



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica

2013

**Hélder Filipe
Santos Nunes**

**Comportamento térmico de uma argamassa com PCM
numa célula-de-teste**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Mecânica

2013

**Hélder Filipe
Santos Nunes**

**Comportamento térmico de uma argamassa com PCM
numa célula-de-teste**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, realizada sob a orientação científica do Doutor António José Barbosa Samagaio, Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

O Júri

Presidente	Professor Doutor Nelson Amadeu Dias Martins Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
Arguente	Professor Doutor Fernando José Neto da Silva Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro
Orientador	Professor Doutor António José Barbosa Samagaio Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Agradecimentos

Quero começar por agradecer ao orientador da minha dissertação, Professor Doutor António Samagaio, na qual expresso o meu apreço pelos profundos conhecimentos nesta área de trabalho e pela total disponibilidade com que acompanhou o meu trabalho.

Gostaria de enaltecer a forte colaboração da Saint-Gobain Weber neste trabalho, principalmente ao Eng.º Luís Silva e ao Nuno Vieira pela dedicação e disponibilidade ao longo do trabalho experimental.

Ao laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, sobretudo ao Vitor Rodrigues e à Maria Figueiredo pela concessão de materiais fundamentais ao propósito do trabalho na célula-de-teste.

Grato ao Eng.º Narciso Soares pela realização dos testes DSC no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e pelas instruções sobre análises térmicas.

Aos meus amigos, Agostinho Ribeiro e Eric Bosne pelas contribuições no presente trabalho e à minha estimável irmã Patrícia, o meu obrigado.

Dedico o meu trabalho aos meus pais, António Nunes e Ana Santos, forças motrizes da minha vida.

Palavras-chave

PCM, materiais de mudança de fase, célula-de-teste, argamassa de revestimento interior, *DSC*, *MDSC*, análises térmicas; desempenho térmico, sistema solar passivo, ganho direto;

Resumo

A incorporação de *PCM* (*Phase Change Materials*) em materiais de construção possibilita melhorar o desempenho térmico desses materiais através do armazenamento de calor latente, reforçando o conforto térmico interior em edifícios por meio da estabilização da temperatura ambiente. Neste trabalho foram produzidas lajetas de uma argamassa de revestimento interior com *PCM* parafínico microencapsulado. Posteriormente as lajetas foram aplicadas no pavimento de uma célula-de-teste que assenta nos princípios de um sistema solar passivo de ganho directo. Esta aplicação é uma solução com capacidade de redução dos gastos energéticos em climatização. Com o desígnio de melhorar a compreensão do comportamento térmico deste material compósito, procedeu-se à realização de análises térmicas *DSC* e *MDSC* para determinação das propriedades térmicas do material. Por último, o trabalho experimental consistiu na avaliação do desempenho térmico das lajetas com *PCM* através de um sistema de monitorização instalado nos dois compartimentos da célula-de-teste. As medições concretizadas permitiram constatar uma redução média nos picos de temperatura máxima de 3,1°C e um aumento dos picos de temperatura mínima de 1,2°C. A maior redução num pico de temperatura máxima foi de 6,1°C e o maior aumento da temperatura mínima foi 2,1°C. Foram alcançadas ainda diferenças de temperatura média entre os compartimentos de 4,0°C durante 8 horas, e 3,2°C durante 10 horas.

Keywords

PCM, phase change materials, test cell, plastering mortar, DSC, MDSC, thermal analysis, thermal performance, passive solar system, direct gain;

Abstract

The incorporation of PCM (Phase Change Materials) on building materials allows the improvement of thermal mass and consequent thermal performance through the latent heat of these materials, as well as the enhancement of inner temperatures stability improving thermal comfort indoors. In this work, slabs were produced based plastering mortar with microencapsulated paraffin PCM. Afterwards the slabs were applied on the floor of a test cell following the principles of a passive solar system. This application is a solution capable of reducing energy on HVAC. With the purpose of evaluating the thermal behavior of this composite material, thermal analysis of DSC e MDSC was performed to determine the thermal properties of the material. Finally, the experimental work aims to evaluating the thermal performance of PCM slabs through a monitoring system installed in two compartments of the test cell. The measurements allowed to verify a mean reduction in maximum peak temperature of 3,1°C and an increase of the peak temperature of 1,2°C. The largest reduction in maximum peak temperature was 6,1°C and higher increase of the minimum temperature was 2,1°C. Mean differences of temperature between compartments of 4,0°C were achieved for 8 hours and 3,2°C for 10 hours.

ÍNDICE

Índice de Tabelas	iii
Índice de Figuras	v
Lista de Abreviaturas	vii
Lista de Símbolos	viii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Estrutura do trabalho	3
2 Materiais de mudança de fase	5
2.1 Definições e conceitos	5
2.2 Classificação dos materiais de mudança de fase	10
2.2.1 Problemas técnicos com os materiais de mudança de fase	12
2.2.2 Materiais Orgânicos	14
2.2.3 Materiais Inorgânicos	15
2.2.4 Misturas Eutécticas	16
2.2.5 <i>PCM</i> Comercial	17
2.3 Métodos de medição das propriedades térmicas dos <i>PCM</i>	18
2.3.1 Calorimetria Diferencial de Varrimento (<i>DSC</i>)	19
2.3.2 Análise Térmica Diferencial (<i>DTA</i>)	19
2.3.3 Método <i>T-History</i>	19
2.4 Incorporação de <i>PCM</i> em materiais de construção	20
2.4.1 Impregnação Direta	20
2.4.2 Imersão	20
2.4.3 Macroencapsulamento	21
2.4.4 Microencapsulamento	22
2.5 Aplicações de <i>PCM</i> em materiais ou elementos construtivos	23
2.5.1 Revestimentos à base de gesso	23
2.5.2 Betão	24

2.5.3	Tijolos cerâmicos	24
2.5.4	Ladrilhos cerâmicos	25
3	Procedimentos de estudo do material compósito e da célula-de-teste	26
3.1	Célula-de-teste	26
3.1.1	Caracterização e constituição da célula-de-teste	27
3.2	Caraterização da argamassa com <i>PCM</i>	29
3.2.1	Argamassa de revestimento interior com <i>PCM</i>	29
3.2.2	Micronal DS5040 X	30
3.3	Produção das lajetas de argamassa com PCM	31
3.3.1	Molde	32
3.3.2	Pintura das lajetas	35
3.4	Análises Térmicas	36
3.4.1	Condutibilidade térmica	36
3.4.2	Ensaio <i>DSC</i> ao <i>PCM</i>	37
3.4.3	Ensaio <i>MDSC</i> à argamassa com <i>PCM</i>	39
3.4.4	Análise aos resultados dos ensaios <i>DSC</i> e <i>MDSC</i>	45
3.5	Sistema de aquisição de dados	46
3.5.1	Sensores	47
3.5.2	Sistema de monitorização	51
4	Resultados da monitorização e discussão	53
4.1	Monitorização de 31 de Outubro a 2 de Novembro	54
4.2	Monitorização de 9 a 10 de Novembro	58
4.3	Monitorização de 15 a 19 de Novembro	63
4.4	Síntese dos resultados gerais	68
4.4.1	Monitorização total	68
4.4.2	Economia de energia	69
5	Conclusão	70
5.1	Conclusões gerais	70
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	70
	Referências bibliográficas	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Massa volúmica, calor específico e condutibilidade térmica de alguns materiais de construção [7]	7
Tabela 2 – Propriedades dos materiais de mudança de fase para aplicação em edifícios (adaptada [12])	12
Tabela 3 – Síntese das vantagens e desvantagens dos materiais orgânicos (adaptado [19])	15
Tabela 4 – Misturas orgânicas com características térmicas adequadas à aplicação no interior de edifícios (adaptado [20])	15
Tabela 5 – Vantagens e desvantagens dos materiais inorgânicos (adaptado [19])	16
Tabela 6 - Misturas inorgânicas com características térmicas adequadas à aplicação no interior de edifícios [20]	16
Tabela 7 – Vantagens e desvantagens dos eutéticos (adaptado [19])	17
Tabela 8 – Misturas eutéticas com características térmicas adequadas à aplicação no interior de edifícios (adaptado [20])	17
Tabela 9 – Materiais de mudança de fase comercializados e adequados para aplicações em edifícios (adaptado [22])	18
Tabela 10 – Propriedades do vão envidraçado da célula-de-teste	29
Tabela 11 – Materiais constituintes da argamassa com PCM utilizada no trabalho experimental	30
Tabela 12 – Propriedades do Micronal DS5040 X segundo o fabricante	31
Tabela 13 – Resultados das medições efetuadas sobre a argamassa endurecida	36
Tabela 14 – Resultados dos ensaios DSC e MDSC	45
Tabela 15 – Legendagem da Figura 35 com a identificação dos módulos receptores	51
Tabela 16 – Medições exibidas neste trabalho	53
Tabela 17 – Nomenclatura definida para apresentação dos resultados	54
Tabela 18 – Síntese dos resultados da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada entre 31 de Outubro e 2 de Novembro	55
Tabela 19 – Síntese dos resultados da humidade relativa interior e exterior e radiação solar global efetuada entre 31 de Outubro e 2 de Novembro	56
Tabela 20 - Síntese dos resultados da temperatura interior do compartimento de referência e experimental efetuada entre o dia 31 de Outubro e 2 de Novembro	58
Tabela 21 – Síntese dos resultados da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada no dia 9 e 10 de Novembro	59
Tabela 22 – Síntese dos resultados da medição da humidade interior (compartimento de referência e compartimento experimental) e exterior efetuada no dia 9 e 10 de Novembro	60
Tabela 23 – Síntese dos resultados da medição da temperatura interior no compartimento de referência e no compartimento experimental efetuada no dia 9 e 10 de Novembro	61
Tabela 24 – Síntese dos resultados da medição do fluxo de calor na parede divisória do compartimento de referência e do compartimento experimental efetuada no dia 9 e 10 de Novembro	63

Tabela 25 – Síntese dos resultados da medição da temperatura exterior e da radiação solar global efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro	64
Tabela 26 – Síntese dos resultados da medição da humidade interior (compartimento de referência e compartimento experimental) e exterior efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro	65
Tabela 27 – Síntese dos resultados da medição da temperatura interior do compartimento de referência e compartimento experimental efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro	66
Tabela 28 – Síntese do resultado da medição do fluxo de calor nas lajetas e da temperatura da parte inferior e superior da lajeta, efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro	68
Tabela 29 – Síntese dos principais resultados da monitorização realizada	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia de trabalho	3
Figura 2 - Fluxo de calor atravessado numa superfície plana	6
Figura 3 – Classificação dos materiais de mudança de fase (adaptado [12])	10
Figura 4 – Entalpia e temperatura de fusão dos diversos materiais de mudança de fase [13]	11
Figura 5 – Esquema da variação da temperatura durante o aquecimento e o arrefecimento de um PCM com sobreaquecimento. [15]	13
Figura 6 - Painéis CSM, PCM macroencapsulado da Rubitherm	21
Figura 7 – Micronal, PCM microencapsulado da BASF [37]	22
Figura 8 – Célula-de-teste da aplicação (esquerda) e incorporação de PCM nas pastas de gesso (direita) [38]	23
Figura 9 – Cubículos em betão com e sem PCM microencapsulado [32]	24
Figura 10 – Incorporação de PCM macroencapsulado em tijolos [33]	25
Figura 11 – Aplicação de PCM macroencapsulado em ladrilhos [35]	25
Figura 12 – Sistema solar passivo de ganho direto	26
Figura 13 – Célula-de-teste instalada na Universidade de Aveiro orientada a Sul	27
Figura 14 – Micronal DS5040 X	31
Figura 15 – Mistura dos materiais constituintes da argamassa (esquerda) e amassadura da argamassa com PCM através da misturadora (direita)	32
Figura 16 – Molde construído para produção das lajetas	33
Figura 17 – Aplicação da mistura de argamassa com PCM	33
Figura 18 – Aspecto final da produção das lajetas no molde	34
Figura 19 – Lajeta produzida parte frontal (esquerda); Lajeta produzida parte lateral (centro); Lajeta produzida parte inferior (direita)	34
Figura 20 – Lajeta após pintura com tinta preta vinílica	35
Figura 21 – Ensaio DSC: Pesagem da amostra (esquerda); encapsulamento da amostra (centro) e colocação das amostras na DSC (direita)	37
Figura 22 – Resultado do ensaio DSC realizado a uma amostra do PCM (Micronal DS5040 X)	38
Figura 23 – Resultado do ensaio MDSC sobre a amostra de argamassa não endurecida com PCM (calor específico)	41
Figura 24 - Resultado do ensaio MDSC sobre a amostra de argamassa endurecida com PCM (calor específico)	42
Figura 25 – Determinação da entalpia em função da temperatura da amostra de argamassa não endurecida com PCM	43
Figura 26 – Determinação da entalpia em função da temperatura da amostra de argamassa endurecida com PCM	44
Figura 27 - Colocação do piranómetro LP PYRA na cobertura da célula de teste	47

Figura 28 - Colocação da sonda HD 9008 TR numa estrutura metálica da célula de teste	48
Figura 29 - Colocação do fluxímetro Hukseflux HFP01 sobre o pavimento preenchido de lajetas de argamassa com PCM	49
Figura 30 - Colocação da sonda de temperatura e humidade relativa interior JUMO 907021/21 e de algumas sondas de temperatura PT100 no compartimento de referência	50
Figura 31 – Colocação de sondas PT100 na parte superior e inferior da lajeta.....	50
Figura 32 – Sistema de monitorização montado numa caixa metálica no compartimento de referência	51
Figura 33 – Software EZ Data Logger Basic	52
Figura 34 – Resultado da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada entre 31 de Outubro e 2 de Novembro	54
Figura 35 - Resultado da medição da humidade interior e exterior efetuada entre o dia 31 de Outubro e 2 de Novembro.....	55
Figura 36 - Resultado da medição da temperatura interior no compartimento de referência e no compartimento experimental efetuada entre o dia 31 Outubro e 2 de Novembro	57
Figura 37 - Resultado da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada no dia 9 e 10 de Novembro.....	59
Figura 38 - Resultado da medição da humidade interior (compartimento de referência e compartimento experimental) e exterior efetuada no dia 9 e 10 de Novembro.....	60
Figura 39 - Resultado da medição da temperatura interior no compartimento de referência e no compartimento experimental efetuada no dia 9 e 10 de Novembro	61
Figura 40 - Resultado da medição do fluxo de calor na parede divisória do compartimento de referência e do compartimento experimental efetuada no dia 9 e 10 de Novembro	62
Figura 41 - Resultado da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada entre 15 e 19 de Novembro.....	63
Figura 42 - Resultado da medição da humidade interior (compartimento de referência e compartimento experimental) e exterior efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro	64
Figura 43 - Resultado da medição da temperatura interior no compartimento de referência e no compartimento experimental efetuada entre 15 de Novembro e 19 de Novembro	65
Figura 44 - Resultado da medição do fluxo de calor nas lajetas e da temperatura da parte inferior e superior da lajeta, efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro	67

LISTA DE ABREVIATURAS

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
PCM	<i>Phase Change Materials</i>
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
EPS	Poliestireno expandido
XPS	Poliestireno extrudido
DGEG	Direção-Geral de Energia e Geologia
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
MDSC	<i>Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry</i>
DTA	<i>Differential Thermal Analysis</i>
CSM	<i>Compact Storage Module</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>
RTD	<i>Resistive Temperature Detectors</i>
INE	Instituto Nacional de Estatística
PVC	Policloreto de vinil

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área exposta	$[m^2]$
C_p	Calor específico (a pressão constante)	$[J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$
$C_{p,sol}$	Calor específico na fase sólida $[J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}]$	$[J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$
$C_{p,líq}$	Calor específico na fase líquida $[J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}]$	$[J\ kg^{-1}\ K^{-1}]$
λ	Condutibilidade térmica	$[W\ m^{-1}\ K^{-1}]$
Q	Quantidade de energia (calor) armazenada ou libertada pelo material	$[J]$
P	Potência de aquecimento	$[W]$
ΔT	Intervalo de temperatura	$[K], [^\circ C]$
Δh_{fus}	Varição de entalpia	$[kg\ kJ^{-1}]$
ρ	Densidade seca aparente	$[kg\ m^{-3}]$
ε	Efusividade térmica	$[J\ m^{-2}\ ^\circ C^{-1}\ s^{-1/2}]$
T_{mf}	Temperatura inferior ao ponto de fusão	$[K], [^\circ C]$
m	Massa	$[kg]$
$m_{líq}$	Massa do <i>PCM</i> na fase líquida	$[kg]$
T_1	Temperatura da superfície mais quente	$[K], [^\circ C]$
T_2	Temperatura da superfície mais fria	$[K], [^\circ C]$
T_i	Temperatura inicial	$[K], [^\circ C]$
T_{fus}	Temperatura de fusão	$[K], [^\circ C]$
T_f	Temperatura final	$[K], [^\circ C]$
L	Espessura da amostra	$[m]$
v	Volume geométrico do provete	$[m^{-3}]$
$E_{arm_{sol}}$	Energia armazenada na fase sólida	$[J]$
$E_{arm_{fus}}$	Energia armazenada durante a fase de transição sólida \leftrightarrow líquida	$[J]$
$E_{arm_{líq}}$	Energia armazenada na fase líquida	$[J]$

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

Atualmente a humanidade tem sido cada vez mais confrontada com o seu modo de consumir energia e explorar os recursos naturais disponíveis no planeta. Segundo um relatório da Agência Internacional de Energia, a procura de energia poderá aumentar quase 50 % até 2030, com o conseqüente aumento das emissões de gases com efeito de estufa, uma tendência que, se não se alterar, poderá elevar 6 °C a temperatura média mundial e provocar a desertificação, migrações das populações, erosão da costa marítima, perda da biodiversidade e fenómenos atmosféricos extremos. [1] As conseqüências são alarmantes e podem tornar-se catastróficas. É necessário dar início a um novo período energético, com o objectivo estratégico de incentivar o uso de fontes de energia renovável para produção de energia necessária ao desenvolvimento e subsistência das populações. Este é um objectivo que deve ser perseguido com afinco e requer uma forte aposta na investigação suportada por investimentos e políticas energéticas adequadas a nível nacional e internacional. A poupança de energia é a primeira fonte de energia renovável actualmente disponível. Cada cidadão pode e deve desempenhar um papel relevante na poupança de energia. [2]

O atual cenário energético nacional é caracterizado por uma forte dependência externa, 76,7% em 2010 segundo a DGEG, com um sistema energético dependente de fontes primárias de origem fóssil. A nova Estratégia Nacional para a Energia (ENE 2020) aposta em vários eixos nomeadamente na promoção da eficiência energética, com o objetivo de reduzir 20% no consumo de energia final em 2020 através do estabelecimento de determinadas medidas como a promoção de projetos inovadores na gestão energética dos edifícios públicos, residenciais e de serviços. [3] O balanço energético realizado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) revela que, em 2009, o setor residencial foi o terceiro maior consumidor de energia final com 17,7 % (0,30 tep/habitante), apresentando uma taxa média de crescimento anual de 1,5 % entre 1989 e 2009. No mesmo balanço, concluiu-se que a principal fonte de energia (secundária) consumida no setor residencial é a energia elétrica com 38,1 %, existindo, por isso, uma evidente dependência desta fonte de energia na sociedade atual. O aumento do consumo de energia elétrica está diretamente associado ao aumento do conforto térmico e ao crescimento do número de equipamentos elétricos disponíveis nas habitações. [4] O consumo referente aos equipamentos de climatização em Portugal representa 25% da energia consumida no setor residencial e, portanto, torna-se imprescindível a utilização de soluções construtivas que permitam uma diminuição do recurso a equipamentos de climatização. [2]

As exigências de conforto térmico promoveram a importância da matriz das construções numa função cada vez mais complexa de regulação térmica entre as condições ambientais e a temperatura interna. [5] Um das maneiras de reduzir o consumo de energia da climatização associado ao conforto térmico é através do armazenamento de energia térmica. O armazenamento pode ser efectuado através da elevação da temperatura de um material (calor sensível) ou através da mudança de fase de um material (calor latente). A principal desvantagem do armazenamento de calor sensível é depender do seu volume e resultar em maior variação da temperatura. O armazenamento de calor latente possui elevada densidade de armazenamento com menor variação de temperatura. Os materiais que têm esta capacidade são designados de materiais de mudança de fase (*PCM - Phase Change Materials*) e são capazes de absorver uma grande quantidade de energia durante a sua fusão e libertá-la durante a solidificação.

A combinação dos materiais de construção tradicionais com *PCM* possibilita a estabilização da temperatura interior através do calor latente dos *PCM*. Os materiais de mudança de fase proporcionam condições de conforto térmico interior beneficiando da redução de energia em equipamentos AVAC. Através de sistemas solares passivos é possível maximizar esta aplicação e melhorar o desempenho energético em edifícios devido ao aumento da capacidade de armazenamento de energia térmica.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem como principal objectivo a avaliação do comportamento térmico de uma argamassa de revestimento interior com *PCM* aplicada no pavimento de uma célula-de-teste. Foi pretendido, mais especificamente, a produção de lajetas de uma argamassa com *PCM* para preenchimento total do pavimento de uma célula-de-teste e posterior realização de monitorizações. De forma a melhorar a compreensão do desempenho térmico da aplicação de lajetas de argamassa com *PCM* na célula-de-teste foi pretendido a realização de análises térmicas para caracterização das propriedades térmicas do material.

1.3 METODOLOGIA

O trabalho foi dividido em quatro procedimentos de forma a alcançar os objetivos traçados no tempo delineado (Figura 1). O primeiro procedimento consiste na revisão bibliográfica sobre a incorporação de *PCM* em materiais de construção. O segundo procedimento corresponde ao trabalho experimental que tem início com a produção de lajetas de uma argamassa de revestimento interior com *PCM* e aplicação no pavimento de uma célula de teste. O terceiro procedimento envolve a determinação das propriedades térmicas da argamassa de revestimento interior com *PCM* através de testes *DSC*, e a realização de monitorizações na célula-de-teste. No quarto e último procedimento pretende-se analisar e discutir os resultados dos testes *DSC* e os resultados das monitorizações na célula-de-teste.

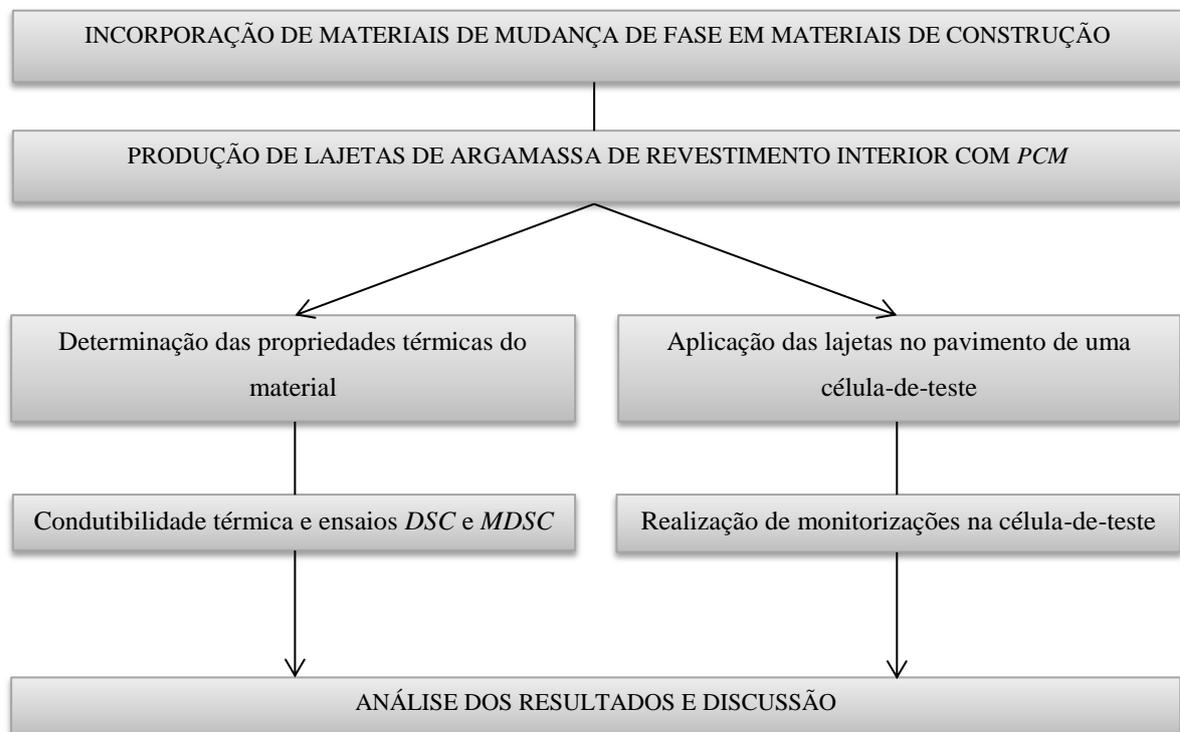


Figura 1 – Metodologia de trabalho

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho possui cinco capítulos organizados pelos diferentes objetivos do presente trabalho. Pormenorizadamente, o primeiro capítulo faz um breve enquadramento da temática do trabalho e apresenta os objetivos ambicionados. O segundo capítulo descreve e caracteriza os *PCM*, apresentando as principais vantagens e desvantagens da sua utilização em edifícios, os métodos de

análise térmica que possibilitam a caracterização das propriedades térmicas dos materiais, a incorporação dos materiais de mudança de fase nos materiais de construção e os resultados obtidos até aos dias de hoje nas experiências científicas já realizadas. O terceiro capítulo desenvolve os procedimentos do trabalho experimental, começando por descrever a célula-de-teste, os passos na produção das lajetas de argamassa de revestimento interior com *PCM*, a caracterização térmica deste material compósito através de testes *DSC* e a apresentação do sistema de monitorização montado na célula-de-teste para recolha de informação em tempo real dos sensores instalados. O quarto capítulo revela as medições efetuadas na célula-de-teste bem como uma análise e discussão dos resultados obtidos. O quinto e último capítulo perpetua as principais conclusões do trabalho desenvolvido, apontando o que deverá ser melhorado e futuros trabalhos que poderão ser desenvolvidos para progresso e continuidade do trabalho efetuado na presente dissertação.

2 MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

2.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS

O armazenamento de energia térmica pode ser dividido em processos físicos e em processos químicos. Os sistemas de armazenamento de energia térmica por processos químicos baseiam-se na energia absorvida e libertada na quebra e formação de ligações moleculares numa reacção química reversível. Neste caso, o calor armazenado depende do material de armazenamento, do calor de reacção e do grau de conversão da reacção. Os sistemas de armazenamento de energia térmica através de processos físicos são baseados no calor sensível e calor latente. Nos edifícios, o armazenamento de calor sensível através da utilização da massa térmica dos elementos estruturais é o sistema mais comumente utilizado. O armazenamento de calor sensível baseia-se na variação de temperatura dos materiais, por exemplo, quando o calor é adicionado ao meio de armazenamento (tijolo, pedra ou betão) e faz aumentar a temperatura do material. [5] A quantidade de calor armazenada depende da massa do material, do calor específico (fase sólida ou fase líquida) e da alteração de temperatura (equação 2.1). O calor específico, C_p , é a quantidade de calor necessária para elevar um grau a temperatura de uma massa unitária do material e as unidades são expressas em $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$. [6] Pode ser definida também como uma medida da inércia térmica do material, ou seja, quanto menor for o calor específico mais rápido será a mudança de temperatura no material.

$$Q = m C_p \Delta T \quad (2.1)$$

Onde,

Q = Quantidade de energia (calor) armazenada [J]

m = Massa do material [kg]

C_p = Calor específico do material [$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$]

ΔT = Elevação da temperatura (devido à energia recebida) [K]

O valor do calor específico para os materiais de construção está contido no intervalo entre 300 e 1500 $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$. Uma excepção relevante é a madeira, cujo calor específico está situado entre 1500 e 2510 $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ (Tabela 1). A água ($T = 10\ ^\circ C$) é uma das matérias com maior calor específico, 4187 $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$. Desta forma, o teor de humidade nos materiais vai influenciar de uma forma significativa a sua capacidade de armazenamento térmico. [7]

Um fenómeno físico bastante comum, e importante mencionar no presente trabalho, é a transmissão de calor, que não é mais do que a transmissão de energia de uma região para outra, como resultado de uma diferença de temperaturas. A grandeza que expressa a quantidade de calor que atravessa uma superfície de área unitária para uma diferença unitária de temperatura entre essa superfície e outra situada a uma distância unitária é a condutibilidade térmica, (λ). As unidades são expressas em $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ e dependem das características do material nomeadamente a massa específica, porosidade e teor de humidade, sendo em geral elevado para bons condutores como os metais e baixo para isolantes térmicos (condutibilidade inferior a $0,065 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e resistência térmica superior a $0,30 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$). [8] A transmissão de calor pode efectuar-se de três formas distintas: condução (passagem de calor de uma região para outra de um mesmo corpo, ou de um corpo para outro quando estes se encontram em contacto), radiação (emissão de energia da superfície de um corpo sob a forma de ondas electromagnéticas) e convecção (passagem de calor de uma zona para outra de um fluído em consequência do movimento relativo das partículas do mesmo).

Quando se coloca, por exemplo, uma parede plana, cuja superfície externa e interna é constituída pelo mesmo material, em contacto com um fluído (ar) a diferentes temperaturas, ocasiona um fluxo de energia por condução no interior da mesma. Este fluxo de transferência de calor (q , [W m^{-2}]) por condução é dado pela equação 2.2.

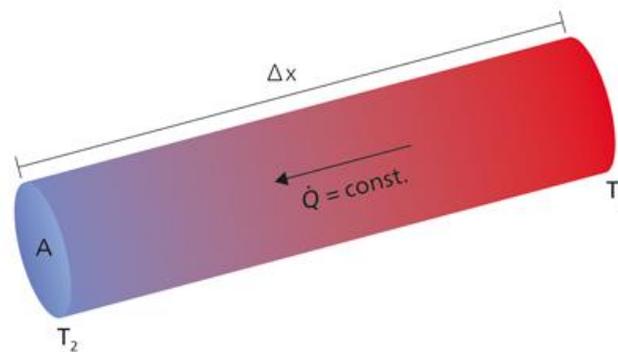


Figura 2 - Fluxo de calor atravessado numa superfície plana

$$q = -\lambda A \frac{T_2 - T_1}{L} \quad (2.2)$$

Onde λ é a condutibilidade térmica do material [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], L a espessura da parede, A é a área da superfície da parede, e $T_1 - T_2$ a diferença de temperatura entre a superfície mais quente e a mais fria. O sinal negativo aparece na equação para indicar que a energia flui do ponto de maior temperatura ao de menor temperatura. O valor de λ não é, normalmente, constante durante toda a vida útil do material, podendo ser alterado como consequência de determinados factores tais como: temperatura, humidade e envelhecimento. [7]

Uma propriedade também relevante, com influência no desempenho energético nos edifícios, é a densidade (ρ) que relaciona o volume de um material com a sua massa. A densidade aparente é aquela que normalmente caracteriza os materiais de construção e pode ser calculada através da divisão do peso do material pelo seu volume global ou aparente, que inclui os espaços vazios. No caso dos espaços vazios estarem ocupados por ar obtém-se a densidade seca (mínima aparente). No caso de estarem ocupados por água diz-se densidade saturada (máxima aparente).

Material	Densidade seca aparente, ρ [kg m^{-3}]	Calor específico (sólido), C_p [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	Condutibilidade térmica, λ [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
Argamassa de reboco	2000	1000	1,15
Granito	2500-2700	650	3,5
Pedra calcária	1600-1790	920	1,1
Betão de inertes correntes	2300-2600	840-1040	2,0
Gesso	750	840	0,35
Alumínio	2700	830-950	230
Aço	7800	450-512	52
Cobre	8930	386	380
Cerâmica	2200-2400	920-1000	1,04
Tijolo cerâmico	1600	920	0,90
Aglomerado cortiça	500	170	0,10
Grés quartzoso	2200 - 2800	745	2,6
Madeira (pouco densa)	200-435	1500-2510	0,13
Vidro de quartzo	2200	750	1,4
Isolante térmico <i>EPS</i>	> 20	1550	0,037
Isolante térmico <i>XPS</i>	25-40	1045	0,037

Tabela 1 – Massa volúmica, calor específico e condutibilidade térmica de alguns materiais de construção [7]

Por outro lado, o armazenamento de calor latente é a quantidade de calor armazenada ou libertada por uma substância durante uma mudança de fase (estados físicos da matéria: sólido, líquido ou gasoso), sem grandes alterações na temperatura. Todos os materiais têm um calor latente associado a cada mudança de fase, mas só alguns são apropriados para utilização em materiais de construção e para aplicações em edifícios. Os materiais de mudança de fase, designados por *PCM* (*Phase Change Materials*), armazenam o calor com a fusão da sua estrutura, absorvendo o calor do espaço. Quando se encontra totalmente fundida, o material não armazena mais calor. A libertação ocorre quando a temperatura do espaço é inferior à temperatura de solidificação e o material solidifica progressivamente, libertando todo o calor armazenado para o espaço. Estes materiais de armazenamento de calor latente possuem uma maior capacidade de armazenamento de calor por unidade de volume do que os materiais de construção convencionais (que utilizam o calor sensível), obtendo uma elevada entalpia de fusão [kJ kg^{-1}] e densidade [kg m^{-3}] isto é uma elevada entalpia de fusão volumétrica [kJ m^{-3}]. [9] A quantidade de energia armazenada ou libertada (Q) é calculada a partir da equação 2.3.

$$Q = m L \quad (2.3)$$

Onde,

Q = Quantidade de energia (calor) armazenada ou libertada pelo material [J]

m = Massa do material [kg]

L = Calor latente do material [kJ kg^{-1}]

O calor latente de fusão/solidificação (L) ou entalpia de fusão/solidificação (Δh) é a quantidade de energia (calor) que é adicionada/transmitida quando uma dada quantidade de material é fundida/solidificada. O conceito de calor latente pode ser bem exemplificado através da água. Quando fornecemos calor ao gelo, a uma pressão constante, o volume específico aumenta ligeiramente e a temperatura aumenta até atingir $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, ponto no qual o gelo se funde enquanto a temperatura permanece constante (a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Neste ponto, designado por ponto de fusão, todo o calor fornecido é aproveitado para se dar a mudança de estado, de sólido para líquido. A quantidade total de calor (ou energia) necessária para ocorrer a fusão completa do gelo em água é de, aproximadamente, 334 kJ kg^{-1} , equivalente à energia necessária (cujo calor sensível é de $4,187\text{ kJ kg}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) para aquecer 1 litro de água desde $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ até cerca de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, ou seja 334 kJ kg^{-1} . [10] A

vantagem do calor latente sobre o calor sensível torna-se ainda evidente por comparação volúmica e mássica necessária para o armazenamento de uma determinada quantidade de calor. [5]

Os conceitos de calor sensível e calor latente permitem definir a quantidade total de energia armazenada (E_{arm}) [J] num material durante a fase sólida, a fase de transição e a fase líquida, que pode ser então expressa pela equação 2.4.

$$E_{arm} = E_{arm_{sol}} + E_{arm_{fus}} + E_{arm_{liq}} \quad (2.4)$$

Em que,

$$E_{arm_{sol}} = m C_{P,sol} (T_{fus} - T_i) \quad (2.5)$$

$$E_{arm_{fus}} = x m \Delta h_{fus} \quad (2.6)$$

$$E_{arm_{liq}} = m C_{P,liq} (T_f - T_{fus}) \quad (2.7)$$

$$x = \frac{m_{liq}}{m} \quad (2.8)$$

Onde,

$E_{arm_{sol}}$ = Energia armazenada na fase sólida [J]

$E_{arm_{fus}}$ = Energia armazenada durante a fase de transição sólida ↔ líquida [J]

$E_{arm_{liq}}$ = Energia armazenada na fase líquida [J]

m = Massa do *PCM* [kg]

m_{liq} = Massa do *PCM* na fase líquida [kg]

T_i = Temperatura inicial [°C]

T_{fus} = Temperatura de fusão [°C]

T_f = Temperatura final [°C]

$C_{P,sol}$ = Calor específico na fase sólida [J kg⁻¹ °C⁻¹]

$C_{P,liq}$ = Calor específico na fase líquida [J kg⁻¹ °C⁻¹]

Δh_{fus} = Entalpia de fusão (energia necessária para fundir 1 kg) [J kg⁻¹]

2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Os *PCM* podem ser classificados, com base no processo de mudança de fase, em: sólido ↔ líquido (fusão/solidificação); sólido ↔ sólido (mudança de uma forma cristalina para outra); sólido ↔ gasoso (sublimação); líquido ↔ gasoso (vaporização/condensação), e com base na sua composição química.

O calor latente das mudanças de fase sólido ↔ líquido são inferiores ao calor latente das mudanças de fase líquido ↔ gasoso (por exemplo, calor latente para derreter gelo = 334 kJ kg^{-1} , calor latente para vaporizar água líquida = 2260 kJ kg^{-1}). As mudanças de fase líquidas ↔ gasosas, embora envolvam maior calor latente, não são normalmente utilizadas para armazenar energia porque os gases ocupam volumes enormes à pressão atmosférica. As mudanças de fase sólidas ↔ sólidas envolvem um calor latente baixo (embora haja exceções), mas também pequenas mudanças de volume. Apenas os materiais de mudança de fase sólidos ↔ líquidos são adequados para o armazenamento de energia térmica em edifícios uma vez que envolvem uma pequena mudança de volume (menos que 10 %). [11]

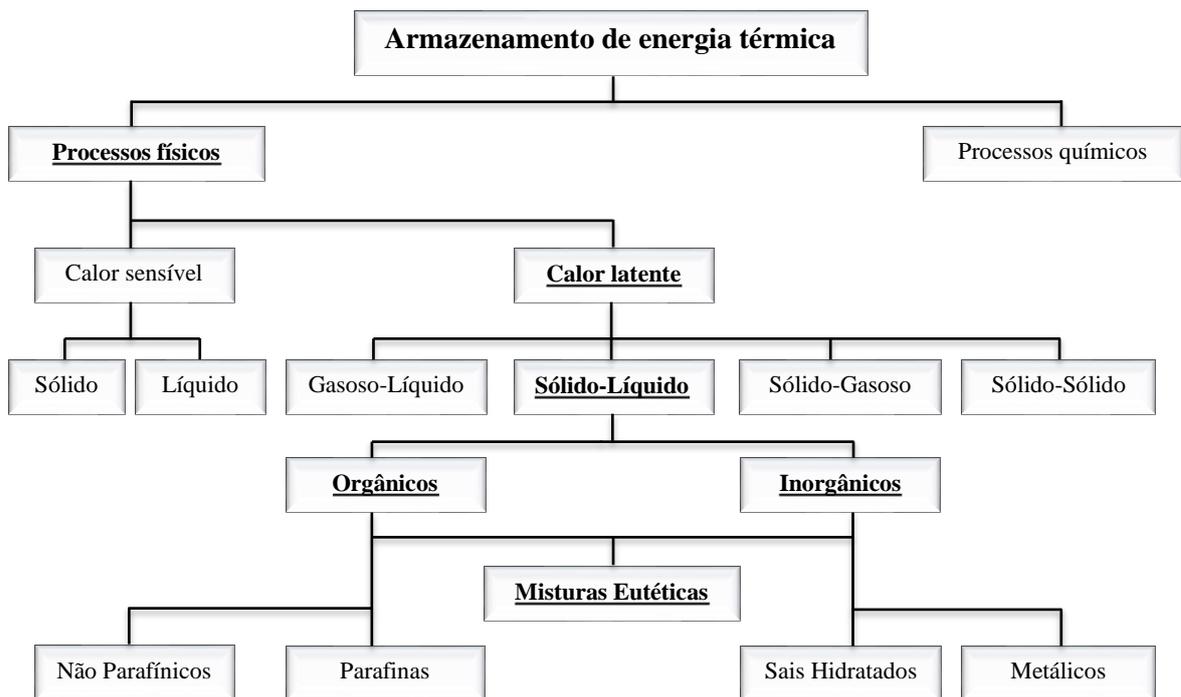


Figura 3 – Classificação dos materiais de mudança de fase (adaptado [12])

No processo de mudança de fase sólido ↔ líquido, os *PCM* podem ser classificados em orgânicos, inorgânicos e misturas eutécticas (Figura 3). Os compostos orgânicos são ainda divididos em parafínicos e não parafínicos enquanto os compostos inorgânicos se dividem em sais

hidratados e metálicos. Uma mistura eutética é uma composição de dois ou mais componentes (orgânicos e inorgânicos) que fundem e cristalizam congruentemente formando uma mistura de cristais compostos.

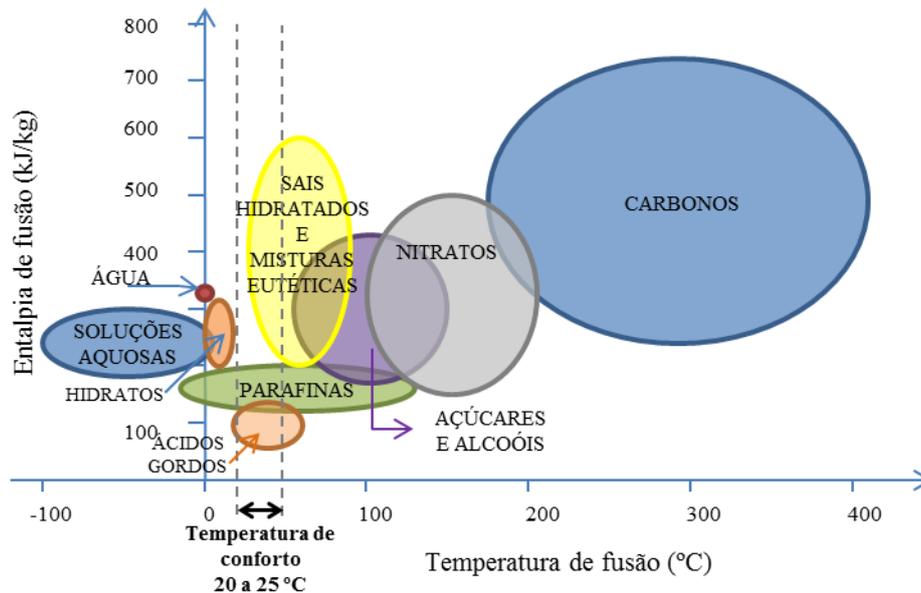


Figura 4 – Entalpia e temperatura de fusão dos diversos materiais de mudança de fase [13]

O conforto térmico pode ser definido como sendo uma condição que expresse satisfação com o ambiente térmico. Do ponto de vista físico, confortável é o ambiente cujas condições permitam a manutenção da temperatura interna sem a necessidade de que sejam accionados mecanismos termorreguladores, ou seja, é necessário que o organismo humano se encontre em balanço térmico com o meio ambiente. Segundo o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios - RCCTE (Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril) a temperatura de conforto estabelecida no Verão é de 25 °C e no Inverno 20 °C. [14] Para aplicações em edifícios, a temperatura de mudança de fase entre os 18 e os 30 °C é preterida no alcance do conforto térmico. [12] A partir da temperatura fusão observada na Figura 4 sobre os diversos materiais, é possível concluir que, para aplicações em edifícios, os *PCM* com potencial são: os parafínicos, os ácidos gordos, os sais hidratados e misturas eutéticas.

A projeção de uma aplicação de materiais de mudança de fase em edifícios deve incluir critérios de ordem térmica, física, cinética e química (Tabela 2).

Propriedade	Característica com potencial de aplicação em edifícios
Térmicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adequadas temperaturas de mudança de fase; 2. Alta capacidade de armazenamento de calor latente durante o processo de mudança de fase; 3. Condutibilidade térmica (nas fases sólida e líquida) elevada; 4. Calor específico e massa volúmica elevada;
Físicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Variação reduzida da massa volúmica durante o processo de mudança de fase; 2. Pressão de vapor reduzida durante a mudança de fase;
Cinéticas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sem sobreaquecimento; 2. Taxa de cristalização suficiente;
Químicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Estabilidade química (longo prazo); 2. Reversibilidade na passagem sólido/líquido e líquido/sólido; 3. Não inflamáveis, nem tóxicos ou poluentes; 4. Durabilidade (sem degradação ao fim de vários ciclos fusão/solidificação);
Económicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Abundância de recursos; 2. Disponibilidade para aplicação; 3. Custo efetivo para larga produção.

Tabela 2 – Propriedades dos materiais de mudança de fase para aplicação em edifícios (adaptada [12])

As investigações realizadas na última década demonstraram que os compostos orgânicos são a melhor opção devido à possibilidade de incorporação direta em materiais de construção e deste modo permite criar um elemento de armazenamento com ganho direto. Enquanto que os compostos inorgânicos não podem ser diretamente incorporados nos materiais de construção e por isso requerem um suporte para impregnação do *PCM* devido à degradação dos ciclos de fusão. [10] Os principais problemas associados aos materiais de mudança de fase descritos na Tabela 2 são abordados na subsecção 2.2.1 do presente trabalho.

2.2.1 PROBLEMAS TÉCNICOS COM OS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

Os principais problemas técnicos encontrados nos materiais de mudança de fase são: o sobreaquecimento, a separação de fases e a inflamabilidade.

2.2.1.1 SOBREARREFECIMENTO

O sobrearrefecimento ocorre quando um material não solidifica imediatamente após uma temperatura abaixo do ponto de fusão, T_{mf} , provocando uma lenta cristalização a temperaturas inferiores (Figura 5). Em alguns casos a libertação de calor não ocorre e, nestes casos, o material só consegue armazenar calor. Este fenómeno é mais comum nos *PCM* inorgânicos e pode ser contornado adicionando aditivos específicos. [15]

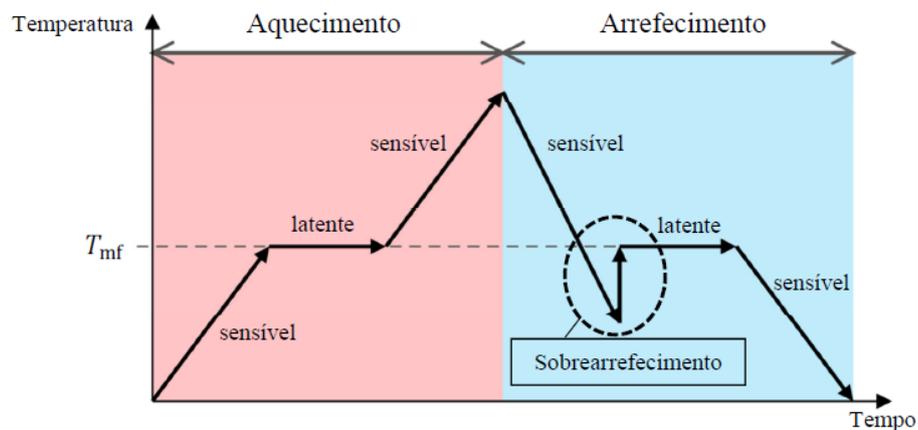


Figura 5 – Esquema da variação da temperatura durante o aquecimento e o arrefecimento de um *PCM* com sobrearrefecimento. [15]

2.2.1.2 SEPARAÇÃO DE FASES

As substâncias formadas por dois ou mais componentes, por exemplo, as misturas de sais hidratados, formadas por água e pelo menos um sal, é possível que durante o processo de solidificação parte da água solidifique e o sal permaneça na fase líquida o que leva à separação de fases ou decomposição. Este comportamento resulta da diferença na temperatura de fusão dos dois componentes da mistura (sal e água). A composição original deixa de existir e o material já não apresenta as propriedades de transição de fase da mistura inicial. Ao contrário dos sais hidratados, as composições eutéticas apresentam o mesmo ponto de fusão, solidificam e fundem simultaneamente e de forma congruente, mantendo a composição e as suas propriedades constantes, sem o risco de separação de fases. [16]

2.2.1.3 INFLAMABILIDADE

A inflamabilidade de certos *PCM*, mais concretamente os materiais de natureza parafínica, está directamente relacionada com o seu ponto de ignição (temperatura mínima na qual o material consegue libertar uma mistura inflamável com o ar, em quantidade suficiente para iniciar a combustão em condições atmosféricas normais). Os fatores mais determinantes na ignição dos *PCM* são: o ponto de ebulição, peso molecular e temperatura de autoignição. Este problema levanta preocupações relacionadas com a resistência ao fogo dos produtos onde este tipo de *PCM* é aplicado, o que tem criado algumas restrições à sua utilização em edifícios. Torna-se deste modo importante compreender a inflamabilidade do *PCM* e estudar o modo de contornar e melhorar o seu comportamento, seja por alteração da parede de revestimento do *PCM* ou através da incorporação de retardadores de chama. [10]

2.2.2 MATERIAIS ORGÂNICOS

Os materiais orgânicos são descritos como parafínicos e não parafínicos. As parafinas são na maioria dos casos misturas de alcanos de cadeia linear $\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)}_n\text{-CH}_3$, verificando-se um aumento no ponto de fusão e do calor latente de fusão com o aumento do comprimento da cadeia de carbonos. Revelam-se não corrosivos, quimicamente inertes, estáveis abaixo dos 500 °C, fusão congruente e pequena variação de volume durante a mudança de fase. [17] Os problemas técnicos dos parafínicos podem em parte ser eliminados através da modificação das misturas e da unidade de armazenamento. A principal limitação quando comparados com os materiais inorgânicos é a menor entalpia de fusão. [18]

Para além das parafinas, existe um elevado número de materiais de mudança de fase orgânicos não parafínicos, com propriedades muito variadas. Neste grupo podemos incluir os ésteres, ácidos gordos (reproduz um comportamento de fusão/solidificação sem sobrearrefecimento), álcoois, glicóis que são materiais com excelentes propriedades de fusão, mas mais caros que os parafínicos.

Classificação	Vantagens	Desvantagens
Orgânicos	1. Disponíveis numa larga gama de temperaturas 2. Calor de fusão elevado 3. Sem sobrerrefecimento 4. Boa compatibilidade com outros materiais 5. Quimicamente inertes	1. Baixa condutibilidade térmica (à volta de $0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) 2. Alteração de volume relativamente grande 3. Inflamáveis

Tabela 3 – Síntese das vantagens e desvantagens dos materiais orgânicos (adaptado [19])

Na Tabela 4 são apresentados alguns materiais orgânicos com características térmicas adequadas à aplicação no interior de edifícios.

Material	Temperatura de fusão [°C]	Entalpia de fusão [kJ kg^{-1}]	Calor específico [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$]	Condutibilidade térmica [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]
Parafina C16–C18	20–22	152	-	-
Parafina C13–C24	22–24	189	0,21	0,21
Parafina C28	28	244	2,16	0,15
Butyl stearate	19	140	-	-
1-Dodecanol	26	200	-	-
n-Octadecane	28	200	-	-
Vinyl stearate	27-29	122	-	-
Dimethyl sebacate	21	120-135	-	-
Polyglycol E 600	22	127,2	-	0,189

Tabela 4 – Misturas orgânicas com características térmicas adequadas à aplicação no interior de edifícios (adaptado [20])

2.2.3 MATERIAIS INORGÂNICOS

Os materiais inorgânicos subdividem-se em sais hidratados e metais. Os sais hidratados podem ser considerados como ligas de sais inorgânicos e água que formam um típico sólido cristalino de fórmula $\text{AB}_n\text{H}_2\text{O}$, portanto a transformação sólido-líquido é uma desidratação do sal hidratado. [17] Os maiores problemas derivados dos sais hidratados são o sobrerrefecimento (descrito na subsecção 2.2.1), risco de corrosão dos materiais em contacto com o *PCM* e como são constituídos por mais do que uma substância, estas podem separar-se em diferentes fases o que compromete a estabilidade cíclica do produto (descrito na subsecção 2.2.1). [16] O facto de apresentarem elevadas entalpias de transição, condutibilidade térmica relativamente alta (o dobro

da parafínica), pequenas variações de volume, não serem corrosivos e mais económicos que os parafínicos, faz com que estes materiais sejam apreciáveis. Os compostos metálicos poderão ser seriamente considerados na tecnologia do armazenamento térmico no futuro em aplicações de baixa e alta temperatura, principalmente, devido a sua elevada condutibilidade térmica comparativamente com outros *PCM*. Os maiores problemas dos metálicos residem na sua massa elevada e em problemas de incompatibilidade com o encapsulamento (técnica de incorporação do *PCM* descrito na secção 2.4). [15]

Classificação	Vantagens	Desvantagens
Inorgânicos	1. Calor de fusão elevado 2. Alta condutibilidade térmica (à volta de $0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) 3. Baixa alteração de volume 4. Disponível a baixo custo	1. Corrosão 2. Sobreaquecimento 3. Separação de fases

Tabela 5 – Vantagens e desvantagens dos materiais inorgânicos (adaptado [19])

Na Tabela 6 são apresentados alguns materiais inorgânicos com características térmicas adequadas à aplicação no interior de edifícios.

Material	Temperatura de fusão [°C]	Entalpia de fusão [kJ kg^{-1}]	Calor específico [$\text{kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$]	Condutibilidade térmica [$\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$]
KF.4H ₂ O	19	231	1,84 (sólido) 2,39 (líquido)	-
Mn(NO ₃).6H ₂ O	26	126	-	-
CaCl ₂ .6H ₂ O	30	171	1,45 (sólido)	-
FeBr ₃ .6H ₂ O	21	105	-	-
LiNO ₃ .3H ₂ O	30	296	-	-
CaCl ₂ .12H ₂ O	30	174	-	-

Tabela 6 - Misturas inorgânicas com características térmicas adequadas à aplicação no interior de edifícios [20]

2.2.4 MISTURAS EUTÉCTICAS

Os eutéticos são misturas de dois ou mais componentes, que liquidificam e solidificam de forma congruente, em simultâneo e sem segregação. São usadas composições eutéticas de materiais orgânico-orgânico, orgânico-inorgânico e inorgânico-inorgânico. No entanto, são escassos os dados disponíveis sobre as suas propriedades físicas e térmicas. [21]

Classificação	Vantagens	Desvantagens
Eutéticos	1. Temperatura de fusão acentuada 2. Alta densidade volumétrica de armazenamento térmico	1. Carência de atuais dados disponíveis sobre as propriedades termofísicas

Tabela 7 – Vantagens e desvantagens dos eutéticos (adaptado [19])

Na Tabela 8 são apresentadas algumas misturas eutéticas com características térmicas adequadas à aplicação no interior de edifícios.

Material	Temperatura de fusão [°C]	Entalpia de fusão [kJ kg ⁻¹]
66.6 % CaCl ₂ · 6H ₂ O + Nucleat + MgCl ₂ · 6H ₂ O(2:1)	25	127
48% CaCl ₂ + 4.3% NaCl + 0.4% KCl + 47.3% H ₂ O	27	188
45/55 Capric+lauric acid	21	143
50% CH ₃ CONH ₂ + 50% NH ₂ CONH ₂	27	263
34% C ₁₄ H ₂₈ O ₂ + 66% C ₁₀ H ₂₀ O ₂	24	148
45% Ca(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O + 55% Zn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	25	130

Tabela 8 - Misturas eutéticas com características térmicas adequadas à aplicação no interior de edifícios (adaptado [20])

2.2.5 PCM COMERCIAL

Os materiais de mudança de fase comercializados são essencialmente baseados em sais hidratados, parafínicos e soluções eutéticas água-sal. Contudo a composição destes materiais é alterada. As modificações típicas são: adição de um nucleador, gelificação do material, aumento da espessura e mistura de diferentes materiais base. Os parafínicos comerciais são geralmente uma mistura de diferentes alcanos devido ao elevado custo de alcanos puros. Os *PCM* comerciais cobrem a gama de temperaturas entre -40 °C e 120 °C porque o mercado apenas necessita de temperaturas dentro deste intervalo.

Designação Comercial	Fabricante	Temperatura de fusão [°C]	Entalpia de fusão [kJ kg ⁻¹]	Calor específico [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]	Condutibilidade térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Micronal DS 5001 (Parafina)	BASF	26	110	-	0,88
STL 27 (Parafina)	Mitsubishi Chemicals	27	213	-	1,09
Climsel C23 (Sal hidratado)	Climator	23	148	-	-
Climsel C24 (Sal hidratado)	Climator	24	216	-	-
S27 (Sal hidratado)	Cristopia	27	190	1,5(sólido) 2,22(líquido)	0,79(sólido) 0,48(líquido)
TH 29 (Sal hidratado)	TEAP	29	188	-	-
RT 20 (Parafina)	Rubitherm GmbH	22	180	2,5	0,20
RT 25 (Parafina)	Rubitherm GmbH	25	147	2,9(sólido) 2,1(líquido)	1,02(sólido) 0,56(líquido)
SP 22 A4 (Sal hidratado)	Rubitherm GmbH	29	157	-	0,60

Tabela 9 – Materiais de mudança de fase comercializados e adequados para aplicações em edifícios (adaptado [22])

Grandes empresas como a *BASF* e *Rubitherm GmbH* (Alemanha), *Cristopia* (França), *TEAP Energy* (Austrália), *EPS Ltd.* (Reino Unido), *Climator* (Suécia) e *Mitsubishi Chemical* (Japão) oferecem uma ampla variedade de *PCM* numa vasta gama de temperaturas de transição. Na Tabela 9 encontram-se alguns materiais de mudança de fase comercializados que são considerados ideais para aplicações em edifícios.

2.3 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS PCM

A determinação das propriedades térmicas é de enorme importância para uma adequada escolha e compreensão do comportamento térmico dos materiais de mudança de fase. Existem várias técnicas de medição de amostras de *PCM*, entre as mais vulgarmente conhecidas encontra-se o teste por calorimetria diferencial de varrimento (*DSC*), a análise térmica diferencial (*DTA*) e o método *T-History*.

2.3.1 CALORIMETRIA DIFERENCIAL DE VARRIMENTO (*DSC*)

Na técnica de ensaio por calorimetria diferencial de varrimento (*DSC*), mesma designação dada ao instrumento de medição da *Perkin-Elmer*, a amostra e o material de referência (com características térmicas conhecidas) são colocados em diferentes cadinhos com fontes de aquecimento individuais e mantidos à mesma temperatura durante o ciclo térmico programado. Nos ensaios *DSC* o que se mede é a diferença de energia fornecida à amostra para mantê-la sempre à mesma temperatura do material de referência. Este método possibilita a determinação do pico de fusão/solidificação, do intervalo de temperaturas de fusão/solidificação e da entalpia de fusão/solidificação. [10] Existem principalmente dois modos de operação para a obtenção da capacidade calorífica dos materiais: o modo dinâmico que é o modo mais comum em que a taxa de aquecimento é constante; e o modo de passos isotérmicos, em que o aquecimento ocorre por passos em intervalos de temperatura. [23] De forma a ultrapassar algumas limitações da *DSC* convencional, foi desenvolvida a calorimetria diferencial de varrimento de temperatura modulada (*MDSC*) que permite, entre outras potencialidades, determinar o calor específico em função da temperatura a partir de um processo cineticamente controlado. A medição é realizada usando uma pequena modulação da temperatura na amostra, o suficiente para obter um pequeno sinal que determina o fluxo de calor. [24]

2.3.2 ANÁLISE TÉRMICA DIFERENCIAL (*DTA*)

No método por análise térmica diferencial (*DTA*), a amostra e o material de referência são submetidos à mesma programação de aquecimento, e as temperaturas da amostra e do material de referência mantêm-se iguais até que ocorra alguma alteração física ou química na amostra. Portanto, nesta técnica de ensaio mede-se a diferença de temperaturas entre a amostra e a referência em função da temperatura fornecida. [13] As mudanças na amostra, tais como a fusão e a solidificação, são registadas em gráficos de temperatura (ou tempo) e o diferencial de temperaturas entre a amostra e o material de referência.

2.3.3 MÉTODO *T-HISTORY*

O método *T-History* foi inicialmente desenvolvido por Zhang e Jiang [25] que testaram colocar amostras em tubos de ensaio equipado com termopares ligados a um *<data logger>*. As amostras eram aquecidas e arrefecidas em banhos de água por um determinado período de tempo e a partir da curva de temperatura e da curva do tempo determinavam as propriedades térmicas. Este método foi posteriormente melhorado por Hong et al. [26] e Peck et al. [27] na correção de alguns

pressupostos e na potencialização de operação. Além de apresentar resultados comparáveis às análises realizadas em *DSC* e *DTA*, este método possibilita o uso de amostras de maiores dimensões.

2.4 INCORPORAÇÃO DE PCM EM MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Os materiais de mudança de fase podem ser incorporados nos materiais de construção ou em elementos construtivos através de três métodos distintos: impregnação direta, imersão e encapsulamento. Os processos de impregnação são ambos de contacto direto com os materiais de construção. Os processos de encapsulamento evitam a interação com os materiais de construção através do macroencapsulamento ou microencapsulamento que permite um manuseamento seguro do *PCM* líquido e previne a alteração da sua composição. A incorporação através de encapsulamento de *PCM* é o método mais utilizado porque evita que afete a função dos materiais de construção. Atualmente o método mais eficaz é incorporando *PCM* microencapsulado no material de construção. [18]

2.4.1 IMPREGNAÇÃO DIRETA

A impregnação direta é o método mais simples em que o *PCM* no estado líquido (soluções aquosas) ou sólido (pó) é diretamente adicionado ao material de construção (por exemplo, betão ou gesso). Não é necessário nenhum equipamento extra, mas a incompatibilidade dos *PCM* com os materiais de construção é o maior problema desta aplicação. [19]

2.4.2 IMERSÃO

O método por imersão utiliza *PCM* derretido ou dissolvido que por capilaridade absorve os poros internos dos materiais de construção (por exemplo, betão ou material cerâmico). Quando o material seca, o *PCM* endurece no interior da estrutura porosa dos materiais. Esta técnica tem a desvantagem de ser um processo lento e de apresentar problemas de vazamento do *PCM* durante os ciclos de aquecimento e arrefecimento. [28]

2.4.3 MACROENCAPSULAMENTO

A tecnologia de macroencapsulação baseia-se no *PCM* encapsulado em recipientes: painéis, esferas, tubos, entre outros. Estes recipientes são depois incorporados no material de construção e com esta técnica os problemas de fuga podem ser evitados. As principais desvantagens são: condutibilidade térmica reduzida devido à concentração elevada de *PCM*, tendência de a solidificação ocorrer junto aos limites da cápsula, impedindo a transferência do calor acumulado pelo *PCM* para o ambiente exterior, e a necessidade de adequar os recipientes nos sistemas construtivos. [18]

Actualmente existem vários *PCM* macroencapsulados no mercado, e um dos mais bem sucedidos é o painel *CSM* (*Compact Storage Model*) da empresa alemã *Rubitherm GmbH* que incorpora no painel *PCM* da *Rubitherm* do tipo *RT* e *SP* e é feito de alumínio, com revestimento eficaz contra a corrosão. Apresenta uma dimensão 450×300 mm com uma espessura que pode variar segundo o tipo de convecção (forçada e natural) entre os 5 mm e os 27 mm. [29]

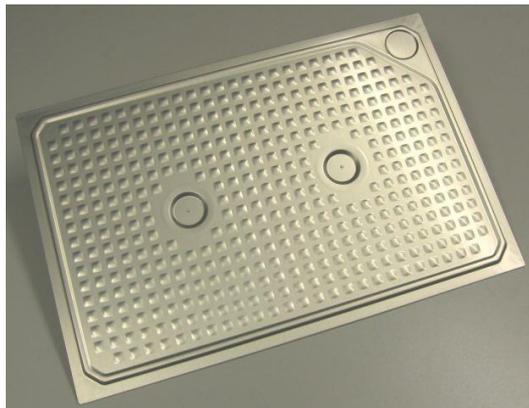


Figura 6 - Painéis *CSM*, *PCM* macroencapsulado da *Rubitherm*

A *Rubitherm* recomenda usar unicamente o *PCM* da *Rubitherm SP* (sais hidratados) neste pánel devido às parafinas (*Rubitherm RT*) serem altamente inflamáveis pelo que em caso de incêndio, os painéis *CSM* começam a fundir desencadeando a combustão da parafina. A *Rubitherm* recomenda igualmente colocar os painéis *CSM* na posição horizontal de modo a reduzir as tensões mecânicas que seriam inerentes no caso do painel ser colocado na posição vertical. [30]

2.4.4 MICROENCAPSULAMENTO

Na microencapsulação, pequenas partículas de material sólido ou líquido são colocadas entre uma película fina polimérica de elevado peso molecular para produzir microcápsulas na escala de milímetros. Esta película mantém a forma e previne o *PCM* de fugas durante o processo de mudança de fase. As microcápsulas podem ser de formato esférico, com uma parede contínua em torno do núcleo, ou podem ser assimétricas de forma variável com uma quantidade de partículas menores (material do núcleo) incorporadas em toda a microcápsula. Todos os estados da matéria podem ser microencapsulados. Isto permite que os materiais em fase líquida e gasosa possam ser tratados facilmente como sólidos. As microcápsulas toleram as mudanças de fase incluindo variações no volume do seu núcleo. As partículas revestidas podem então ser incorporadas em matérias de construção compatíveis com a película polimérica. [31]

As microcápsulas podem ser processadas como dispersão aquosa ou em pó e são possíveis com temperaturas de mudança de fase de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

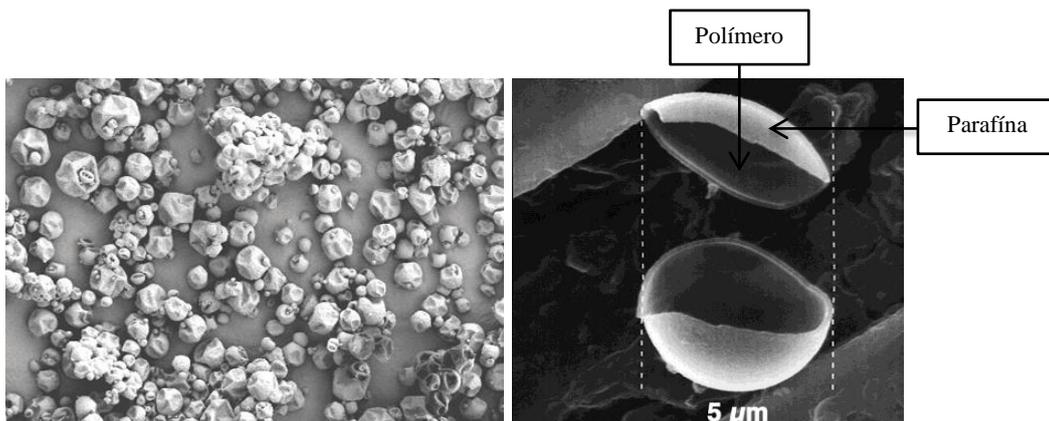


Figura 7 – *Micronal*, *PCM* microencapsulado da *BASF* [37]

Atualmente existem vários produtos comerciais de *PCM* microencapsulados, entre os quais a *Micronal* produzida pela alemã *BASF*. A unidade de produto *Micronal PCM* (Figura 7) é composta pela microcápsula, onde uma mistura de cera é encapsulada no interior do polímero em microescala, com um diâmetro de cerca de 5 μm . Este *Micronal* pode ser convenientemente incorporada em gesso, cimento ou outros materiais estruturais do edifício.

2.5 APLICAÇÕES DE PCM EM MATERIAIS OU ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Os materiais de mudança de fase aplicados em edifícios conseguem aumentar o efeito de armazenagem térmica e melhorar o conforto térmico interior. De um modo geral, um *PCM* pode ser integrado em quase todos os tipos e componentes das construções, mas as diferentes áreas de aplicação têm as suas próprias configurações e características únicas. Nesta secção são apresentados alguns casos bem sucedidos da aplicação de *PCM*, microencapsulado e macroencapsulado em materiais ou elementos construtivos através de sistemas solares passivos.

2.5.1 REVESTIMENTOS À BASE DE GESSO

A aplicação de *PCM* em revestimentos à base de gesso para paredes e tetos tem sido uma das incorporações com mais estudos realizados. Silva et al [10], estudou o desempenho de pastas de gesso contendo *PCM* em microcápsulas (0,086 e 0,12 kg m⁻²), tendo observado uma redução da temperatura máxima em cerca de 5 °C e um aumento da temperatura mínima de 1,5 °C.

Outra aplicação em pastas de gesso foi desenvolvido por Schossig et al. [39] através da construção de duas células-de-teste (Figura 8), cujas paredes foram revestidas internamente com 6 mm de gesso projectado e 40 % de *PCM* e na outra célula-de-teste não foi aplicado *PCM* para efeito de comparação. O período monitorizado com o revestimento de 6 mm registou uma temperatura interior máxima, na célula com *PCM*, de cerca de 4 °C mais baixa, sendo que esta atingida cerca de 1 hora mais tarde (desfasamento temporal). Com sombreamento, proporcionado por estores interiores, as diferenças registadas foram de apenas 2 °C. O contributo do *PCM* para o conforto térmico foi de tal forma significativo que, durante um período de três semanas, as temperaturas se situaram acima de 28 °C durante cerca de 5 horas na célula com *PCM* contra cerca de 50 horas na célula de referência.



Figura 8 – Célula-de-teste da aplicação (esquerda) e incorporação de *PCM* nas pastas de gesso (direita) [38]

2.5.2 BETÃO

Um método de aplicação em estruturas de edifícios é incorporar o *PCM* na matriz de betão. Cabeza *et al.* [32], construíram dois cubículos: um com paredes em betão convencional e outro com 5% de *PCM* (*Micronal DS 5001 X* da *BASF*, com temperatura de transição de 26 °C e calor latente de 110 kJ kg⁻¹) microencapsulado em camadas de betão com 0,12 m de espessura e foi observado a subida da temperatura mínima de 2 °C no cubículo com *PCM*. Relativamente à temperatura máxima, foi registada na parede de betão sem *PCM* 39 °C, enquanto que a parede com *PCM* atingia um valor máximo de 36 °C.



Figura 9 – Cubículos em betão com e sem *PCM* microencapsulado [32]

2.5.3 TIJOLOS CERÂMICOS

As experiências realizadas em tijolos não têm sido muitas, mas os resultados são positivos. Um desses estudos teve como o objetivo revelar o potencial de uma aplicação de *PCM* incorporado num tijolo oco. Duas paredes de tijolos de barro foram construídas com *PCM* macroencapsulado (*RT-18*) e outro sem *PCM*. As paredes foram testadas através de uma câmara climática, e foi alcançada uma diminuição da amplitude térmica de 5 °C na parede de tijolos com *PCM*. [33]

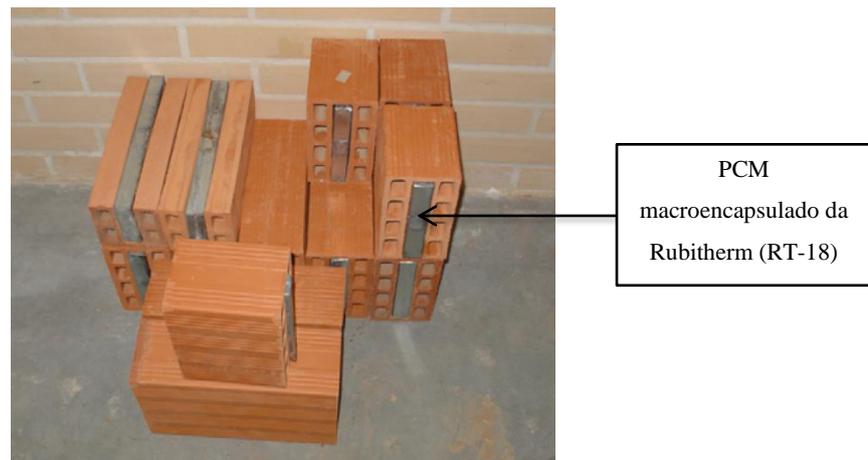


Figura 10 – Incorporação de PCM macroencapsulado em tijolos [33]

2.5.4 LADRILHOS CERÂMICOS

Um estudo efetuado sobre a incorporação de *PCM* em ladrilhos cerâmicos teve como objetivo a colocação de um recipiente metálico preenchido com uma mistura eutética de parafina com um ponto de fusão de 23°C na parte inferior do ladrilho cerâmico. Os resultados mostraram o potencial termorregulador deste sistema de pavimentação, obtendo-se na superfície do ladrilho com *PCM* valores entre 1,5 °C e 2,8 °C acima da temperatura do ladrilho sem *PCM*. [34]

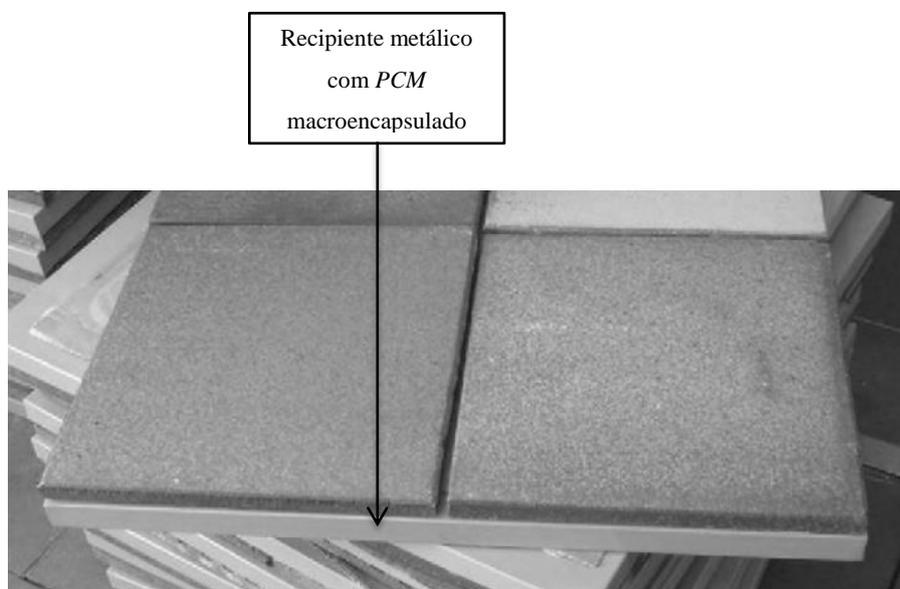


Figura 11 – Aplicação de PCM macroencapsulado em ladrilhos [35]

3 PROCEDIMENTOS DE ESTUDO DO MATERIAL COMPÓSITO E DA CÉLULA-DE-TESTE

O trabalho experimental consiste na avaliação do desempenho térmico de lajetas de argamassa de revestimento interior com *PCM* (parafínico microencapsulado) aplicado no pavimento de uma célula-de-teste.

3.1 CÉLULA-DE-TESTE

A célula-de-teste encontra-se instalada no Campus da Universidade de Aveiro, perto da Ponte Pedonal sobre o Estreito de S. Pedro, com as coordenadas GPS 40° 62.809'N e 8° 65.6594'W, orientada a Sul Real (SR). Esta orientação acenta nos princípios bioclimáticos de um sistema solar passivo que permite à célula-de-teste no Verão, devido à posição mais elevada do Sol, maximizar os ganhos solares passivos e provocar maiores zonas de sombreamento nos edifícios, enquanto que no Inverno, o Sol encontra-se mais baixo e assim é potenciada a incidência da radiação solar.

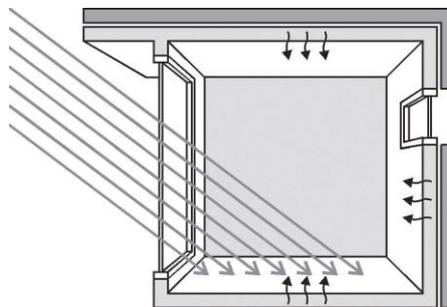


Figura 12 – Sistema solar passivo de ganho direto

Num sistema solar passivo, a energia solar é captada pelos elementos arquitetónicos e flui no sistema por meios naturais através da radiação, difusão e convecção natural. A eficiência destes sistemas está em primeira análise dependente da correta orientação e posicionamento do edifício relativamente ao Sol, pelo que o conhecimento da incidência da radiação em função da estação do ano é fundamental. [22] O trabalho experimental realizado concretizou-se na estação fria, e o sistema solar passivo utilizado é baseado na estratégia de ganho directo (Figura 12) que tem como princípios fundamentais a maximização da captura do Sol no Inverno através de vãos envidraçados bem orientados e dimensionados, aos quais se associam elementos massivos, ou seja, massa

térmica interior que permitirá o armazenamento da energia solar e sua utilização em horas posteriores.



Figura 13 – Célula-de-teste instalada na Universidade de Aveiro orientada a Sul

A célula-de-teste possui dois compartimentos, com as mesmas dimensões, designados de compartimento de referência e compartimento experimental, e não se encontra instalada nenhuma pala de sombreamento (proteção solar) nem há realização de ventilação natural, ao contrário do que preconiza um sistema solar passivo de ganho directo, prejudicando assim a optimização de conforto ambiente no interior dos compartimentos. A estrutura da célula-de-teste tem uma forma paralelepípedica com 7 m de comprimento, 2,35 m de largura e 2,57 m de altura, que equivale a uma área total de $16,45 \text{ m}^2$. O volume interior de cada compartimento é de $15,7 \text{ m}^3$.

3.1.1 CARACTERIZAÇÃO E CONSTITUIÇÃO DA CÉLULA-DE-TESTE

O conhecimento dos diferentes materiais constituintes da célula-de-teste é uma mais valia por auxiliar a nossa compreensão do efeito dos elementos construtivos no conforto térmico interior da célula-de-teste. Nesta secção é realizada uma caracterização dos elementos estruturais verticais, paredes, parede divisória, pavimento, fachada norte/sul e cobertura da célula-de-teste.

3.1.1.1 ELEMENTOS ESTRUTURAIS VERTICAIS

Os pilares da célula de teste são formados por perfis quinados em aço galvanizado de 2 mm de espessura e contêm no interior um tubo redondo em PVC, com 70 mm de diâmetro e 2,5 mm de espessura, destinado ao escoamento das águas da cobertura. No interior da célula, os pilares são rematados por uma chapa lacada.

3.1.1.2 PAREDES

As paredes da célula-de-teste são formadas por painel *sandwich* com 40 mm de espessura, formado por chapa de aço pré-lacada sobre base galvanizada em ambas as faces e isolamento intermédio (térmico e acústico) formado à base de resinas de poliuretano auto-extinguível. O painel *sandwich* apresenta um coeficiente de transferência térmica de $0,51 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e possui boa resistência à humidade.

3.1.1.3 PAREDE DIVISÓRIA

A composição da parede interna (divisória) que divide os dois compartimentos é igual às restantes paredes da célula-de-teste. Nesta parede divisória foram aplicadas, sobre a sua superfície, placas de poliestireno expandido sem encaixe (EPS 100) com 30 mm de espessura, revestindo toda a área da parede. Esta placa de isolamento possui uma condutibilidade térmica de $0,036 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e resistência térmica de $0,75 \text{ m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C W}^{-1}$. A inclusão deste material teve como finalidade a redução da transmissão térmica entre compartimentos e assim obter resultados mais fiáveis na análise do comportamento térmico de cada compartimento. Devido às elevadas temperaturas alcançadas no interior dos compartimentos, foram colocadas folhas de alumínio nas bordas das placas de isolamento junto ao vão envidraçado.

3.1.1.4 PAVIMENTO

O pavimento da célula-de-teste é constituído, na camada inicial, por perfis de chapas galvanizadas que sustentam uma carga repartida de forma uniforme 250 kg m^{-2} . Agregada a esta camada de chapa galvanizada existe uma camada isolante de estrado fenólico com 18 mm de espessura e uma tela de Vinílico *Traviata 6026* utilizada para revestimento do piso. A camada isolante fenólica possui uma condutibilidade térmica de $0,30 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e calor específico de $1700 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ enquanto que a tela vinílica apresenta uma condutibilidade térmica de $0,17 \text{ W m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e calor específico de $900 \text{ J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

3.1.1.5 FACHADA NORTE E SUL

A face da célula-de-teste orientada a Norte é constituída por um painel *sandwich*, que inclui duas portas em aço lacado a branco, de dimensões 900×2010 mm, que dão acesso a cada um dos compartimentos.

A face da célula-de-teste orientada a Sul é composta por duas montras de caixilharia em alumínio lacado a branco (1800×2280 mm) com vidro duplo incolor $5 + (12) + 5$ mm, sem proteção solar.

Vidro	Transmissão luminosa (%)	Coefficiente U	Fator solar (%)	Coefficiente de Sombreamento (%)
Vidro duplo incolor 5+(12)+5 mm	80	2,8	0,74	0,85

Tabela 10 – Propriedades do vão envidraçado da célula-de-teste

3.1.1.6 COBERTURA

A cobertura da célula de teste é formada por uma camada inferior em teto falso constituído por chapa perfilada galvanizada em poliéster e silicone branco *pirinéu* 1006 com 0,05 mm de espessura. A camada superior da cobertura é de chapa galvanizada com perfis conformados a frio sobre a qual está sobreposto um conjunto de tubos galvanizados com dimensões de $40 \times 30 \times 1,5$ mm e onde está fixada uma chapa perfilada do tipo HT-30 com 0,6 mm de espessura. Estas duas camadas estão separadas por fibra de vidro com lâmina anti-humidade (espessura de 80 mm) de forma a aumentar a capacidade de isolamento da cobertura.

3.2 CARATERIZAÇÃO DA ARGAMASSA COM *PCM*

3.2.1 ARGAMASSA DE REVESTIMENTO INTERIOR COM *PCM*

A argamassa de revestimento interior com *PCM* utilizada no trabalho experimental foi previamente desenvolvida pela Eng.^a Ana Vaz Sá. [35] Nesse trabalho foram elaboradas várias formulações de argamassa com *PCM* incorporado, até à obtenção de uma formulação sem fissuração aparente. A argamassa desenvolvida obedece aos requisitos da normalização europeia vigente EN998-1.

Material	Proporção da mistura em relação à massa (%)
Cimento (ligante hidráulico)	10,00
Cal (ligante hidráulico)	5,00
Carbonato de cálcio (agregado industrial)	57,65
Resinas (VAE, Tg = 15°C)	2,00
Fibras (PAN, com 6 mm)	0,20
Fibras (Pó de alumínio)	0,10
Derivados à base de celulose ($\mu = 2000$ a 3000 mPa.s 2 %; 20 °C)	0,05
PCM (<i>Micronal DS5040 X</i>)	25,00

Tabela 11 – Materiais constituintes da argamassa com PCM utilizada no trabalho experimental

Neste trabalho foram utilizados os mesmos materiais constituintes da formulação (Tabela 11) desenvolvida pela Eng.^a Ana Vaz Sá, excepto o PCM, que ao invés do *Micronal DS5008 X* foi usado o mais atual *Micronal DS5040 X* da mesma gama de temperaturas.

3.2.2 MICRONAL DS5040 X

O PCM *Micronal* da *BASF* cumpre os rigorosos requisitos da *RAL-PCM*, associação reguladora da qualidade dos materiais de mudança de fase, após avaliação dos seguintes critérios: quantidade de calor armazenada em função da temperatura, reprodutibilidade cíclica do processo de armazenamento (revelou não sofrer qualquer diminuição do seu desempenho em mais de 10000 ciclos) e a condutibilidade térmica. A microcápsula *Micronal* tem cerca de 5 μm e é feita de polímetil-metacrilato (*PMMA*), um termoplástico transparente leve e de alta resistência mais conhecido por acrílico (plástico). [26]



Figura 14 – *Micronal DS5040 X*

Esta microcápsula contém no seu núcleo uma mistura especial de parafínicos e permite a alteração de 10% do seu volume durante a transição de fase da parafina sem qualquer perda ou vazamento de material. É compatível com a maioria dos materiais de revestimento interior, como cimentícios ou madeira. [26]

	<i>Micronal DS5040 X</i>
Tipo	Pó
Ponto de fusão (aproximado) [°C]	23
Faixa de operação [°C]	10 - 30
Capacidade de armazenamento total (aproximado) [kJ kg ⁻¹]	135
Capacidade de calor latente (aproximado) [kJ kg ⁻¹]	100
Densidade aparente [kg m ⁻³]	250 - 350

Tabela 12 – Propriedades do *Micronal DS5040 X* segundo o fabricante

3.3 PRODUÇÃO DAS LAJETAS DE ARGAMASSA COM PCM

A produção da argamassa com *PCM* em lajeta possibilita uma acessível aplicação deste material no pavimento da célula-de-teste. Esta produção foi realizada no laboratório da *Saint-Gobain Weber*, empresa dedicada ao desenvolvimento de argamassas industriais para o mercado da construção e renovação, localizada na Zona Industrial de Taboeira em Aveiro.

No início da produção foram colocados numa misturadora todos os materiais constituintes da argamassa e o *PCM* nas devidas proporções e posteriormente foi depositada água numa proporção de $0,34 \text{ L kg}^{-1}$ de argamassa.



Figura 15 – Mistura dos materiais constituintes da argamassa (esquerda) e amassadura da argamassa com PCM através da misturadora (direita)

A primeira mistura procedeu-se de forma lenta durante 30 segundos, desligou-se a misturadora e acomodou-se o material com uma pá, repousando depois durante 1 minuto. Nova mistura à mesma velocidade durante mais um minuto. Após a amassadura se encontrar finalizada, deixou-se permanecer o material em repouso durante 10 minutos.

3.3.1 MOLDE

A formação de lajetas 30×30 com 2 cm de espessura foi realizada através de dois moldes 100×100 cm com 1 cm de espessura cada, com um contraplacado de 5 mm a servir de base. Entre os dois moldes foi colocada fibra de vidro de forma a conferir mais consistência à lajeta.

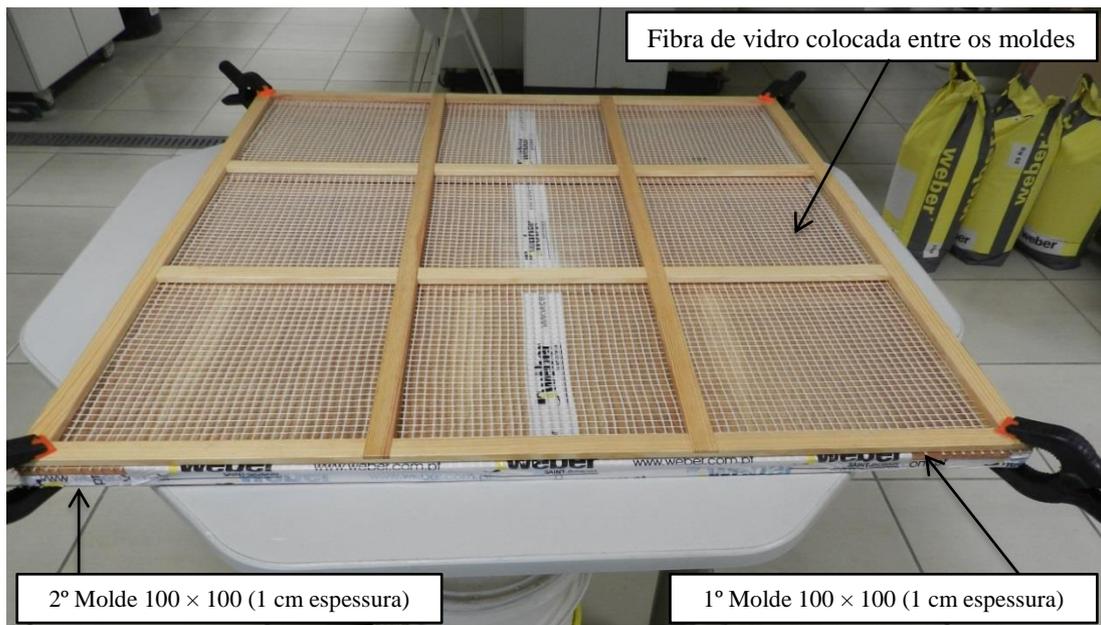


Figura 16 – Molde construído para produção das lajetas

A área total do pavimento em cada compartimento é de $7,14 \text{ m}^2$ e a área no compartimento experimental que ficou sem preenchimento do material composto é de apenas $0,17 \text{ m}^2$.

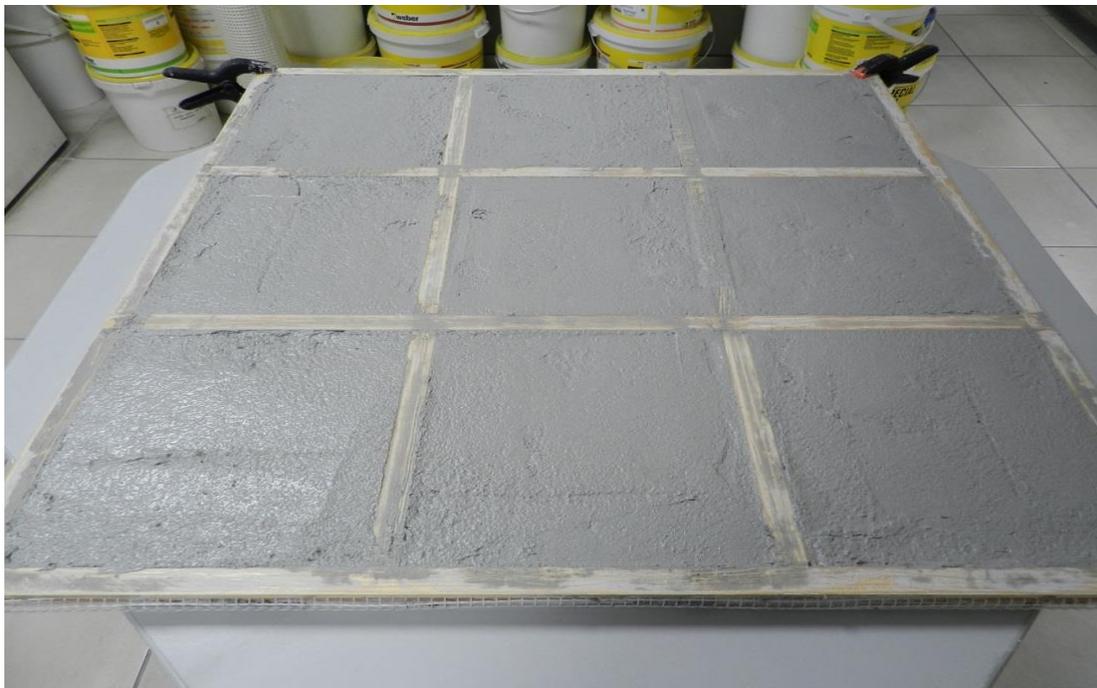


Figura 17 – Aplicação da mistura de argamassa com *PCM*



Figura 18 – Aspecto final da produção das lajetas no molde

As lajetas não ficaram totalmente preenchidas no seu molde de 30×30 cm, existindo alguns espaços na parte inferior sem material devido à amortização que a fibra de vidro, colocada no meio do molde, provocou sobre o material. Procedeu-se à pesagem de todas as lajetas e foi determinado um peso médio de 1,658 kg. Sabendo que a massa volúmica do material é de 1173 kg m^{-3} (subsecção 3.4.1) é possível afirmar que as lajetas produzidas correspondem a uma espessura de 1,57 cm num molde de 30×30 cm totalmente preenchido com o material compósito.



Figura 19 – Lajeta produzida parte frontal (esquerda); Lajeta produzida parte lateral (centro); Lajeta produzida parte inferior (direita)

3.3.2 PINTURA DAS LAJETAS

A quantidade de radiação solar absorvida tem relação directa com a cor de revestimento dos materiais. Com o objetivo de maximizar a absorção solar, foram pintadas todas as lajetas produzidas com tinta preta CIN *Vinylmatt*. Esta tinta aquosa de aspecto mate profundo é formulada à base de dispersão vinílica, vulgarmente utilizada na construção civil nomeadamente em estuques sintéticos, estanhados, reboco, betão, tijolo entre outros.



Figura 20 – Lajeta após pintura com tinta preta vinílica

A tinta CIN *Vinylmatt* apresenta um rendimento prático de 11-15 m² L⁻¹ por demão devendo ser aplicada através de rolo anti-gota, trincha ou pistola *airless*. O tempo de secagem deverá ser de 3 a 4 horas a 20 °C e 60 °C de humidade relativa inferior a 80 %.

Na aplicação da tinta, procedeu-se inicialmente à limpeza da superfície e depois a tinta foi impregnada directamente com uma trincha, sem qualquer lixagem sobre a superfície superior e sem colocação de primário. A aplicação decorreu com uma demão lenta e rigorosa de forma a preencher toda a superfície rugosa superior e lateral da lajeta. Não se verificaram anomalias no comportamento de aderência da tinta e após aplicação em todas as lajetas, estas permaneceram durante uma semana na cave do Laboratório de Civil da Universidade de Aveiro antes de serem transportadas para a célula-de-teste.

3.4 ANÁLISES TÉRMICAS

3.4.1 CONDUTIBILIDADE TÉRMICA

A densidade seca aparente da argamassa com *PCM* foi determinada a partir da massa e do volume de um provete de argamassa endurecida com *PCM* através da expressão da equação 3.1.

$$\text{Densidade seca aparente } (\rho) = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

Onde,

m = Massa do provete [kg]

v = Volume geométrico do provete [m^3]

A condutibilidade térmica foi medida no laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro através do instrumento Deltalab ET-100, em que um provete é colocado sobre uma superfície horizontal que vai aquecer uniformemente uma das superfícies da amostra.

Argamassa endurecida	
Propriedade	Resultado
Densidade seca aparente [kg m^{-3}]	1173
Condutibilidade térmica [$\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$]	0,306

Tabela 13 – Resultados das medições efetuadas sobre a argamassa endurecida

O valor da condutibilidade térmica foi determinado através da expressão da equação 3.2.

$$\lambda = \frac{P L}{A \Delta T} \quad (3.2)$$

Onde,

λ = Condutibilidade térmica [$\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$]

P = Potência de aquecimento [W]

L = Espessura da amostra [m]

A = Área exposta [m^2]

ΔT = Diferença de temperatura entre os dois lados da amostra [°C]

3.4.2 ENSAIO *DSC* AO *PCM*

A realização de ensaios de calorimetria diferencial de varrimento (*DSC*), conforme referido na subsecção 2.3.1, é primordial na determinação do intervalo de temperaturas de fusão/solidificação de materiais.

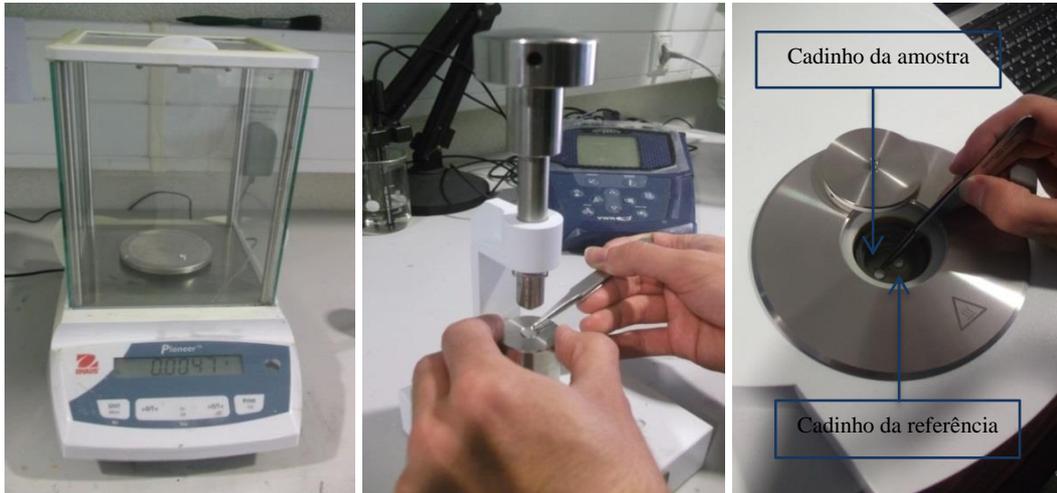


Figura 21 – Ensaio *DSC*: Pesagem da amostra (esquerda); encapsulamento da amostra (centro) e colocação das amostras na *DSC* (direita)

O primeiro ensaio foi realizado no Departamento de Mecânica da Universidade de Aveiro na *PerkinElmer DSC 4000*. Esta *DSC* foi calibrada com índio (temperatura de fusão de 156,6 °C) e com salicilato de fenila (temperatura de fusão de 41,79 °C) e após encapsulamento de uma amostra do *PCM* em estudo (*Micronal DS5040 X*) com 7,60 mg, submeteu-se a um ciclo de aquecimento/arrefecimento entre 10 °C e 40 °C com variação programada de 2 °C min⁻¹.

O ensaio efetuado traduz a diferença entre o calor fornecido à amostra de *PCM* e à amostra do material de referência para mantê-los à mesma temperatura.

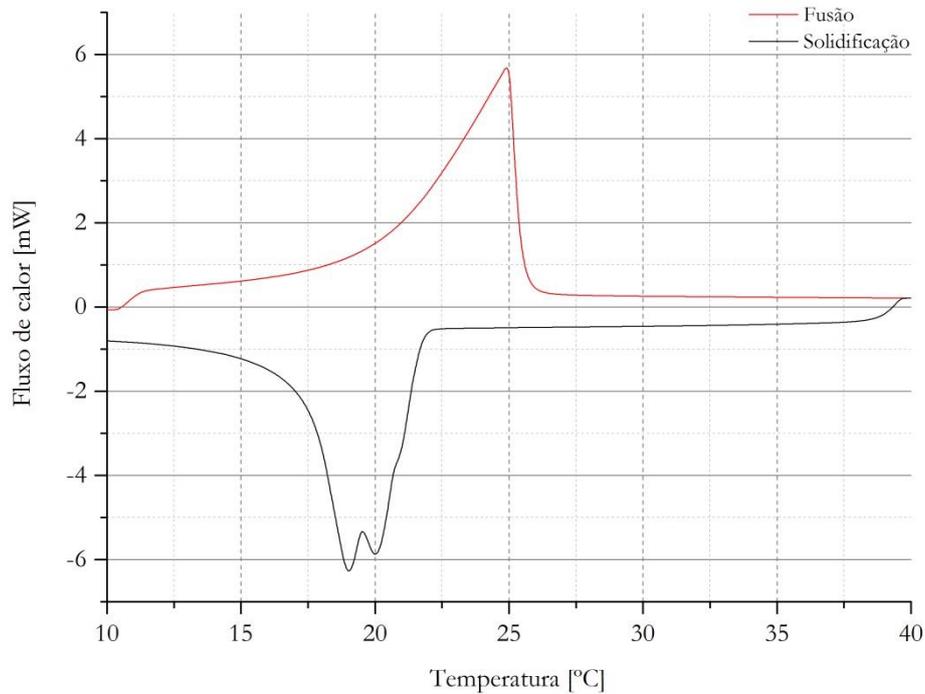


Figura 22 – Resultado do ensaio DSC realizado a uma amostra do PCM (Micronal DS5040 X)

O ensaio *DSC* revela que o *Micronal DS5040 X* apresenta uma gama de temperaturas de fusão alargada, de 20,09 °C a 25,68 °C e o pico de fusão ocorre a 24,90 °C. O pico de fusão representa a mudança de fase completa, ou seja, a temperatura a partir da qual todo o material passou de sólido a líquido.

A curva incongruente da solidificação é explicada, segundo o fabricante, pelas misturas de vários tipos de parafínicos de elevada pureza que o *Micronal DS5040 X* possui, podendo levar à separação de picos através da análise *DSC*.

3.4.3 ENSAIO *MDSC* À ARGAMASSA COM *PCM*

Os ensaios sobre amostras de argamassa com *PCM* foram realizados utilizando um *Modulated Differential Scanning Calorimeter (MDSC)*, equipamento da *TA Instruments* modelo *Q100*, nas instalações do laboratório do Departamento de Química da Faculdade de Engenharia da Universidade de Coimbra, devido a esta extensão de *DSC* ter a capacidade de medir o calor específico em função da temperatura. O equipamento foi calibrado a 2 °C min^{-1} , utilizando índio e padrões de safira (temperatura de fusão de 2030 °C) e um período de modulação de 120 segundos, na análise de fluxo de calor e calor específico.

Os testes realizados incidiram sobre duas amostras distintas:

- ❖ Argamassa não endurecida com o *PCM* (ArgN), ou seja, todos os materiais constituintes da argamassa com *PCM* antes da mistura de água;
- ❖ Argamassa endurecida com o *PCM* (ArgEND), ou seja, o material após a mistura de água e a secagem. Para a realização do teste sobre uma amostra deste material foi utilizado um almofariz no esmagamento que possibilitou a conversão do material em pó.

A realização de ensaios sobre estas amostras tem o intuito de analisar as propriedades térmicas antes e após a formação da argamassa endurecida.

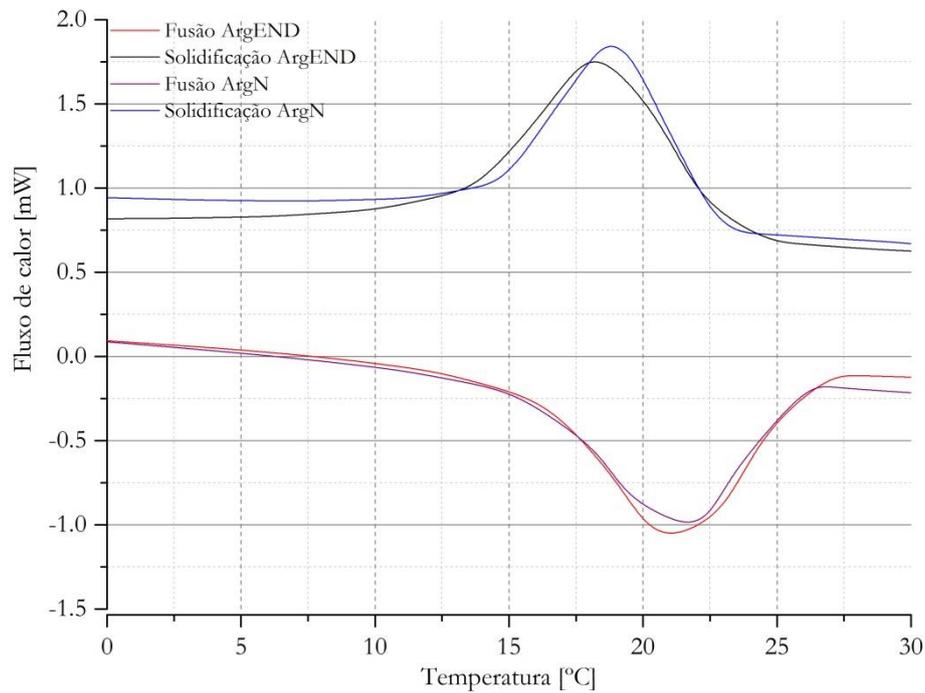


Figura 25 – Resultado do ensaio MDSC sobre as amostras de argamassa não endurecida com PCM e de argamassa endurecida com PCM (fluxo de calor)

A análise do fluxo de calor permitiu identificar a temperatura do pico de fusão e solidificação da amostra ArgN que é de 21,65 °C e 18,8 °C respectivamente.

A temperatura do pico de fusão e solidificação da amostra ArgEND é de 21,00 °C e 18,20 °C respectivamente. Em relação às gamas de temperatura de fusão e solidificação, na amostra ArgN é de 16,03 °C – 25,52 °C e 14,15 °C – 22,75 °C respectivamente, e na amostra ArgEND é de 15,93 °C – 25,92 °C e 13,13 °C – 23,12 °C respectivamente.

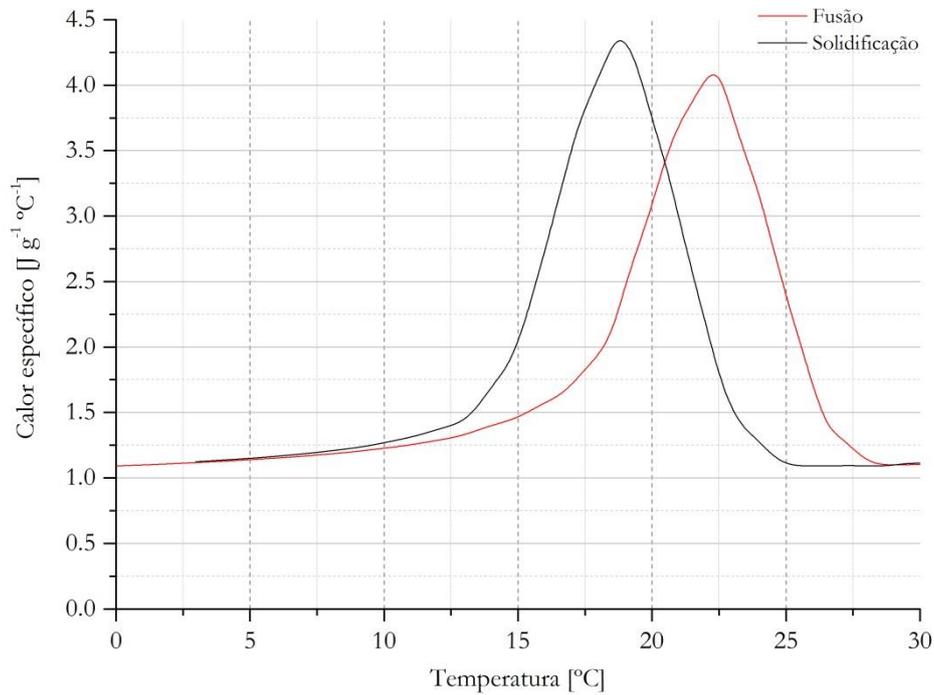


Figura 23 – Resultado do ensaio *MDSC* sobre a amostra de argamassa não endurecida com *PCM* (calor específico)

O pico do calor específico no aquecimento (fusão) dá-se à temperatura de 22,3 °C alcançando 4,13 J g⁻¹ °C⁻¹ enquanto que pico do calor específico no arrefecimento (solidificação) ocorre a 18,9 °C atingindo 4,36 J g⁻¹ °C⁻¹.

No teste sobre uma amostra de argamassa endurecida com *PCM*, o pico do calor específico no aquecimento (fusão) dá-se à temperatura de 22,9 °C alcançando 2,07 J g⁻¹ °C⁻¹ enquanto que pico do calor específico no arrefecimento (solidificação) ocorre a 17,8 °C atingindo 2,37 J g⁻¹ °C⁻¹.

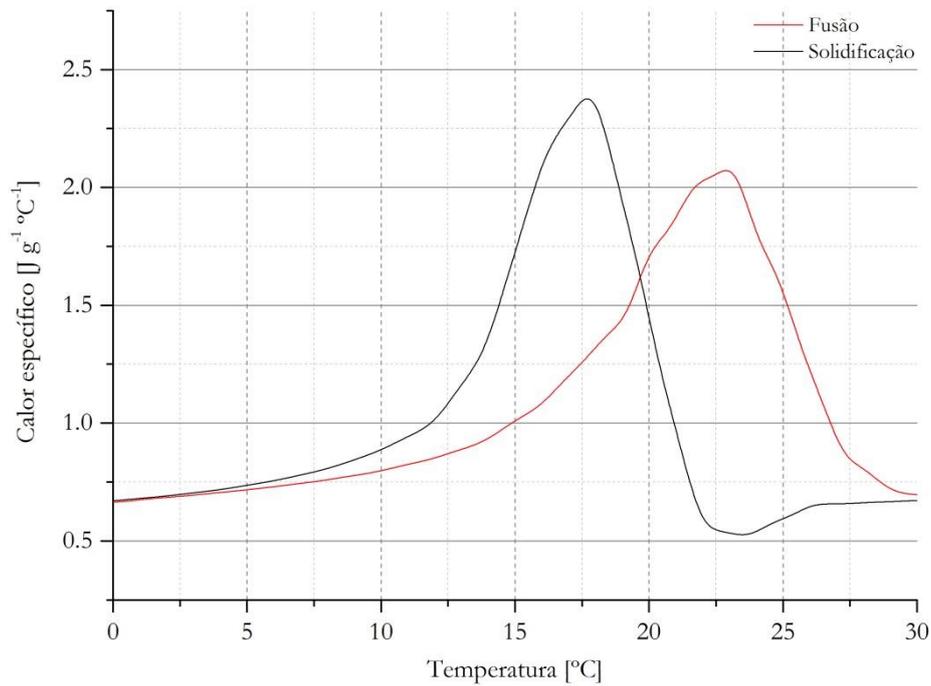


Figura 24 - Resultado do ensaio *MDSC* sobre a amostra de argamassa endurecida com *PCM* (calor específico)

No teste sobre uma amostra de argamassa endurecida com *PCM*, o pico do calor específico no aquecimento (fusão) dá-se à temperatura de $22,9 \text{ } ^\circ\text{C}$ alcançando $2,07 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ enquanto que pico do calor específico no arrefecimento (solidificação) ocorre a $17,8 \text{ } ^\circ\text{C}$ atingindo $2,37 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

A medição do calor específico sobre as duas amostras, através dos ensaios de *MDSC*, possibilita a determinação da entalpia em função da temperatura. Esta resolução permitirá uma avaliação mais rigorosa da entalpia de mudança de fase das amostras e posteriormente será útil para um trabalho de simulação energética.

Começando pela definição da capacidade calorífica para um processo a pressão constante:

$$C_P = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_P = \left(\frac{dH}{dT} \right)_P \quad (3.3)$$

A partir da expressão da capacidade calorífica a pressão constante, temos:

$$dH = C_P dT \quad (3.4)$$

Integrando entre dois limites de temperatura, obtemos:

$$h(T) = \int_{T_0}^T C_P(t) dT \quad (3.5)$$

Os resultados da equação 3.5 são os valores da entalpia em função de um intervalo de temperatura do calor específico (Figura 25 e Figura 26)

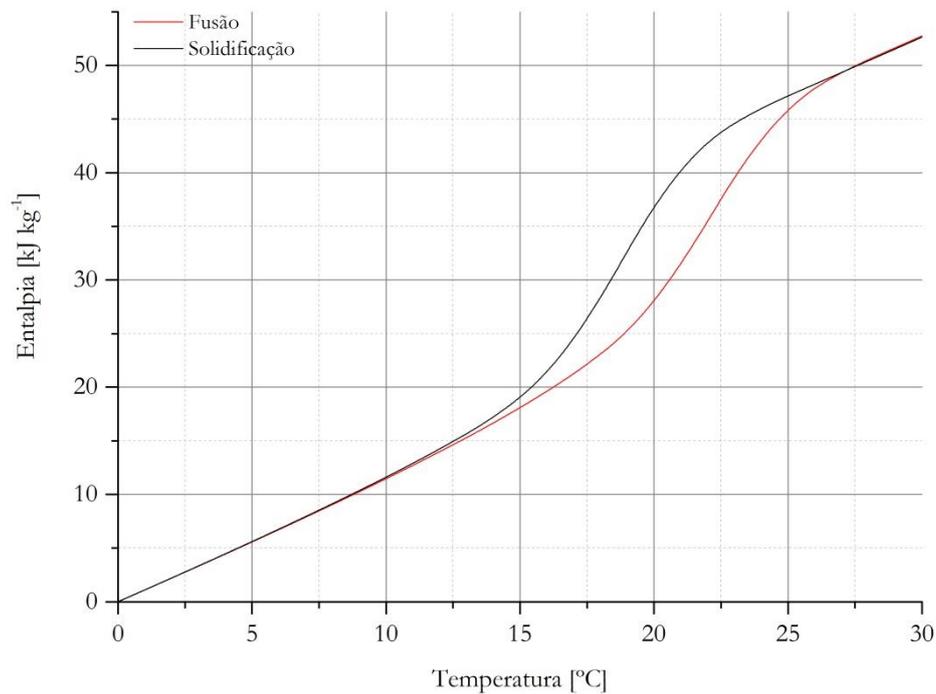


Figura 25 – Determinação da entalpia em função da temperatura da amostra de argamassa não endurecida com PCM

A entalpia de fusão da amostra de ArgN e ArgEND é, respetivamente, de $27,28 \text{ kJ kg}^{-1}$ e $15,13 \text{ kJ kg}^{-1}$.

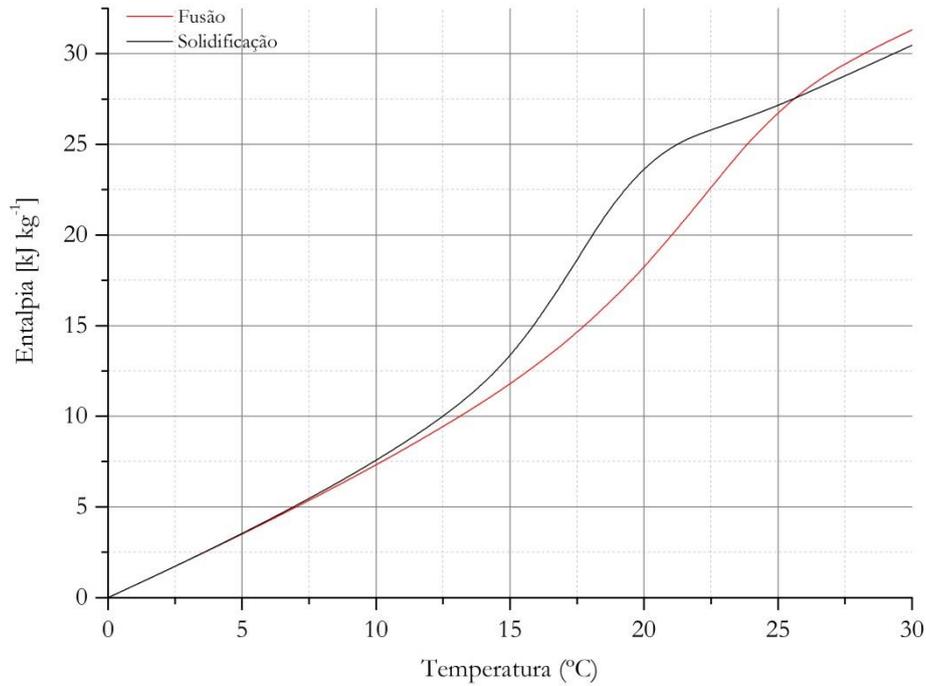


Figura 26 – Determinação da entalpia em função da temperatura da amostra de argamassa endurecida com PCM

A entalpia de solidificação (libertação de energia) da amostra de ArgN e ArgEND é, respetivamente, $26,71 \text{ kJ kg}^{-1}$ e $14,22 \text{ kJ kg}^{-1}$.

3.4.4 ANÁLISE AOS RESULTADOS DOS ENSAIOS *DSC* E *MDSC*

Os resultados obtidos nos ensaios *DSC* e *MDSC* estão resumidos na Tabela 14. Os valores considerados dos picos de fusão e solidificação e do intervalo de temperaturas de fusão e solidificação foram obtidos através da análise do fluxo de calor dos ensaios *DSC* e *MDSC*.

	<i>PCM</i>	ArgN	ArgEND
Tipo de ensaio	<i>DSC</i>	<i>MDSC</i>	<i>MDSC</i>
Amostra [mg]	7,60	7,62	9,68
Velocidade [$^{\circ}\text{C min}^{-1}$]	2	2	2
Calibração	Salicilato de fenila e Índio	Safira e Índio	Safira e Índio
Pico de fusão [$^{\circ}\text{C}$]	24,90	21,65	21,00
Pico de solidificação [$^{\circ}\text{C}$]	19,03	18,80	18,20
Δ Temperatura de fusão [$^{\circ}\text{C}$]	20,09 - 25,68	16,03 - 25,52	15,93 - 25,92
Δ Temperatura de solidificação [$^{\circ}\text{C}$]	17,03 - 21,54	14,15 - 22,75	13,13 - 23,12
C_p sólido (10 $^{\circ}\text{C}$) [$\text{J g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$]	-	1,228	0,810
C_p líquido (30 $^{\circ}\text{C}$) [$\text{J g}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$]	-	1,102	0,707
Entalpia de fusão [kJ kg^{-1}]	-	27,28	15,13
Entalpia de solidificação [kJ kg^{-1}]	-	26,71	14,22
Calor específico volumétrico (ρC_p) [$\text{kJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$]	-	-	950,13
Efusividade térmica (\mathcal{E}) [$\text{kJ m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \text{ s}^{-1/2}$]	-	-	0,54

Tabela 14 – Resultados dos ensaios *DSC* e *MDSC*

A efusividade térmica (\mathcal{E}) [$\text{J m}^{-2} \text{°C}^{-1} \text{s}^{-1/2}$], expressa a capacidade de o material absorver ou libertar energia térmica (calor) e é obtido segundo a expressão da equação 3.6.

$$\mathcal{E} = \sqrt{\lambda \rho C_p} \quad (3.6)$$

Onde,

λ = Condutibilidade térmica [$\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$]

ρ = Densidade seca aparente [kg m^{-3}]

C_p = Calor específico do material [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]

O intervalo de temperaturas de fusão e solidificação e a temperatura do pico de fusão e solidificação entre as amostras ArgN e ArgEND são similares, ao contrário das propriedades de calor específico e entalpia que, segundo a análise realizada às amostras recolhidas, não foram conservadas. O resultado da entalpia obtido na amostra ArgN encontra-se dentro do preconizado pelo fabricante, considerando que a amostra contém 25 % de *PCM* e a entalpia de fusão do *PCM* é $\cong 100 \text{ kJ kg}^{-1}$. No entanto, segundo Barreneche *et al.* [36], existe um grau de incerteza associado à entalpia obtida nos testes *DSC* entre 10 – 41 % em relação aos dados do fabricante, sustentando ainda que a realização de testes *DSC* a uma velocidade de 2 °C min^{-1} resulta em maiores incertezas do que a velocidades mais baixas. Portanto, dever-se-á sempre que possível efetuar ensaios *DSC* a $0,05 \text{ °C min}^{-1}$ por resultar em menor erro.

3.5 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados foi realizada através de equipamentos de medição da temperatura, humidade relativa, radiação solar e fluxo de calor, estrategicamente posicionados no interior e exterior da célula-de-teste. Os dados monitorizados pelos módulos recetores de aquisição de dados através de um *software* dedicado, possibilitaram o armazenamento da informação para posterior análise.

3.5.1 SENSORES

O equipamento utilizado na medição da radiação solar global (W m^{-2}) foi o piranómetro *LP PYRA 03* de 2ª classe da *Delta Ohm* com sensibilidade típica de $10 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^{-2}$, que cumpre os padrões ISO 9060 e atende aos requisitos definidos pela *World Meteorological Organization (WMO)*. Este piranómetro, que foi instalado sobre a cobertura da célula de teste, é concebido para qualquer condição climática e adequado para instalação em campo.

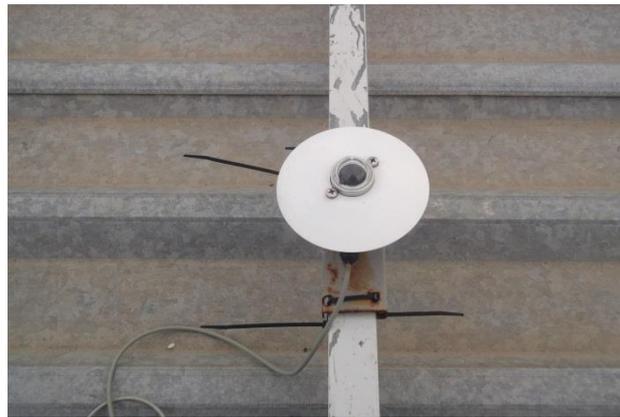


Figura 27 - Colocação do piranómetro *LP PYRA* na cobertura da célula de teste

As medições da temperatura exterior e humidade relativa exterior foram realizadas através da sonda *HD 9008 TR* que possui um sensor capacitivo de humidade do tipo *H6100* e um sensor de temperatura (*PT100*), montados na extremidade de um tubo plástico. A sonda foi colocada no exterior numa estrutura metálica sobre a cobertura da célula-de-teste e de forma a evitar que as correntes de ar, radiação solar e chuva interfiram nos resultados foi instalado um suporte com 12 anéis da *Delta Ohm*.



Figura 28 - Colocação da sonda *HD 9008 TR* numa estrutura metálica da célula de teste

A sonda *JUMO 907021/21* são transdutores desenvolvidos especialmente para aplicações AVAC, e possuem um sensor de humidade capacitivo (erro de medição a 45% de HR é tipicamente de -0,05% HR/°C) e um sensor de temperatura *PT100* (classe tolerância “A”). Em cada compartimento foi colocado junto à parede Norte uma sonda *JUMO 907021/21*, responsável pela determinação da humidade relativa e da temperatura interior. Infelizmente não foi possível adquirir dados da temperatura numa das sondas, e por isso apenas os resultados da humidade relativa foram considerados nas monitorizações efetuadas.

Os fluxímetros *Hukseflux HFP01* foram utilizados na determinação do fluxo de calor de superfície (pode ser colocado em solos, paredes e envelope das edificações) no interior dos compartimentos da célula-de-teste. O fluxo de calor é definido como a taxa de transferência de calor que atravessa um determinado material por unidade de área. Este fluxímetro possui um corpo de cerâmica-plástico que mantém a resistência térmica baixa. A margem de erro é de $\pm 20\%$ em relação a uma gama de condutibilidade térmica de $0,1-1,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (de areia seca para areia saturada de água) no intervalo de temperatura de -30°C a 70°C .



Figura 29 - Colocação do fluxímetro *Hukseflux HFP01* sobre o pavimento preenchido de lajetas de argamassa com PCM

A medição da temperatura interior em pontos estratégicos da célula de teste foi efetuada através de sondas *PT100*. As *PT100* são sensores resistivos, designados também de termorresistências (*Resistive Temperature Detectors - RTD*), que determinam a temperatura do meio ambiente através da variação da resistência elétrica da platina (material estável e linear com elevado coeficiente de temperatura) em relação à sua temperatura. A termorresistência de platina a 0 °C apresenta uma resistência de 100 Ω e a sensibilidade ronda os 0,38 Ω °C⁻¹. As *PT100* utilizadas possuem bolbos de classe de tolerância “A” e de forma a minimizar os erros de medição é utilizado o método de medição de três fios (compensação simples) que permite compensar a sensibilidade das resistências dos fios de ligação e assim garantir maior precisão das medições.

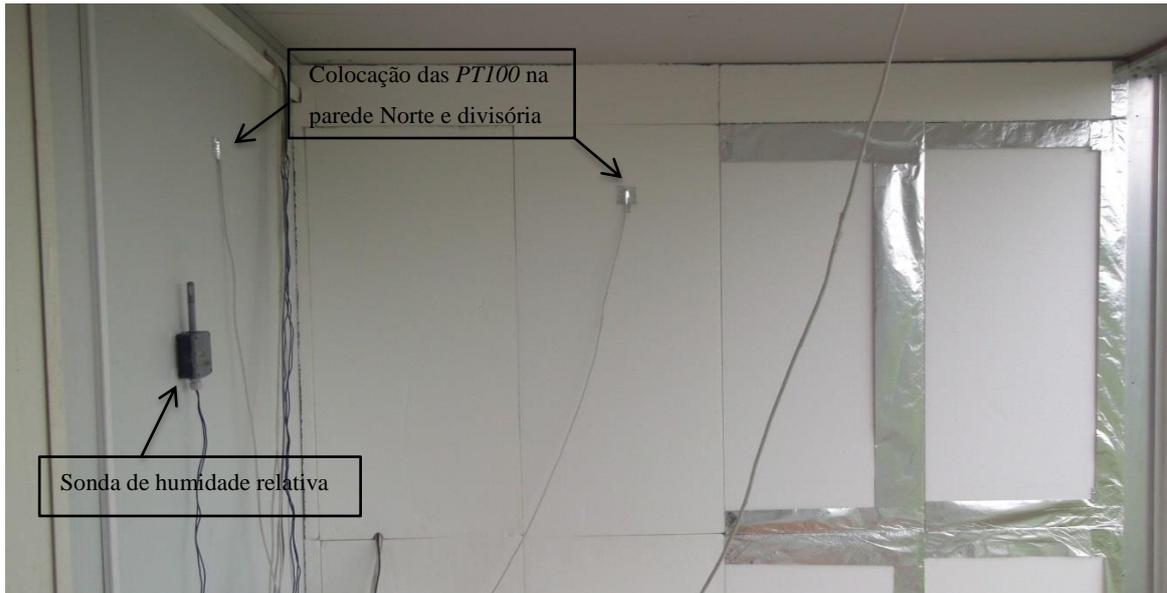


Figura 30 - Colocação da sonda de temperatura e umidade relativa interior *JUMO 907021/21* e de algumas sondas de temperatura *PT100* no compartimento de referência

A medição da temperatura interior foi efetuada a partir de 4 sondas *PT100* em cada compartimento da célula-de-teste colocadas, estrategicamente, no tecto, na parte superior e inferior da parede Norte e na parede divisória. As pontas das sondas *PT100* não foram colocadas em contacto com a superfície (ao contrário do que demonstra a Figura 30), mas dobradas para o interior da célula-de-teste. A determinação da temperatura interior em cada compartimento foi realizada através da média das 4 sondas *PT100* em cada compartimento.

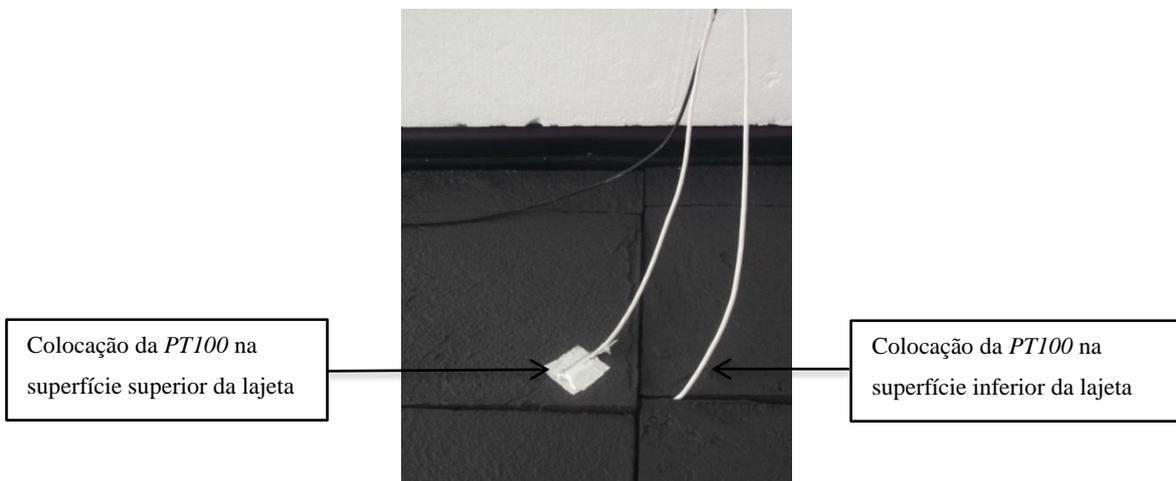


Figura 31 – Colocação de sondas *PT100* na parte superior e inferior da lajeta

A Figura 31 mostra a utilização das *PT100* na medição da temperatura superior e inferior das lajetas de argamassa com *PCM* no compartimento experimental da célula de teste.

3.5.2 SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

O sistema de monitorização colocado no interior do compartimento de referência da célula de teste permite a aquisição em tempo real de dados das sondas de medição e é realizado através de módulos recetores, que funcionam numa linha de comunicação RS485 de acordo com o protocolo. Estes módulos recetores processam e convertem em dados que são posteriormente registados num portátil através de um *software* dedicado denominado *EZ Data Logger Basic*.

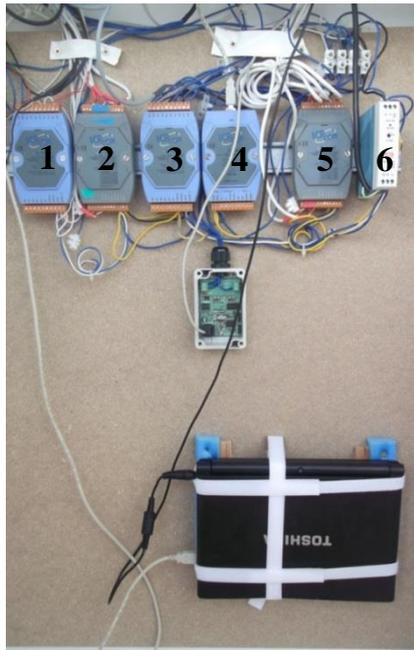


Figura 32 – Sistema de monitorização montado numa caixa metálica no compartimento de referência

Nr.º	Componente
1	Módulo de aquisição de dados das sondas <i>HD9008 RT</i> e <i>907021/21</i> da <i>ICPDAS</i> modelo <i>I-7017C-CR</i> ;
2	Módulo de aquisição de dados das sondas <i>PT100</i> com 6 entradas <i>RTD</i> (3 fios) da <i>ICPDAS</i> modelo <i>I-7015P-G-CR</i> ;
3	Módulo de aquisição de dados dos fluxímetros <i>Hukseflux HFP01</i> com 6 entradas <i>RTD</i> (3 fios) da <i>ICPDAS</i> modelo <i>I-7015P-G-CR</i> ;
4	Módulo conversor <i>USB</i> para <i>RS485</i> da <i>ICPDAS</i> modelo <i>I-7561-CR</i> ;
5	Módulo de aquisição de dados das sondas <i>PT100</i> com 6 entradas <i>RTD</i> (3 fios) da <i>ICPDAS</i> modelo <i>I-7015P-G-CR</i> ;
6	Fonte de alimentação de 24v da <i>MeanWell</i> modelo <i>MDR-20-24</i> .

Tabela 15 – Legendagem da Figura 35 com a identificação dos módulos recetores

O sistema de monitorização está montado numa caixa metálica que foi isolada com placas de poliestireno expandido (*EPS*) de 3 cm envolvidas em folha de alumínio para que não absorva radiação solar e desta forma não influencie os resultados da temperatura interior do compartimento de referência.

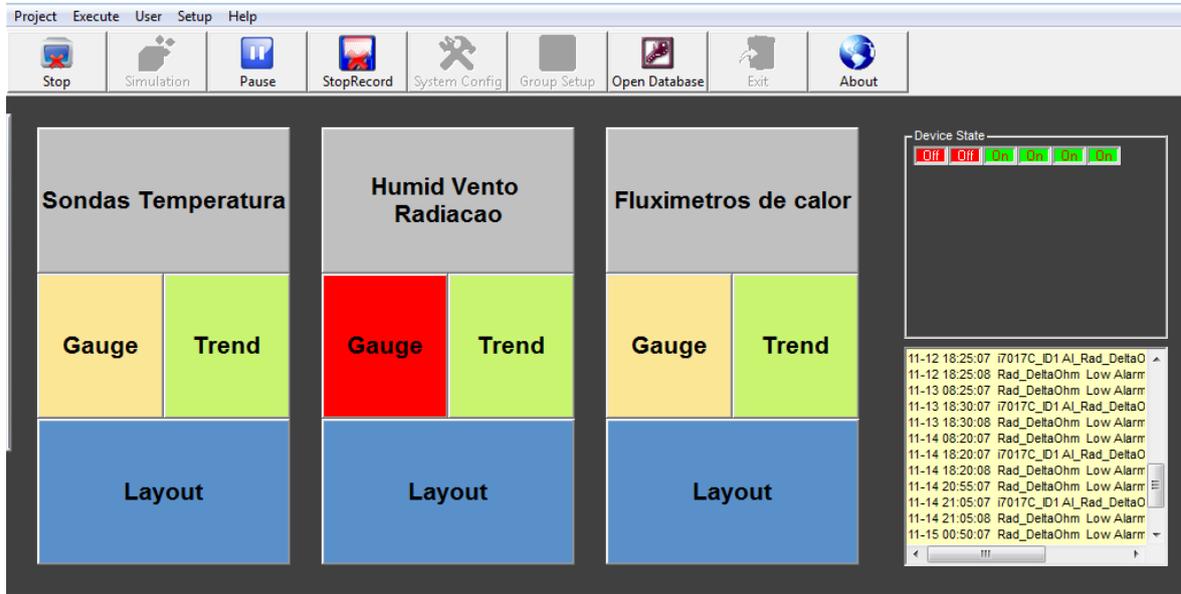


Figura 33 – Software EZ Data Logger Basic

O *EZ Data Logger Basic* permite a automatização dos registos de dados pretendidos com base em intervalos de tempo configuráveis. A Figura 33 mostra a concepção efetuada no *software* para registo de dados dos módulos recetores.

4 RESULTADOS DA MONITORIZAÇÃO E DISCUSSÃO

Neste capítulo são reveladas as medições realizadas pelo sistema de monitorização instalado com o objetivo de avaliar o desempenho térmico das lajetas de argamassa com *PCM* aplicadas no pavimento de um dos dois compartimentos da célula-de-teste. As lajetas de argamassa com *PCM* foram instaladas no compartimento experimental (CEXP) enquanto que o compartimento de referência (CREF) não possui qualquer material no pavimento, contendo apenas o sistema de aquisição de dados devidamente isolado junto à parede Norte.

As mediações foram realizadas entre o dia 29 de Outubro e 20 de Novembro de 2013, e neste trabalho serão apresentados os resultados relativos aos dias em que se alcançaram as temperaturas interiores mais quentes, mais frias e também mais próximas da faixa de operação do *PCM* para que seja possível compreender numa ampla gama de temperaturas.

Período de medição	Temperatura exterior e interior	Radiação solar global	Humidade relativa	Fluxo de calor na parede divisória	Fluxo de calor nas lajetas
31 Out. a 2 Nov.	✓	✓	✓		
8 Nov. a 10 Nov.	✓	✓	✓	✓	
15 Nov. a 19 Nov.	✓	✓	✓		✓

Tabela 16 – Medições exibidas neste trabalho

As datas representadas nas Figuras das secções 4.1, 4.2 e 4.3 encontram-se definidas da seguinte forma: mês/dia/ano. A nomenclatura utilizada neste capítulo para apresentação dos resultados está definida na Tabela 16.

Sigla	Significado
CEXP	Compartimento experimental
CREF	Compartimento de referência
TICEXP	Temperatura interior do compartimento experimental
TICREF	Temperatura interior do compartimento de referência
HR	Humidade Relativa
TSUPL	Temperatura superior das lajetas
TINFL	Temperatura inferior das lajetas
FCL	Fluxo de calor nas lajetas
FCPREF	Fluxo de calor na parede divisória do compartimento de referência
FCPEXP	Fluxo de calor na parede divisória do compartimento experimental

Tabela 17 – Nomenclatura definida para apresentação dos resultados

4.1 MONITORIZAÇÃO DE 31 DE OUTUBRO A 2 DE NOVEMBRO

As medições efetuadas entre o período 31 de Outubro e 2 de Novembro permitiram determinar a temperatura exterior e radiação solar global (Figura 34), a humidade relativa exterior e interior dos compartimentos (Figura 35) e a temperatura interior nos dois compartimentos (Figura 36).

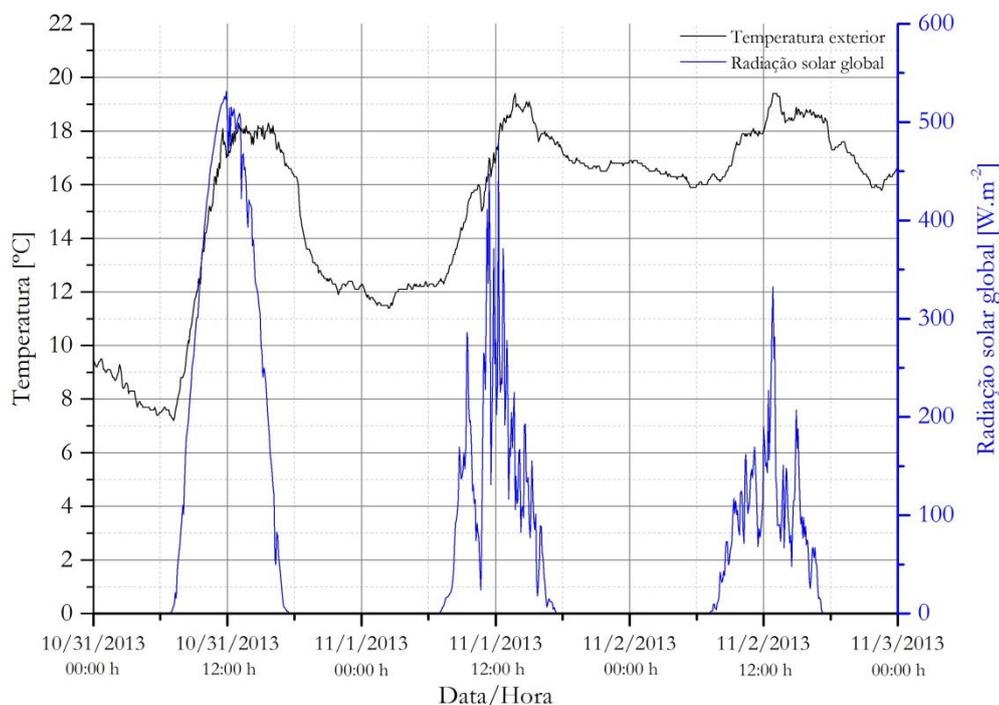


Figura 34 – Resultado da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada entre 31 de Outubro e 2 de Novembro

Nestes três dias de monitorização, o dia 31 de Outubro obteve a temperatura exterior mais baixa com 7,20 °C, maior amplitude térmica exterior com 11,1 °C e maior radiação solar global máxima e média, enquanto que o dia 2 de Novembro alcançou a menor radiação solar global máxima e média.

Parâmetro	31 Out. 2013	1 Nov. 2013	2 Nov. 2013
Temperatura exterior mínima [°C]	7,20	11,40	15,80
Temperatura exterior máxima [°C]	18,30	19,40	19,40
Temperatua exterior média [°C]	12,69	15,30	17,17
Radiação solar global máxima [W m ⁻²]	531	481	332
Radiação solar global média [W m ⁻²]	130	58	41

Tabela 18 - Síntese dos resultados da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada entre 31 de Outubro e 2 de Novembro

A humidade relativa é um importante parâmetro no conforto interior, e os resultados da monitorização nestes dias são revelados na Figura 35.

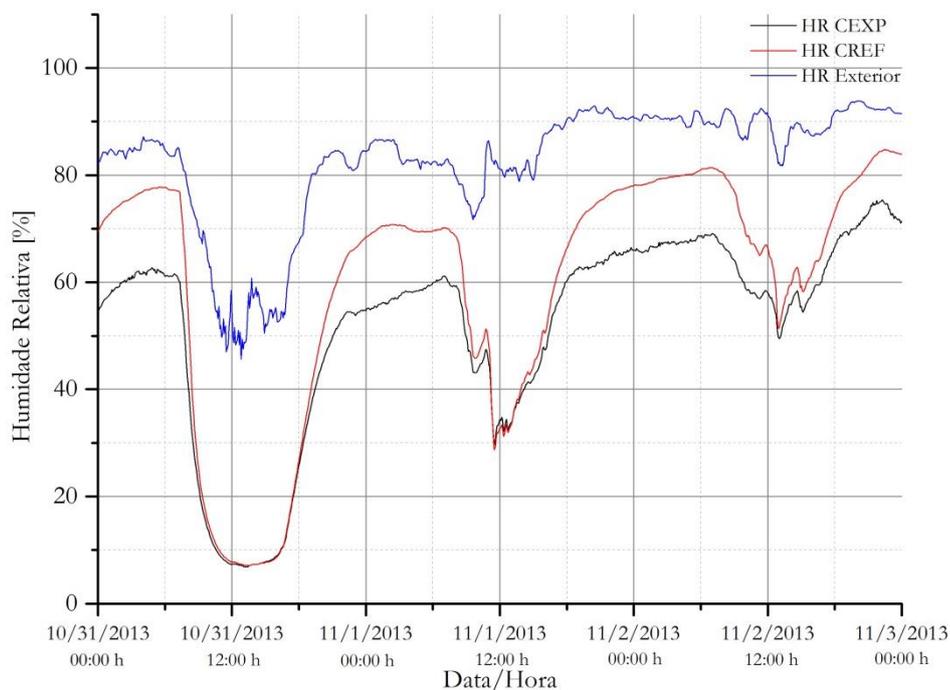


Figura 35 - Resultado da medição da humidade interior e exterior efetuada entre o dia 31 de Outubro e 2 de Novembro

Os mínimos alcançados na humidade relativa [%] são praticamente idênticos. Em relação aos máximos, o CEXP resultou numa diminuição de 15 % de HR, na média dos 3 dias, em comparação com o CREF.

Humidade Relativa	31 Out. 2013			1 Nov. 2013			2 Nov. 2013		
	CREF	CEXP	Exterior	CREF	CEXP	Exterior	CREF	CEXP	Exterior
Mínimo [%]	7,10	6,90	45,60	28,70	29,60	71,70	51,40	49,50	81,70
Máximo [%]	77,8	62,70	87,20	78,00	66,50	92,90	84,80	75,40	93,80
Média [%]	44,3	36,80	72,65	61,68	53,87	84,78	74,26	64,89	90,21

Tabela 19 - Síntese dos resultados da humidade relativa interior e exterior e radiação solar global efetuada entre 31 de Outubro e 2 de Novembro

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) estabelece, de acordo com o Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril, uma humidade relativa de conforto de 50 % e indica que esta não deverá ser inferior a 25 %. [14] No conjunto destes primeiros três dias monitorizados, o CREF registou uma HR média de 61,09 % enquanto que o CEXP registou 51,85 %.

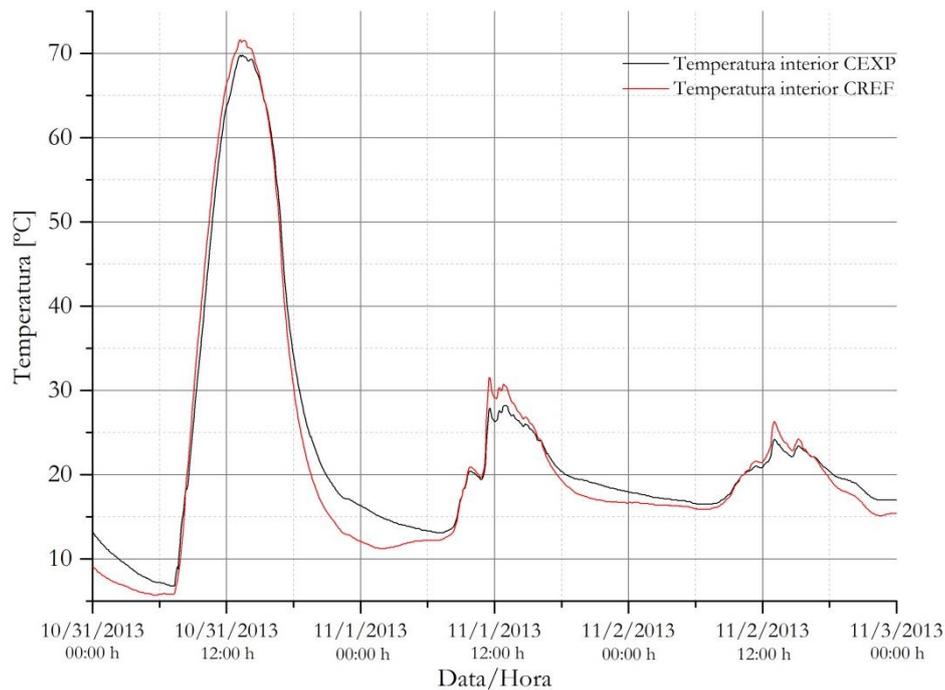


Figura 36 - Resultado da medição da temperatura interior no compartimento de referência e no compartimento experimental efetuada entre o dia 31 Outubro e 2 de Novembro

No primeiro período de arrefecimento, no dia 31 de Outubro, o pico mínimo no CEXP ocorre 1h30min depois do pico mínimo no CREF. Este desfasamento temporal pode esclarecer a diferença de inércia térmica entre os compartimentos. Neste mesmo dia verificou-se o efeito de sobrecarga da capacidade de armazenamento térmico das lajetas de argamassa com *PCM*. A célula-de-teste deveria possuir uma pala de sombreamento para proteção solar e desta forma atenuar a acumulação de calor no seu interior.

Na transição do dia 31 de Outubro para 1 de Novembro, o período de arrefecimento no CEXP ocorre de forma mais vagarosa do que no CREF, principalmente após as lajetas de argamassa com *PCM* atingirem a temperatura de solidificação que possibilitou a maior amplitude térmica alcançada entre compartimentos nesse dia (+4,60 °C no CEXP em comparação com o CREF). Do início do período de arrefecimento até às 03h51min, o CEXP registou uma diferença de temperatura média de +4 °C em relação ao CREF. Além disso, a comparação dos picos de arrefecimento nos dois compartimentos durante a transição do dia 31 de Outubro para 1 de Novembro resultou no maior desfasamento temporal registado de 5h:05min.

Temperatura	31 Out. 2013		1 Nov. 2013		2 Nov. 2013	
	CREF	CEXP	CREF	CEXP	CREF	CEXP
Mínima [°C]	5,70	6,80	11,20	13,10	15,10	16,50
$\Delta T(\text{CEXP}-\text{CREF})$ [°C]	+1,10		+1,90		+1,40	
Máxima [°C]	71,60	69,80	31,50	27,70	26,30	24,20
$\Delta T(\text{CEXP}-\text{CREF})$ [°C]	-1,80		-3,80		-2,10	
Média [°C]	28,76	30,10	18,12	19,00	18,54	19,04
$\Delta T(\text{CEXP}-\text{CREF})$ [°C]	+1,34		+0,88		+0,50	

Tabela 20 - Síntese dos resultados da temperatura interior do compartimento de referência e experimental efetuada entre o dia 31 de Outubro e 2 de Novembro

Os dias 1 e 2 de Novembro resultaram em temperaturas mais próximas da faixa de operação do *PCM* permitindo verificar que após a temperatura de fusão das lajetas de argamassa com *PCM*, os picos de temperatura máxima foram reduzidos em 3,80 °C e 2,10 °C, respectivamente, em relação ao CREF. No período de arrefecimento do dia 1 de Novembro (17h01min), a diferença de temperatura máxima entre os dois compartimentos foi alcançada 4 horas depois com +1,9 °C em comparação com o CREF, mantendo até às 06h51min uma amplitude média de +1,2 °C. O desfaseamento temporal nos picos máximos e mínimos entre os compartimentos não foi significativo nestes dias.

4.2 MONITORIZAÇÃO DE 9 A 10 DE NOVEMBRO

As medições efetuadas no dia 9 de Novembro e 10 de Novembro permitiram determinar a temperatura exterior e radiação solar global (Figura 37), a humidade relativa exterior e interior dos compartimentos (Figura 38), temperatura interior nos dois compartimentos (Figura 39) e o fluxo de calor na parede divisória dos dois compartimentos (Figura 40).

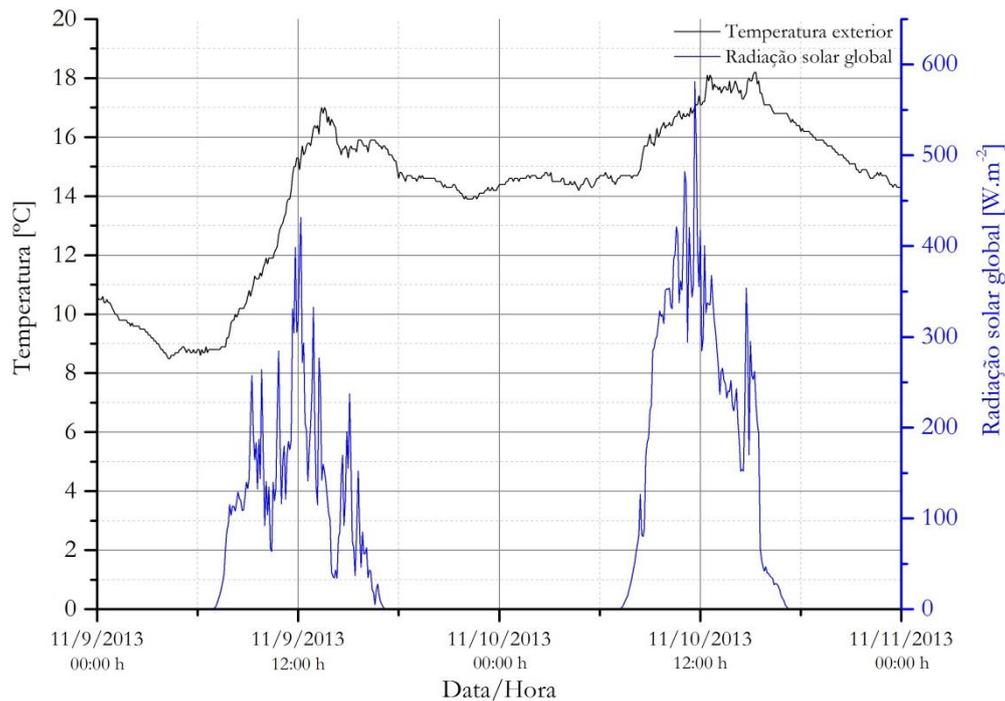


Figura 37 - Resultado da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada no dia 9 e 10 de Novembro

Nos dois dias monitorizados, o dia 9 de Novembro obteve a temperatura exterior mais baixa com 8,5 °C e maior amplitude térmica exterior com 8,5 °C, enquanto que o dia 10 de Novembro alcançou maiores temperaturas exteriores e maior radiação solar global máxima e média.

Parâmetros	9 Nov. 2013	10 Nov. 2013
Temperatura exterior mínima [°C]	8,50	14,20
Temperatura exterior máxima [°C]	17,00	18,20
Temperatura exterior média [°C]	12,60	15,69
Radiação solar global máxima [W m^{-2}]	431,70	581,20
Radiação solar global média [W m^{-2}]	56,19	90,94

Tabela 21 – Síntese dos resultados da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada no dia 9 e 10 de Novembro

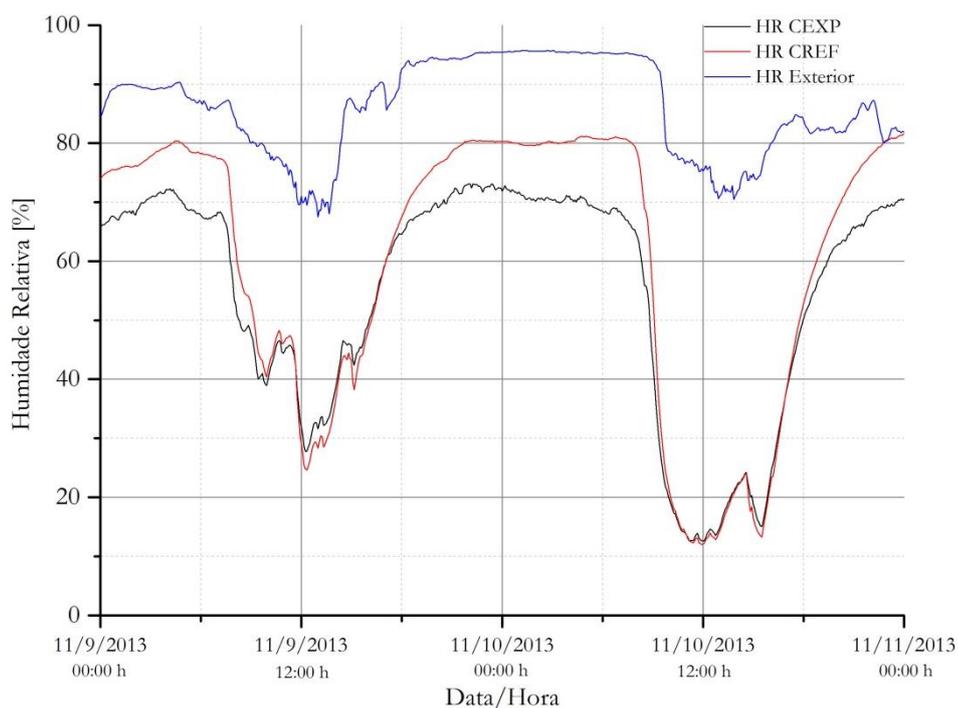


Figura 38 - Resultado da medição da humidade interior (compartimento de referência e compartimento experimental) e exterior efetuado no dia 9 e 10 de Novembro

Relativamente à humidade relativa, no dia 9 de Novembro o CEXP registou uma diminuição de 20 % da HR média em relação ao CREF e no dia 10 Novembro resultou num decréscimo de 12 %.

Humidade Relativa	9 Nov. 2013			10 Nov. 2013		
	CREF	CEXP	Exterior	CREF	CEXP	Exterior
Mínimo [%]	24,60	27,80	67,50	12,00	12,60	70,50
Máximo [%]	80,50	73,10	95,50	81,40	72,80	95,70
Média [%]	63,81	54,13	86,38	56,25	50,15	85,85

Tabela 22 – Síntese dos resultados da medição da humidade interior (compartimento de referência e compartimento experimental) e exterior efetuado no dia 9 e 10 de Novembro

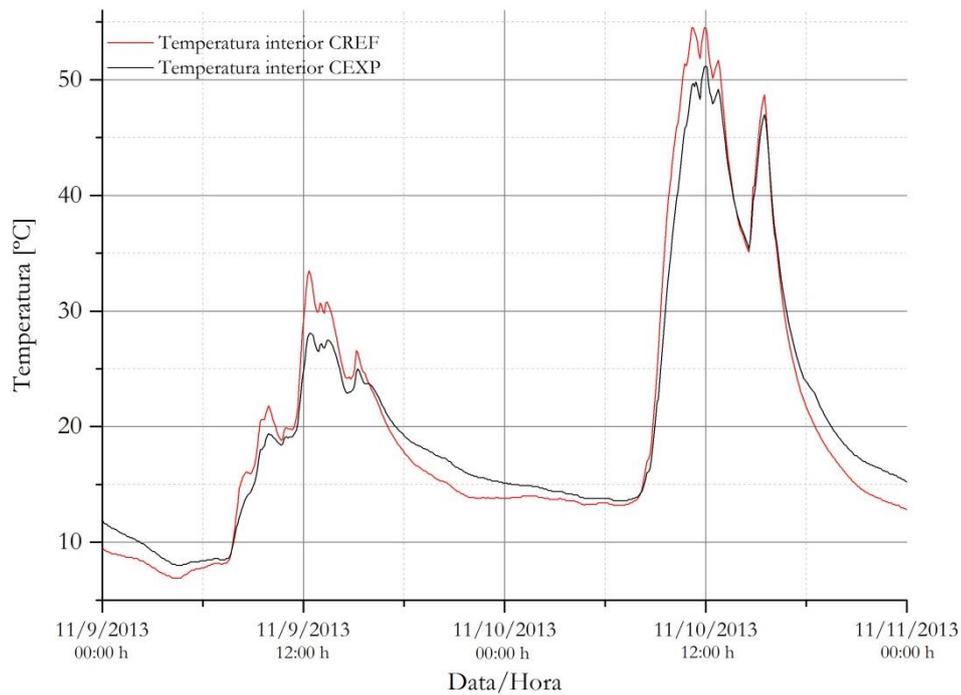


Figura 39 - Resultado da medição da temperatura interior no compartimento de referência e no compartimento experimental efetuada no dia 9 e 10 de Novembro

No dia 9 de Novembro o CEXP obteve uma diminuição do pico de temperatura máxima de 5,50 °C em relação ao CREF e no dia 10 alcançou uma diminuição de 3,30 °C. A maior diferença de temperatura ocorrida no período de arrefecimento do dia 9 de Novembro foi de +2,10 °C em relação ao CREF quando a temperatura no CEXP era de 17,30 °C, ou seja, dentro da gama de temperaturas de solidificação das lajetas de argamassa com *PCM*. Desde o início do período de arrefecimento, às 17h00min, até perto das 06h00min, foi mantida uma amplitude térmica média de +1,26 °C em relação CREF.

Temperatura	9 Nov. 2013		10 Nov2013	
	CREF	CEXP	CREF	CEXP
Mínima [°C]	6,90	8,00	12,90	13,60
$\Delta T(\text{CEXP-CREF})$ [°C]	+1,10		+0,70	
Máxima [°C]	33,50	28,00	54,50	51,20
$\Delta T(\text{CEXP-CREF})$ [°C]	-5,50		-3,30	
Média [°C]	15,98	16,23	24,50	24,62
$\Delta T(\text{CEXP-CREF})$ [°C]	+0,25		+0,12	

Tabela 23 – Síntese dos resultados da medição da temperatura interior no compartimento de referência e no compartimento experimental efetuada no dia 9 e 10 de Novembro

Os fluxímetros utilizados na medição do fluxo de calor na parede divisória dos dois compartimentos foram isolados na parte superior com fita de alumínio e colocados no centro da parede divisória de cada compartimento sobre a superfície das placas de isolamento *EPS* a uma altura de 1,5 m.

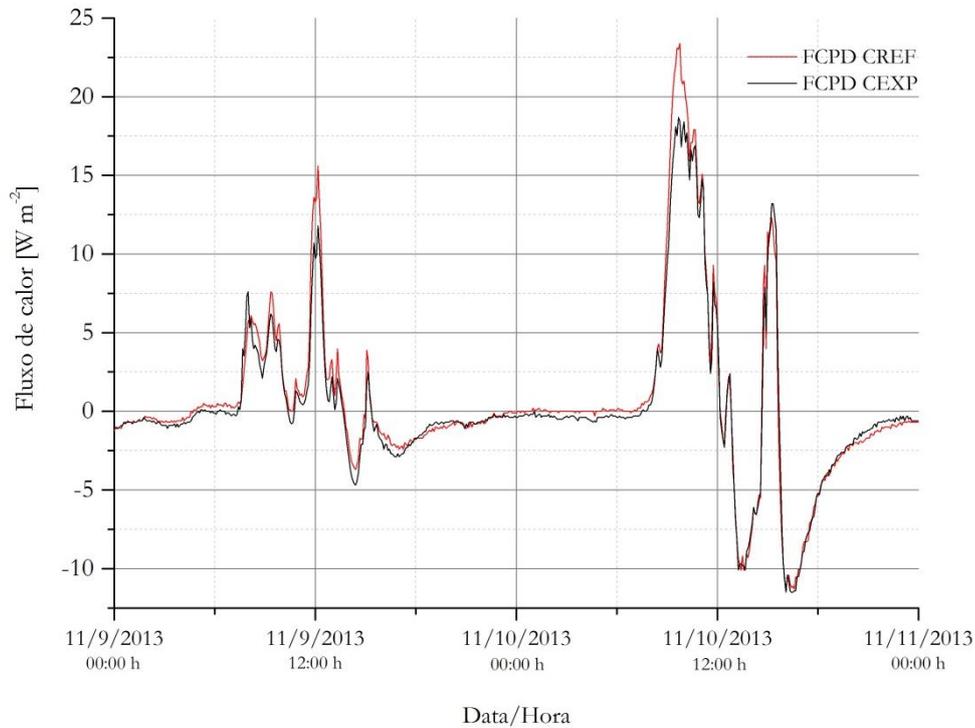


Figura 40 - Resultado da medição do fluxo de calor na parede divisória do compartimento de referência e do compartimento experimental efetuada no dia 9 e 10 de Novembro

Os resultados obtidos pelos fluxímetros revelam que os picos do fluxo de calor acompanham os picos da temperatura interior dos compartimentos principalmente quando a diferença de temperatura entre as placas de isolamento e a temperatura ambiente do compartimento é maior. Os valores negativos do fluxo de calor [W m^{-2}] refletem as perdas térmicas incluindo o fluxo de calor que é atravessado na placa de isolamento para o compartimento interior, sendo no entanto esses valores poucos significativos.

Fluxo de calor	9 Nov. 2013		10 Nov 2013	
	CREF	CEXP	CREF	CEXP
FCPD Mínimo [W m^{-2}]	-3,70	-4,70	-11,30	-11,50
FCPD Máximo [W m^{-2}]	15,60	11,80	23,40	18,70
FCPD Média [W m^{-2}]	0,53	0,14	0,57	0,25

Tabela 24 – Síntese dos resultados da medição do fluxo de calor na parede divisória do compartimento de referência e do compartimento experimental efetuada no dia 9 e 10 de Novembro

O maior pico negativo ocorreu no dia 10 de Novembro devido às bruscas variações de temperatura interior que ocorreram nesse dia (Figura 41). Os máximos do FCPD no CEXP são inferiores ao CREF devido às temperaturas interiores mais baixas alcançadas no CEXP.

4.3 MONITORIZAÇÃO DE 15 A 19 DE NOVEMBRO

As medições efetuadas de 15 de Novembro a 19 de Novembro permitiram determinar a temperatura exterior e radiação solar global (Figura 41), a humidade relativa exterior e interior dos compartimentos (Figura 42), temperatura interior nos dois compartimentos (Figura 43) e o fluxo de calor nas lajetas (Figura 44).

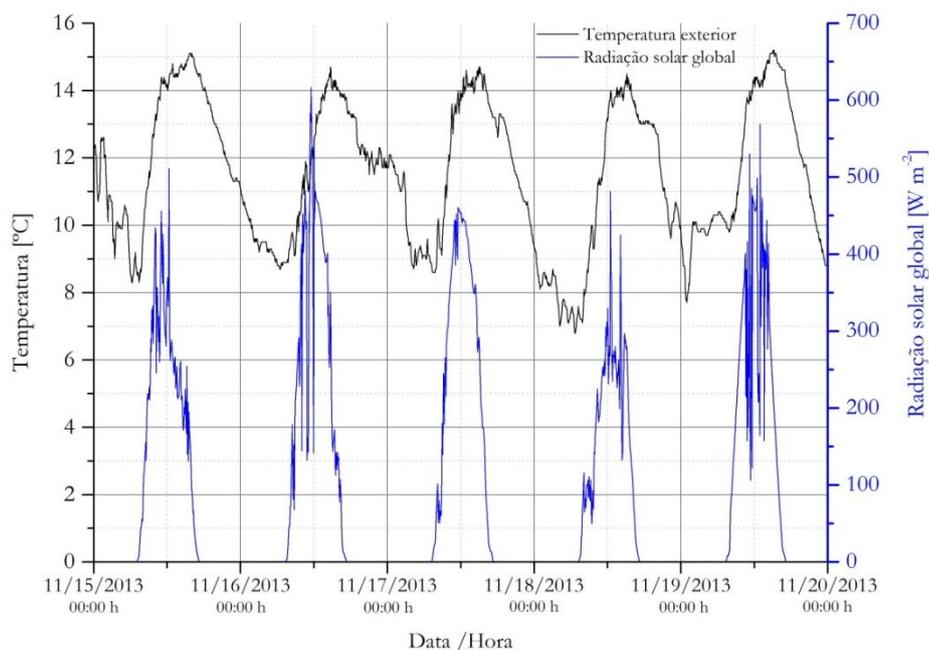


Figura 41 - Resultado da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada entre 15 e 19 de Novembro

As temperaturas exteriores dos últimos cinco dias monitorizados foram similares, com amplitudes térmicas próximas. O dia 18 de Novembro obteve a maior amplitude térmica com 7,7 °C e a menor radiação solar global máxima e média. Os dias 16 e 17 de Novembro resultaram na menor amplitude térmica com 6,1 °C e na maior radiação solar global média.

Parâmetros	15 Nov. 2013	16 Nov. 2013	17 Nov 2013	18 Nov 2013	19 Nov. 2013
Temperatura exterior mínima [°C]	8,30	8,70	8,60	6,80	7,70
Temperatura exterior máxima [°C]	15,70	14,70	14,70	14,50	15,20
Temperatua exterior média [°C]	12,28	11,44	11,69	10,64	11,64
Radiação solar global máxima [W m ⁻²]	511	616	461	481	569
Radiação solar global média [W m ⁻²]	89	108	107	71	96

Tabela 25 – Síntese dos resultados da medição da temperatura exterior e da radiação solar global efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro

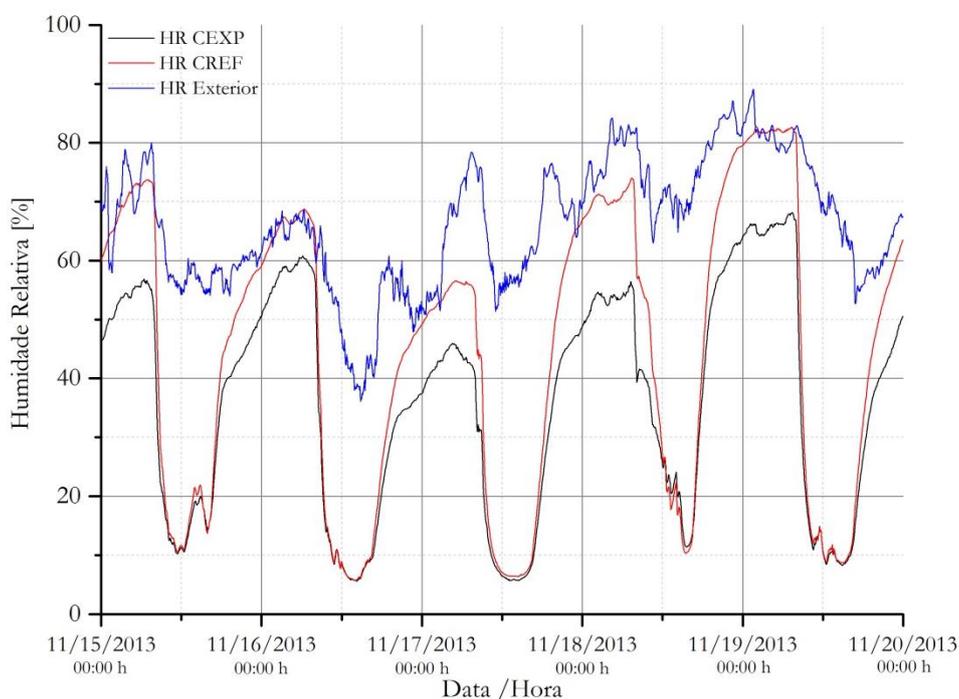


Figura 42 - Resultado da medição da humidade interior (compartmento de referência e compartmento experimental) e exterior efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro

Relativamente à humidade relativa, em todos os cinco dias monitorizados, os resultados da HR mínima entre os compartimentos foram muito similares, registando-se maiores diferenças na HR máxima e média. Os resultados mais baixos da HR média interior nestes cinco dias devem-se às elevadas temperaturas interiores alcançadas nos compartimentos.

Humidade Relativa	15 Nov 2013	16 Nov 2013	17 Nov 2013.	18 Nov 2013	19 Nov 2013
HR Mínima CREF [%]	10,50	5,80	6,30	10,30	8,70
HR Mínima CEXP [%]	10,30	5,60	5,70	11,40	8,30
HR Mínima Exterior [%]	54,00	36,10	50,80	63,00	52,70
HR Máxima CREF [%]	73,70	68,80	66,70	79,50	82,80
HR Máxima CEXP [%]	56,90	60,80	48,60	63,70	68,20
HR Máxima Exterior [%]	80,00	68,60	78,40	87,10	89,10
HR Média CREF [%]	45,02	38,19	37,46	53,56	47,93
HR Média CEXP [%]	36,43	32,76	29,26	42,95	38,87
HR Média Exterior [%]	63,10	55,61	64,55	76,24	71,33

Tabela 26 – Síntese dos resultados da medição da humidade interior (compartimento de referência e compartimento experimental) e exterior efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro

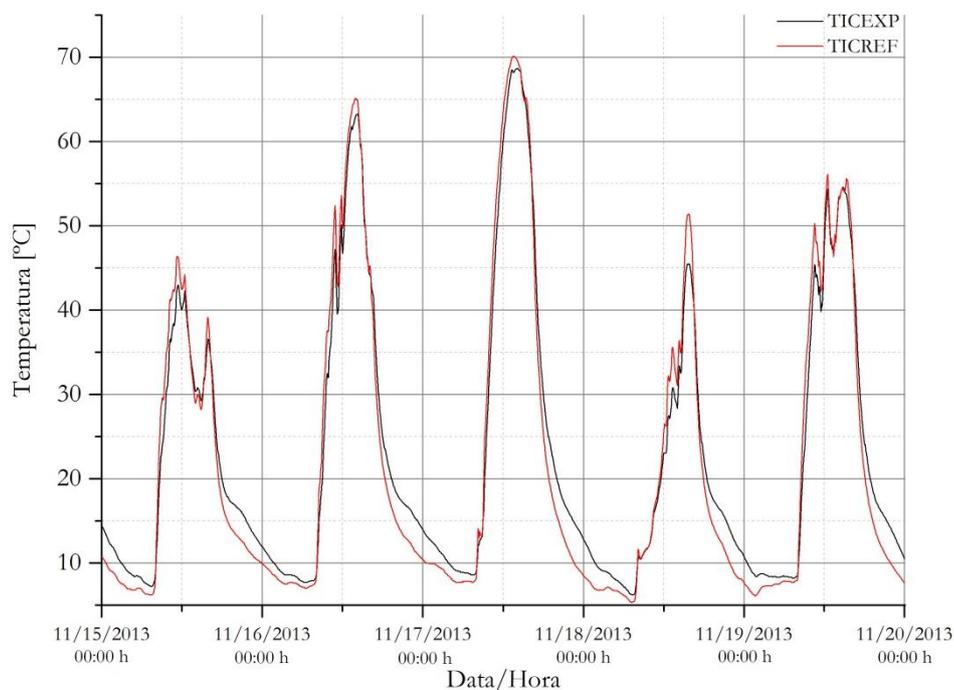


Figura 43 - Resultado da medição da temperatura interior no compartimento de referência e no compartimento experimental efetuada entre 15 de Novembro e 19 de Novembro

No dia 15 de Novembro, o pico de temperatura máxima ocorrida alcançou $-3,40\text{ }^{\circ}\text{C}$ no CEXP em comparação com o CREF. A diferença de temperatura máxima alcançada nesse dia durante o arrefecimento foi de $3,50\text{ }^{\circ}\text{C}$ em relação ao CREF, às 20h55min, quando a temperatura interior do CEXP era $16,10\text{ }^{\circ}\text{C}$. A diferença de temperatura média durante o arrefecimento até ao início do período de aquecimento do dia seguinte foi de $1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ neste dia em relação ao CREF. No dia 16, a diferença de temperatura máxima no período de arrefecimento foi de $4,80\text{ }^{\circ}\text{C}$ aos $16,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ no CEXP. A diferença de temperatura média das 17h35min até às 07h35min foi de $2,65\text{ }^{\circ}\text{C}$ em relação ao CREF. O dia 17 de Novembro alcançou a maior diferença de temperatura média entre os compartimentos, durante o período de arrefecimento, registando $3,24\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a máxima de $5,00\text{ }^{\circ}\text{C}$. No dia 18 de Novembro, o CEXP alcançou menos $6,10^{\circ}\text{C}$ no pico de temperatura máxima interior em relação ao CREF.

Temperatura	15 Nov. 2013	16 Nov. 2013	17 Nov. 2013	18 Nov. 2013	19 Nov. 2013
TICREF mínima [$^{\circ}\text{C}$]	6,20	7,00	7,70	5,30	6,10
TICEXP mínima [$^{\circ}\text{C}$]	7,20	7,70	8,60	6,20	8,20
$\Delta\text{T(CEXP-CREF)}$ [$^{\circ}\text{C}$]	+1,00	+0,70	+0,90	+0,90	+2,10
TICREF máxima [$^{\circ}\text{C}$]	46,40	65,10	70,10	51,40	56,10
TICEXP máxima [$^{\circ}\text{C}$]	43,00	63,30	68,70	45,30	54,60
$\Delta\text{T(CEXP-CREF)}$ [$^{\circ}\text{C}$]	-3,40	-1,80	-1,40	-6,10	-1,50
TICREF média [$^{\circ}\text{C}$]	19,38	24,50	27,08	16,58	22,97
TICEXP média [$^{\circ}\text{C}$]	20,26	25,11	28,28	17,43	23,81
$\Delta\text{T(CEXP-CREF)}$ [$^{\circ}\text{C}$]	+0,88	+0,61	+1,20	+0,85	+0,84

Tabela 27 – Síntese dos resultados da medição da temperatura interior do compartimento de referência e compartimento experimental efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro

Na medição do fluxo de calor nas lajetas do CEXP foi utilizado um fluxímetro, isolado na parte superior com fita de alumínio, sobre a lajeta e colocou-se uma PT100 na parte inferior da lajeta e outra PT100 na parte superior da lajeta com o desígnio de avaliar a diferença de temperatura na lajeta.

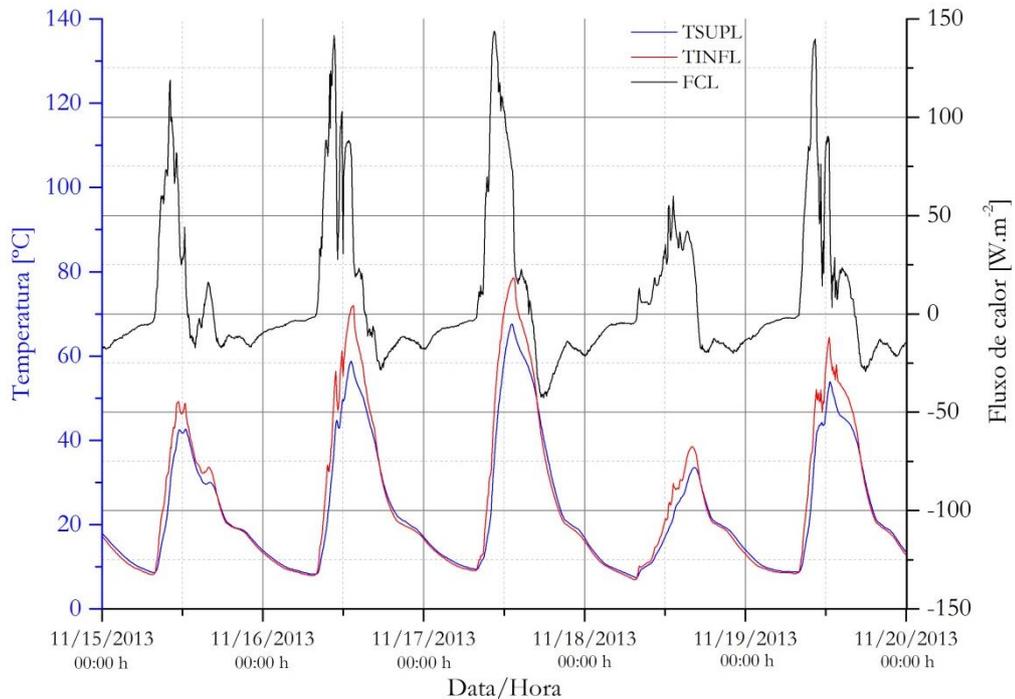


Figura 44 - Resultado da medição do fluxo de calor nas lajetas e da temperatura da parte inferior e superior da lajeta, efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro

Os picos do fluxo de calor obtidos acompanham os picos das temperaturas da parte superior e inferior da lajeta, como é possível observar no gráfico (Figura 44). Os valores do fluxo de calor atingem os picos no momento de maior amplitude térmica entre a parte superior e inferior da lajeta.

Parâmetros	15 Nov. 2013	16 Nov. 2013	17 Nov. 2013	18 Nov. 2013	19 Nov. 2013
TINFL mínimo [°C]	8,60	8,30	9,40	7,40	8,80
TINFL máximo [°C]	42,70	58,70	67,60	33,50	53,90
TINFL médio [°C]	21,20	25,24	29,23	17,01	23,99
TSUPL mínimo [°C]	8,10	8,00	9,10	7,00	8,40
TSUPL máximo [°C]	49,20	72,00	78,60	38,50	64,50
TSUPL médio [°C]	22,43	27,82	31,46	17,88	26,12
FCL mínimo [W m ⁻²]	-18,00	-28,60	-42,70	-21,50	-29,50
FCL máximo [W m ⁻²]	118,90	141,60	143,80	59,90	139,80
FCL médio [W m ⁻²]	3,61	11,31	9,71	1,88	8,44

Tabela 28 – Síntese do resultado da medição do fluxo de calor nas lajetas e da temperatura da parte inferior e superior da lajeta, efetuada entre o dia 15 e 19 de Novembro

4.4 SÍNTESE DOS RESULTADOS GERAIS

Esta secção apresenta sumariamente os resultados gerais de toda a monitorização realizada e determina a economia de energia da aplicação.

4.4.1 MONITORIZAÇÃO TOTAL

Considerando todas as medições apresentadas no presente trabalho, a Tabela 29 sintetiza os resultados da monitorização.

Parâmetro	Resultado
Redução média dos picos de temperatura máxima [°C]	3,1
Maior redução dos picos de temperatura máxima [°C]	6,1
Aumento médio dos picos de temperatura mínima [°C]	1,2
Maior aumento dos picos de temperatura mínima [°C]	2,1
Temperatura média CEXP [°C]	22,38
Temperatura média CREF [°C]	21,64

Tabela 29 – Síntese dos principais resultados da monitorização realizada

4.4.2 ECONOMIA DE ENERGIA

A entalpia de fusão obtida nos ensaios *MDSC* sobre uma amostra de argamassa endurecida com *PCM* foi de $15,13 \text{ kJ kg}^{-1}$ (subsecção 3.4.4) e sabendo que a massa total das lajetas instaladas no pavimento da célula de teste é $129,1 \text{ kg}$, a energia armazenada ou libertada durante a mudança de fase pelo *PCM* pode ser calculada pela equação 2.3 da secção 2.1 do presente trabalho. O resultado correspondente é 1953 kJ , ou $0,54 \text{ kWh}$, e representa a quantidade de energia economizada em cada processo de mudança de fase realizado pelo material.

5 CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Nos últimos anos a utilização de materiais de mudança de fase tem alcançado particular interesse no meio científico devido à necessidade de maiores conhecimentos dos efeitos práticos da aplicação de *PCM* em edifícios e da sua eficiência. A caracterização do *PCM* com propriedades termofísicas apropriadas aos materiais de construção e elementos construtivos é imprescindível para uma aplicação bem sucedida. Além disso, o material de mudança de fase deve ser sempre selecionado de acordo com as temperaturas de transição de fase próximas da temperatura média interior. A técnica de microencapsulamento tem revelado ser a solução mais eficaz na incorporação do *PCM* em materiais de construção, principalmente na incorporação em placas de gesso cartonado e argamassas de revestimento.

A monitorização realizada no trabalho experimental permite concluir que a eficácia do *PCM* é dependente das condições climáticas e dos elementos construtivos da edificação. As elevadas temperaturas interiores alcançadas, devido à captura da radiação solar pelo vão envidraçado e acumulação de calor no interior da célula-de-teste, sobrecarregaram a capacidade de armazenamento das lajetas. As elevadas amplitudes térmicas interiores obtidas prejudicaram a ação desta aplicação, uma vez que o armazenamento e libertação de calor das lajetas de argamassa com *PCM* apenas ocorrem durante uma gama de temperaturas (fusão e solidificação) que foram determinadas nos ensaios *MDSC* realizados.

Os resultados das medições permitiram verificar uma redução média nos picos de temperatura máxima de 3,1 °C com a aplicação das lajetas de argamassa com *PCM*, sendo que a maior redução foi de 6,1 °C. Em relação ao aumento nos picos de temperatura mínima, registou-se uma média de 1,2 °C, e o maior resultado verificado foi de 2,1 °C. A aplicação das lajetas com *PCM* no pavimento da célula-de-teste resultam numa economia de energia de 1953 kJ em cada processo de mudança de fase realizado pelo material.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nos próximos trabalhos experimentais a serem realizados na célula-de-teste dever-se-á colocar uma pala de sombreamento para que seja possível alcançar menores amplitudes térmicas do que as que se verificaram em quase toda a monitorização do presente trabalho experimental.

Para desenvolvimento e progresso do trabalho efetuado, será importante a realização de um trabalho experimental que consistisse na produção de lajetas de argamassa sem *PCM* no compartimento de referência para possibilitar melhor compreensão do efeito do *PCM* na temperatura interior e na inércia térmica encontrada nos compartimentos.

No futuro deverá ser desenvolvido um modelo de simulação energética (por exemplo, em *EnergyPlus*) com base nos resultados obtidos no presente trabalho. Esse modelo de simulação energética poderá servir para compreender a aplicação da argamassa de revestimento interior com *PCM* noutros elementos da célula-de-teste (ou noutro edifício), e encontrar as melhores soluções construtivas que garantem progresso no desempenho térmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Essick, “Energia, o grande dilema do nosso futuro” *National Geographic Portugal*, Lisboa, p. 95, 2012.
- [2] P. Isolani, “Manual do consumidor - Eficiência energética nos edifícios residenciais” *EnerBuilding*, no. Deco, p. 48, 2008.
- [3] *Assembleia da República - Estratégia Nacional para a Energia 2020*, no. ENE 2020. Lisboa: <http://dre.pt/pdf1sdip/2010/04/07300/0128901296.pdf>, 2010, p. 8.
- [4] J. M. Perdigoto and A. de C. Carvalho, “Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010,” *Instituto Nacional de Estatística, I.P.*, Lisboa, p. 117, 2010.
- [5] M. M. Gonçalves, “Estudo de novos materiais de mudança de fase” Universidade de Aveiro, 2009.
- [6] H. Mehling and L. F. Cabeza, *Heat and cold storage with PCM: An up to date introduction into basics and applications (Heat and Mass Transfer)*. Springer, 2008, p. 305.
- [7] P. Mendonça, “Habitar sob uma segunda pele : estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados” Universidade de Aveiro, 2005.
- [8] F. Torgal and S. Jalali, *A sustentabilidade dos materiais de construção*, 2^a ed. Guimarães: TECMINHO, 2010, p. 400.
- [9] C. V Konstantinidou, “Integration of thermal energy storage in buildings” University of Texas at Austin, 2010.
- [10] N. T. D. F. da Silva, “Incorporação de Materiais de Mudança de Fase em Materiais de Construção” Universidade do Minho, 2009.
- [11] C. Sunliang, “State of the art thermal energy storage solutions for high performance buildings” University of Jyväskylä, 2010.
- [12] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*, vol. 23, no. 3. 2003, pp. 251–283.
- [13] A. V. Sá, “Comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

-
- [14] Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, *Decreto-Lei nº80/2006*. 2006, p. 46.
- [15] I. M. S. Carvalho, “Dimensionamento de um Sistema de Teto Arrefecido Integrando Materiais de Mudança de Fase” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [16] S. Lucas, “Argamassas funcionais para construção sustentável” Universidade de Aveiro, 2011.
- [17] J. F. Mendes, A. Joyce, P. Horta, and M. J. Brites, “Armazenamento de energia solar térmica” Amadora, 2010.
- [18] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, and H. Di, “Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 6, pp. 2197–2209, Jun. 2007.
- [19] 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, Apr. 2012.
- [20] L. F. Cabeza, a. Castell, C. Barreneche, a. de Gracia, and a. I. Fernández, “Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 3, pp. 1675–1695, Apr. 2011.
- [21] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen, “Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review” *Energy Build.*, vol. 42, no. 9, pp. 1361–1368, Sep. 2010.
- [22] V. V. Tyagi and D. Buddhi, “PCM thermal storage in buildings: A state of art” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 6, pp. 1146–1166, Aug. 2007.
- [23] E. Grunther, S. Hiebler, and H. Mehling, “Determination of the heat storage capacity of PCM and PCM-objects as the function of temperature” *Bavar. Cent. Appl. Energy Reserch (ZAE Bayern)*, p. 7, 2004.
- [24] B. Cassel and R. Packer, “Modulated Temperature DSC and the DSC 8500: A Step Up in Performance.” Shelton, CT USA, p. 6, 2010.
- [25] Z. Yinping and J. Yi, “A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase change materials” vol. 10, pp. 201–205, 1999.
- [26] H. Hong and S. Kim, “Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials” *Int. J. Refrig.*, vol. 27, pp. 360–366, 2004.

- [27] J. Peck, J.-J. Kim, and C. Kang, “A study of accurate latent heat measurement for a PCM with a low melting temperature using T-history method” *Int. J. Refrig.*, vol. 29, pp. 1225–32, 2006.
- [28] 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, Apr. 2012.
- [29] “Instruction guidelines for CSM panels” *Rubitherm Technologies GmbH*, 2013. [Online]. Available: http://www.rubitherm.de/english/pages/02h_air_heating_systems.htm. [Accessed: 21-Jul-2013].
- [30] A. Ribeiro, “Comportamento Térmico de Sistemas Solares Passivos Sampaio Ribeiro Usando PCMs” Universidade de Aveiro, 2012.
- [31] V. V. Tyagi, S. C. Kaushik, S. K. Tyagi, and T. Akiyama, “Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 2, pp. 1373–1391, Feb. 2011.
- [32] L. F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, and O. Zubillaga, “Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings” *Energy Build.*, vol. 39, no. 2, pp. 113–119, Feb. 2007.
- [33] T. Silva, R. Vicente, N. Soares, and V. Ferreira, “Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution” *Energy Build.*, vol. 49, pp. 235–245, Jun. 2012.
- [34] I. Cerón, J. Neila, and M. Khayet, “Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use” *Energy Build.*, vol. 43, no. 8, pp. 1869–1874, Aug. 2011.
- [35] A. V. Sá, “Comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.
- [36] C. Barreneche, A. Solé, L. Miró, I. Martorell, a. I. Fernández, and L. F. Cabeza, “Study on differential scanning calorimetry analysis with two operation modes and organic and inorganic phase change material (PCM)” *Thermochim. Acta*, vol. 553, pp. 23–26, Feb. 2013.
- [37] M. Schmidt and F. P. Division, “Phase Change Materials – latent heat storage for interior climate control” pp. 0–34, 2008.
- [38] P. Schossig, H. 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, Nov. 2005.

