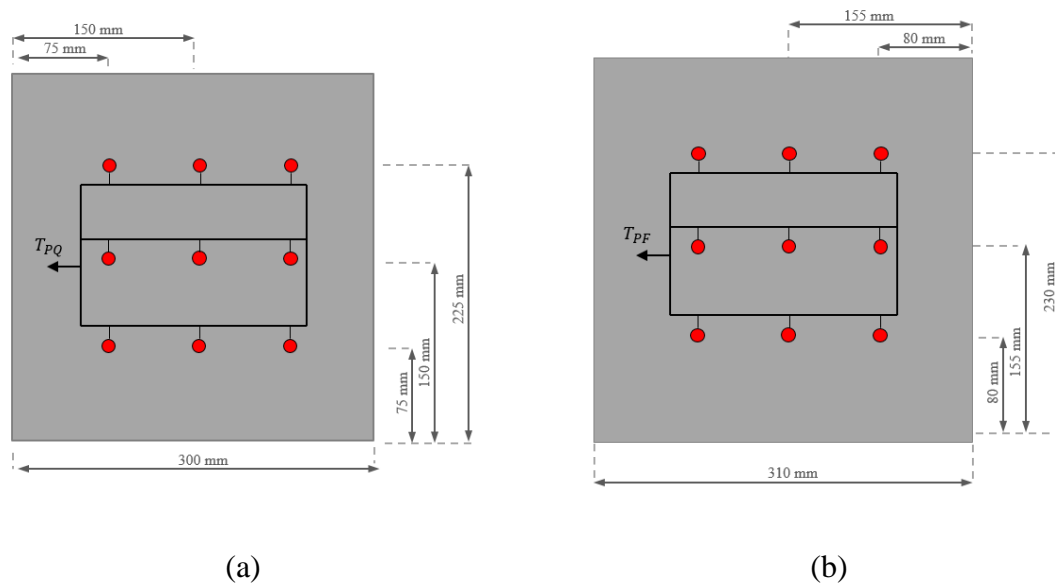


Figura 3.15 – Representação da distribuição dos termopares tipo-K (a) na placa quente e (b) na placa fria.

3.5.2. Módulo de teste

Neste módulo são colocados 21 termopares tipo-K em cada uma das faces verticais principais da amostra, conforme esquematizado na Figura 3.16, T_Q é a temperatura média na face do provete mais próxima do módulo de aquecimento e T_F é a temperatura média na face mais próxima do módulo de arrefecimento. É também colocado um sensor de fluxo de calor *HFS-4* em cada uma das faces do provete (*HFS1* e *HFS2* nas superfícies quente e fria da amostra, respetivamente), a 140 mm da aresta lateral esquerda (Figura 3.16 (a)). Finalmente, são monitorizadas as temperaturas em três profundidades distintas da amostra: T_1 , T_2 e T_3 são as temperaturas médias medidas pelos termopares colocados a 8.3 mm, 12.5 mm e 20.8 mm, respetivamente, conforme esquematizado na figura Figura 3.16 (b).

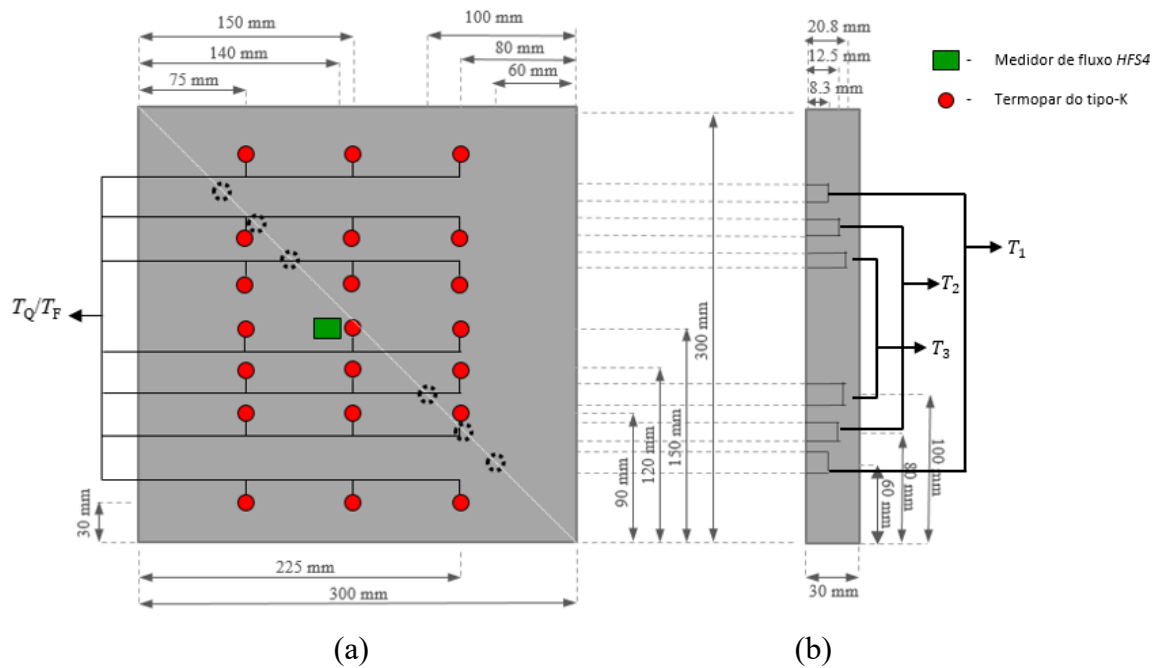


Figura 3.16 – Representação da disposição dos termopares na amostra: (a) vista das faces verticais principais do provete; (b) vista lateral da amostra em corte, com representação dos orifícios onde devem ser colocados os termopares em profundidade.

3.6. Protocolo experimental e ensaios realizados

Nesta secção são apresentados os ensaios que foram realizados, bem como o protocolo experimental adotado para a realização dos mesmos.

3.6.1. Ensaio de carga

Os ensaios de carga (aquecimento) foram realizados para quatro temperaturas finais da amostra, T_{PQ} (27 °C, 30 °C, 35°C e 55 °C) sendo que para cada uma destas temperaturas, foram realizados dois ensaios com potências elétricas, P_{aq} , fornecidas à placa quente diferentes (20 W e 34 W). Na Figura 3.17 são apresentados os ensaios realizados para a placa de gesso com PCM Alba[®]balance 25. No total foram realizados 7 ensaios de carga. Na Figura 3.18 são apresentados os ensaios realizados para a placa de gesso laminado cartonado *GYPFOR FIRE*, nesta placa foram realizados 4 ensaios de carga.

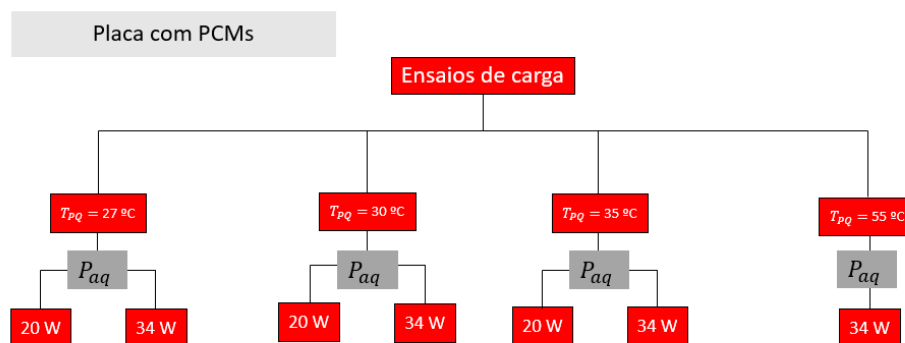


Figura 3.17 – Ensaio de carga (aquecimento) realizados na placa de gesso Alba® balance 25.

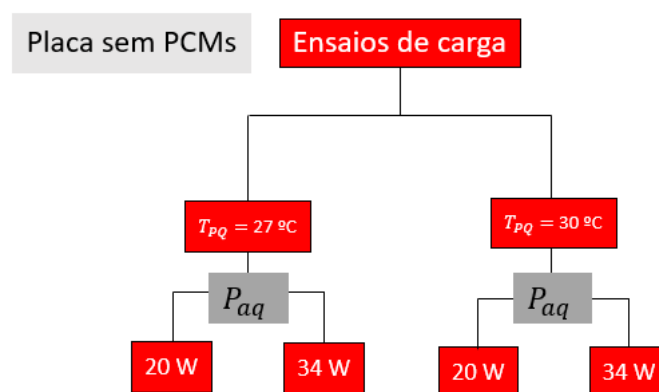


Figura 3.18 – Ensaio de carga (aquecimento) realizados na placa de gesso sem PCMs.

Para se dar início ao ensaio de carga, aquece-se a placa quente recorrendo à resistência elétrica nela contida, regulando a potência fornecida com o *Variac*, até que a placa quente esteja a uma temperatura o mais uniforme possível e igual à temperatura, T_{PQ} , selecionada para cada um dos ensaios. No início do ensaio, a amostra a testar encontra-se à temperatura ambiente, que também é monitorizada durante os ensaios. Quando a temperatura da placa quente atinge o valor pré-estabelecido para o ensaio, T_{PQ} , o ensaio de carga pode começar. Recorre-se então ao sistema de calhas para mover o módulo de aquecimento e para o colocar em contacto com a superfície da amostra a testar. Na superfície oposta (lado do módulo de arrefecimento) são colocadas uma placa de XPS e uma placa de aglomerado de cortiça (nesta ordem) por forma a criar uma fronteira aproximadamente adiabática. Procedese ao aperto dos dois módulos através do conjunto de varões roscados e porcas garantindo uma boa pressão de contacto. O ensaio de carga termina quando todas as temperaturas

medidas no seio da amostra atingirem a temperatura T_{PQ} . Neste momento, todo o PCM da amostra já se encontra na fase líquida.

Durante o ensaio são monitorizadas as seguintes variáveis:

- $HFS1$ – Fluxo de calor na face do provete do lado do módulo de aquecimento;
- $HFS2$ – Fluxo de calor na face do provete do lado do módulo de arrefecimento;
- T_{PQ} – Temperatura média na superfície da placa quente;
- T_Q e T_F – Temperaturas médias nas superfícies da amostra do lado do módulo de aquecimento e arrefecimento respetivamente;
- T_1, T_2, T_3 – Temperaturas no interior da amostra a 8.3 mm, 12.5 mm e 20.8 mm de profundidade, respetivamente;
- T_{amb} – Temperatura ambiente na sala do ensaio.

3.6.2. Ensaio de descarga

Os ensaios de descarga (arrefecimento) foram realizados para quatro temperaturas iniciais da amostra, T_{am} (27 °C, 30 °C, 35 °C, 55 °C), sendo que para cada uma delas foram realizados vários ensaios impondo diferentes temperaturas para o banho termostaticado, T_{bt} , temperaturas às quais corresponde uma determinada temperatura da placa fria, T_{PF} , diferentes devido às perdas no circuito. As temperaturas iniciais da amostra nos ensaios de arrefecimento correspondem às temperaturas finais da amostra aquando dos ensaios de aquecimento, uma vez que cada ensaio de descarga é feito imediatamente após a conclusão do ensaio de carga precedente. Na Figura 3.19 são apresentados os ensaios de descarga realizados para cada temperatura selecionada, na placa com PCMs, na qual foram realizados 7 ensaios de descarga. Na Figura 3.20 são apresentados os ensaios de descarga realizados na placa de gesso laminado cartonado sem PCMs *GYPFOR FIRE*. Nesta placa foram realizados 4 ensaios de descarga.

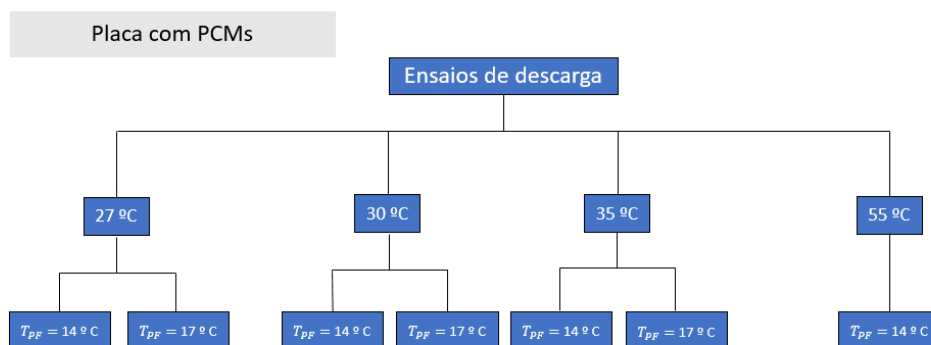


Figura 3.19 – Ensaio de descarga (arrefecimento) realizados para a placa de gesso Alba®balance 25.

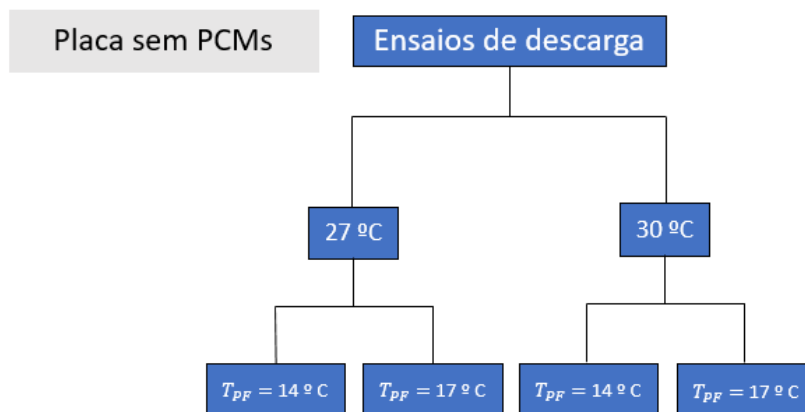


Figura 3.20 – Ensaio de descarga (arrefecimento) realizados para a placa de gesso sem PCMs.

Para que se possa iniciar o ensaio de descarga é necessário garantir que a placa fria se encontra à temperatura T_{PF} estipulada previamente. O módulo de arrefecimento é movido para junto do módulo de teste recorrendo ao sistema de calhas. Na superfície do lado do módulo de aquecimento são colocadas uma placa de XPS e uma placa de aglomerado de cortiça (nesta ordem) para criar uma fronteira aproximadamente adiabática. De seguida, procede-se ao aperto dos dois módulos através do conjunto de varões roscados e porcas garantindo uma boa pressão de contacto. O ensaio de descarga termina quando todas as temperaturas medidas no seio da amostra atingirem a temperatura dois graus acima da temperatura inicial da placa fria T_{PF} . Neste momento, todo o PCM da amostra já se encontra na fase sólida.

Durante o ensaio são monitorizadas as seguintes variáveis:

- *HFS1* – Fluxo de calor na face do provete do lado do módulo de aquecimento;

- $HFS2$ – Fluxo de calor na face do provete do lado do módulo de arrefecimento;
- T_{PF} – Temperatura média na superfície da placa fria;
- T_Q e T_F – Temperatura média nas superfícies da amostra do lado do módulo de aquecimento e arrefecimento, respetivamente;
- T_1, T_2, T_3 – Temperaturas no interior da amostra a 8.3 mm, 12.5 mm e 20.8 mm de profundidade, respetivamente;
- T_{amb} – Temperatura ambiente na sala do ensaio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de carga e descarga das duas placas de gesso, com e sem PCMs.

4.1. Ensaio de carga

Como foi descrito no protocolo experimental, os ensaios de carga iniciam-se com a amostra à temperatura ambiente, encostando a placa quente à temperatura predefinida para cada ensaio. Na Figura 4.1 são apresentados os resultados obtidos para os ensaios da placa de gesso com PCM Alba[®]balance 25, para a temperatura $T_{PQ} = 30\text{ °C}$ e potências elétricas, P_{aq} , fornecidas à placa quente de 20 W e 34W, respetivamente.

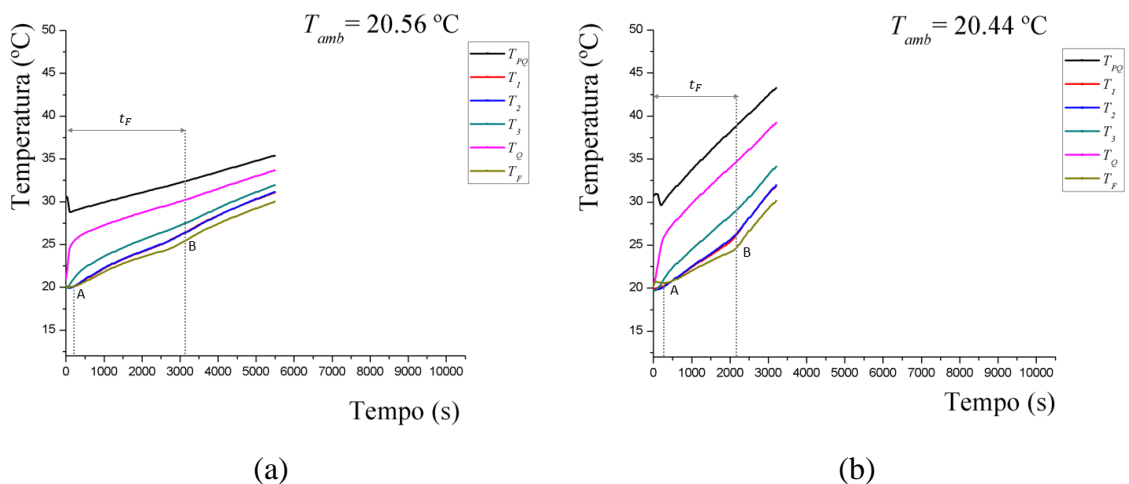


Figura 4.1 – Ensaio de carga da placa de gesso Alba[®]balance 25, quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura inicial $T_{PQ} = 30\text{ °C}$ e para uma potência constante de: (a) 20W; (b) 34W;

Através da observação dos gráficos apresentados na Figura 4.1 pode identificar-se um comportamento semelhante ao comportamento que foi apresentado na Figura 2.1, no subcapítulo do *Princípio de Funcionamento dos PCMs*. No entanto, é de notar que as curvas que caracterizam o comportamento do provete durante o aquecimento têm uma expressão mais ténue visto que este não é constituído apenas por PCM. Recorrendo a dois pontos

auxiliares, A e B, é possível dividir o gráfico em três intervalos: (i) início do ensaio até ao Ponto A – PCM na fase sólida; (ii) Ponto A até ao Ponto B – mudança de fase; (iii) Ponto B até ao final do ensaio – PCM na fase líquida. O primeiro intervalo é caracterizado por uma subida de temperatura e uma estabilização da mesma (olhando para as temperaturas no seio da amostra). Este fenómeno é explicado pelo contacto de uma superfície quente (placa quente) com a amostra que se encontra a uma temperatura inferior (perto de T_{amb}), e pelo tempo necessário para o aperto dos módulos. No segundo intervalo, é iniciada a fusão do PCM onde este armazena energia. O ponto B marca o ponto onde todo o PCM já fundiu. No terceiro intervalo, o PCM encontra-se na fase líquida.

Observando os resultados, verifica-se que as temperaturas T_1, T_2 e T_3 se encontram entre as temperaturas das superfícies T_Q e T_F . A forma das curvas sugere ainda que a condução de calor é o mecanismo de transmissão de calor dominante, podendo o problema ser tratado como um problema de condução de calor puramente difusivo. Ou seja, a convecção natural dentro das microcápsulas pode ser desprezada [7].

Comparando os dois gráficos para $T_{PQ} = 30$ °C (ensaio com potência de 20 W e 34 W), verifica-se que o ensaio com menor potência fornecida à placa quente tem maior duração e, conseqüentemente, maior tempo necessário para a completa fusão do PCM na amostra. O tempo que o PCM demora a fundir (t_F) para a placa de gesso no ensaio de 20 W é de aproximadamente 3100 segundos enquanto que para o ensaio de 34 W este tempo é de aproximadamente 2150 segundos.

A Figura 4.2 mostra os fluxos de calor nas superfícies quente e fria da amostra, durante o ensaio de carga da placa de gesso com PCM quando é aplicada uma potência constante de 20 W e com $T_{PQ} = 30$ °C.

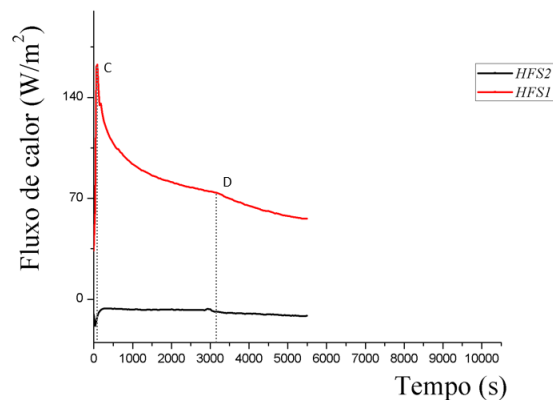


Figura 4.2 – Fluxo de calor no decorrer do ensaio de carga da placa de gesso com PCM Alba®balance 25, com potência elétrica constante fornecida à placa de 20W e $T_{PQ} = 30\text{ °C}$.

Observa-se que o fluxo $HFS1$ aumenta bruscamente no momento inicial, devido ao contacto entre a placa quente e a amostra, até chegar ao ponto de inflexão C, onde começa o aquecimento da amostra. No intervalo entre o ponto C e o ponto D ocorre a mudança de fase do PCM. A partir do ponto D todo o PCM encontra-se na fase líquida, o que justifica a variação na evolução da curva de $HFS1$. Durante todo o ensaio, o fluxo de calor $HFS2$, é aproximadamente nulo, como seria de esperar, já que se assegurou uma fronteira aproximadamente adiabática.

Na Tabela 4.1 apresentam-se os resultados para todos os ensaios de carga realizados e esquematizados na Figura 3.17. Verifica-se que quanto maior a potência fornecida, menor o tempo necessário para a completa fusão do PCM (t_F). Por outro lado, quanto maior for a temperatura inicial da placa quente, menor será o tempo necessário para a fusão do PCM. Os gráficos referentes aos resultados reportados nesta tabela são apresentados no Anexo II – Resultados dos ensaios de carga.

Tabela 4.1 – Tempo para a completa fusão do PCM na amostra, t_F , para todos os ensaios de carga realizados com a placa de gesso com PCM Alba®balance 25.

		t_F	
		$P_{AQ} = 20\text{ W}$	$P_{AQ} = 34\text{ W}$
Carga	$T_{PQ} = 27\text{ °C}$	3300 s	2400 s
	$T_{PQ} = 30\text{ °C}$	3100 s	2150 s
	$T_{PQ} = 35\text{ °C}$	2000 s	1250 s
	$T_{PQ} = 55\text{ °C}$	–	1200 s

De seguida, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados com a placa de gesso sem PCMs *GYPFOR FIRE* (Figura 4.3), para a mesma condição inicial de ensaio $T_{PQ} = 30\text{ °C}$ e com potências elétricas fornecidas à placa quente de 20 W e 30 W, respetivamente.

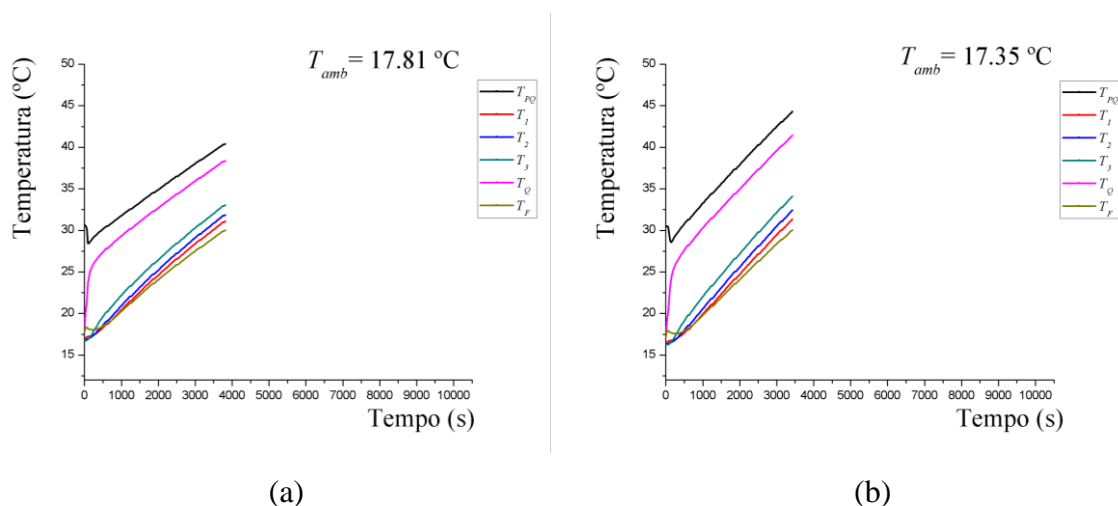


Figura 4.3 – Ensaio de carga com a placa de gesso sem PCMs *GYPFOR FIRE*, quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura inicial $T_{PQ} = 30\text{ °C}$ e para uma potência constante de: (a) 20 W; (b) 34 W.

Pela análise dos gráficos apresentados na Figura 4.3, observa-se que após o contacto inicial da placa quente com a amostra e o aperto dos módulos, onde há um pequeno decréscimo da temperatura, a evolução da temperatura é caracterizada por uma reta aproximadamente linear, o que comprova que estamos perante a transferência de calor num sólido (aquecimento). De forma análoga à análise feita para a placa de gesso com PCMs, o ensaio com maior potência (34 W) tem uma duração menor em relação ao ensaio com menor potência fornecida (20 W). Os restantes resultados para os ensaios de carga com a placa de gesso *GYPFOR FIRE* são apresentados no Anexo II – Resultados dos ensaios de carga.

Na Figura 4.4 apresenta-se a evolução dos fluxos de calor nas superfícies quente e fria do provete, durante o ensaio de carga com a placa de gesso sem PCMs para a potência escolhida de 20 W.

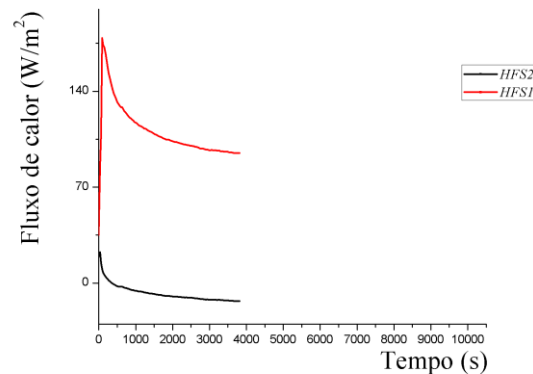


Figura 4.4 - Fluxo de calor no decorrer do ensaio de carga com a placa de gesso sem PCMs *GYPFOR FIRE* para a potência constante de 20 W.

A Figura 4.4 mostra um aumento brusco do fluxo de calor *HFS1* nos instantes iniciais, momento em que a placa quente contacta com a amostra, iniciando-se depois um decréscimo progressivo do fluxo sendo mais rápido. Este é maior quanto maior for a diferença entre a temperatura da placa quente e a temperatura da amostra. Através da aplicação das placas de isolamento (XPS e aglomerado de cortiça) consegue-se criar uma fronteira aproximadamente adiabática, sendo de esperar que *HFS2* seja nulo ou praticamente nulo, como verificado.

4.2. Ensaio de descarga

Os ensaios de descarga iniciam-se com a temperatura da amostra à temperatura predefinida T_{am} , encostando-a à placa fria à temperatura T_{PF} estipulada previamente para cada ensaio. Na Figura 4.5 são apresentados os resultados obtidos para o ensaio de arrefecimento da placa de gesso com PCMs *Alba*[®] balance 25, para uma temperatura inicial da amostra de 30 °C, e temperatura da placa fria T_{PF} de 14 °C e 17 °C, respetivamente.

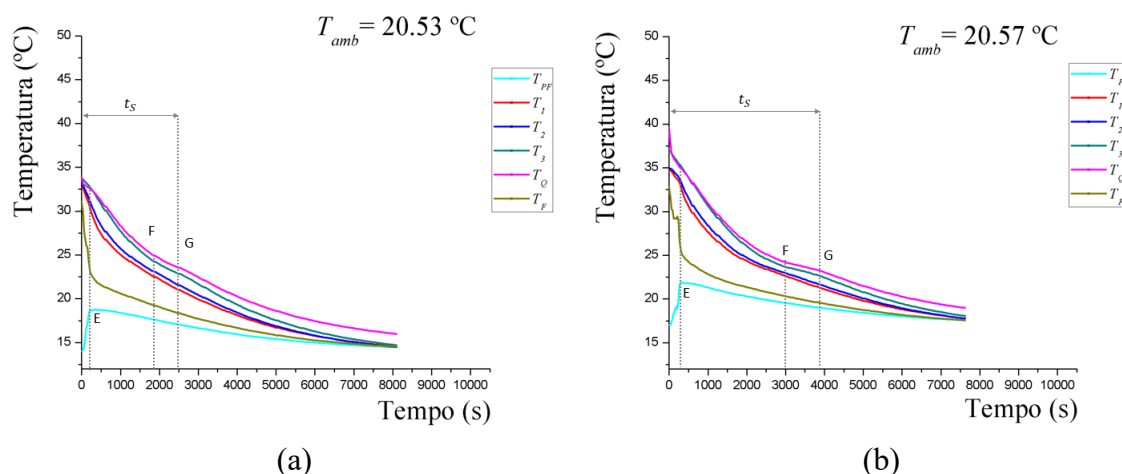


Figura 4.5 – Ensaio de descarga da placa de gesso com PCM Alba®balance 25, inicialmente a uma temperatura de 30 °C quando colocada em contacto com a placa fria a: (a) $T_{PF} = 14$ °C; (b) $T_{PF} = 17$ °C.

A Figura 4.5 apresenta um comportamento similar ao já enunciado na Figura 2.1 onde se caracteriza o funcionamento de um PCM puro face a uma matriz (mistura de vários materiais) com PCM. Através da adição dos pontos E, F e G é possível criar quatro intervalos que possibilitam a caracterização do comportamento da amostra durante todo o ensaio de descarga, sendo estes: (i) início do ensaio até ao ponto E; (ii) ponto E até ao ponto F – PCM na fase líquida; (iii) ponto F até ao ponto G – mudança de fase; (iv) ponto G até ao final do ensaio – PCM na fase sólida. No primeiro intervalo podemos ver uma descida brusca das temperaturas relativas à amostra provocada pelo contacto de uma superfície quente (superfície da amostra) com uma superfície fria (placa fria). Durante este primeiro intervalo há também muito "ruído" visto ser necessário efetuar o aperto manual dos módulos de teste e de arrefecimento (por forma a garantir um fluxo praticamente unidirecional). O segundo intervalo, mostra um arrefecimento a uma taxa praticamente constante, ou seja, o PCM encontra-se na fase líquida. O ponto F marca o início da solidificação do PCM, visto que há uma diminuição do declive da curva a partir deste ponto. Neste intervalo, o declive da curva é inferior ao verificado no intervalo anterior. De facto, existe um patamar próximo da temperatura de mudança de fase do PCM (25 °C). O terceiro intervalo termina quando se atinge o ponto G de inflexão das curvas. A partir deste ponto, o PCM já está na fase sólida, dado que há uma nova alteração no declive na curva – maior taxa de arrefecimento. O último

intervalo termina quando são atingidas as condições de fim de ensaio estipuladas no protocolo experimental.

As temperaturas T_1, T_2 e T_3 , estão entre as duas temperaturas das superfícies da amostra (T_Q e T_F) e a temperatura da superfície fria, T_F , está acima da temperatura da placa fria, T_{PF} , como seria de esperar. Pela dinâmica das curvas obtidas, também na descarga se verifica que se pode desprezar o efeito da convecção natural no interior das microcápsulas durante o arrefecimento da amostra – problema de condução de calor puramente difusivo [7].

Fazendo uma comparação entre os dois gráficos apresentados ((a) e (b)), ensaios com temperatura da placa fria T_{PF} de 14 °C e 17 °C respetivamente, verifica-se que quanto menor a temperatura da placa fria menor é o tempo que o PCM necessita para solidificar, t_s . Isto seria de esperar, visto que a diferença entre a temperatura da amostra e a temperatura da placa fria é maior para o ensaio com $T_{PF} = 14$ °C. O tempo necessário para que o PCM solidifique no ensaio com $T_{PF} = 14$ °C é de aproximadamente 2650 segundos enquanto que no ensaio com $T_{PF} = 17$ °C este tempo é de aproximadamente 3900 segundos.

Na Figura 4.6 são apresentados os gráficos do fluxo de calor durante o ensaio de descarga da placa de gesso Alba[®] balance 25 para $T_{PF} = 14$ °C e para a temperatura inicial da amostra $T_{am} = 30$ °C. Verifica-se que o fluxo $HFS2$ aumenta bruscamente (em módulo, visto o fluxo estar a ser aplicado no sentido módulo de arrefecimento – módulo de aquecimento), fenómeno explicado pelo contacto da placa fria com a amostra quente. A partir do ponto H, é iniciado o arrefecimento de toda a amostra através do processo de condução puramente difusiva. Entre o ponto H e J, existe um ponto (não perceptível nesta análise visual) onde se dá a formação de um patamar característico da mudança de fase do PCM, onde este liberta o calor latente armazenado durante o ensaio de carga. A mudança de fase termina no ponto J onde se nota uma ligeira inflexão na curva. O fluxo de calor $HFS1$ medido na face onde são colocadas as duas placas de isolamento, mantém-se muito próximo de zero como seria de esperar.

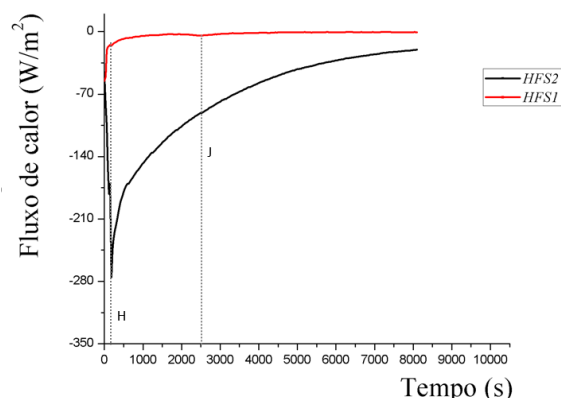


Figura 4.6 – Fluxos de calor no decorrer do ensaio de descarga da placa de gesso Alba®balance 25, com temperatura inicial da amostra de 30 °C e com condição inicial da placa fria de $T_{PF} = 14$ °C.

Na Tabela 4.2 apresentam-se todos os resultados relativos aos tempos de solidificação (t_s) para todos os ensaios de descarga com a placa de gesso Alba®balance 25. Verifica-se que quanto menor a temperatura da placa fria, T_{PF} , menor o tempo necessário para a solidificação do PCM, quanto menor a temperatura inicial da amostra T_{am} , menor é o tempo necessário para a completa solidificação do PCM. Os gráficos a partir dos quais foram retirados estes valores são apresentados no Anexo III – Resultados dos ensaios de descarga.

Tabela 4.2 – Tempos de solidificação, t_s , para todos os ensaios de descarga realizados com a placa de gesso com PCM Alba®balance 25.

		t_s	
		$T_{PF} = 14$ °C	$T_{PF} = 17$ °C
Descarga	$T_{am} = 27$ °C	1900 s	2600 s
	$T_{am} = 30$ °C	2650 s	3900 s
	$T_{am} = 35$ °C	3800 s	3950 s
	$T_{am} = 55$ °C	4500 s	–

De seguida são apresentados os resultados obtidos para os ensaios de descarga realizados para placa de gesso sem PCMs GYPFOR FIRE (Figura 4.7), para a mesma condição inicial (temperatura da amostra de 30 °C) quando em contacto com as temperaturas de placa fria, T_{PF} , de 14 °C e 17 °C.

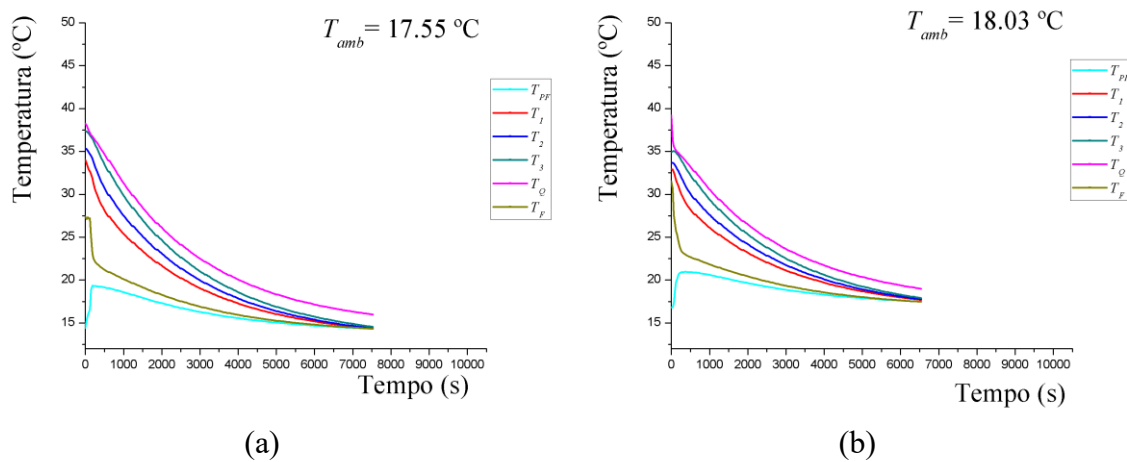


Figura 4.7 – Ensaio de descarga da placa de gesso sem PCMs *GYPFOR FIRE*, inicialmente a uma temperatura de 30 °C quando colocada em contacto com a placa fria a: (a) $T_{PF} = 14$ °C; (b) $T_{PF} = 17$ °C.

Nos gráficos apresentados na Figura 4.7 é notório o instante inicial quando se faz o contacto da placa fria com a amostra quente, bem como o tempo necessário para o aperto dos módulos de teste e arrefecimento. A partir de um determinado momento, a evolução da temperatura segue uma tendência aproximadamente linear, o que indica a presença de um fenómeno de transferência de calor por condução. De maneira análoga à análise feita para a placa de gesso com PCM, o ensaio com menor temperatura da placa fria apresenta uma duração inferior. Os restantes gráficos referentes aos ensaios de descarga com a placa de gesso *GYPFOR FIRE* são apresentados no Anexo III – Resultados dos ensaios de descarga.

A Figura 4.8 apresenta a evolução dos fluxos de calor medidos durante o ensaio de descarga com a placa de gesso sem PCM, para $T_{PF} = 14$ °C e para a temperatura inicial da amostra $T_{am} = 30$ °C. Verifica-se um aumento (em módulo) brusco do fluxo de calor *HFS2* nos instantes iniciais, provocado pelo contacto inicial da placa fria com a superfície da amostra que está a uma temperatura superior. Algumas irregularidades neste primeiro momento podem ser explicadas pelo aperto manual dos dois módulos. Após este pico, inicia-se um decréscimo progressivo do fluxo sendo a taxa de arrefecimento menor, quanto menor for a diferença entre a temperatura da placa fria e a temperatura da amostra. Durante o ensaio, o fluxo de calor *HFS1* mantém-se muito próximo de zero visto que é criada uma fronteira aproximadamente adiabática com a aplicação das duas placas de isolamento (XPS e aglomerado de cortiça).

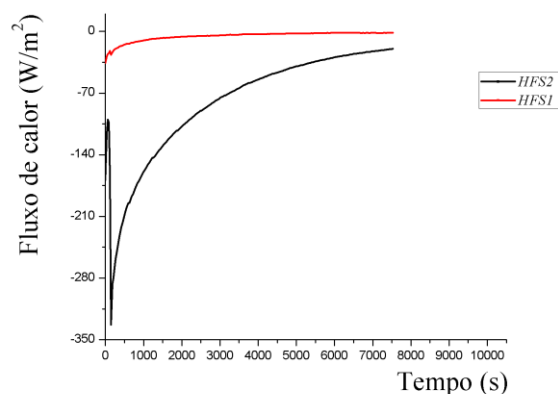


Figura 4.8 – Fluxos de calor no decorrer do ensaio de descarga da placa de gesso sem PCMs GYPFOR FIRE para a temperatura inicial da amostra de 30 °C e com condição inicial da placa fria de $T_{PF} = 14$ °C.

4.3. Ensaio suplementar

Através da análise realizada aos ensaios de carga e descarga efetuados para as duas placas de gesso descritos acima, achou-se conveniente a realização de um ensaio suplementar com condições iniciais da amostra que permitissem a visualização e caracterização da evolução da temperatura na placa com PCMs Alba[®]balance 25 quando sujeita aos ensaios de carga e descarga. A razão pela qual foi efetuado este ensaio, deve-se ao facto de quando solicitados ao ensaio de aquecimento e arrefecimento a partir de uma temperatura da amostra próxima da temperatura ambiente a parte do gráfico referente à fase sólida do PCM no ensaio de aquecimento e fase líquida do PCM no ensaio de arrefecimento não são claramente visíveis (a transição sólido – líquido / líquido – sólido, respetivamente, iniciam muito rapidamente).

As condições de ensaio implementadas para o ensaio de aquecimento são:

- Pré-arrefecimento da amostra a 13 °C;
- Aquecimento da placa quente até a uma temperatura $T_{PQ} = 30$ °C;
- Acoplamento das placas de isolamento na superfície da amostra do lado do módulo de arrefecimento;
- Junção e aperto do módulo de aquecimento e módulo de teste;
- Aquecimento da amostra até que todos os pontos no seio da amostra atinjam 30 °C.

As condições de ensaio implementadas para o ensaio de arrefecimento são:

- Arrefecimento da placa fria a uma $T_{PF} = 12\text{ °C}$, imposta por uma temperatura do banho termostatzado $T_{bt} = 10\text{ °C}$;
- Acoplamento das placas de isolamento na superfície da amostra do lado do módulo de aquecimento;
- Junção e aperto do módulo de arrefecimento e módulo de teste (a uma temperatura correspondente ao final do ensaio de carga, anteriormente realizado);
- Arrefecimento da amostra até que todos os pontos no seio da amostra atinjam 14 °C .

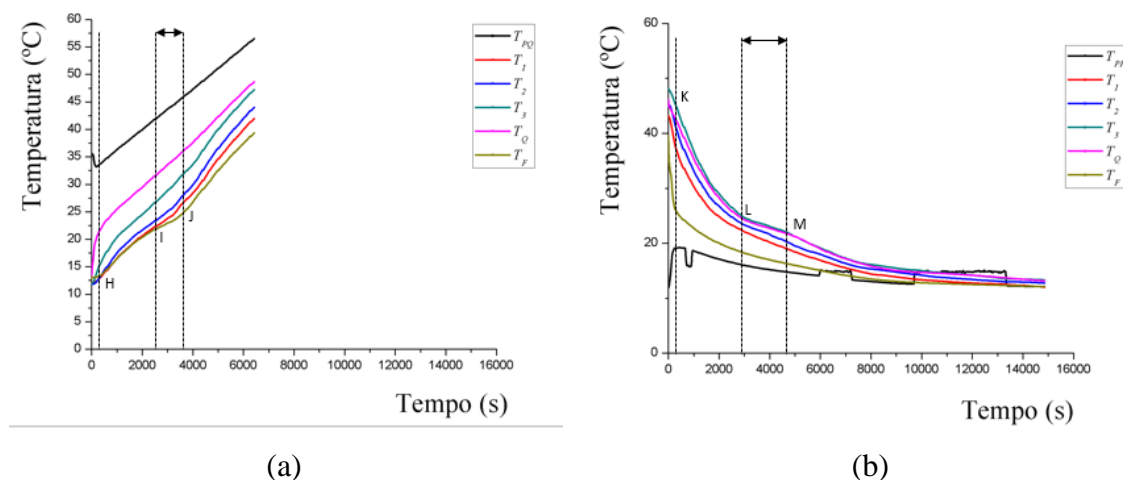


Figura 4.9 – Ensaio suplementar realizado na placa de gesso com PCMs Alba[®]balance 25: (a) ensaio de aquecimento (carga); (b) ensaio de arrefecimento (descarga).

Através da adição de 3 pontos auxiliares é possível definir quatro intervalos com os quais é possível representar o comportamento térmico da placa de gesso com PCMs (Figura 4.9 (a)): (i) início do ensaio até ao ponto H; (ii) ponto H até ao ponto I – PCM na fase sólida; (iii) ponto I até ao ponto J – mudança de fase; (iv) ponto J até ao final do ensaio – PCM na fase líquida. O primeiro intervalo é caracterizado por uma subida da temperatura na amostra e uma estabilização desta, sendo que há o contacto de uma superfície quente (placa quente) com uma superfície que se encontra a uma temperatura inferior (amostra) e o tempo necessário para o aperto dos módulos. No segundo intervalo, é possível observar uma subida da temperatura caracterizada por uma reta aproximadamente linear, o que comprova a presença da transferência de calor num sólido. O ponto I marca o início da mudança de

fase sólido – líquido comprovada pela diminuição do declive da curva neste intervalo. No quarto intervalo todo o PCM já fundiu, encontrando-se na fase líquida. O intervalo entre o ponto I e o ponto J caracteriza o intervalo em que o PCM armazena energia e tem uma duração de aproximadamente 1200 segundos.

Relativamente ao ensaio de arrefecimento, foram adicionados também 3 pontos criando quatro intervalos com os quais é possível caracterizar o comportamento térmico da placa de gesso com PCMs (Figura 4.9 (b)): (i) início do ensaio até ao ponto K; (ii) ponto K até ao ponto L – PCM na fase líquida; (iii) ponto L até ao ponto M – mudança de fase; (iv) ponto M até ao final do ensaio – PCM na fase sólida. O primeiro intervalo é caracterizado por uma fase de alguma instabilidade na curva de arrefecimento devido ao contacto de uma superfície quente (amostra) com uma superfície a uma temperatura inferior (placa fria) bem como ao tempo necessário para o aperto dos módulos. No segundo intervalo é observado um arrefecimento a uma taxa praticamente constante comprovando que o PCM está na fase líquida. O terceiro intervalo é onde ocorre a mudança de fase visto que há uma diminuição do declive da curva neste intervalo, sendo até possível a observação de um patamar próximo da temperatura de mudança de fase do PCM (25 °C). O ponto M marca o fim da mudança de fase do PCM, sendo este um ponto de inflexão da curva de arrefecimento que é seguida de um aumento do declive da curva (maior taxa de arrefecimento) comprovando que o PCM já está na fase sólida. O ensaio termina quando todas as temperaturas medidas no seio do PCM atingirem as condições de ensaio estipuladas no protocolo experimental acima descrito.

O objetivo deste ensaio suplementar foi atingido ao ser possível caracterizar melhor as 3 fases nas curvas tanto de aquecimento como de arrefecimento, comparativamente ao ensaio realizado com temperatura inicial da amostra $T_{am} = 30$ °C para o ensaio de descarga e ao ensaio de carga com temperatura inicial da amostra T_{am} temperatura ambiente.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Nesta dissertação foi adaptada uma instalação experimental já existente no Laboratório de Climatização e Ambiente do DEM–FCTUC, com o objetivo de se estudar a transferência de calor em regime transiente numa placa de gesso comercial com um PCM microencapsulado na sua composição. Os ensaios realizados permitiram avaliar o efeito da potência fornecida à placa quente, e o efeito da temperatura inicial da amostra no ensaio de carga. No ensaio de descarga foram avaliados os efeitos da temperatura da placa fria e da temperatura inicial da amostra. Foram também determinados respetivamente, os tempos de fusão e de solidificação do PCM presente na amostra durante os ciclos de carga e de descarga. Foi também avaliada a transferência de calor numa placa de gesso sem PCMs para comparar a cinética dos ensaios, e melhor compreender a influência dos PCMs. Com esta comparação, foi possível comprovar o potencial termorregulador dos PCMs.

Verificou-se que em ambas as placas, a transferência de calor durante a carga e a descarga é dominada pela condução (fenómeno puramente difusivo). Durante a fase de carga, concluiu-se que a diminuição da potência fornecida à fonte que alimenta a placa quente aumenta significativamente o tempo necessário para fundir a totalidade de PCM presente na amostra, assim com o fluxo de calor medido na superfície aquecida da amostra. Os ensaios de descarga permitiram concluir que o aumento da temperatura inicial da amostra e da temperatura da placa fria, aumenta o tempo necessário para solidificar todo o PCM presente na amostra. Por último, conclui-se que as placas de gesso com PCMs podem ter algum potencial termorregulador, podendo ser utilizadas para aumentar a eficiência energética dos edifícios quando aplicadas na sua envolvente, bem como aumentar o conforto térmico dos ocupantes. No entanto é necessário comprovar estas afirmações num trabalho futuro, numérica ou experimentalmente.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

Nesta dissertação encontraram-se algumas dificuldades em caracterizar o ciclo completo de carga do material com PCM devido à proximidade da temperatura inicial da amostra com a temperatura de mudança de fase do PCM. Como tal sugere-se:

- fazer o pré-arrefecimento da amostra a temperaturas inferiores a 13°C antes de se iniciar o ensaio de carga;
- comparar os resultados obtidos com resultados obtidos numericamente.

Dado que os tempos de armazenamento/restituição de energia obtidos foram baixos, sugere-se a realização de ensaios com outras placas de gesso, com outro tipo ou quantidade de PCM incorporado.

Outra dificuldade deste trabalho foi a quantificação da energia armazenada/restituída durante os ensaios, visto não se saber a quantidade percentual de PCM na amostra, bem como as propriedades exatas da amostra testada. Assim sugere-se a escolha de um material com estas propriedades conhecidas para poder avaliar melhor o potencial destas placas de gesso com PCM incorporado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] European Union, “Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council,” *Off. J. Eur. Union*, pp. 13–35, 2010.
- [2] European Commission, “Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings,” Brussels, 2016.
- [3] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, “A review on buildings energy consumption information,” *Energy Build.*, vol. 40, pp. 394–398, 2008.
- [4] N. Soares *et al.*, “Seminar PCMs4Buildings Systems with PCM-filled rectangular cavities for the storage of solar thermal energy for buildings: The case of the PCMs4Buildings project,” 2018.
- [5] N. Soares *et al.*, “Apresentação do projeto PCMs4Buildings - Sistemas com cavidades retangulares com materiais de mudança de fase (PCMs) para o aproveitamento de energia solar térmica em,” 2020. [Online]. Available: <http://adai2016.wixsite.com/pcms4buildings/main-results>. [Accessed: 18-Jan-2019].
- [6] N. Soares, A. R. Gaspar, P. Santos, and J. J. Costa, “Experimental study of the heat transfer through a vertical stack of rectangular cavities filled with phase change materials,” *Appl. Energy*, vol. 142, pp. 192–205, 2015.
- [7] N. Soares, A. R. Gaspar, P. Santos, and J. J. Costa, “Experimental evaluation of the heat transfer through small PCM-based thermal energy storage units for building applications,” *Appl. Energy*, vol. 116, pp. 18–34, 2016.
- [8] P. Pais, “Desenvolvimento e testes de uma instalação para o estudo do comportamento térmico de materiais de mudança de fase (PCM),” Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2013.
- [9] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, 2009.
- [10] E. Osterman, V. V. Tyagi, V. Butala, N. A. Rahim, and U. Stritih, “Review of PCM

- based cooling technologies for buildings,” *Energy Build.*, vol. 49, pp. 37–49, 2012.
- [11] D. Zhou, C. Y. Zhao, and Y. Tian, “Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications,” *Appl. Energy*, vol. 92, pp. 593–605, 2012.
- [12] S. A. Memon, “Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 870–906, 2014.
- [13] A. Khudhair and M. Farid, “A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 2, pp. 263–275, 2004.
- [14] P. Schossig, H. M. Henning, S. Gschwander, and T. Haussmann, “Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 89, no. 2–3, pp. 297–306, 2005.
- [15] T. Silva, R. Vicente, and F. Rodrigues, “Literature review on the use of phase change materials in glazing and shading solutions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 515–535, 2016.
- [16] J. Vadhera, A. Sura, G. Nandan, and G. Dwivedi, “Study of Phase Change materials and its domestic application,” *Mater. Today Proc.*, vol. 5, pp. 3411–3417, 2018.
- [17] F. Ascione, N. Bianco, R. Francesca, D. Masi, F. De Rossi, and G. Peter, “Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials : Energy savings and indoor comfort in the cooling season,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 990–1007, 2014.
- [18] Z. Aketouane, M. Malha, D. Bruneau, A. Bah, M. Asbik, and O. Ansari, “Energy savings potential by integrating Phase Change Material into hollow bricks : The case of Moroccan buildings,” *Build. Simul.*, vol. 11, no. 6, pp. 1109–1122, 2018.
- [19] H. Ling *et al.*, “Effect of phase change materials on indoor thermal environment under different weather conditions and over a long time,” *Appl. Energy*, vol. 140, pp. 329–337, 2015.
- [20] K. Biswas, J. Lu, P. Soroushian, and S. Shrestha, “Combined experimental and numerical evaluation of a prototype nano-PCM enhanced wallboard,” *Appl. Energy*, vol. 131, pp. 517–529, 2014.
- [21] L. Royon, L. Karim, and A. Bontemps, “Optimization of PCM embedded in a floor panel developed for thermal management of the lightweight envelope of buildings,”

- Energy Build.*, vol. 82, pp. 385–390, 2014.
- [22] GRUNDFOS, “Bomba de circulação MAGNA 3 25-100 da GRUNDFOS.” [Online]. Available: <https://product-selection.grundfos.com/>. [Accessed: 19-Jan-2019].
- [23] GRUNDFOS, “Ficha técnica da bomba de circulação MAGNA 3 25-100 da GRUNDFOS,” 2019. [Online]. Available: <https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?custid=GMA&productnumber=97924247&qcid=465540056>. [Accessed: 19-Jan-2019].
- [24] PicoTech, “TC-08,” 1820. [Online]. Available: <https://www.picotech.com/download/datasheets/usb-tc-08-thermocouple-data-logger-data-sheet.pdf>. [Accessed: 19-Jan-2019].
- [25] Omega Engineering, “Funcionamento de um termopar tipo-K.” [Online]. Available: <https://www.omega.com/prodinfo/thermocouples.html>. [Accessed: 20-Jan-2019].
- [26] Omega Engineering, “Características técnicas dos sensores de fluxo de calor HFS-4 utilizados na instalação.” [Online]. Available: https://www.omega.com/pptst/HFS-3_HFS-4.html. [Accessed: 28-Jan-2019].
- [27] Omega Engineering, “Sensores de fluxo de calor com filme fino HFS-3 e HFS-4 da Omega.”
- [28] Rigips Saint-Gobain, “Ficha técnica da placa de gesso Alba®balance 25.”
- [29] GYPFOR FIRE, “Ficha técnica da placa de gesso GYPFOR FIRE com reação ao fogo melhorada.”
- [30] BASF The Chemical Company, “Ficha técnica do PCM Micronal DS 5001 X.”

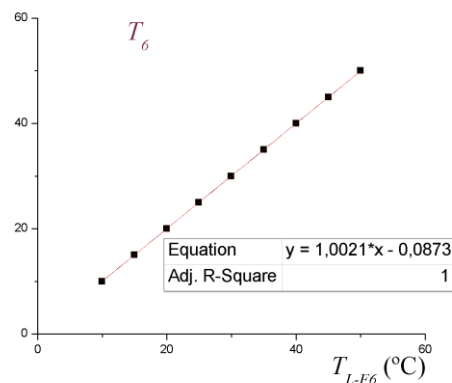
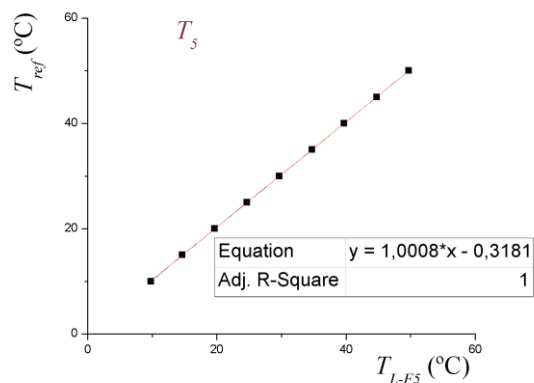
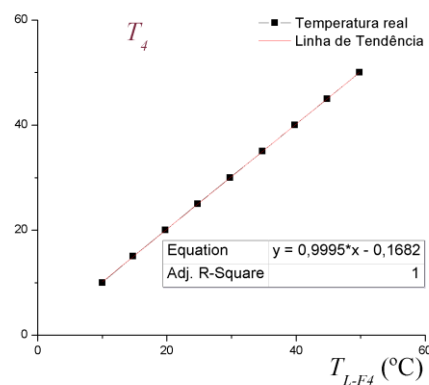
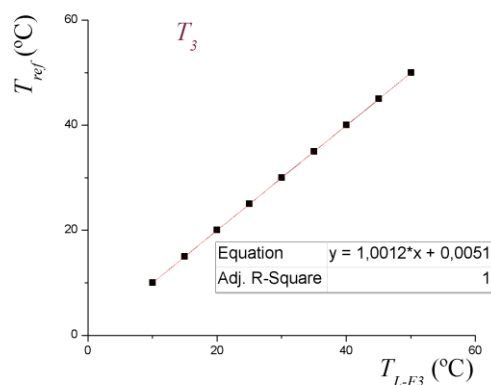
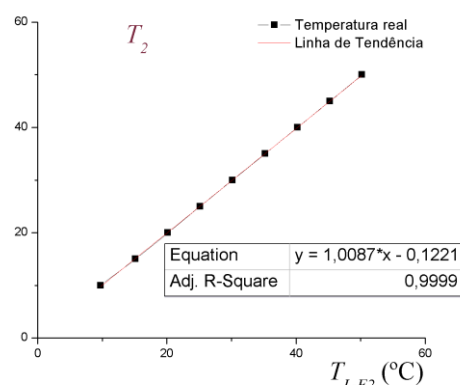
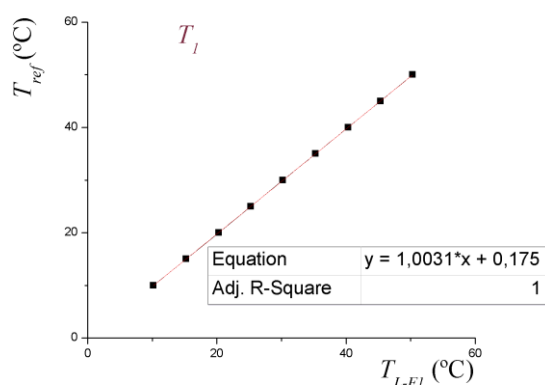
ANEXO I – CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES – RESULTADOS

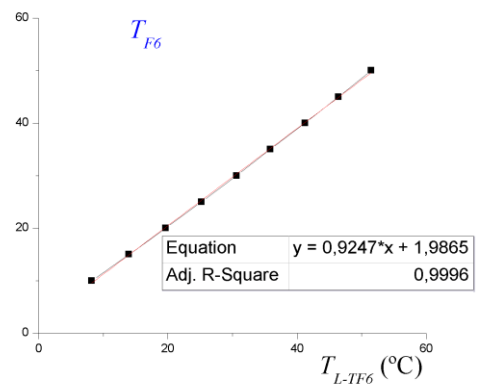
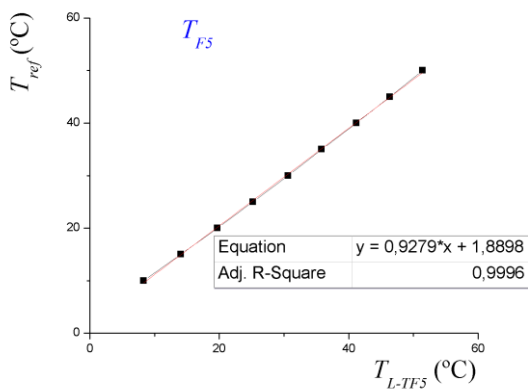
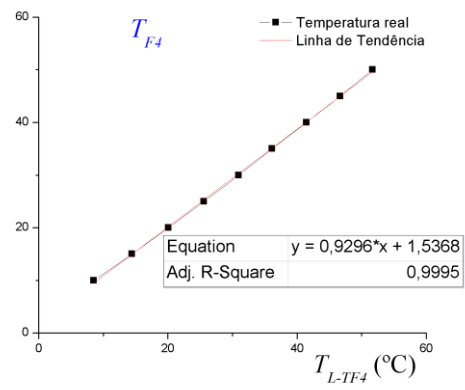
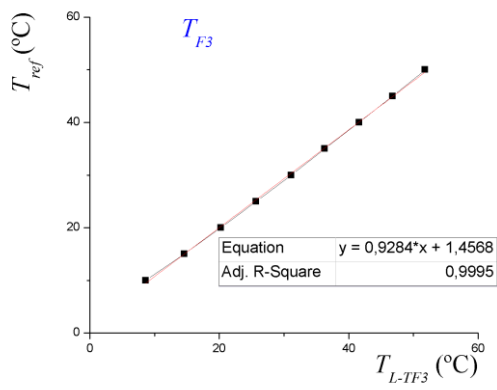
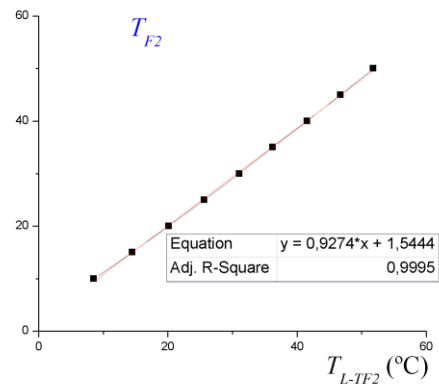
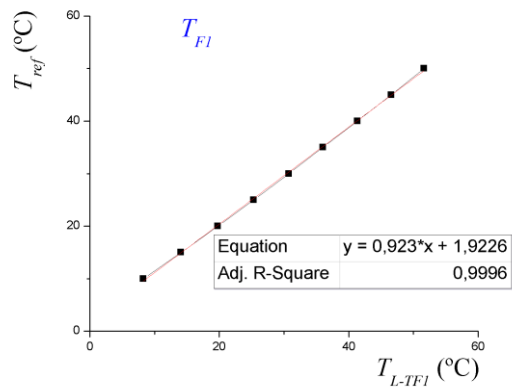
Os resultados obtidos na calibração dos termopares utilizados na instalação experimental são apresentados na Tabela I.1. A calibração foi feita recolhendo valores da temperatura de cada termopar a cada 10 segundos, durante 5 minutos, para 9 temperaturas de referência diferentes, sendo assim possível determinar a reta de calibração para cada termopar.

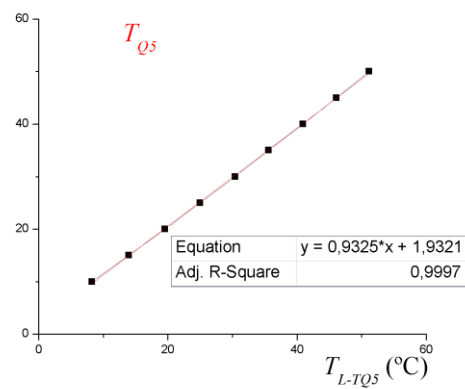
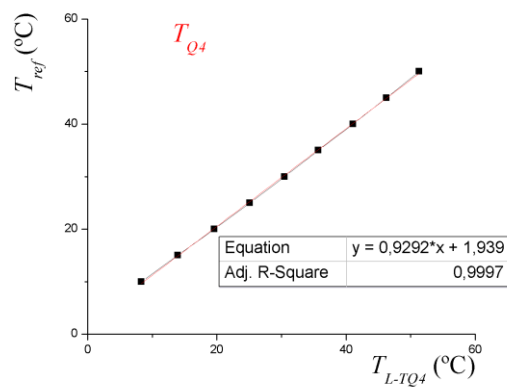
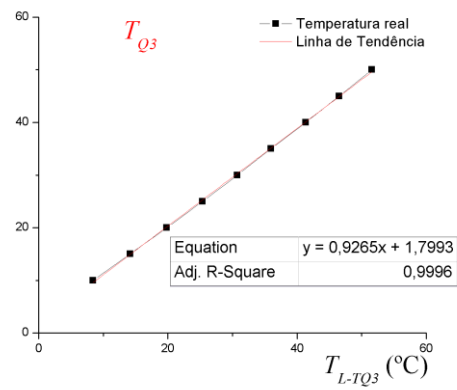
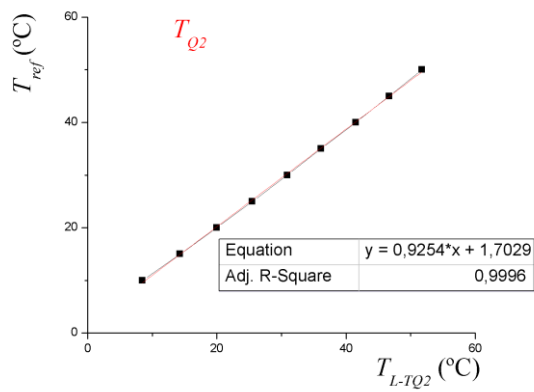
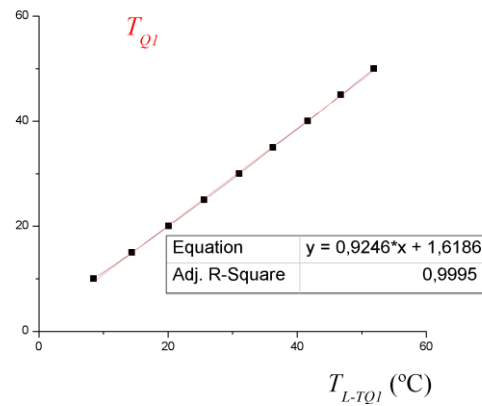
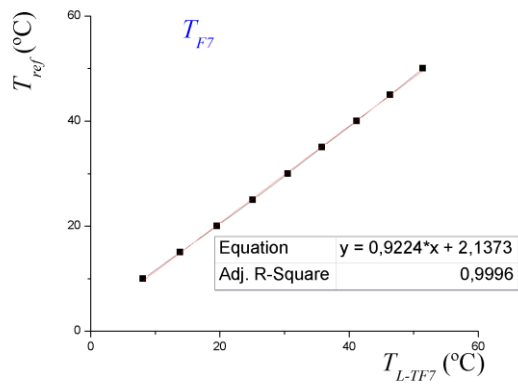
Tabela I.1 – Média das temperaturas lidas pelos termopares para as 9 temperaturas de calibração.

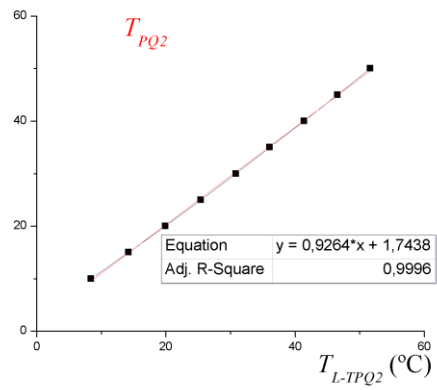
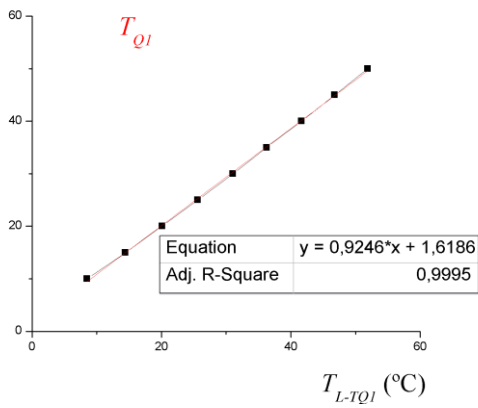
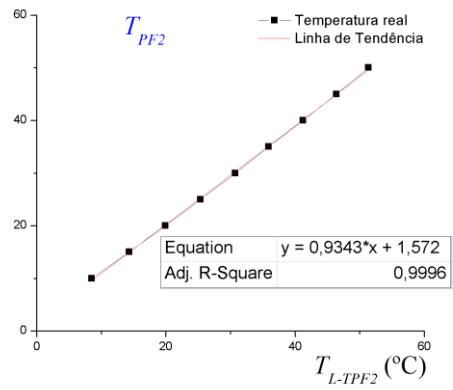
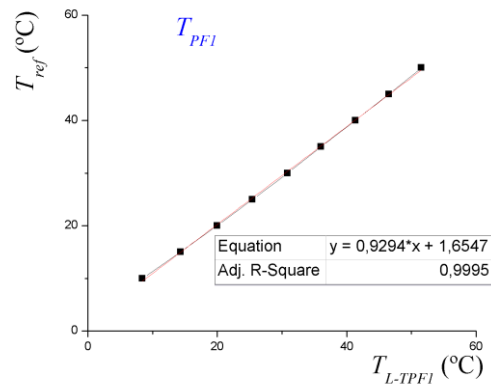
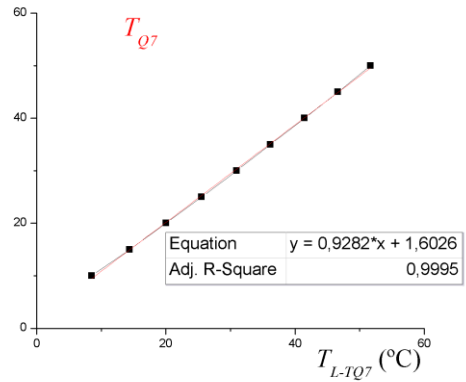
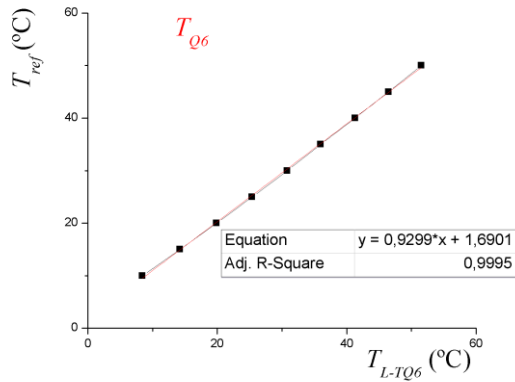
Temperatura do banho termostatizado	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C	45°C	50°C	
T_{Q1}	8,50	14,42	20,11	25,62	31,04	36,28	41,64	46,79	51,87	
T_{Q2}	8,46	14,29	19,98	25,49	30,89	36,13	41,53	46,67	51,75	
T_{Q3}	8,39	14,15	19,84	25,34	30,74	35,97	41,38	46,52	51,59	
T_{Q4}	8,27	13,93	19,61	25,09	30,50	35,70	41,10	46,25	51,32	
T_{Q5}	8,22	13,93	19,57	24,97	30,40	35,61	40,92	46,10	51,16	
T_{Q6}	8,42	14,23	19,89	25,38	30,82	35,99	41,29	46,46	51,52	
T_{Q7}	8,49	14,37	20,04	25,54	30,97	36,16	41,46	46,63	51,69	
T_{F1}	8,25	14,08	19,78	25,32	30,77	36,01	41,36	46,56	51,64	
Média das temperaturas lidas pelos termopares [°C]	T_{F2}	8,52	14,47	20,14	25,63	31,05	36,23	41,55	46,75	51,79
	T_{F3}	8,59	14,56	20,23	25,69	31,11	36,27	41,61	46,80	51,82
	T_{F4}	8,53	14,45	20,10	25,56	30,97	36,13	41,48	46,66	51,68
	T_{F5}	8,28	14,04	19,71	25,19	30,62	35,87	41,19	46,37	51,42
	T_{F6}	8,22	13,97	19,66	25,18	30,62	35,87	41,23	46,42	51,49
	T_{F7}	8,09	19,82	19,53	25,08	30,54	35,82	41,18	46,37	51,45
	T_{PQ1}	8,36	14,02	19,73	25,23	30,68	35,91	41,25	46,41	51,50
	T_{PQ2}	8,42	14,22	19,90	25,41	30,85	36,06	41,43	46,58	51,65
	T_{PF1}	8,42	14,31	19,97	25,43	30,85	36,03	41,38	46,53	51,57
	T_{PF2}	8,53	14,31	19,93	25,36	30,76	35,91	41,24	46,40	51,41
	T_{amb}	8,52	14,47	20,13	25,64	31,07	36,21	41,47	46,62	51,67
	T_1	10,17	15,23	20,27	25,27	30,22	35,30	40,33	45,33	50,29
	T_2	9,72	15,13	20,16	25,16	30,15	35,21	40,23	45,26	50,23
	T_3	10,07	15,00	20,02	25,01	30,01	35,05	40,07	45,08	50,06
	T_4	9,98	14,76	19,77	24,77	29,77	34,81	39,83	44,85	49,83
	T_5	9,79	14,65	19,66	24,66	29,68	34,72	39,73	44,75	49,72
	T_6	9,95	14,94	19,96	24,95	29,94	35,00	40,02	45,03	49,99

A partir dos resultados apresentados na Tabela I.1, traçaram-se as retas de calibração para cada termopar, como se pode observar na Figura I.1. Os gráficos apresentados têm no eixo das abcissas os valores médios da temperatura lidos pelos termopares quando conectados ao *data-logger*, enquanto que no eixo das ordenadas se encontram os valores medidos pelo termómetro do banho termostatizado (temperatura de referência).









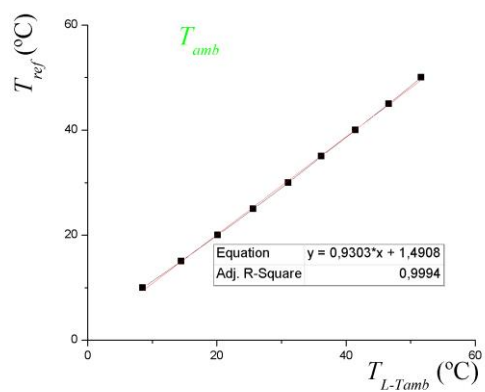


Figura I.1 – Retas de calibração dos termopares utilizados na instalação experimental.

ANEXO II – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARGA

Neste anexo, apresentam-se os resultados obtidos, para os ensaios de carga. De notar que o gráfico apresentado na Figura II.4 não está à mesma escala dos restantes de maneira a que seja perceptível mais facilmente a evolução da temperatura.

- **Placa de gesso Alba® balance 25 com PCM na sua matriz**

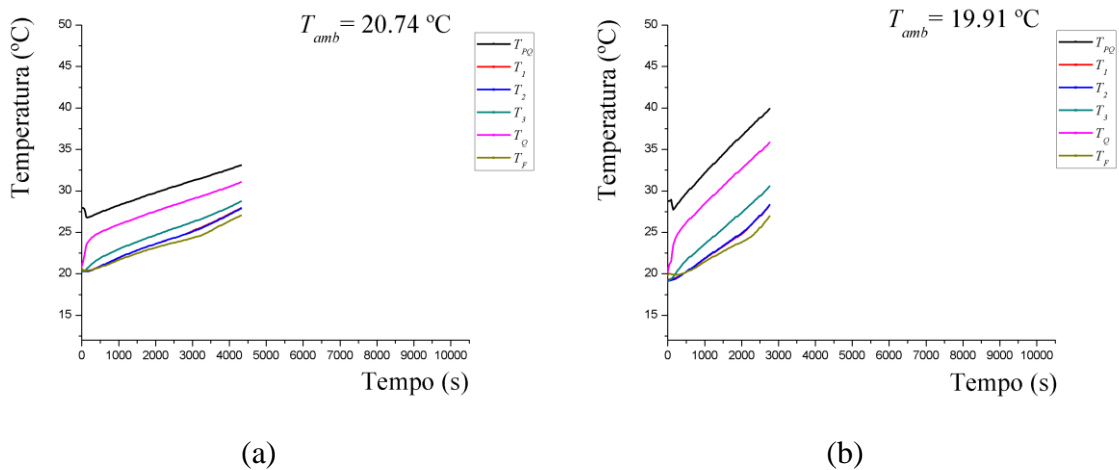


Figura II.1 – Ensaio de carga (aquecimento) com a temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura $T_{PQ} = 27\text{ °C}$ com potência constante fornecida à placa de: (a) 20 W; (b) 34 W.

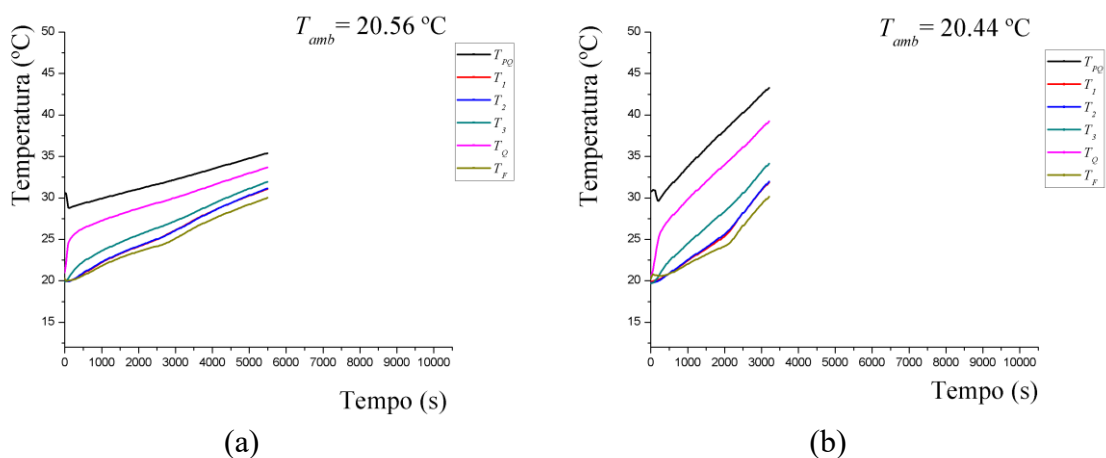


Figura II.2 – Ensaio de carga (aquecimento) com temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura $T_{PQ} = 30\text{ °C}$ com potência constante fornecida à placa de: (a) 20 W; (b) 34 W.

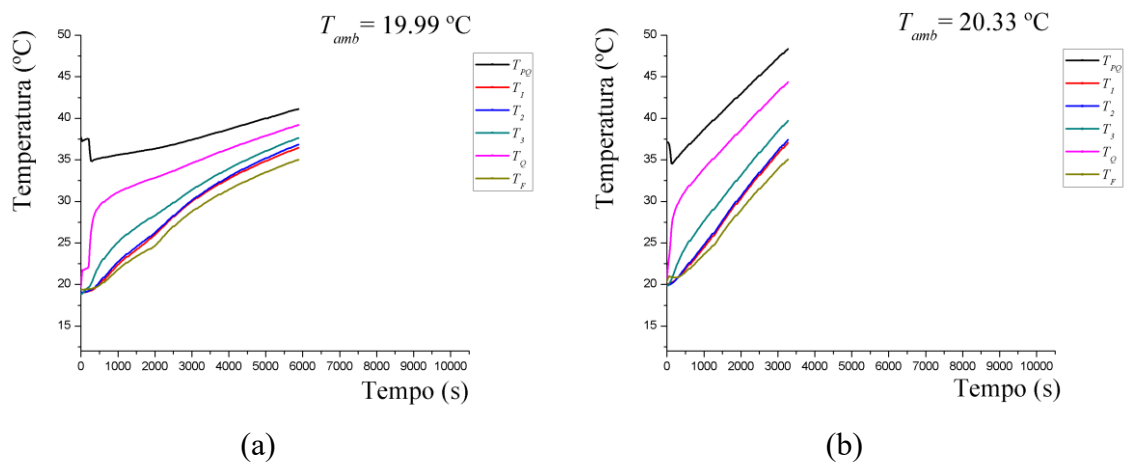


Figura II.3 – Ensaio de carga (aquecimento) com temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura $T_{PQ} = 35\text{ °C}$ com potência constante fornecida à placa de: (a) 20 W; (b) 34 W.

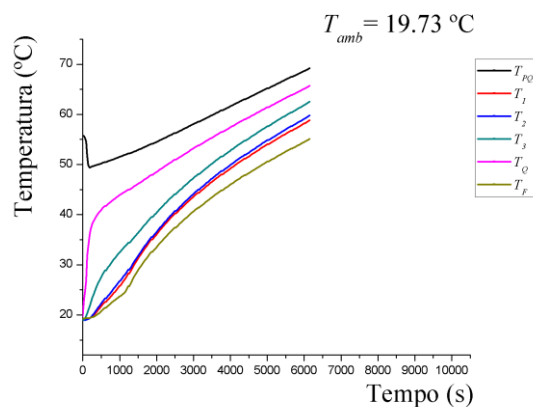


Figura II.4 – Ensaio de carga (aquecimento) com temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura $T_{PQ} = 55\text{ °C}$ com potência constante fornecida à placa de 34 W.

• Placa de gesso *GYPFOR FIRE* com reação ao fogo melhorada

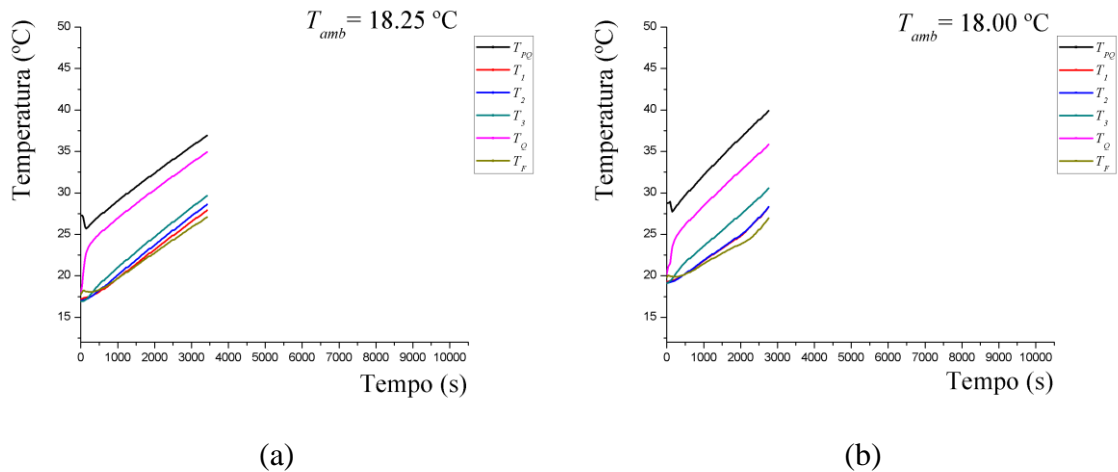


Figura II.5 – Ensaio de carga (aquecimento) com temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura $T_{PQ} = 27$ °C com potência constante fornecida à placa de: (a) 20 W; (b) 34 W.

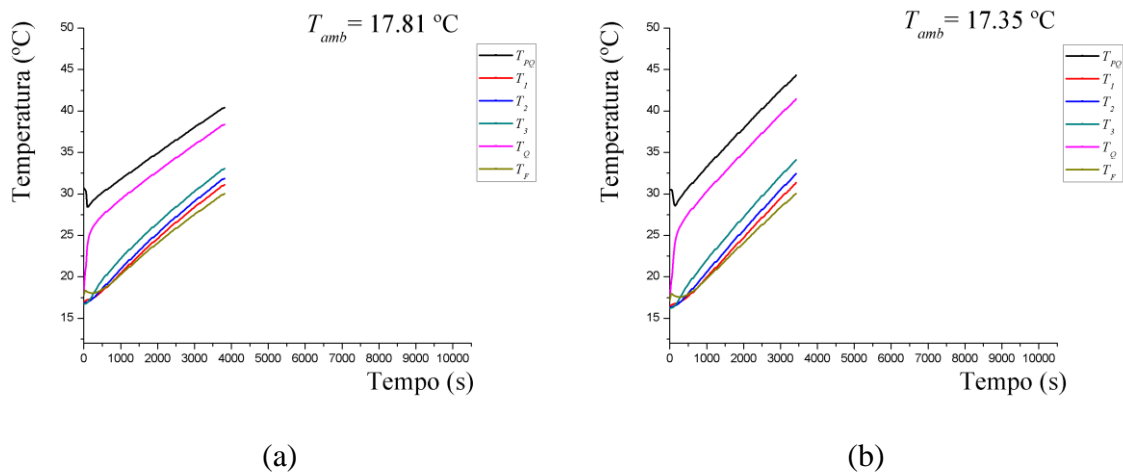


Figura II.6 – Ensaio de carga (aquecimento) com temperatura ambiente como temperatura inicial da amostra quando colocada em contacto com a placa quente a uma temperatura $T_{PQ} = 30$ °C com potência constante fornecida à placa de: (a) 20 W; (b) 34 W.

ANEXO III – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE DESCARGA

Os gráficos apresentados nesta secção são referentes aos ensaios de descarga nas amostras testadas. De notar que o gráfico apresentado na Figura III.4 não está à mesma escala que dos outros, de forma a serem mais visíveis as curvas de evolução da temperatura.

- Placa de gesso Alba® balance 25 com PCM na sua matriz

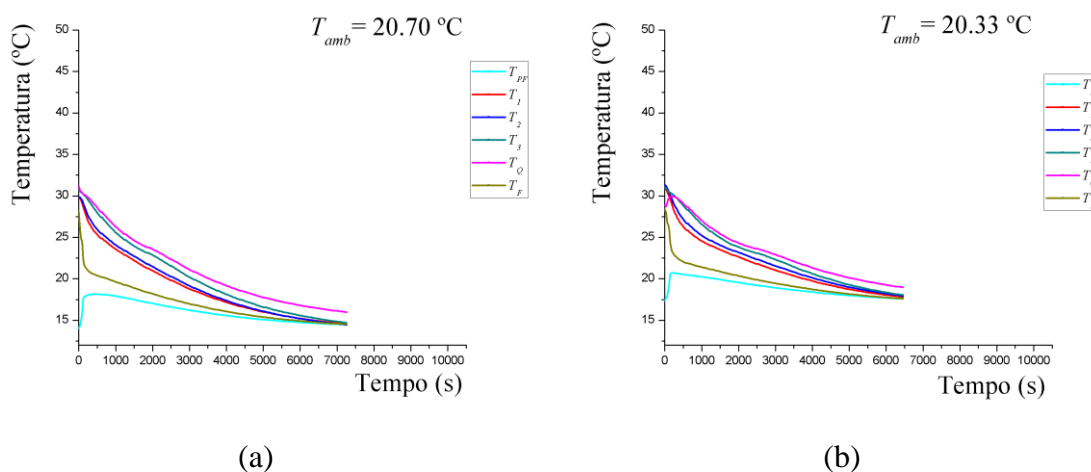


Figura III.1 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de 27 °C e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura: (a) $T_{PF} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$; (b) $T_{PF} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$.

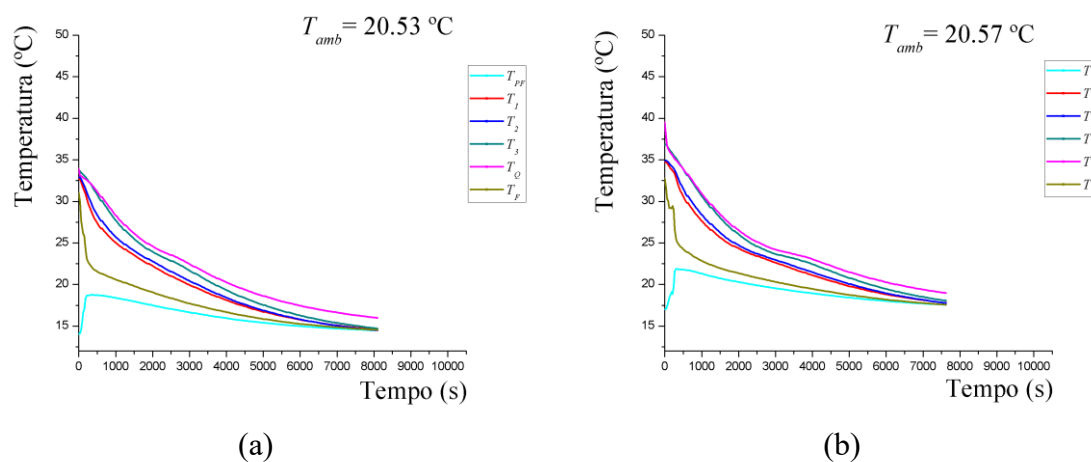


Figura III.2 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de 30 °C e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura: (a) $T_{PF} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$; (b) $T_{PF} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$.

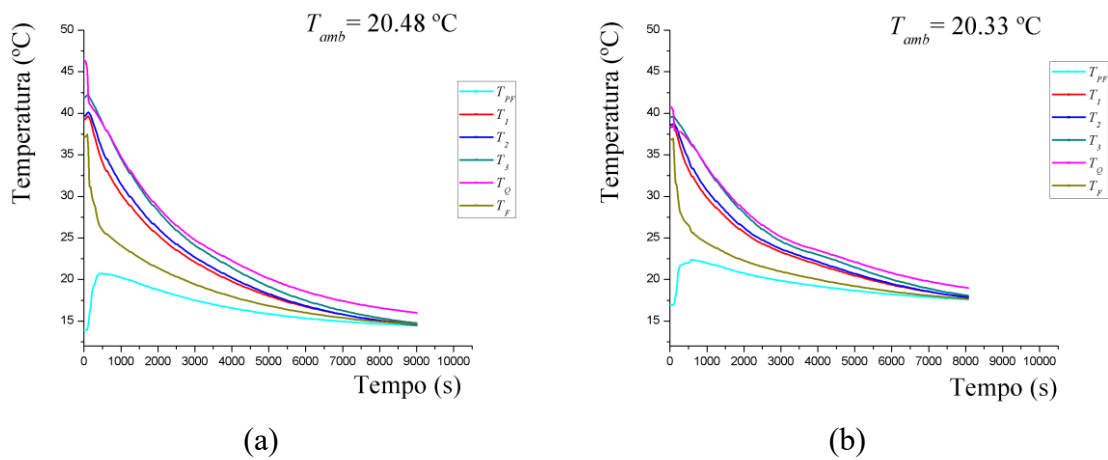


Figura III.3 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de 35 °C e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura: (a) $T_{PF} = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $T_{PF} = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

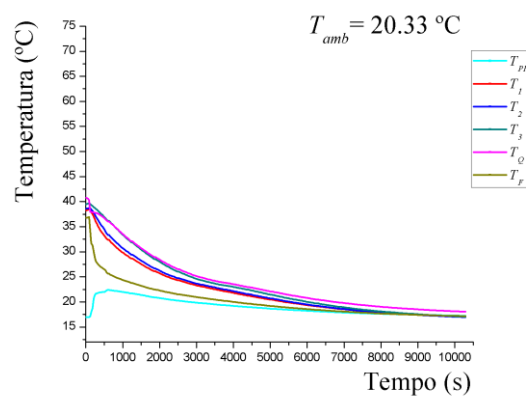


Figura III.4 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de 55 °C e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura $T_{PF} = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

• Placa de gesso *GYPFOR FIRE* com reação ao fogo melhorada

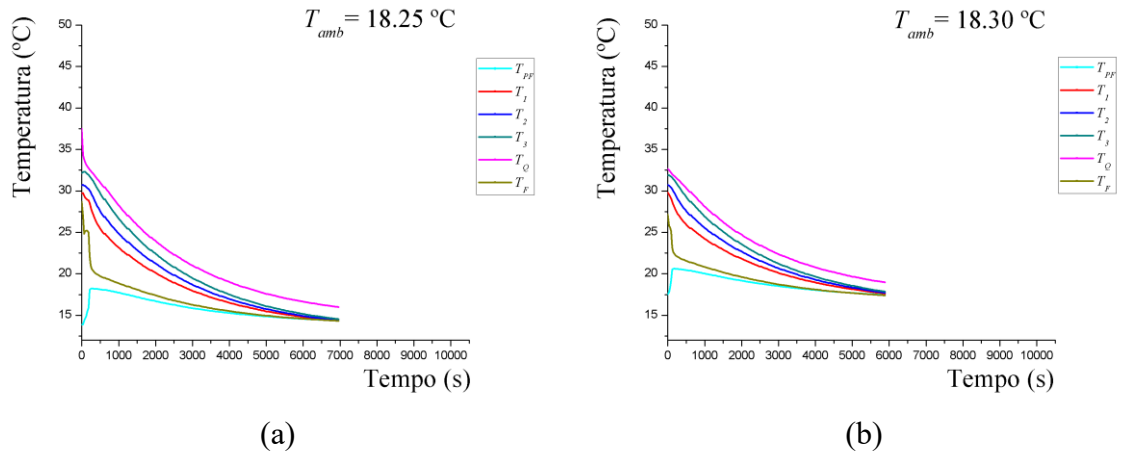


Figura III.5 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura: (a) $T_{PF} = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $T_{PF} = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

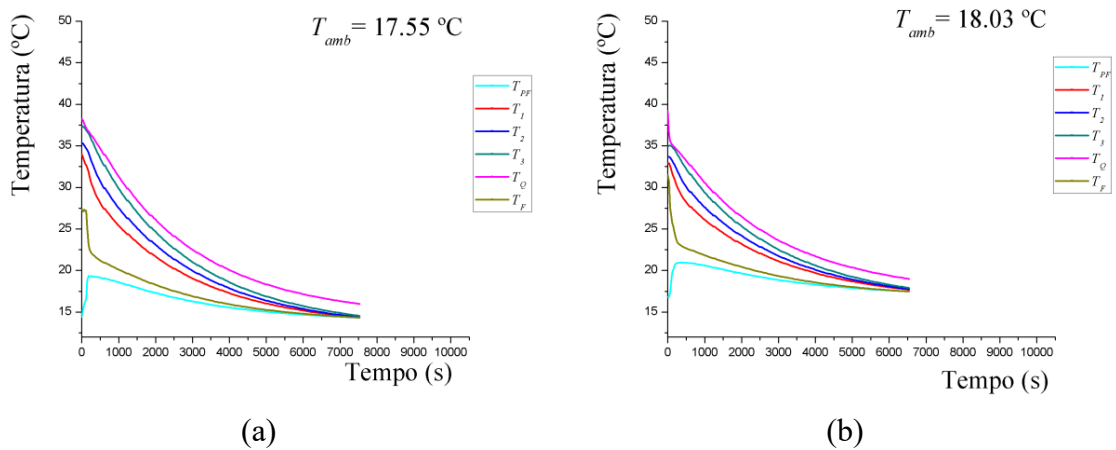


Figura III.6 – Ensaio de descarga (arrefecimento) com temperatura da amostra T_{am} inicial de $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e quando colocada em contacto com a placa fria a uma temperatura: (a) $T_{PF} = 14 \text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $T_{PF} = 17 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

ANEXO IV – ILUSTRAÇÕES ADICIONAIS

Nesta secção são apresentadas algumas imagens auxiliares para melhor entendimento do funcionamento de cada ensaio e disposição dos componentes da instalação experimental.



Figura IV.1 – Montagem experimental no decorrer de um ensaio de descarga.



Figura IV.2 – Montagem experimental durante um ensaio de descarga.



Figura IV.3 – Vista da instalação experimental e dos seus componentes.

