FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO

Comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase

Ana Margarida Vaz Duarte Oliveira e Sá

Licenciada em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestre em Construção de Edifícios pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para obtenção do grau de doutor
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Orientação: Prof. Hipólito Campos de Sousa

Prof. António José Barbosa Samagaio

JULHO 2012

Ao meu avô Agnelo,

Agradecimentos

Ao finalizar este trabalho gostaria de manifestar o meu sincero agradecimento a todos aqueles que ao longo do tempo e a diferentes níveis contribuíram para a sua realização.

Expresso o meu apreço ao Professor Hipólito de Sousa, orientador cientifico desta dissertação, pela total disponibilidade com que acompanhou o meu trabalho, pela confiança e conselhos transmitidos, fundamentais à concretização dos objetivos propostos.

Quero também salientar o contributo dado pelo Professor António Samagaio, coorientador deste trabalho, pela sua crítica e incentivos constantes.

Ao Professor Vitor Abrantes pelos estímulos e conselhos, e em especial pelo incitamento continuo à realização e conclusão do trabalho.

Quero agradecer ao Professor Vasco Peixoto de Freitas, com quem aprendi a fazer investigação, a disponibilização de meios laboratoriais essenciais ao desenrolar deste trabalho.

Ao longo da realização deste trabalho reaprendi a investigar com os ensinamentos e enorme exigência e sentido crítico do meu amigo e colega Miguel Azenha. A ele devo mais do que um simples agradecimento, as suas criatividade e paixão pelo trabalho foram um enorme incentivo na procura de soluções e na construção de uma linha de investigação consistente. A discussão e reflexão a que me conduziu contribuíram decisivamente para a concretização dos objetivos propostos.

Ao Eng.º Romeu Vicente agradeço o interesse demonstrado pelo tema e o acompanhamento do percurso experimental deste trabalho.

Agradeço o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia – FCT, através do projeto PTDC/ENR/68224/2006 – Comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase.

O apoio prestado pela empresa Saint-Gobain Weber, nas pessoas do Eng.º Luís Silva e do Eng.º Nuno Vieira, cuja disponibilidade e dedicação permitiram o desenvolvimento do estudo experimental. À empresa BASF, em especial ao Eng.º Manuel Morgado e ao Eng.º Marco Schmidt, na disponibilização dos materiais necessários à realização experimental deste trabalho.

Ao Dr. João Rodrigues, responsável pelo laboratório de fumo e fogo do INEGI, que prontamente acedeu ao pedido de realização de ensaios e ainda revelou total disponibilidade e partilhou o interesse e a curiosidade em avaliar o comportamento da argamassa desenvolvida.

Ao Professor Tenreiro Machado que com a sua visão e a sua extraordinária experiência ciêntica me soube conduzir a um porto seguro.

Manifesto o meu agradecimento profundo à minha amiga e colega Ana Guimarães pela amizade e ajuda em todos os momentos. Ao meu amigo e colega Eduardo Costa pela sua total disponibilidade.

Ao amigo José António Figueroa pelas explicações, pela preocupação e pela confiança no meu trabalho.

À compreensão de todos os meus colegas e amigos que ao longo deste tempo aceitaram e compreenderam a minha dedicação a este propósito.

Finalmente saliento o carinho e a preocupação da minha família, que possibilitaram a serenidade indispensável à realização deste trabalho. À Madalena e ao António. Obrigada Pai.

Resumo

A introdução de materiais de mudança de fase (PCM) em materiais de construção destina-se essencialmente ao aumento da sua capacidade de armazenamento de calor, na forma de calor latente. Garantindo a estabilização das temperaturas interiores, na proximidade das temperaturas de conforto, pela fixação e uniformização da temperatura das superfícies interiores dos edifícios, contribuindo deste modo para o aumento da sensação de conforto.

Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento e caracterização de um novo material compósito que consiste na incorporação de materiais de mudança de fase microencapsulados numa argamassa de revestimento à base de cimento e cal.

O trabalho experimental desenvolvido foi dividido em duas tarefas distintas. A primeira pretendeu apresentar o desenvolvimento e caracterização da nova argamassa com PCM. A segunda compreendeu a análise experimental e *in situ* da argamassa desenvolvida quando aplicada a pequenas células de teste, especialmente concebidas para o efeito.

A simulação numérica com recurso à modelação pelo método dos elementos finitos, numa análise tridimensional do problema de transferência de calor associado aos materiais de mudança de fase, permitiu validar e calibrar o modelo aplicado. As análises paramétricas desenvolvidas, com o recurso à ferramenta numérica utilizada, permitiram o melhor conhecimento dos fenómenos ocorridos e o estudo de soluções alternativas em termos de características e concentrações de PCM. Finalmente, as análises paramétricas possibilitaram a extrapolação para o estudo de casos reais.

Abstract

Building materials with incorporated phase change materials (PCM) are meant to increase heat storage capacity, enable stabilization of interior surface temperatures of buildings whereby influencing the thermal comfort sensation and the stabilization of the interior ambient temperatures.

This study presents the development and characterization of a new composite construction material that consists in embedding micro-encapsulated PCM in plastering mortar.

This research work also aimed experimental and numerical investigation of the first application of the new composite material with the goal of highlighting behavioral differences in regard to common mortars. For that propose two small-scale test cells were built: one with recourse to conventional mortar; and other with PCM plastering mortar. Both cells were monitored when subjected to realistic temperature cycles, with high temperature variation, in order to assess the effect of PCM incorporation.

The numerical modeling of the experiments allowed a better understanding of the phenomena involved, and validation of the simulation tool. Based on such simulation tool, parametric analyses have been conducted in view of alterative PCM characteristics and concentrations. Finally, results of real scale buildings spaces were obtained with resource to numerical modeling.

Índice

Capítulo 1 Introdução 1
1.1 Enquadramento ... 1
1.2 Objetivos ... 3
1.2.1 Objetivos gerais ... 3
1.2.2 Metodologia de investigação ... 5
1.3 Apresentação do conteúdo da tese ... 6
Capítulo 2 Materiais de Mudança de Fase – PCM 9
2.1 Introdução ... 9
2.2 Definições e conceitos ... 11
2.3 PCM: Propriedades, classes e categorias ... 16
2.4 Métodos de ensaio das propriedades térmicas dos PCM ... 20
2.4.1 Introdução ... 20
2.4.2 Método de ensaio DTA ... 21
2.4.3 Método de ensaio DSC ... 21
2.5 PCM com características térmicas adequadas a aplicações no interior dos edifícios ... 22
2.6 Incorporação de PCM em materiais ou componentes da construção ... 25
2.6.1 Introdução ... 25
2.6.2 Impregnação ... 25
2.6.3 Imersão ... 25
2.6.4 Encapsulamento ... 26
2.6.4.1 Introdução ... 26
2.6.4.2 Macrocápsulas ... 26
2.6.4.3 Microcápsulas ... 27
2.7 Materiais e componentes da construção com PCM ... 28

2.7.1 Introdução 28
2.7.2 Painéis de gesso cartonado 28
2.7.3 Ladrilhos cerâmicos 29
2.7.4 Elementos à base de betão 30
2.7.5 Paredes de Trombe 30
2.7.6 Portadas 30
2.7.7 Blocos de betão ou tijolo 31
2.7.8 Pavimentos radiantes 31
2.7.9 Tetos falsos 32
2.8 Comentários síntese 33
Capítulo 3 Desenvolvimento de uma argamassa de revestimento interior com PCM 35
3.1 Objetivo 35
3.2 Argamassas de revestimento 36
3.2.1 Grupos e classes 36
3.2.2 Requisitos 38
3.3 Componentes e formulação de uma argamassa com PCM 40
3.4 Caracterização da argamassa com PCM 44
3.4.1 Avaliação de desempenho 44
3.4.2 Ensaios de caracterização térmica 46
3.4.2.1 Método do choque térmico e método da placa quente 46
3.4.2.2 Ensaios DSC 47
3.5 Análise crítica dos resultados 52
3.6 Conclusões 54
Capítulo 4 Ensaios laboratoriais e *in situ* 55
4.1 Preâmbulo 55
4.2 Descrição das células de teste 56
4.2.1 Propriedades dos materiais 56
4.2.2 Geometria 56
4.3 Ensaios em Laboratório 59
4.3.1 Equipamentos e sistemas de monitorização 59
4.3.2 Ciclos de temperatura 60

4.3.3 Resultados da monitorização de temperaturas 64
4.4 Ensaios *in situ* 67
4.4.1 Equipamentos e sistemas de monitorização 67
4.4.2 Condições climáticas 68
4.4.3 Resultados da monitorização de temperaturas 70
4.5 Síntese comparativa dos resultados obtidos: ensaios em laboratório *vs.* ensaios *in situ* 73
4.6 Análise crítica dos resultados 74
Capítulo 5 Problema Matemático: análise da transferência de calor 77
5.1 Conceitos gerais 77
5.2 Condução 78
5.2.1 Definições e conceitos 78
5.2.2 Equação geral da condução de calor 78
5.2.3 Condução de calor em materiais de mudança de fase 81
5.3 Convecção 82
5.4 Radiação 84
5.4.1 Conceitos gerais 84
5.4.2 Modelo solar 86
5.4.2.1 Preâmbulo 86
5.4.2.2 Radiação solar direta 87
5.4.2.3 Parâmetros geométricos 88
5.4.2.4 Radiação absorvida pela superfície 90
5.5 Convecção e radiação 90
5.5.1 Transferência de calor por convecção-radiação 90
5.5.2 Temperatura fictícia ar-sol 91
5.6 Resolução do problema térmico 91
5.6.1 Métodos de resolução do problema térmico 91
5.6.2 Método dos Elementos Finitos 92
5.7 Comentários síntese 94
Capítulo 6 Resolução Numérica 97
6.1 Introdução 97
6.2 Formulação e condições de fronteira 98

6.3 Propriedades térmicas utilizadas na modelação 100
6.4 Geometria e parâmetros utilizados na modelação 101
6.4.1 Modelação dos ensaios laboratoriais e *in situ*: recurso à temperatura fictícia ar-sol 101
6.4.2 Modelação dos ensaios *in situ*: recurso ao modelo solar 105
6.5 Resultados numéricos e comparação com a monitorização experimental ... 109
6.5.1 Resultados numéricos *vs.* campanha experimental em laboratório 109
6.5.2 Resultados numéricos *vs.* campanha experimental *in situ* 111
6.5.2.1 Simulação numérica com recurso à temperatura fictícia ar-sol 111
6.5.2.2 Simulação numérica com recurso ao modelo solar 116
6.5.3 Síntese de resultados 122
6.6 Análise comparativa entre os resultados numéricos obtidos: células SPCM *vs* CPCM 123
6.7 Conclusões 133
Capítulo 7 Análises Paramétricas 135
7.1 Introdução 135
7.2 Células de teste CPCM: modelação do PCM 136
7.2.1 Análises paramétricas realizadas 136
7.2.2 Estudo do efeito da variação da entalpia de fusão do PCM 136
7.2.3 Estudo do efeito da variação do intervalo de temperaturas de fusão do PCM 138
7.2.4 Estudo do efeito da variação da entalpia e do intervalo de temperaturas de fusão do PCM 139
7.3 Células de teste à escala real: modelação de paredes 141
7.3.1 Introdução 141
7.3.2 Formulação e condições de exposição 142
7.3.3 Propriedades térmicas utilizadas na modelação 142
7.3.4 Geometria e parâmetros utilizados na modelação 143
7.3.5 Análise dos resultados numéricos obtidos 145
7.3.5.1 Resultados numéricos: Porto, mês de agosto 145
7.3.5.2 Resultados numéricos: Lisboa, mês de agosto 147

7.3.5.3 Análise de mapas de evolução das temperaturas ao longo das paredes das células de teste SPCMr e CPCMr 153
7.4 Conclusões 159
Capítulo 8 Conclusões 161
8.1 Conclusões gerais 161
8.2 Desenvolvimentos futuros 164
Anexo A Formulações testadas no desenvolvimento de uma argamassa com PCM 169
Anexo B Boletins de ensaio 173
Referências Bibliográficas 181

Lista de Figuras

Figura 1.1 — Síntese esquemática da metodologia de trabalho. 6
Figura 2.2 — Ciclo de fusão/solidificação da água. 10
Figura 2.3 — Evolução da condutibilidade térmica do betão em função da temperatura (Azenha 2004; Morabito 2001). 13
Figura 2.4 — Evolução do calor específico do betão em função da temperatura (Azenha 2004; Morabito 2001). 13
Figura 2.5 — Estados físicos da matéria (água). 14
Figura 2.6 — Diagrama de fases da água. 15
Figura 2.7 — Duas vias distintas de armazenamento de calor: Calor sensível e Calor latente. 16
Figura 2.8 — Classificação dos PCM em diferentes categorias (gráfico adaptado de (Abhat 1983)). 17
Figura 2.9 — Distribuição das diferentes categorias de PCM em função da entalpia e da temperatura de fusão (gráfico adaptado de (Dieckmann 2008)). 17
Figura 2.10 — Macrocápsulas para materiais de mudança de fase (PCM) (BASF 2010): *(a)* macrocápsulas rígida de polímeros; *(b)* macrocápsulas em folha de alumínio. 26
Figura 2.11 — Microcápsulas para materiais de mudança de fase (PCM) (BASF 2010): *(a)* microcápsula esférica; *(b)* PCM microencapsulados em solução aquosa; *(c)* PCM microencapsulados em pó. 27
Figura 2.12 — Placas de gesso cartonado com PCM micro encapsulado (BASF 2010). 29

Figura 2.13 — Corte esquemático de blocos de betão contendo PCM macroencapsulado (adaptado de (Alawadhi 2008)). 31
Figura 2.14 — Representação esquemática de um pavimento radiante com PCM (adaptado de (Lin et al. 2007)). 32
Figura 2.15 — Representação esquemática de tetos falsos com PCM, funcionamento diurno (adaptado de (Tyagi e Buddhi 2007)). 32
Figura 2.16 — Representação esquemática de tetos falsos com PCM, funcionamento noturno (adaptado de (Tyagi e Buddhi 2007)). 33
Figura 3.17 — Ensaio de pequena chama realizado no Laboratório de Ensaios de Reação ao Fumo e Fogo do INEGI, Porto. 39
Figura 3.18 — Aparência da superfície das amostras da argamassa endurecida - formulações B e C. 43
Figura 3.19 — Aparência da superfície das amostras da argamassa endurecida - formulações H e L. 43
Figura 3.20 — Valor estimado para a condutibilidade térmica da argamassa com PCM (formulação L) – Dados da tabela A.12, EN 1745 (CEN 2002). 46
Figura 3.21 — Equipamentos de ensaio (LFC/FEUP): *(a)* 'CT-Mètre' e *(b)* 'Halometrix GHP-300' 47
Figura 3.22 — Representação esquemática do equipamento utilizado nos ensaios DSC. 48
Figura 3.23 — Registo fotográfico dos ensaios realizados no Laboratório de Química da Universidade de Aveiro: *(a)* pesagem e *(b)* encapsulamento em cadinhos. 48
Figura 3.24 — Registo fotográfico dum ensaio DSC (Laboratório de Química da UA): *(a)* colocação dos cadinhos e *(b)* equipamento 'Perkin Elmer Diamond'. 49
Figura 3.25 — Registo do ensaio DSC sobre uma amostra de PCM. 49
Figura 3.26 — Leitura de dados resultantes do ensaio DSC sobre uma amostra de PCM. 51
Figura 3.27 — Registo do ensaio DSC sobre uma amostra de argamassa com PCM. 52

Figura 4.28 — Representação esquemática das células de teste (unidades: cm)..... 57
Figura 4.29 — Conceção das células de teste: *(a)* e *(b)* cofragem e colocação de rede armada nas paredes; *(c)* cofragem e colocação de rede armada na tampa. 58
Figura 4.30 — Conceção das células de teste: *(a)* e *(b)* paredes e tampa das células após descofragem. 58
Figura 4.31 — Conceção das células de teste: *(a)* argamassa de revestimento interior; *(b)* revestimento exterior (XPS). 58
Figura 4.32 — Equipamentos e sistemas de monitorização: *(a)* sistema de aquisição de dados; *(b)* câmara climática com o modelo 'Votsch VC 4034'. 59
Figura 4.33 — Disposição dos termopares no interior das células de teste: *(a)* superfície interior das paredes; *(b)* centro geométrico da célula..... 60
Figura 4.34 — Temperatura ambiente, Temperatura fictícia ar-sol e Radiação solar global no dia 7 de Abril, no Porto. 62
Figura 4.35 — Temperatura ambiente, Temperatura fictícia ar-sol e Radiação solar global no dia 7 de Abril, em Faro. 63
Figura 4.36 — Monitorização das temperaturas nas células de teste SPCM e CPCM no dia 7 de Abril, no Porto. 65
Figura 4.37 — Monitorização das temperaturas nas células de teste SPCM e CPCM no dia 7 de Abril, em Faro..... 66
Figura 4.38 — Monitorização *in situ* das células de teste: *(a)* representação esquemática em planta; *(b)* e *(c)* fotografias da cobertura do 1º andar do edifício G da FEUP..... 67
Figura 4.39 — Disposição dos sensores tipo 'PT100' no interior das células de teste: *(a)* no centro e na base e *(b)* na tampa e no canto SE. 68
Figura 4.40 — Monitorização da temperatura exterior (T_{ar}) e da radiação solar (I_g) entre os dias 15 e 19 de maio de 2011. 69
Figura 4.41 — Monitorização da velocidade do vento e da humidade relativa entre os dias 15 e 19 de maio de 2011..... 70

Figura 4.42 — Monitorização da temperatura ambiente, da radiação solar e do interior das células SPCM e CPCM, entre os dias 15 e 19 de maio de 2011. 71
Figura 4.43 — Monitorização da temperatura ambiente, da radiação solar e do interior das células (canto SE e tampa), entre os dias 15 e 19 de maio de 2011. 72
Figura 4.44 — Monitorização da temperatura ambiente, da radiação solar e do interior das células (base e centro geométrico), entre os dias 15 e 19 de maio de 2011. 73
Figura 5.45 — Mecanismos de transferência de calor (Azenha 2004). 77
Figura 5.46 — Volume infinitesimal elementar de matéria - C_v. 79
Figura 5.47 — Perfil da velocidade e da temperatura de um fluido na vizinhança de um sólido (Azenha 2004). 83
Figura 5.48 — Espectro das radiações eletromagnéticas (Botelho 2011)..... 84
Figura 5.49 — Parâmetros geométricos considerados na análise do fluxo de radiação solar direta (Azenha 2009). 88
Figura 6.50 — Aproximação da curva DSC à relação linear entre entalpia (H) e temperatura (T), da argamassa com PCM (formulação L). 99
Figura 6.51 — Representação do modelo de 1/8 da célula de teste, utilizado na modelação numérica..... 101
Figura 6.52 — Condições climáticas simuladas numericamente: temperatura fictícia ar-sol de um dia da estação de arrefecimento (dia 7 de Abril), no Porto. 103
Figura 6.53 — Condições climáticas simuladas numericamente: temperatura fictícia ar-sol de um dia da estação de arrefecimento (dia 7 de Abril), em Faro. 103
Figura 6.54 — Condições climáticas simuladas numericamente – Temperatura fictícia ar-sol: dias 15 a 19 de maio de 2011, no Porto. 104
Figura 6.55 — Radiação solar monitorizada pelo piranómetro e radiação estimada pelo modelo solar para T_l = 4,5, nos dias 15 a 19 de maio de 2011. 106

Figura 6.56 — Radiação absorvida por uma superfície de cor branca (α_s = 0,25) estimada pelo modelo solar para T_l = 4,5: dias 15 a 19 de maio de 2011. 107
Figura 6.57 — Radiação absorvida por uma superfície de cor branca (α_s = 0,25) estimada pelo modelo solar para T_l = 4,5 e corrigida para a nebulosidade observada: dias 15 a 19 de maio de 2011..... 108
Figura 6.58 — Radiação absorvida por uma superfície de cor branca (α_s = 0,25) estimada pelo modelo solar para T_l = 4,5 e corrigida para a nebulosidade observada: dias 17 e 18 de maio de 2011..... 108
Figura 6.59 — Monitorização em laboratório e simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM, dia 7 de Abril (Porto). 109
Figura 6.60 — Monitorização em laboratório e simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM, dia 7 de Abril (Faro)..... 110
Figura 6.61 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,15) no interior centro da célula de teste SPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011..... 113
Figura 6.62 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,15) no interior centro da célula de teste CPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011..... 113
Figura 6.63 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,15) no canto SE das células de teste SPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011. 114
Figura 6.64 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,15) no canto SE da célula de teste CPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011. 114
Figura 6.65 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,25) no canto SE das células de teste SPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011. 115

Figura 6.66 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,25) no canto SE das células de teste CPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011. 116
Figura 6.67 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas no centro da célula de teste SPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011. 118
Figura 6.68 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas no centro da célula de teste CPCM dias 15 a 19 de maio de 2011..... 118
Figura 6.69 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas na tampa da célula de teste SPCM dias 15 a 19 de maio de 2011. 119
Figura 6.70 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas na tampa da célula de teste CPCM dias 15 a 19 de maio de 2011..... 119
Figura 6.71 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas no centro da célula de teste SPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011. 120
Figura 6.72 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas no centro da célula de teste CPCM dias 15 a 19 de maio de 2011..... 121
Figura 6.73 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas na tampa da célula de teste SPCM dias 15 a 19 de maio de 2011. 121
Figura 6.74 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas na tampa da célula de teste CPCM dias 15 a 19 de maio de 2011..... 122
Figura 6.75 — Simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM, dia 7 de Abril, no Porto. 124
Figura 6.76 — Simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM, dia 7 de Abril, em Faro. 129
Figura 7.77 — Simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM (ΔH = 12,5 kJ/kg; ΔH = 25 kJ/kg; ΔH = 50 kJ/kg). 137
Figura 7.78 — Simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM (ΔH = 25 kJ/kg: $T_{fusão}$(23-25ºC) ou $T_{fusão}$(24-26ºC)). 139
Figura 7.79 — Simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM (ΔH= 50 kJ/kg: $T_{fusão}$(23-25ºC) ou $T_{fusão}$(24-26ºC)). 140

Figura 7.80 — Célula de teste com duas fachadas opostas de orientação Este-Oeste. 141
Figura 7.81 — Modelo de um espaço interior confinado exteriormente por duas paredes verticais opostas, com orientação Este-Oeste. 143
Figura 7.82 — Condições climáticas simuladas numericamente durante o mês de agosto, no Porto. 144
Figura 7.83 — Condições climáticas simuladas numericamente durante o mês de agosto, em Lisboa. 145
Figura 7.84 — Simulação numérica das temperaturas na face do revestimento interior das células de teste SPCMr e CPCMr, mês de agosto, Porto. 146
Figura 7.85 — Simulação numérica das temperaturas no centro das células de teste SPCMr e CPCMr, mês de agosto, Porto. 147
Figura 7.86 — Simulação numérica das temperaturas na face interior das células de teste SPCMr e CPCMr, para α_s = 0,6, durante o mês de agosto, em Lisboa. 148
Figura 7.87 — Simulação numérica das temperaturas na face interior das células de teste SPCMr, CPCMr e CPCMr2628, para α_s = 0,6, durante o mês de agosto, em Lisboa. 149
Figura 7.88 — Simulação numérica das temperaturas no centro das células de teste SPCMr, CPCMr e CPCMr2628, para α_s = 0,6, durante o mês de agosto, em Lisboa. 149
Figura 7.89 — Simulação numérica das temperaturas na face interior das células de teste SPCMr e CPCMr para α_s = 0,4, durante o mês de agosto, em Lisboa. 150
Figura 7.90 — Simulação numérica das temperaturas no centro das células de teste SPCMr e CPCMr para α_s = 0,4, no mês de agosto, em Lisboa. 151
Figura 7.91 — Simulação numérica das temperaturas na face interior das células de teste SPCMr, CPCMr e CPCMr+ para α_s = 0,4, durante o mês de agosto, em Lisboa. 152

Figura 7.92 — Simulação numérica das temperaturas no centro das células de teste SPCMr, CPCMr e CPCMr+, para α_s = 0,4, durante o mês de agosto, em Lisboa..... 152

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 — Condutibilidade térmica, massa volúmica, calor específico e calor específico volumétrico de alguns materiais de construção. 12
Tabela 2.2 — Vantagens e desvantagens das misturas orgânicas, inorgânicas e eutéticas (Zhou, Zhao, e Tian 2012)..... 19
Tabela 2.3 — Propriedades mais relevantes na seleção dos PCM a utilizar na envolvente dos edifícios (Zalba et al. 2003). 19
Tabela 2.4 — PCM com características térmicas adequadas à aplicação no interior dos edifícios (Zhou, Zhao, e Tian 2012). 23
Tabela 2.5 — PCM disponíveis nos mercados internacionais, com características térmicas adequadas à aplicação no interior dos edifícios. 24
Tabela 2.6 — PCM microencapsulados disponíveis nos mercados internacionais, com características térmicas adequadas à aplicação em edifícios (BASF 2010). 24
Tabela 3.7 — Grupos de argamassas identificados na Norma EN 998-1 (CEN 2010). 36
Tabela 3.8 — Classificação de argamassas de acordo com a EN 998-1 (CEN 2010). 37
Tabela 3.9 — Métodos de ensaio e características requeridas a uma argamassa genérica (GP) ou a uma argamassa leve (LW) (CEN 2010). 38
Tabela 3.10 — Proporções da mistura das formulações A a L e da argamassa de referência (REF). 42
Tabela 3.11 — Resultados e respetivos métodos de ensaio realizados sobre a argamassa com PCM – Formulação L. 44

Tabela 3.12 — Análise crítica dos resultados: argamassa com PCM (formulação L), e propriedades da argamassa de referência (REF). 53
Tabela 4.13 — Características dos materiais utilizados na construção das células de teste (SPCM e CPCM). 56
Tabela 4.14 — Valores máximos da radiação solar incidente sobre superfícies verticais e horizontais exteriores, em Portugal Continental (Sousa, Freitas, e Silva 2003)..... 61
Tabela 5.15 — Métodos de resolução do problema térmico de transferência de calor. 91
Tabela 6.16 — Propriedades das camadas das células de teste (SPCM e CPCM), consideradas na modelação numérica do problema térmico..... 100
Tabela 6.17 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: Representação do revestimento interior de 1/8 das células de teste SPCM e CPCM – intervalos: *t* = 7 h, *t* = 8 h, *t* = 9 h e *t* = 10 h, dia 7 de Abril, no Porto..... 125
Tabela 6.18 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: Representação do revestimento interior de 1/8 das células de teste SPCM e CPCM – intervalos: *t* = 10 h e 15 min, *t* = 10h e 30 min, *t* = 10 h e 45 min e *t* = 11h, dia 7 de Abril, no Porto. 126
Tabela 6.19 — Mapas de evolução dos campos de temperatura. Representação de 1/8 das células de teste SPCM e CPCM: intervalos: *t* = 12 h e 15 min, dia 7 de Abril, no Porto. 128
Tabela 6.20 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: Representação do revestimento interior de 1/8 das células de teste SPCM e CPCM – intervalos: *t* =18h, *t* =19h, *t* =20h e *t* =21h, dia 7 de Abril, em Faro. 131
Tabela 6.21 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: Representação do revestimento interior de 1/8 das células de teste SPCM e CPCM – intervalos: *t* = 32h e 15 min, *t* = 32 h e 30 min, *t* = 32 h e 45 min e *t* = 33 h, dia 7 de Abril, em Faro. 132

Tabela 7.22 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: representação das paredes orientadas a Oeste das células de teste SPCMr e CPCMr – intervalo: t = 20 horas, dia 14 de agosto. 153
Tabela 7.23 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: representação das paredes orientadas a Oeste, SPCMr e CPCMr nos intervalos: t = 14h, t = 15h, t = 16h, t = 17h, t = 18h, t = 19h, t = 20h, t = 21h, t = 22h, t = 23h, t = 24h, dia 14 e t = 1h, dia 15 de agosto..... 154
Tabela 7.24 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: representação das células de teste SPCMr e CPCMr no intervalos t = 20h, dia 14 de agosto. 158

Lista de Símbolos, Abreviaturas e Nomenclatura

Símbolo	Unidade	Designação
λ	W/(m·K)	Condutibilidade térmica
c_p	J/(kg·K)	Calor específico
C	J/(m^3·K)	Calor específico volumétrico
α_T	m^2/s	Difusibilidade térmica
ρ	kg/m^3	Massa volúmica
H	J/kg	Entalpia
L	J	Calor latente
T	ºC	Temperatura
t	S	Tempo
T_1	ºC	Temperatura de fusão
T_2	ºC	Temperatura de pico de fusão
C_v	m^3	Volume infinitesimal elementar de matéria
$\dot{E}_{st}$	W	Taxa de energia armazenada
$\dot{E}_g$	W	Taxa de energia gerada
$\dot{E}_{in}$	W	Taxa de entrada de energia
$\dot{E}_{out}$	W	Taxa de saída da energia
Q	W	Fluxo de calor
$\dot{Q}$	W/m^3	Taxa de geração de energia por unidade de volume
q''	W/m^2	Fluxo convectivo de calor por unidade de área
h_{conv}	W/(m^2·K)	Coeficiente de convecção
T_s	ºC	Temperatura da superfície
T_f	ºC	Temperatura do fluido
R_{se}	(m^2·K)/W	Resistência térmica superficial exterior
R_{si}	(m^2·K)/W	Resistência térmica superficial interior
E	W/m^2	Radiância

Símbolo	Unidade	Designação
ε	-	Emissividade (capacidade de emissão da radiação)
Σ	$W/(m^2 \cdot K^4)$	Constante de Stefan-Boltzmann
G	W/m^2	Irradiação
α_s	-	Coeficiente de absorção solar
h_r	$W/(m^2 \cdot K)$	Coeficiente de transferência de calor por radiação
T_m	ºC	Temperatura média entre a superfície e o meio
T_l	FNU	Turbidez (**U**nidades **N**efelométricas de **F**ormazina)
q_m	W/m^2	Radiação que atinge o nível do mar
q_0	-	Constante solar
H	º	Elevação solar, ângulo entre a direção dos raios solares e o horizonte
I	º	Ângulo de incidência dos raios solares em relação à normal $\bar{n}$
Ψ	º	Azimute da projeção de $\bar{n}$ no plano horizontal
A	º	Ângulo que a superfície faz com o plano horizontal
$\bar{n}$	-	Vetor perpendicular à superfície
$T_{ar\text{-}sol}$	ºC	Temperatura fictícia ar-sol
I_g	W/m^2	Radiação solar total incidente numa superfície horizontal por unidade de área
R_r	$(m^2 \cdot K)/W$	Fração da resistência térmica superficial exterior devido à radiação
T_r	ºC	Temperatura radiante equivalente da abóbada celeste e envolvente exterior celeste

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento

O conforto térmico pode ser definido como o estado de espírito que traduz a aceitação como agradável do ambiente térmico que nos rodeia (ISO 2005). Considera-se que um indivíduo está colocado em condições de temperatura de conforto quando não experimenta qualquer desagrado ou irritação que o distraia das suas atividades de momento ou quando não experimenta sensações de desconforto (trocas de calor exageradas com o ambiente, ou grandes diferenças de temperatura entre as várias partes do corpo).

O estado de equilíbrio térmico, e a consequente sensação de conforto, dependem do ambiente e do indivíduo. Os fatores ambientais que condicionam a sensação de conforto são os seguintes:

- temperatura do ar;
- temperatura superficial do contorno;
- velocidade do ar;
- humidade do ar.

No que diz respeito ao indivíduo, a sensação de conforto depende de inúmeros fatores dos quais se destacam os seguintes:

- idade;
- sexo;
- estado de saúde;
- vestuário;
- tipo de atividade.

É difícil quantificar e identificar a influência de cada um dos fatores enunciados individualmente, pois atuam em conjunto e estão fortemente interrelacionados. O conforto térmico é relativo e dependente de muitas variáveis, sendo muito difícil de calcular.

A temperatura superficial do contorno é importante pois influencia a temperatura do ar, do ambiente onde o indivíduo está inserido, sendo determinante nas trocas por radiação e convecção. A velocidade do ar influencia as trocas por convecção. Já a humidade do ar é mais relevante para temperaturas mais elevadas, diminuindo de importância para temperaturas moderadas.

Os materiais de mudança de fase (PCM) vocacionados para utilização nos elementos construtivos (fachadas, paredes interiores e lajes) caracterizam-se, essencialmente, pela mudança entre o estado sólido e o estado líquido e por apresentarem temperaturas de fusão próximas das temperaturas de conforto exigidas ao ambiente interior (20 ºC ou 25 ºC). A incorporação de PCM na construção, apesar de recente, perspectiva-se como uma aplicação extremamente interessante pois a temperatura superficial dos elementos construtivos é nivelada pela temperatura de fusão destes materiais. A aproximação da temperatura superficial do contorno à temperatura de fusão dos PCM, coincidente com a gama de conforto, é transmitida às temperaturas do ambiente interior tornando-as mais homogéneas, mais estáveis e mais próximas dos níveis desejados.

É habitualmente referido que os edifícios residenciais apresentam uma dependência energética muito menor, quando comparados com edifícios destinados aos serviços ou à indústria. No entanto, em Portugal, são as habitações que têm registado ao longo dos últimos anos um maior aumento no consumo de energia em climatização (DGEG 2010), causado não só por alterações sentidas nos processos construtivos da envolvente dos edifícios, mas também por um aumento das exigências de conforto térmico interior.

Tendo em atenção a atual situação económica em Portugal é importante que as novas construções se façam tendo em atenção medidas de conservação de energia e numa perspectiva de utilização racional das fontes de energia como sendo a conservação de fontes convencionais e o recurso às renováveis. Dentro das energias renováveis e no que se refere ao conforto nos edifícios, é de particular importância o aproveitamento da energia solar passiva (Almeida 1994).

A aplicação de PCM aos elementos da envolvente de edifícios (paredes, pavimentos e tetos) é feita com o intuito de aproveitar a energia solar passiva, com o incremento da capacidade de armazenamento de calor conferida, pelos PCM, aos materiais tradicionalmente utilizados na construção (betão, tijolo, madeira e outros).
Quando se fala em capacidade de armazenamento de um dado elemento é usual distinguir três tipos de armazenamento (Almeida 1994):

— armazenamento de curta duração – por períodos de poucas horas, caraterísticos de elementos de baixa densidade (ou pouca massa) que transmitem rapidamente ao ar ambiente a pouca energia neles armazenada.

— armazenamento diário, ou de 24 horas – armazenamento durante o dia para posterior libertação à noite.

— armazenamento de longa duração – caraterístico dos elementos maciços, mais espessos, onde o calor é armazenado por períodos superiores a um dia.

Dos três tipos de armazenamento, o mais significativo é, sem dúvida, o diário, que é um reflexo do harmónico natural de 24 horas das solicitações exteriores a que um elemento está sujeito, como é o caso da radiação solar e das temperaturas ambientais (Almeida 1994).
Neste estudo demonstrou-se a influência dos PCM na capacidade de armazenamento diário de uma argamassa de revestimento interior, quando sujeita a solicitações climáticas exteriores, em especial: variações de temperatura e radiação solar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

O objetivo principal deste trabalho é o de avaliar como a introdução de PCM nos elementos construtivos correntes utilizados na construção pode influenciar o conforto térmico interior.
Neste trabalho o elemento escolhido para a incorporação de PCM foi a argamassa de reboco, por ser o revestimento interior mais vulgarmente empregue nos edifícios residenciais em Portugal, por estar em contacto direto com o ar interior, facilitando a transmissão do calor armazenado pelo PCM para o meio envolvente, e ainda por não

termos encontrado, na bibliografia consultada, nenhuma referência a este tipo de material compósito de argamassa à base de cimento e cal com PCM.

O trabalho realizado pretende responder a três grandes objetivos, nomeadamente o desenvolvimento de um novo material compósito à base de cimento e cal com PCM, o estudo da sua aplicação, através da monitorização de pequenas células de teste (em laboratório e *in situ*) e a identificação da combinação dos parâmetros associados aos PCM que otimiza a capacidade de armazenamento do calor latente ao longo da sua utilização diária, através da utilização de ferramentas numéricas.

O desenvolvimento da argamassa de revestimento interior com PCM consistiu na procura da formulação adequada à incorporação da maior quantidade possível de PCM nos restantes componentes da mistura. O processo iterativo utilizado conduziu a uma mistura com 25% de PCM, posteriormente caraterizada segundo os requisitos e métodos de ensaio normalizados.

O novo material compósito, a argamassa à base de cimento e cal incorporando PCM microencapsulados, foi aplicado no revestimento interior de pequenas células de teste com o intuito de avaliar a ação dos PCM e estudar a influência da nova argamassa no comportamento térmico de espaços interiores. A campanha experimental realizada, para além de permitir avaliar o efeito dos PCM, teve como objetivo validar o modelo numérico utilizado na resolução numérica do problema matemático de transferência de calor.

Para isso construíram-se duas pequenas células de teste, uma **C**om **PCM**, designada por CPCM e outra **S**em **PCM**, a célula SPCM, fáceis de manusear e monitorizar. As células foram sujeitas a vários ciclos de temperaturas em ambiente controlado (no interior da câmara climática com o modelo ‘Votsch VC 4034’). Para além da campanha experimental realizada em laboratório sujeitaram-se as pequenas células às condições climáticas *in situ* em dias com elevadas amplitudes térmicas diárias e radiação solar intensa. As temperaturas monitorizadas foram posteriormente comparadas com os valores obtidos numericamente através de um programa de elementos finitos (3D). O programa base utilizado foi o DIANA (TNO DIANA BV 2010) adaptado para leitura da radiação solar com uma rotina do programa MATLAB (MathWorks 2010).

Depois de afinado o modelo numérico, realizaram-se análises paramétricas com o intuito de responder ao grande desafio deste trabalho – identificar a combinação dos

parâmetros associados aos PCM (temperatura e entalpia de fusão) que otimiza a capacidade de armazenamento do calor latente ao longo da estação de arrefecimento.

1.2.2 Metodologia de investigação

A primeira fase deste trabalho abrange a pesquisa e a análise detalhada da bibliografia sobre materiais de mudança de fase aplicados à construção, com a finalidade de os poder definir, identificar e caracterizar. São estudadas as propriedades destes materiais e os principais métodos de as avaliar. A forma como os PCM são introduzidos nos materiais de construção correntes é outro dos temas estudado e sintetizado no estado da arte deste trabalho que reúne a pesquisa desenvolvida ao longo do trabalho apresentado.

As restantes fases do estudo desenvolvido estão apresentadas sob a forma de esquema na Figura 1.1. A investigação engloba as fases seguintes:

— avaliação experimental da possibilidade de incorporação de PCM em argamassas de revestimento interior à base de cimento e cal;

— estudo experimental – em laboratório e *in situ* – do comportamento térmico de células de teste, especialmente concebidas para o efeito, com e sem PCM;

— resolução numérica do problema de transferência de calor em materiais de mudança de fase recorrendo ao **M**étodo dos **E**lementos **F**initos (MEF);

— simulação numérica do comportamento térmico das células de teste e comparação com os resultados experimentais;

— simulação numérica do comportamento térmico de células de teste à escala real incluindo a realização de análises paramétricas;

— exploração dos resultados obtidos e avaliação da aplicabilidade de argamassas com PCM no revestimento interior de edificios, em Portugal.

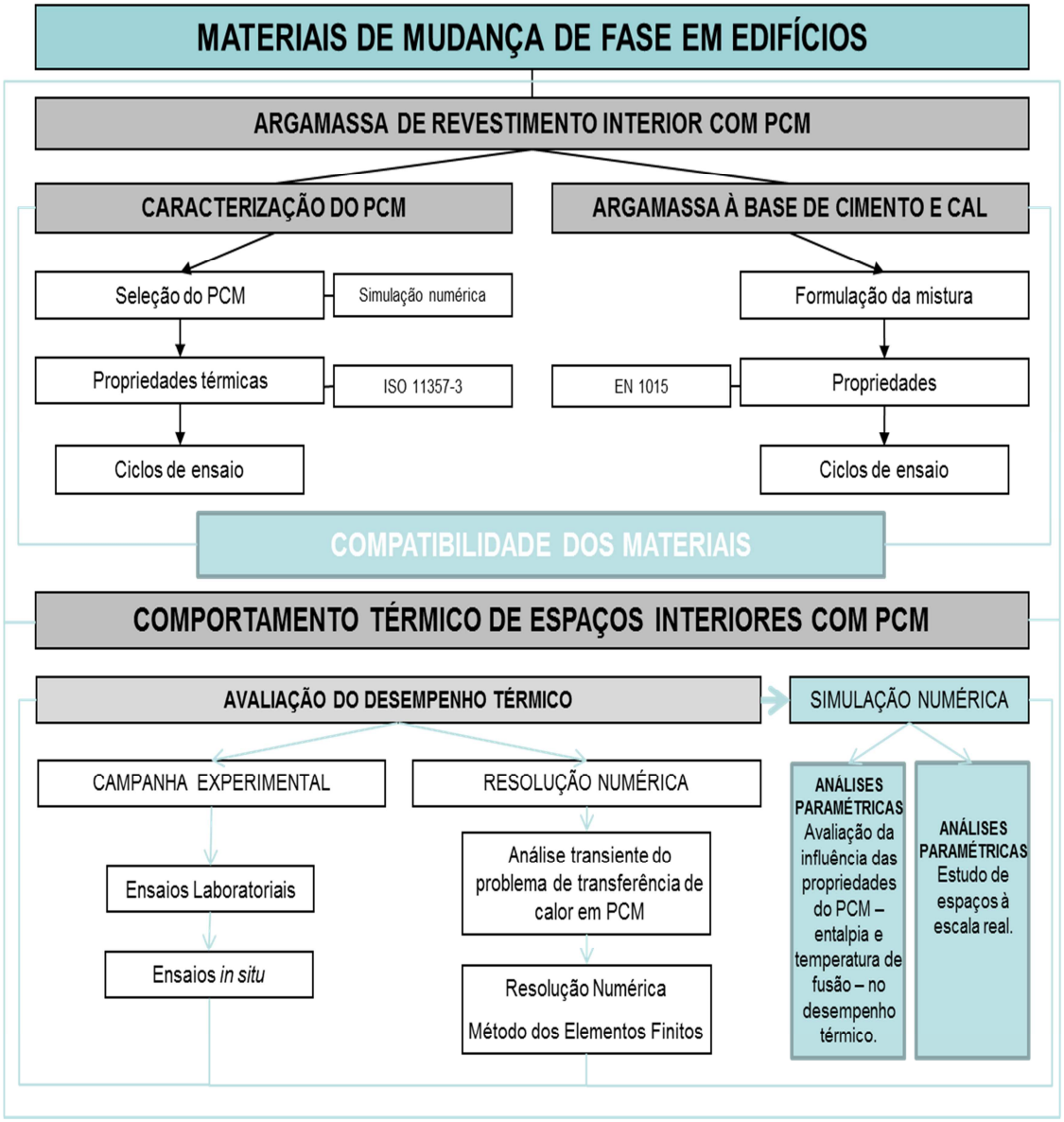


Figura 1.1 — Síntese esquemática da metodologia de trabalho.

1.3 Apresentação do conteúdo da tese

De acordo com o referido, os grandes objetivos do trabalho apresentado foram o desenvolvimento de uma argamassa incorporando PCM, a realização de uma campanha experimental capaz de traduzir o efeito do novo material compósito no comportamento térmico de espaços interiores e, com o recurso a ferramentas numéricas, a identificação das características dos PCM (temperatura e entalpia de fusão) que otimizam a capacidade de armazenamento de calor latente associada à utilização diária dos espaços durante a estação de arrefecimento.

Assim, para cumprir os objetivos propostos, o trabalho elaborado apresenta a organização seguinte:

— CAPÍTULO 1 – resume os objetivos deste trabalho e introduz os restantes capítulos;

— CAPÍTULO 2 – corresponde a uma síntese do estado de arte do conhecimento no domínio dos materiais de mudança de fase aplicados à construção. Em primeiro lugar aborda os conceitos base associados ao processo de armazenamento de calor latente pelos materiais de mudança de fase. Em segundo lugar foca a divisão destes materiais em classes e categorias referindo as principais propriedades associadas à correta seleção destes materiais. Em terceiro lugar, refere alguns dos métodos de ensaio utilizados na caracterização térmica destes materiais. Por fim, inclui uma análise sintética a trabalhos de outros autores realizados no âmbito da incorporação de PCM em materiais e componentes da construção;

— CAPÍTULO 3 – descreve o processo de desenvolvimento e caracterização de um novo material compósito incorporando PCM, concretamente uma argamassa para reboco interior de paredes e tetos à base de cimento e cal;

— CAPÍTULO 4 – descreve as campanhas experimentais realizadas em laboratório e *in situ*. Inclui a descrição da construção e monitorização de células de teste instaladas em ambiente controlado (no interior de uma câmara climática), e *in situ*, na cobertura do edifício G da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto – FEUP, junto à estação meteorológica do Laboratório de Física das Construções – LFC. Apresenta os principais resultados da monitorização experimental com uma análise crítica dos valores obtidos;

— CAPÍTULO 5 – sistematiza a formulação teórica do problema matemático de transferência de calor em materiais de construção correntes e em materiais de mudança de fase;

— CAPÍTULO 6 – apresenta a resolução numérica do problema matemático de transferência de calor através de um modelo de elementos finitos, 3D. Descreve a realização de análises térmicas numéricas das células de teste

utilizadas durante a campanha de ensaios experimentais. As análises térmicas desenvolvidas são comparadas com os resultados obtidos na monitorização experimental com o objetivo de validar o modelo numérico utilizado na resolução do problema matemático de transferência de calor, associado a materiais de mudança de fase;

— CAPÍTULO 7 – apresenta a realização de análises paramétricas com a intenção de otimizar o PCM a aplicar durante a estação climática de arrefecimento. Estuda o efeito da variação da entalpia de fusão e\ou do intervalo de temperaturas de fusão, avaliando a influência da alteração das propriedades do PCM incorporado na argamassa no comportamento térmico das células de teste CPCM. Faz, através de análises paramétricas, uma primeira abordagem ao estudo do comportamento térmico de espaços interiores limitados por paredes, à escala real, revestidas pela argamassa com PCM desenvolvida.

— CAPÍTULO 8 – resume as principais conclusões e perspetiva o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Materiais de Mudança de Fase – PCM

2.1 Introdução

O calor armazenado na forma de calor latente é um sistema de armazenamento de energia reconhecido e eficiente. Os materiais utilizados para o armazenamento de energia na forma de calor latente são designados por '***P**hase **C**hange **M**aterials*' (PCM) (Lane 1983), em português: 'Materiais de mudança de fase'. A elevada capacidade de armazenamento a temperatura constante carateriza estes materiais diferenciando-os dos materiais tradicionalmente utilizados na construção de edifícios. Quando a temperatura ambiente sobe as ligações químicas do PCM quebram e este passa do estado sólido ao líquido. A reação química observada é endotérmica o que significa que o material absorve o calor fornecido. Quando a temperatura volta a descer, o PCM regressa ao estado sólido, libertando o calor armazenado (*v.* Figura 2.2). Estes ciclos contribuem para a estabilização da temperatura interior, conseguida pela ação do PCM de conservação de calor a temperatura constante e não pelo aumento da resistência térmica dos elementos da envolvente dos edifícios.

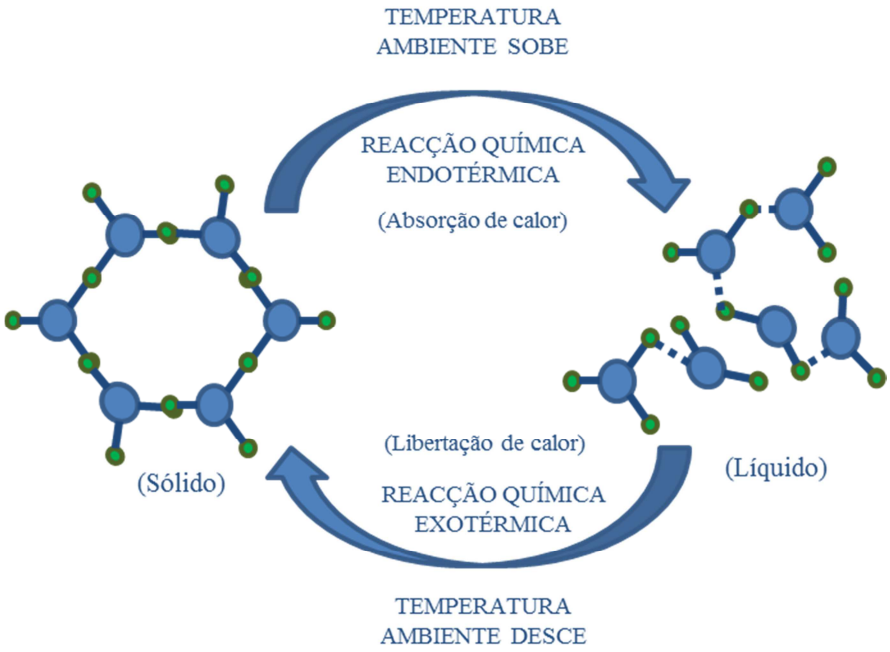


Figura 2.2 — Ciclo de fusão/solidificação da água.

Todos os materiais têm um calor latente associado a cada mudança de fase, mas só alguns são apropriados para a utilização em edifícios. Durante a mudança de fase os materiais devem apresentar um elevado calor latente, conseguir uma transição reversível e garantir pequenas variações no volume. Devem ser quimicamente estáveis e bons condutores de calor (Baetens, Jelle, e Gustavsen 2010). A temperatura a que acontece a mudança de fase, temperatura de fusão, é outra propriedade importante, pois deve ser a adequada às condições de utilização do espaço (produção de calor por: máquinas, iluminação, atividade das pessoas, etc.) e às condições climáticas da envolvente em que o edifício se insere.

Neste capítulo, logo após a referência a alguns conceitos e definições, faz-se um levantamento dos diferentes tipos de PCM, das suas propriedades e das várias formas de os introduzir nos edifícios. Existem muitos materiais que podem ser utilizados como PCM, no entanto, só serão referidos aqueles que forem apropriados a aplicações no interior dos edifícios.

2.2 Definições e conceitos

Os materiais tradicionalmente utilizados na construção (o betão e as argamassas, a pedra, o tijolo, o vidro, a madeira, etc.) apresentam um conjunto de propriedades que lhes confere maior ou menor capacidade de armazenamento de calor e de restituição ao meio do calor armazenado. Antes de mais, convém referir alguns conceitos para melhor compreensão destas aptidões: a condutibilidade térmica, o calor específico, o calor específico volumétrico e a difusibilidade térmica.

À quantidade de calor que atravessa, na unidade de tempo, uma superfície de área unitária, para uma diferença unitária de temperatura entre essa superfície e outra situada a uma distância unitária, dá-se a designação de condutibilidade térmica, que se representa por λ, em W/(m·K).

Por definição, o calor específico – c_p, é a quantidade de calor necessária para elevar de uma unidade de temperatura uma unidade de massa de um corpo (a pressão constante) e as unidades em que se exprime são J/(kg·K).

A capacidade do material para armazenar energia é normalmente representada pelo calor específico volumétrico – C, que resulta do produto da massa volúmica pelo calor específico do material, $\rho \cdot c_p$, e exprime-se em J/(m^3·K).

Difusibilidade térmica – α_T, é a designação dada à relação entre a condutibilidade térmica e o calor específico volumétrico ($\alpha_T = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$), e expressa-se em (m^2/s). Representa uma medida da capacidade de um material conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de a armazenar (Azenha 2004). Materiais com elevados α_T respondem rapidamente a alterações térmicas no meio (como os metais), enquanto materiais com α_T reduzidos (como por exemplo os materiais utilizados no isolamento térmico: poliestireno extrudido (XPS), cortiça e outros) responderão lentamente, demorando mais tempo até que se estabeleça nova condição de equilíbrio.

Na Tabela 2.1 estão apresentados valores da condutibilidade térmica (Santos e Matias 2007), da massa volúmica (Santos e Matias 2007), do calor específico (Mendonça 2005; Coelho 2007) e do calor específico volumétrico de alguns materiais tradicionalmente utilizados na construção de edifícios.

Tabela 2.1 — Condutibilidade térmica, massa volúmica, calor específico e calor específico volumétrico de alguns materiais de construção.

Material	Condutibilidade térmica	Massa volúmica	Calor específico	Calor específico volumétrico
	λ_{10} [W/(m·K)]	ρ [kg/m^3]	c_p [kJ/(kg·K)]	$\rho.c_p$ [kJ/(m^3·K)]
Água (T = 10 ºC)	0,600	1000	4,181	4181
Ar (T = 20 ºC)	0,025	1,230	1,012	1,245
Argamassa (rebocos tradicionais)	1,300 1,800	1800 – 2000 > 2000	1,000 1,046	1800 – 2000 > 2092
Betão (betões normais)	1,650 2,000	2000 – 2300 2300 – 2600	0,880 1,040	1760 – 2024 2392 – 2704
Cerâmica (tijolos, telhas, ladrilhos)	0,600	1400 – 1600	0,840	1176 – 1344
Isolantes térmicos:				
EPS	0,040	15,00 – 20,00	1,550	15,83 – 21,10
XPS	0,037	25,00 – 40,00	1,045	26,13 – 41,80
ICB	0,045	90,00 – 140,0	0,170	15,30 – 23,80
Madeira (madeiras densas)	0,230	750,0 – 820,0	1,500 – 2,500	1125 – 2050
Metais (aço)	50,00	7800	0,450 – 0,512	3510 – 3994
Pedras naturais:				
Granito	2,800	2500 – 2700	0,790	1975 – 2133
Pedras calcárias	1,400	1800 – 1990	0,810	1458 – 1612
Vidro (vidro de quartzo)	1,400	2200	0,840	1848

De acordo com as definições apresentadas, a capacidade de armazenamento de calor (que resulta do produto $\rho \cdot c_p$) e de restituição ao meio do calor armazenado, traduzida essencialmente pela difusibilidade térmica, são características intrínsecas dos materiais. No entanto, estas propriedades não são constantes, já que a variação da temperatura, a presença da água ou o estado físico em que os materiais se encontram fazem alterar as propriedades dos materiais. O aumento da temperatura contribui, em geral, para o decréscimo do valor da condutibilidade térmica (λ) e para o aumento do calor específico (c_p). A título de exemplo os gráficos das Figuras 2.3 e 2.4 mostram a evolução de λ e de c_p do betão em função da temperatura. A presença de humidade contribui, habitualmente, para o aumento dos valores de λ e de c_p, já que a água é das substâncias com maior calor específico, c_p = 4,181 J/(kg·K) (*v.* Tabela 2.1),

ultrapassada apenas pelo Hidrogénio e pelo Amoníaco que não são substâncias utilizadas na construção (Coelho 2007). Os materiais, quando no estado sólido, são melhores condutores de calor do que no estado líquido ou gasoso, ou seja, apresentam condutibilidades térmicas mais elevadas, por exemplo a água, próxima dos 0 ºC apresenta uma condutibilidade térmica de λ = 0,58 W/(m·K), abaixo dos 0 ºC, quando passa a gelo, apresenta um valor de λ = 2,18 W/(m·K) (Coelho 2007).

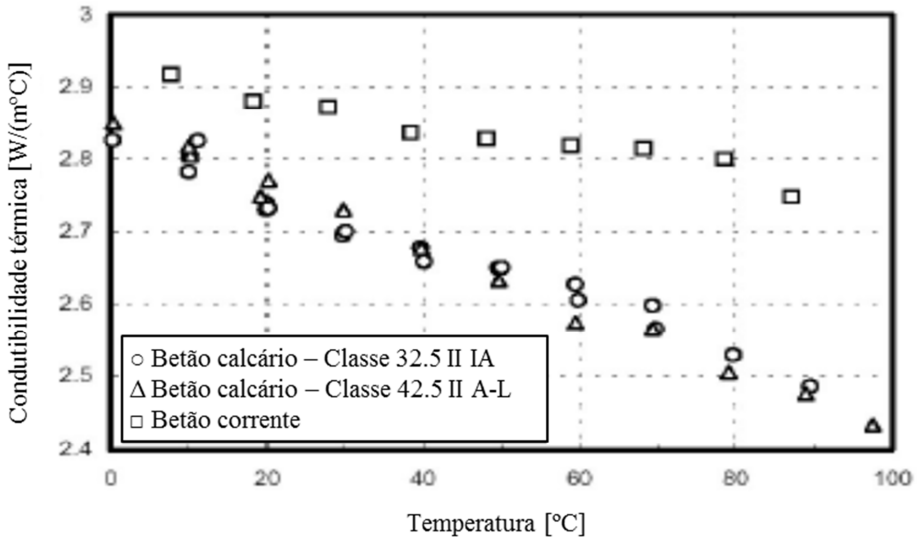


Figura 2.3 — Evolução da condutibilidade térmica do betão em função da temperatura (Azenha 2004; Morabito 2001).

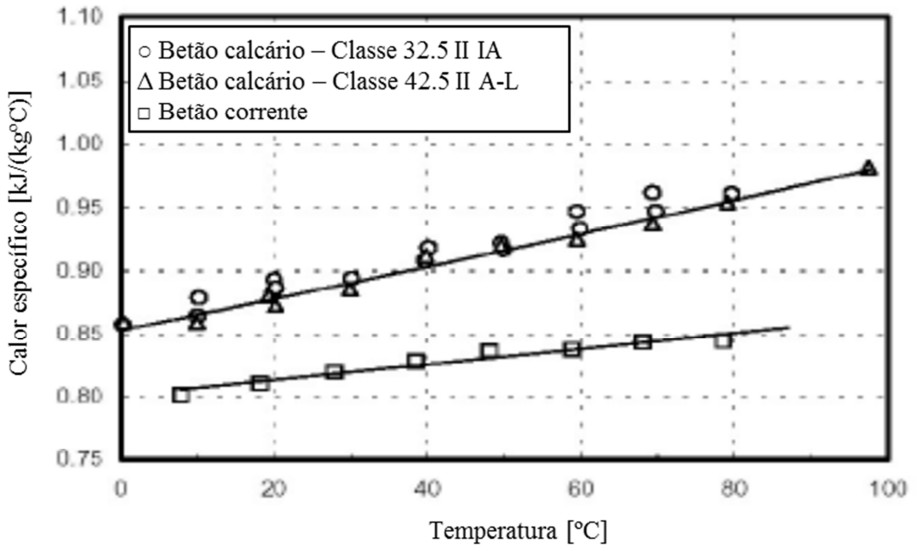


Figura 2.4 — Evolução do calor específico do betão em função da temperatura (Azenha 2004; Morabito 2001).

Os materiais tradicionalmente utilizados na construção distinguem-se, essencialmente, dos utilizados como PCM por não sofrerem uma mudança de fase, durante o intervalo de temperaturas de utilização previsto. Uma fase pode ser definida como uma quantidade de matéria totalmente homogénea (sólida, líquida ou gasosa). Em cada fase a substância pode existir a várias pressões e temperaturas ou, utilizando a terminologia da termodinâmica, em vários estados. O estado sólido é caracterizado pela forte coesão molecular que confere à matéria uma forma estável; o estado gasoso pela fraca coesão molecular e, por conseguinte, sem forma; e o estado líquido é um estado intermédio (Figura 2.5).

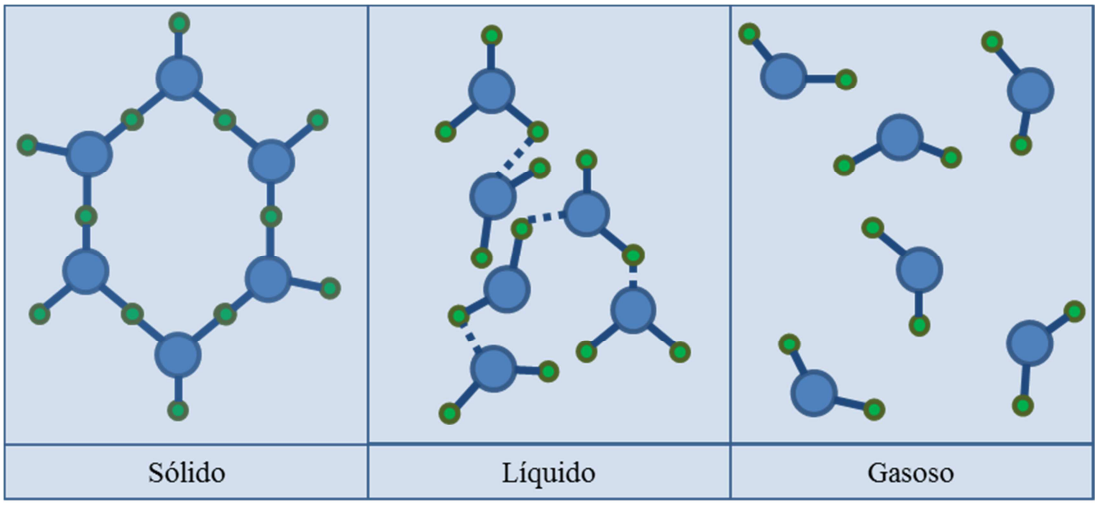


Figura 2.5 — Estados físicos da matéria (água).

Para compreendermos melhor os conceitos mencionados tomemos como exemplo uma substância muito familiar, a água. Se considerarmos uma dada massa de água reconhecemos que ela pode existir sob várias formas. Se ela é inicialmente líquida pode tornar-se vapor, após aquecida, ou num sólido quando arrefecida.

Consideremos agora uma dada massa de gelo, a temperatura e pressão conhecidas. Quando fornecemos calor ao gelo, a uma pressão constante, o volume específico aumenta ligeiramente e a temperatura aumenta até atingir 0 ºC, ponto no qual o gelo se funde enquanto a temperatura permanece constante (a 0 ºC). 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) necessário para se dar a fusão completa do gelo em água é de, aproximadamente,

334 kJ/kg (Coelho 2007). Quando todo o gelo estiver fundido, qualquer transferência de calor adicional causa um aumento da temperatura do líquido (até aos 100 ºC, temperatura de ebulição, na passagem do estado líquido ao gasoso). A energia fornecida à água a 0 ºC (na temperatura de fusão) só será restituída após a diminuição da temperatura, na passagem de água para gelo – numa reação exotérmica.

O gráfico da Figura 2.6 pretende sintetizar o diagrama de fases da água. Representa a energia (em forma de calor) utilizada pela água (nos vários estados) para aumentar a respetiva temperatura, permitindo observar a grande quantidade de calor associada às mudanças de fase. À quantidade total de energia gerada na mudança de fase dá-se a designação de 'entalpia de mudança de fase' ou apenas 'entalpia'.

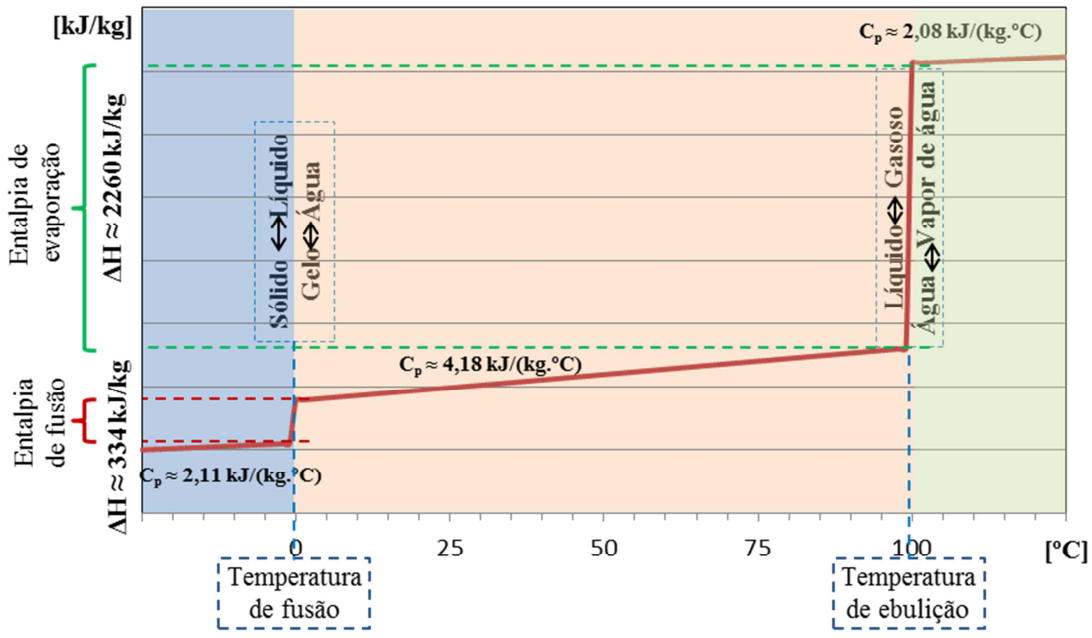


Figura 2.6 — Diagrama de fases da água.

A quantidade de energia necessária para elevar a temperatura da água entre os 1 ºC e os 80 ºC é aproximadamente igual à quantidade de calor utilizada para se dar a fusão do gelo em água. A quantidade de calor associada à mudança de fase e a quantidade de calor associada ao calor específico do material (c_p) distinguem-se por calor latente e calor sensível, respetivamente. O esquema representado na Figura 2.7 ilustra a diferença entre estes dois conceitos, calor latente e calor sensível, tendo em atenção a alusão feita à água.



Figura 2.7 — Duas vias distintas de armazenamento de calor: Calor sensível e Calor latente.

Os materiais utilizados como PCM em edifícios são caracterizados pela transição entre a fase sólida e líquida. Associados a uma reação química endotérmica, na fusão (durante a passagem de sólido a líquido), e a uma reação exotérmica na solidificação (na passagem de líquido a sólido). Estas e outras propriedades importantes para a correta seleção do PCM a utilizar no interior de espaços habitados estão caracterizadas nos parágrafos seguintes.

2.3 PCM: Propriedades, classes e categorias

A estabilização da temperatura no interior dos edifícios, ou a diferença e o desfasamento entre as temperaturas exteriores e interiores, pode ser conseguida tirando proveito do calor sensível – associado aos materiais tradicionalmente utilizados na construção, ou aproveitando o calor gerado durante as mudanças de estado: o calor latente – associado aos designados PCM. Os materiais utilizados como PCM na construção são aqueles que fazem a transição entre o estado sólido e o estado líquido, podendo estes ser classificados em duas categorias distintas: orgânicos e inorgânicos. Estas categorias aparecem ainda subdivididas em misturas

(de parafinas e ácidos gordos ou de sais hidratados) e misturas eutéticas. A classificação dos PCM está ilustrada no gráfico da Figura 2.8.

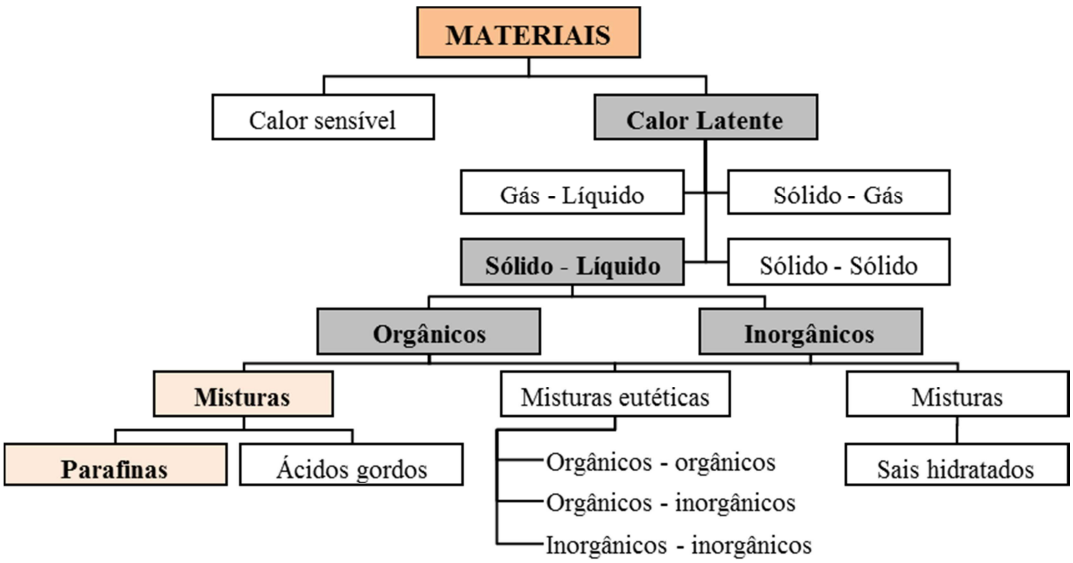


Figura 2.8 — Classificação dos PCM em diferentes categorias (gráfico adaptado de (Abhat 1983)).

A cada categoria ou grupo de PCM está associada uma gama de entalpias e uma gama de temperaturas de fusão características (*v.* Figura 2.9).

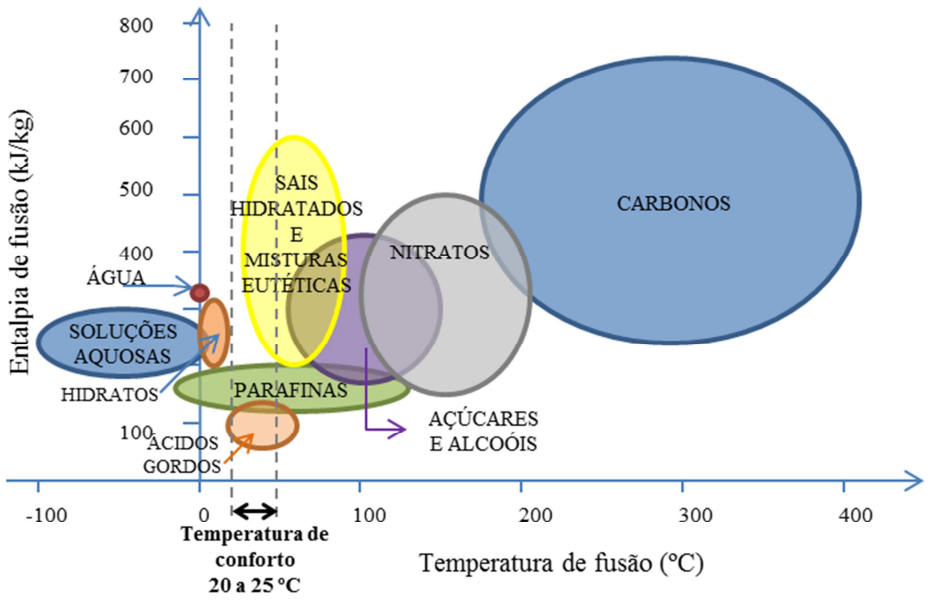


Figura 2.9 — Distribuição das diferentes categorias de PCM em função da entalpia e da temperatura de fusão (gráfico adaptado de (Dieckmann 2008)).

A observação do gráfico anterior (*v.* Figura 2.9) permite verificar que as parafinas, os ácidos gordos, os sais hidratados e as misturas eutéticas apresentam temperaturas de fusão dentro da gama de utilização corrente dos edifícios (no intervalo de temperaturas de conforto, entre os 20 ºC e os 25 ºC) o que os torna os mais adequados para a aplicação no interior dos espaços habitados. Destes os sais hidratados e as misturas eutéticas apresentam maior entalpia de fusão. No entanto, são as parafinas que reúnem o conjunto de características que tornam a sua aplicação em edifícios mais vantajosa face aos materiais inorgânicos e às misturas eutéticas.

Os materiais orgânicos, como as parafinas, são quimicamente estáveis, garantem uma transição reversível e não são corrosivos (Baetens, Jelle, e Gustavsen 2010). Os sais hidratados apresentam melhor condutibilidade térmica ($\lambda \approx 0{,}5$ W/(m.K)), são económicos e não inflamáveis. No entanto, são corrosivos e sofrem sobrearrefecimento[1] (Zhou, Zhao, e Tian 2012). As misturas eutéticas podem ser subdivididas em três subcategorias: orgânicos-orgânicos; orgânicos-inorgânicos; e inorgânicos-inorgânicos. São caracterizadas por apresentarem uma temperatura de fusão/solidificação bem definida (à semelhança do que acontece com as substâncias puras, como a água). No entanto, a utilização de misturas eutéticas como PCM é muito recente, existindo pouca informação disponível sobre estes materiais. A Tabela 2.2 resume as vantagens e desvantagens entre os materiais, orgânicos e inorgânicos e as misturas eutéticas, com capacidade de armazenamento de calor na forma de calor latente.

Em resumo, a utilização de PCM, só é possível se estes materiais apresentarem determinadas características térmicas, físicas e químicas, compatíveis com os materiais de construção e com as condições de utilização. Para além disso, é necessário que estejam disponíveis no mercado e que sejam económicos. As propriedades necessárias à correta caracterização dos PCM estão sintetizadas na Tabela 2.3.

[1] Sobrearrefecimento é a designação dada ao processo de redução da temperatura de um líquido, abaixo da sua temperatura de solidificação sem que este se torne sólido.

Tabela 2.2 — Vantagens e desvantagens das misturas orgânicas, inorgânicas e eutéticas (Zhou, Zhao, e Tian 2012).

	MISTURAS ORGÂNICAS	**MISTURAS INORGÂNICAS**	**MISTURAS EUTÉTICAS**
VANTAGENS	Disponíveis numa alargada gama de temperaturas de fusão Elevada entalpia de fusão Baixo ou nenhum sobre arrefecimento Estabilidade química, recicláveis Boa compatibilidade com outros materiais	Elevada entalpia de fusão Melhor condutibilidade térmica ($\lambda \approx 0{,}5$ W/(m.K)) Reduzida variação de volume Baixo custo	Temperatura de fusão bem definida (exata) Elevada capacidade de armazenamento de calor ($C = \rho c_p$, elevado) Elevada entalpia de fusão
DESVANTAGENS	Condutibilidade térmica baixa ($\lambda \approx 0{,}2$ W/(m.K)) Alteração do volume Inflamável	Sobrearrefecimento Corrosão	Falta de informação disponível

Tabela 2.3 — Propriedades mais relevantes na seleção dos PCM a utilizar na envolvente dos edifícios (Zalba et al. 2003).

PROPRIEDADES TÉRMICAS	**PROPRIEDADES FÍSICAS**	**PROPRIEDADES QUÍMICAS**	**PROPRIEDADES ECONÓMICAS**
Temperatura de fusão/solidificação – próxima da temperatura de conforto	Alteração de volume na mudança de fase: reduzida	Estabilidade química	Barato e abundante
Entalpia elevada	Variação da massa volúmica: reduzida	Reversibilidade na passagem de sólido/líquido e de líquido/sólido	
Condutibilidade térmica (nas fases sólida e líquida) elevada	Pressão de vapor durante a mudança de fase: reduzida	Duráveis – não apresentarem degradação ao fim de vários ciclos de fusão/solidificação	
Calor específico e massa volúmica elevadas	Mudança de fase uniforme na passagem de sólido/líquido e de líquido/sólido	Não inflamáveis, não tóxicos e não poluentes	

Os PCM são utilizados no interior dos edifícios com o intuito de melhorar as condições de conforto térmico. Por conseguinte, de entre as várias características apresentadas na Tabela 2.3 destacam-se as propriedades térmicas, sendo estas decisivas na seleção do PCM adequado à aplicação pretendida. Do ponto de vista térmico os PCM devem apresentar um intervalo de temperaturas de mudança de fase adequado à temperatura operacional expectável para o interior dos edifícios, que deverá ser próxima das temperaturas de conforto: 20 ºC para a estação de aquecimento, e 25 ºC para a estação de arrefecimento (Ministério das Obras Públicas 2006). A temperatura de fusão adequada (ou o intervalo de temperaturas de fusão) vai depender não só das temperaturas de conforto requeridas para o espaço interior, mas também das condições climáticas da envolvente em que o edifício está inserido. A capacidade de armazenamento de calor, latente (associada à mudança de fase) e sensível (dada pelo calor específico volumétrico), deve ser elevada. A condutibilidade térmica deve contribuir para facilitar a restituição do calor armazenado ao meio interior, ou seja, deve ser elevada. É muito importante garantir a estabilidade destas características ao longo do tempo, evitando a alteração das propriedades térmicas dos PCM mesmo depois de submetidos a vários ciclos de fusão/solidificação. Estudos recentes, publicados por Shukla *et al.* (Shukla, Buddhi, e Sawhney 2008), demonstraram que os PCM orgânicos garantem maior estabilidade térmica do que os PCM inorgânicos.

2.4 Métodos de ensaio das propriedades térmicas dos PCM

2.4.1 Introdução

Os métodos de ensaio utilizados na caracterização térmica dos PCM são muito importantes, dado que propriedades como a temperatura de fusão, a entalpia de fusão e a condutibilidade térmica dos materiais são decisivos na seleção do PCM a utilizar.

Dos vários métodos referidos na bibliografia consultada referem-se os dois mais vulgarizados, nomeadamente os ensaios DTA (‘***D**ifferential **T**hermal **A**nalysis’*) (Bhadeshia 2002) e os ensaios DSC (‘***D**ifferential **S**caning **C**alorimeter’*) (Dean 1995).

2.4.2 Método de ensaio DTA

O método DTA, no qual a temperatura da amostra é comparada com a temperatura de uma amostra inerte de referência, foi concebido por um metalurgista Inglês, Roberts Austin (1889). Nesta técnica, a diferença de temperaturas entre a substância e o material de referência é medida em função da temperatura imposta.

A amostra e o material de referência são submetidos à mesma programação de aquecimento registada pelos sensores de temperatura, geralmente termopares. A referência pode ser alumina em pó ou simplesmente uma cápsula vazia. Ao longo do programa de aquecimento, a temperatura da amostra e da referência mantêm-se iguais até que ocorra alguma alteração física ou química na amostra. Se a reação for exotérmica, a amostra irá libertar calor, ficando, por um curto período de tempo, com uma temperatura superior à da referência. Do mesmo modo, se a reação for endotérmica, a temperatura da amostra será temporariamente menor do que a da referência. Mudanças na amostra, tais como fusão, solidificação e cristalização, são registadas sob a forma de picos, numa curva com a temperatura ou o tempo nas abcissas e o diferencial de temperaturas (entre amostra e referência) nas ordenadas.

A principal utilidade do método DTA é detetar a temperatura inicial dos processos térmicos e caracterizá-los qualitativamente como endotérmico ou exotérmico, reversível ou irreversível. Este tipo de informação faz com que este método seja particularmente importante na determinação de diagramas de fase. No entanto, existem vários fatores que influenciam as curvas apresentadas pelo gráfico resultante da aplicação do método DTA, inviabilizando a conversão da área compreendida pelas curvas (que representa o diferencial de temperaturas) em calor.

2.4.3 Método de ensaio DSC

***D**ifferential **S**caning **C**alorimetry* (DSC) foi a designação dada ao instrumento de medição desenvolvido em 1964 pela empresa Perkin-Elmer. Esta é também a designação utilizada para definir a correspondente técnica de ensaio. Nos ensaios DSC, a amostra e a referência são colocados em recipientes distintos (cadinhos) com fontes de aquecimento individuais.

O material de referência deve apresentar as seguintes características: não reagir com o cadinho ou com as fontes de calor, não apresentar qualquer reação térmica ao longo

do ciclo de ensaio e apresentar uma condutibilidade térmica e uma capacidade de armazenamento de calor próximas da amostra que se pretende estudar.

Nos recipientes, quer a amostra quer a referência são mantidas à mesma temperatura durante o ciclo térmico programado. Para tal, é necessário corrigir a energia fornecida durante a reação térmica que ocorre na amostra. Durante a reação, o sistema aumenta imediatamente a energia fornecida à amostra, no caso de o processo ser endotérmico, ou diminui a energia fornecida, quando a reação é exotérmica. A energia fornecida permite quantificar as transformações ocorridas, uma vez que a transferência de calor é proporcional à energia envolvida na reação.

A diferença entre os métodos DTA e DSC é que no primeiro, a energia fornecida à amostra e à referência é sempre a mesma, registando-se diferenças de temperaturas entre elas (amostra e referência) sempre que ocorre uma reação na amostra, enquanto nos ensaios DSC o que se mede é a diferença entre a energia fornecida à amostra e à referência para as manter sempre à mesma temperatura.

O método DSC é muito útil para determinar a entalpia de fusão (correspondente à energia envolvida na reação química) e a temperatura ou intervalo de temperaturas de fusão/solidificação.

2.5 PCM com características térmicas adequadas a aplicações no interior dos edifícios

Os PCM contribuem para a estabilização da temperatura interior dos edifícios, conseguida pela ação de conservação de energia interna (na forma de calor) a temperatura constante, correspondente à temperatura de fusão. A temperatura ótima de fusão varia essencialmente com as condições do ambiente exterior e com as características dos materiais de construção utilizados. Foram já apresentados vários estudos a propósito da estimativa da temperatura ótima de fusão requerida aos PCM. Peippo *et al.* (Peippo, Kauranen, e Lund 1991) estimaram que, para as condições climáticas da estação de aquecimento na Finlândia, a temperatura ótima dos PCM incorporados em painéis de gesso cartonado aplicados na superfície interior das paredes deveria ser 1 a 3 ºC superior em relação à temperatura média interior. Já outros estudos, publicados por Neeper (Neeper 1999) ou por Xu *et al.* (Xu et al. 2005) concluem que a temperatura de fusão ótima deve ser equivalente à temperatura

média interior. Sabendo que as temperaturas de conforto requeridas pela normalização vigente (Ministério das Obras Públicas 2006) variam entre a estação de aquecimento e de arrefecimento, sendo de 20 ºC e 25 ºC, respetivamente, e, tendo em conta a necessidade de satisfação das condições de conforto térmico, devem ser selecionados PCM com temperaturas de fusão entre os 18 ºC e os 30 ºC.

Alguns dos PCM, misturas orgânicas, misturas inorgânicas (sais hidratados) e misturas eutéticas, com características térmicas adequadas à aplicação no interior dos edifícios encontram-se indicados nas Tabelas 2.4, 2.5 e 2.6.

Tabela 2.4 — PCM com características térmicas adequadas à aplicação no interior dos edifícios (Zhou, Zhao, e Tian 2012).

DESIGNAÇÃO COMERCIAL	TIPO	TEMP. DE FUSÃO T [ºC]	ENTALPIA DE FUSÃO ΔH [kJ/kg]	CALOR ESPECIFICO c_p [kJ/(kg·K)]	COND. TÉRMICA λ [W/(m·K)]
Parafina C16–C18	O	20–22	152	-	-
Parafina C13–C24	O	22–24	189	0,21	0,21
Parafina C28	O	28	244	2,16	0,15
Butyl stearate	O	19	140	-	-
1-Dodecanol	O	26	200	-	-
n-Octadecane	O	28	200	-	-
Vinyl stearate	O	27-29	122	-	-
Dimenthyl sebacate	O	21	120-135	-	-
Polyglycol E 600	O	22	127,2	-	0,189
45/55 Capric+lauric acid	EU-O	21	143	-	-
Propyl palmitate	O	19	186	-	-
Octadecyl 3-mencaptopropylate	O	21	143	-	-
$KF.4H_2O$	INO	18,5	231	1,84 (s) 2,39 (l)	-
$Mn(NO_3).6H_2O$	INO	25,8	125,9	-	-
$CaCl_2 .6H_2O$	INO	29,7	171	1,45 (s)	-
$Cacl_2 .6H_2O$ + Nucleat + $MgCl_2$. $6H_2O$(2:1)	EU-INO	25	127	-	-
48% $CaCl_2$ + 4.3% NaCl + 0.4%KCI + 47.3%H_2O	EU-INO	26,8	188	-	-

O – Mistura Orgânica (Parafinas / ácidos gordos)
INO – Mistura Inorgânica (Sais hidratados)
EU-O – Mistura Eutéctica Orgânica-Orgânica
EU-INO – Mistura Eutéctica Inorgânica-Inorgânica
(s) – Estado sólido
(l) – Estado líquido

Tabela 2.5 — PCM disponíveis nos mercados internacionais, com características térmicas adequadas à aplicação no interior dos edifícios.

DESIGNAÇÃO COMERCIAL	TEMP. DE FUSÃO T [ºC]	ENTALPIA DE FUSÃO ΔH [kJ/kg]	CALOR ESPECIFICO c_p [kJ/(kg·K)]	COND. TÉRMICA λ [W/(m·K)]	REFS.
RT20 (Parafina)	22	172	-	-	(Rubitherm 2009)
RT 25 (Parafina)	25	147	2,1 (s) 2,9 (l)	-	(Rubitherm 2009)
RT 27 (Parafina)	26-28	179	1,8 (s) 2,4 (l)	-	(Rubitherm 2009)
RT 30 (Parafina)	30	206	-	-	(Rubitherm 2009)
STL 27	27	213	-	-	(Climator 2009)
Climsel C23 (Sal hidratado)	23	148	-	-	(Cristopia 2010)
Climsel C24 (Sal hidratado)	24	216	-	-	(Cristopia 2010)
S 27 (Sal hidratado)	27	190	1,47 (s) 2,22 (l)	0,79 (s) 0,48 (l)	(PCM Energy 2009)
TH 29 (Sal hidratado)	29	188	-	-	(Climator 2009)
SP 22 A 17	22	150	-	0,6	(Rubitherm 2009)
SP 25 A 8	25	180	2,5	0,6	(Rubitherm 2009)
SP 29	29	157	-	0,6	(Rubitherm 2009)

(s) – Estado sólido
(l) – Estado líquido

Tabela 2.6 — PCM microencapsulados disponíveis nos mercados internacionais, com características térmicas adequadas à aplicação em edifícios (BASF 2010).

DESIGNAÇÃO COMERCIAL	MATERIAIS ORGÂNICOS EM:	TEMP. DE FUSÃO T [ºC]	ENTALPIA DE FUSÃO ΔH [kJ/kg]	MASSA VOLÚMICA ρ [kg/m^3]
DS 5000	Solução aquosa	26	45	-
DS 5007	Solução aquosa	23	41	-
DS 5030	Solução aquosa	21	37	-
DS 5001	Pó	26	110	250 – 350
DS 5008	Pó	23	100	250 – 350
DS 5029	Pó	21	90	250 – 350

2.6 Incorporação de PCM em materiais ou componentes da construção

2.6.1 Introdução

Os materiais de mudança de fase podem ser incorporados nos materiais ou sistemas construtivos por três métodos distintos: impregnação (ou incorporação direta), imersão e encapsulamento (Hawes, Feldman, e Banu 1993).

A impregnação e imersão são dois processos distintos de introdução de PCM em materiais tradicionalmente utilizados na construção. No entanto, ambos condicionam os materiais de construção ao contacto direto com os PCM.

2.6.2 Impregnação

Os PCM podem ser adicionados às composições das misturas de determinados materiais de construção como, por exemplo, às misturas de gessos ou de betões, no estado sólido (em pó) ou líquido (soluções aquosas). Este é o método mais simples de introdução de PCM em materiais de construção, não sendo necessária a utilização de equipamentos complementares, distintos dos convencionais. No entanto, a incompatibilidade dos PCM com os materiais de construção tem sido apontada como a principal desvantagem da impregnação (Zhou, Zhao, e Tian 2012).

2.6.3 Imersão

O método de imersão direta de PCM é utilizado em materiais de construção porosos, à base de betão ou cerâmica, como, por exemplo, blocos para alvenaria. Os materiais são imersos em PCM derretido ou dissolvido que, por capilaridade, se entranha nos seus poros. Ao secar, o PCM endurece no interior da estrutura porosa dos materiais. Este método tem a vantagem de poder converter um material corrente num composto com PCM, mas apresenta alguns inconvenientes. Trata-se de um processo lento e que implica o desperdício de PCM durante a imersão e durante a utilização do material composto, devido a fugas de PCM durante os ciclos térmicos (Kaasinen 1992).

2.6.4 Encapsulamento

2.6.4.1 Introdução

O encapsulamento de PCM surge como forma de evitar o contacto direto com os materiais de construção e assim evitar a interação entre eles. As cápsulas, macro ou microcápsulas, são normalmente produzidas à base de polímeros. O encapsulamento torna o manuseamento de líquidos mais fácil.

2.6.4.2 Macrocápsulas

As macrocápsulas para PCM podem apresentar várias formas: esféricas, cilíndricas ou outras e podem ser fabricadas a partir de vários materiais, como folha de alumínio ou polímeros, sendo produzidas isoladamente e só posteriormente inseridas nos materiais de construção. Na Figura 2.10 mostram-se alguns exemplos de macrocápsulas contendo PCM.



(a) *(b)*

Figura 2.10 — Macrocápsulas para materiais de mudança de fase (PCM) (BASF 2010): *(a)* macrocápsulas rígida de polímeros; *(b)* macrocápsulas em folha de alumínio.

A principal desvantagem deste método de introdução de PCM em edifícios é a necessidade de adequar os sistemas construtivos à presença das macrocápsulas. Outra importante preocupação é manter as cápsulas intactas durante o uso do edifício. Devido à concentração de uma elevada quantidade de PCM, a condutibilidade térmica é reduzida e há tendência para a solidificação (cristalização) junto aos limites da cápsula, impedindo a transferência da energia interna acumulada pelo PCM para o ambiente interior (Cabeza et al. 2007).

2.6.4.3 Microcápsulas

O micro encapsulamento pode ser definido como o processo de envolver ou englobar uma substância numa outra substância numa escala muito pequena, estando o diâmetro das cápsulas compreendido entre 1 a 1000 μm. As microcápsulas podem ser esféricas, de paredes contínuas (*v.* Figura 2.11), ou podem ser assimétricas, com várias formas. Materiais nos três estados de matéria (sólido, líquido e gasoso) podem ser microencapsulados. A película polimérica que serve de microcápsula deve ser compatível com o PCM e com os materiais de construção.



(a) *(b)* *(c)*

Figura 2.11 — Microcápsulas para materiais de mudança de fase (PCM) (BASF 2010): *(a)* microcápsula esférica; *(b)* PCM microencapsulados em solução aquosa; *(c)* PCM microencapsulados em pó.

Os PCM microencapsulados têm a vantagem de serem de fácil aplicação, não exigirem alteração dos processos construtivos e não se danificarem com a utilização corrente dada aos edifícios.

No entanto, alguns estudos publicados sobre a incorporação de PCM microencapsulados demonstram que as propriedades dos materiais de construção são por vezes afetadas. O estudo publicado por Hunger *et al.* (Hunger et al. 2009) conclui que o aumento da percentagem de PCM micro encapsulado na mistura de betão auto compactável afeta, quer as propriedades térmicas, quer as propriedades mecânicas das peças endurecidas. O aumento da dosagem de PCM provoca a diminuição da resistência à compressão e a redução da condutibilidade térmica do betão endurecido. Por outro lado, Cabeza *et al.* (Cabeza et al. 2007) demonstram que o micro encapsulamento, apesar de caro, é seguro, pois o PCM assim introduzido na mistura

dos componentes utilizados no betão é considerado como mais um agregado, não afetando drasticamente as funções essenciais das paredes de betão endurecidas.
Uma das soluções construtivas mais amplamente estudada e divulgada é a utilização de PCM microencapsulados em placas de gesso cartonado (Feldman, Banu, e Hawes 1995; Ahmad et al. 2006; Shilei, Neng, e Guohui 2006; Shilei et al. 2007; Chen et al. 2008; Zhang et al. 2008; Kuznik, Virgone, e Roux 2008; Kuznik, Virgone, e Noel 2008; Kuznik e Virgone 2009; Ramírez 2009; Lai, Chen, e Lin 2010; Hasse et al. 2011; Borreguero et al. 2011). Esta e outras soluções construtivas com PCM estão desenvolvidas na secção seguinte (secção 2.7).

2.7 Materiais e componentes da construção com PCM

2.7.1 Introdução

A pesquisa bibliográfica realizada ao longo deste estudo permitiu conhecer várias soluções construtivas em que se aplicaram, com sucesso, materiais de mudança de fase, de entre as quais se apresenta um pequeno resumo em relação às seguintes:

— Painéis de gesso cartonado;
— Ladrilhos cerâmicos;
— Elementos à base de betão;
— Paredes de Trombe;
— Portadas;
— Blocos de betão ou tijolo;
— Pavimentos radiantes;
— Tetos falsos.

2.7.2 Painéis de gesso cartonado

As placas de gesso são económicas e bastante aplicadas numa grande variedade de situações, nomeadamente em paredes e tetos, o que as torna propícias à incorporação de PCM. Esta é de facto uma das soluções construtivas com PCM mais divulgada (Feldman, Banu, e Hawes 1995; Ahmad et al. 2006; Shilei, Neng, e Guohui 2006; Shilei et al. 2007; Chen et al. 2008; Zhang et al. 2008; Kuznik, Virgone, e Roux 2008; Kuznik, Virgone, e Noel 2008; Kuznik e Virgone 2009; Ramírez 2009; Lai, Chen, e Lin 2010; Hasse et al. 2011; Borreguero et al. 2011). Foram produzidas

placas com 20 % a 30 % de PCM incorporados por imersão direta (Scalat et al. 1996) ou por micro encapsulamento (Borreguero et al. 2011), com características térmicas distintas em função da aplicação desejada. Existem placas de gesso cartonado disponíveis no mercado (*v.* Figura 2.12) com uma temperatura de fusão de 23 ºC e uma entalpia de fusão de 22 kJ/kg.

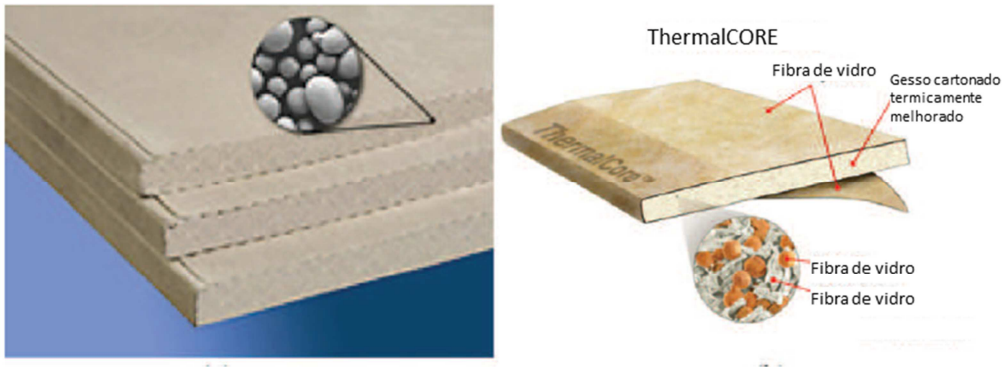


Figura 2.12 — Placas de gesso cartonado com PCM micro encapsulado (BASF 2010).

Neeper (Neeper 1999) estudou a flutuação da temperatura interior de um compartimento sujeito a amplitudes térmicas diurnas, quando revestido interiormente por placas de gesso cartonado com PCM orgânicos (parafinas e ácidos gordos). O desempenho térmico de placas de gesso cartonado aplicadas num compartimento solar passivo foi estudado por Athienitis *et al.* (Athienitis et al. 1997). No estudo apresentado por Scalat *et al.* (Scalat et al. 1996), estudou-se a influência das placas de gesso cartonado na estabilização das temperaturas interiores de um compartimento com sistemas de climatização intermitentes. Os resultados desse estudo evidenciaram a capacidade de armazenamento de calor das placas de gesso cartonado, conferindo ao compartimento temperaturas na gama de conforto, após o funcionamento dos sistemas de climatização, durante períodos de tempo mais longos.

2.7.3 Ladrilhos cerâmicos

A utilização de PCM em ladrilhos cerâmicos foi estudada por Hittle (Hittle 2002), Cerón (Cerón, Neila, e Khayet 2011) e Gárcia (García et al. 2011). Os ladrilhos cerâmicos com PCM são obtidos pela mistura de PCM micro encapsulado em pó nas restantes matérias-primas, substituindo parcialmente o pó de quartzo. Os ladrilhos

assim obtidos garantem uma aparência semelhante à dos ladrilhos comuns, mas com uma capacidade de armazenamento de calor superior, com uma entalpia de 130 kJ/kg e uma temperatura de fusão de 29 ºC (Hittle 2002).

2.7.4 Elementos à base de betão

A incorporação nas paredes e pavimentos à base de betão pode ser obtida, quer pela mistura de PCM (encapsulado ou não) nas restantes matérias-primas constituintes do betão (Hunger et al. 2009; Cabeza et al. 2007), quer pela imersão dos elementos de betão endurecido em PCM derretido ou em soluções aquosas contendo PCM (Bentz e Turpin 2007). Alguns trabalhos (Cabeza et al. 2007) demonstraram que a introdução de PCM microencapsulados em elementos de betão contribui para uma ligeira redução da resistência mecânica das paredes.

2.7.5 Paredes de Trombe

Parafinas, ácidos gordos ou sais hidratados são introduzidos nas paredes de Trombe com o intuito de aumentar a capacidade de armazenamento de calor, num intervalo de temperaturas conveniente à aplicação em estudo, adaptando este sistema solar passivo tradicional à presença de PCM. Knowles (Knowles 1983) usou parafina e aditivos metálicos para aumentar a condutibilidade térmica e a eficiência térmica em geral de uma parede de Trombe. Bourdeau (Bourdeau 1980) concluiu que uma parede com PCM de apenas 8 cm de espessura tem um desempenho térmico superior a uma parede de alvenaria com 40 cm. Swet (Swet 1980), Ghoneim *et al.* (Ghoneim, Klein, e Duffie 1991) e Chandra (Chandra et al. 1985) confirmaram que uma parede com PCM de menor espessura é mais eficiente do ponto de vista térmico do que uma parede de Trombe corrente, apresentando maior capacidade de armazenamento de calor.

2.7.6 Portadas

As portadas contendo PCM são colocadas pelo exterior da envolvente envidraçada dos edifícios. Durante o dia, são abertas, ficando a face interior exposta à radiação solar. O PCM derrete e absorve o calor. À noite, quando as portadas fecham e as janelas se abrem, a face interior da portada fica em contacto direto com o interior do edifício, libertando a energia acumulada (Buddhi, Mishra, e Sharma 2003).

2.7.7 Blocos de betão ou tijolo

Os blocos de betão ou os blocos cerâmicos também podem conter PCM. A incorporação de PCM nos blocos pode ser feita através de todos os métodos descritos anteriormente (*v.* secção 2.6): incorporação direta de PCM (micro encapsulado ou não); imersão dos blocos em PCM líquido aquecido; e introdução de macrocápsulas com PCM.

Hawes *et al.* (Hawes, Feldman, e Banu 1993) estudaram a introdução de PCM, por incorporação direta, em blocos de betão, concluindo que a capacidade de armazenamento de calor aumenta consideravelmente. No entanto, a resistência mecânica dos blocos fica comprometida, limitando a incorporação de grandes quantidades de PCM.

Lee *et al.* introduzem, por imersão, 8,6 % de parafina em blocos de betão autoclavado garantido uma entalpia de 18,9 kJ/kg. Através da introdução de três macrocápsulas contendo PCM no centro de blocos cerâmicos (Figura 2.13), Alawadhi (Alawadhi 2008) demonstrou que o fluxo de calor para o interior dos edifícios, em climas quentes, pode ser reduzido em cerca de 18 %.

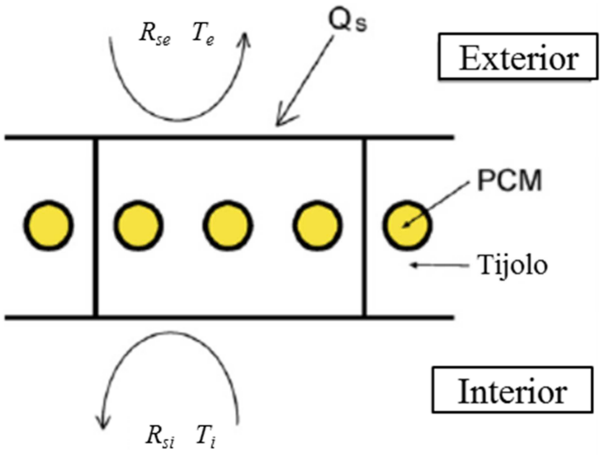


Figura 2.13 — Corte esquemático de blocos de betão contendo PCM macroencapsulado (adaptado de (Alawadhi 2008)).

2.7.8 Pavimentos radiantes

Os PCM são utilizados em pavimentos radiantes com o intuito de racionalizar o uso de energia para aquecimento. O sistema de aquecimento deve estar ligado apenas algumas horas por dia. Quando a energia é desligada, o calor acumulado pelos PCM

é distribuído gradualmente pelo compartimento. O pavimento radiante deve conter uma camada de isolamento térmico inferior (Figura 2.14), para evitar perdas de calor para o exterior. Lin *et al.* (Lin et al. 2005; Lin et al. 2007) aplicaram PCM sobre um pavimento radiante, tendo demonstrado que é possível reduzir significativamente os consumos energéticos com uma adaptação construtiva simples.

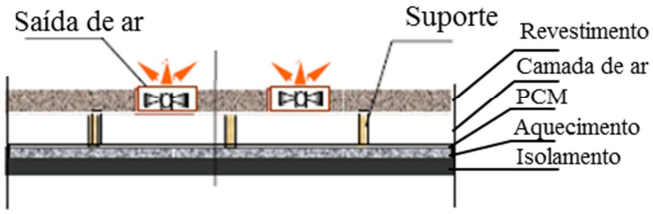


Figura 2.14 — Representação esquemática de um pavimento radiante com PCM (adaptado de (Lin et al. 2007)).

2.7.9 Tetos falsos

A criação de um teto falso com PCM é normalmente empregue com o intuito de refrigerar os compartimentos, tirando partido do arrefecimento noturno durante a estação quente. O teto falso (*v.* Figuras 2.15 e 2.16) é composto por grelhas reguláveis que estão em contacto com o exterior. Estas grelhas mantêm-se fechadas durante o dia e são abertas à noite para deixar entrar o ar frio. Durante o dia, impedida a entrada de calor, faz-se circular o ar através da superfície superior do teto falso onde os PCM se mantêm à temperatura desejada, ou seja, à temperatura de fusão (Frank 2004; Kondo, Iwamoto, e Ibamoto 2006).

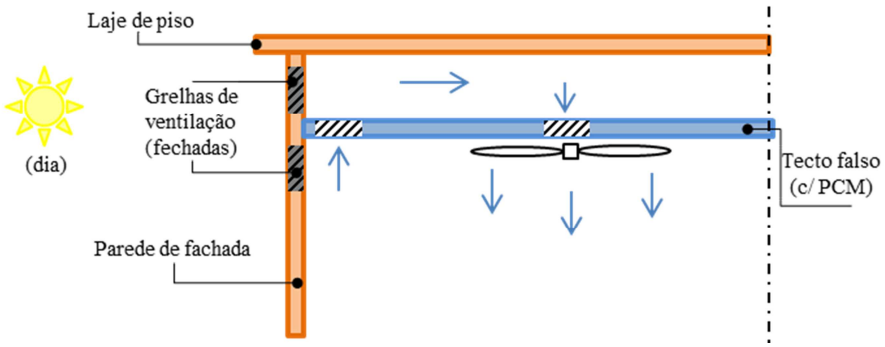


Figura 2.15 — Representação esquemática de tetos falsos com PCM, funcionamento diurno (adaptado de (Tyagi e Buddhi 2007)).

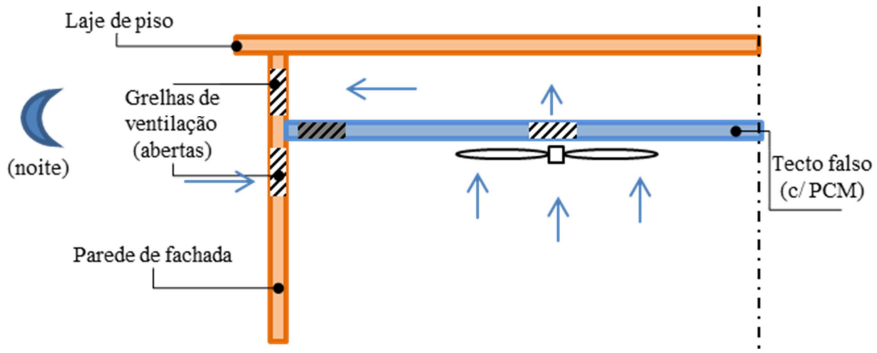


Figura 2.16 — Representação esquemática de tetos falsos com PCM, funcionamento noturno (adaptado de (Tyagi e Buddhi 2007)).

2.8 Comentários síntese

Neste capítulo, os materiais utilizados como PCM no interior de edifícios foram identificados e divididos em classes e categorias. As propriedades térmicas foram apontadas como sendo decisivas na seleção do PCM mais adequado, tendo em vista o reconhecido contributo para o conforto térmico interior. Preferem-se aqueles que, dentro da gama de temperaturas de fusão requerida (próxima da temperatura de conforto interior), apresentem maior entalpia. No entanto, outras importantes características, tais como a durabilidade, a estabilidade química, a reversibilidade e a compatibilidade com outros materiais de construção condicionam a escolha do PCM.

Descreveram-se os métodos utilizados na incorporação dos PCM em materiais e componentes utilizados na construção. Várias soluções construtivas, onde os PCM foram inseridos com sucesso, foram discutidas.

Dado o estado de conhecimento atual sobre os PCM, identificadas as suas características e o seu comportamento e conhecendo alguns dos materiais e componentes utilizados na construção em que estes materiais já foram incorporados, estudou-se a possibilidade de incorporação de PCM em argamassas à base de cimento e cal (Capítulo 3). Desenvolveu-se um novo produto, com base nos materiais tradicionalmente utilizados na construção portuguesa que, em complementaridade com outros, poderá ser utilizado no controlo da temperatura dos espaços interiores (Capítulo 6).

Capítulo 3

Desenvolvimento de uma argamassa de revestimento interior com PCM

3.1 Objetivo

O objetivo do estudo apresentado neste capítulo é o de avaliar a possibilidade de desenvolvimento de um novo produto para o revestimento interior de paredes: uma argamassa "termicamente melhorada" ou com capacidades específicas de armazenamento de calor. Esta característica é conferida à argamassa pela introdução de materiais de mudança de fase (PCM), microencapsulados, à mistura com cimento, cal e agregados, componentes característicos de uma argamassa corrente.

A realização deste estudo experimental compreendeu os seguintes passos:

— Componentes e formulação da argamassa com PCM – Elaboração de amostras com diferentes formulações para aferir a quantidade dos diferentes componentes da mistura;

— Caracterização experimental da argamassa com PCM – Elaboração de um conjunto de ensaios físicos, mecânicos e térmicos, com o intuito de avaliar as propriedades do material compósito (argamassa com PCM);

— Análise crítica dos resultados – Caracterização da argamassa de revestimento interior segundo a Norma Europeia EN 998-1 (CEN 2010) e comparação dos valores obtidos com os de uma argamassa comercial.

Com o intuito de poderem ser comercializadas e aplicadas em Portugal, ou noutro país da União Europeia, as argamassas de revestimento devem satisfazer a Norma EN 998-1 (CEN 2010). Assim, antes de se apresentar o estudo experimental, referem-se os grupos, as classes e os respetivos requisitos, apresentados na normalização vigente para as argamassas de revestimento (*v.* secção 3.2).

3.2 Argamassas de revestimento

3.2.1 Grupos e classes

A Norma Europeia EN 998-1 (CEN 2010) é aplicável a argamassas de revestimento exterior (*rendering mortar*) ou interior (*plastering mortar*) produzidas industrialmente, comtemplando, quer argamassas secas (com pré-doseamento em fábrica), quer argamassas prontas a aplicar (em pasta). Na gama de argamassas a que é aplicável, podem distinguir-se seis grupos distintos (*v.* Tabela 3.7).

Tabela 3.7 — Grupos de argamassas identificados na Norma EN 998-1 (CEN 2010).

Abreviatura	Tipo de argamassa
GP	Argamassa genérica (todos os fins) para revestimento exterior ou interior “General purpose rendering/plastering mortar”
LW	Argamassa leve para revestimento exterior ou interior “Lightweight rendering/plastering mortar”
CR	Argamassa colorida para revestimento exterior “Coloured rendering mortar”
OC	Argamassa para revestimento exterior monocamada “One coat rendering mortar for external use”
R	Argamassa de reparação “Renovation mortar”
T	Argamassa de isolamento térmico “Thermal insulating mortar”

Esta Norma define ainda as classes relativas a três parâmetros de caracterização de argamassas, nomeadamente:

— resistência mecânica aos 28 dias (CS I a CS IV);

— capilaridade (W0 a W2);

— condutibilidade térmica (T1 e T2).

As restantes características não estão divididas em classes, mas existe a obrigatoriedade de serem declaradas pelo fabricante. A determinação das características deve ser realizada laboratorialmente seguindo normas específicas para o efeito, com particular enfâse para a EN 1015 (CEN 2006) nas suas diversas partes.

No entanto, para cada um dos tipos de argamassas acima referidos (*v.* Tabela 3.7) a norma EN 1015 (CEN 2006) impõe limites para as classificações CS, W e T constantes na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 — Classificação de argamassas de acordo com a EN 998-1 (CEN 2010).

Propriedades	Classes	Valores de referência
Resistência mecânica aos 28 dias	CS.I	0,4 a 2,5 N/mm^2
	CS.II	1,5 a 5,0 N/mm^2
	CS.III	3,5 a 7,5 N/mm^2
	CS.IV	> 6 N/mm^2
Absorção de água por capilaridade	W0	Não especificado
	W1	$c \leq 0{,}40$ kg/(m^2·min$^{1/2}$)
	W2	$c \leq 0{,}20$ kg/(m^2·min$^{1/2}$)
Condutibilidade térmica	T1	$\lambda \leq 0{,}1$ W/(m·ºC)
	T2	$\lambda \leq 0{,}2$ W/(m·ºC)

Para além dos limites impostos aos parâmetros apresentados na Tabela 3.8, a aplicabilidade, ou não, de uma determinada argamassa como revestimento interior de paredes, com base na Norma EN 998-1 (CEN 2010), pressupõe a verificação do cumprimen-to das responsabilidades do fabricante, do projetista e do aplicador.

O fabricante deve garantir que as classes CS, W e T estão identificadas, sempre que tal for aplicável ao tipo de argamassa em estudo. Argamassas dos grupos GP (argamassa genérica) ou LW (argamassa leve) podem pertencer a qualquer classe relativamente à resistência mecânica aos 28 dias (entre CSI a CSIV) e à capilaridade (entre W0 e W2), respetivamente. As classes T1 e T2 apenas se aplicam às argamassas de isolamento térmico, do grupo T. O fabricante deve ainda verificar se as restantes características identificadas na norma estão declaradas e se o produto respeita, na realidade, as propriedades anunciadas.

O projetista tem a responsabilidade de assegurar que foi escolhido um produto recomendado para o tipo de aplicação pretendido. Finalmente, o aplicador deve respeitar as regras de preparação e aplicação do produto (condições do suporte, técnicas de aplicação, espessuras, cura, etc.) divulgadas, em geral, nas fichas técnicas do produto ou na bibliografia da especialidade.

3.2.2 Requisitos

De acordo com o referido anteriormente, para ser comercializada e aplicada em Portugal, uma argamassa deve responder às exigências impostas pela regulamentação vigente (CEN 2010). No desenvolvimento da nova argamassa deve-se verificar se o produto final cumpre os requisitos apresentados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 — Métodos de ensaio e características requeridas a uma argamassa genérica (GP) ou a uma argamassa leve (LW) (CEN 2010).

Propriedades	Método de ensaio	Requisitos	
		GP	LW
Massa volúmica (produto endurecido) [kg/m^3]	EN 1015-10 (CEN 2006)	Intervalo de valores declarado	Intervalo de valores declarado ≤ 1300 kg/m^3
Resistência à compressão [N/mm^2]	EN 1015-11 (CEN 2006)	CS I a CS IV	
Aderência [N/mm^2] Configuração da rotura - FP: (A, B ou C)	EN 1015-12 (CEN 2006)	≥ valor declarado e FP	
Absorção de água por capilaridade [g/(dm^2·min$^{1/2}$)] (exigência para aplicações em elementos exteriores)	EN 1015-18 (CEN 2006)	W 0 a W 2	
Coeficiente de difusão ao vapor (μ) (exigência para aplicações em elementos exteriores)	EN 1015-19 (CEN 2006)	≤ valor declarado	
Condutibilidade térmica [W/m·K]	Valor médio tabelado (P = 50 %)	EN 1745 (CEN 2002), Tabela A.12	
Reação ao fogo (classe)	EN 13501-1 (CEN 2007)	Classe de resistência ao fogo apropriada.	
Durabilidade ($\lambda_{10,dry}$) (exigência para aplicações em elementos exteriores)	Aderência e permeabilidade à água após ciclos de gelo/degelo. Requisitos válidos para o local de aplicação pretendido.		

No âmbito do estudo desenvolvido, para além das características anteriormente mencionadas (*v.* Tabela 3.9), foram avaliadas propriedades como a entalpia e o calor específico, propriedades afetadas pela presença dos PCM. Mesmo sabendo que não são exigidas pela normalização vigente, essas características são fundamentais na análise do comportamento, experimental e numérico, do novo material compósito.

A classe de reação ao fogo exigida aos materiais de revestimento interior está, conforme o referido na Norma EN 13501-1 (CEN 2007), dependente do tipo de utilização prescrita para o local. Os ensaios realizados foram inconclusivos em relação à classe de reação ao fogo a atribuir à argamassa desenvolvida. A ausência de ignição da amostra de argamassa com PCM quando submetida ao ensaio de pequena chama (descrito na Norma ISO 11925-2 (ISO 2010)) traduziu-se num resultado 'satisfatório' (*v.* Figura 3.17). No entanto, este resultado não permite tirar qualquer conclusão quanto à classe de reação ao fogo a atribuir à argamassa desenvolvida, podendo esta apresentar uma classe igual ou superior a E, consoante os resultados obtidos nos ensaios SBI ('***S**ingle **B**urning **T**est'* ou, em português, 'Ensaio do objeto isolado em combustão'). Dada a impossibilidade de realizar estes ensaios, por indisponibilidade dos equipamentos e amostras necessários, esta argamassa deve ser classificada com a classe F (de desempenho não determinado). No entanto, deve ser salientado que, de acordo com o produtor, o PCM utilizado não é considerado altamente inflamável, apresentado uma temperatura de ignição de 230ºC (BASF 2008).

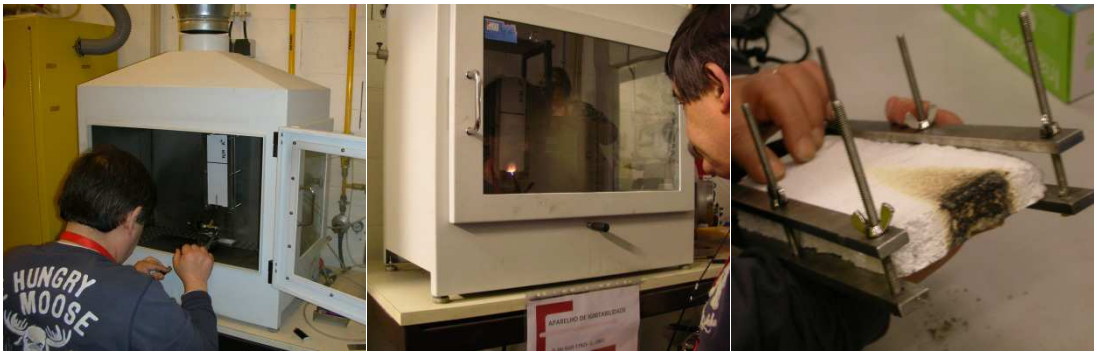


Figura 3.17 — Ensaio de pequena chama realizado no Laboratório de Ensaios de Reação ao Fumo e Fogo do INEGI, Porto.

A durabilidade ou alteração das propriedades da argamassa ao longo do tempo não fez parte do âmbito deste estudo. Embora a normalização vigente não exija esta avaliação para elementos de revestimento interior, considera-se importante conhecer, para além das outras propriedades mencionadas na norma EN 998-1 (CEN 2010), a durabilidade expectável para a atuação dos PCM incorporados no novo material compósito. Os PCM microencapsulados utilizados neste estudo têm um certificado de garantia, tendo sido sujeitos a 10.000 ciclos de fusão/solidificação sem apresentarem qualquer alteração ou sinal de degradação (Schmidt 2007), ou seja, se o PCM sofrer 1 ciclo de fusão/solidificação por dia, terá uma durabilidade superior a 27 anos. Sabendo que o PCM, com temperatura de fusão de 23ºC, apenas se aplica à estação de arrefecimento, ou seja, a menos de metade dos dias do ano, a duração expectável do PCM é superior à duração requerida para os elementos de 'fácil substituição', cuja duração máxima exigida (em função da durabilidade do edifício) é de 40 anos (ISO 2011). No entanto, o estudo publicado (Schmidt 2007) apenas se refere à durabilidade do PCM isoladamente e portanto há intenção de, no futuro, realizar uma investigação aprofundada sobre a durabilidade da argamassa compósita desenvolvida.

3.3 Componentes e formulação de uma argamassa com PCM

A mistura obtida (utilizada posteriormente para uma caracterização mais detalhada) resultou de um conjunto de ensaios iniciais realizados com o intuito de avaliar a possibilidade de incorporação de PCM micro encapsulado (produzido industrialmente) em argamassas de reboco à base de cimento e cal. O PCM em pó foi adicionado à mistura juntamente com as restantes matérias-primas, substituindo parcialmente o agregado. A fissuração precoce é expectável, dada a importante redução da quantidade de agregado utilizada nas formulações testadas em comparação com a quantidade utilizada em argamassas correntes. As proporções dos vários componentes presentes na mistura foram ajustadas através de um processo iterativo (de tentativa e erro), até que as amostras da argamassa endurecida não apresentassem fissuração aparente após as primeiras horas de secagem em ambiente controlado (com temperatura de 20 ºC ± 2 ºC e humidade relativa de 50 % ± 5 %). As

amostras utilizadas, com $10 \times 10 \times 1$ cm^3, resultaram do espalhamento da pasta de argamassa sobre uma superfície de tijolo.

Para além de todos os componentes utilizados na obtenção de uma argamassa corrente, nomeadamente: cimento, cal, areia e/ou agregados industriais e diferentes aditivos (resinas, fibras, derivados celulósicos e outros), as formulações testadas incluíram a presença de um PCM. O cimento e a cal, ligantes deste composto, têm a capacidade de aglomerar uma preparação elevada de materiais inertes conferindo ao conjunto grande coesão e consistência. O cimento utilizado foi do tipo I e da classe 42,5R, de acordo com a EN 197-1 (CEN 2001). O agregado industrial utilizado foi uma areia calcária (carbonato de cálcio) com uma distribuição granulométrica entre os 0,5-1,5 mm. As resinas (cuja matéria prima tem a designação técnica de ***V**inyl **A**cetate **E**thylene* ou VAE) foram usadas em algumas das formulações com o objetivo de melhorar a aderência ao substrato (betão ou tijolo) em reduzidas concentrações de cimento. Contudo, as resinas têm tendência a provocar a perda de elasticidade da pasta de argamassa (Wacker 2008). As fibras adicionadas (fibras de poliacrilonitrila ou PAN, com 6 mm e de pó de alumínio) são utilizadas com o intuito de compensar e redistribuir as tensões internas na argamassa, prevenindo a formação de fissuras (Grimm 2010). Os derivados à base de celulose conferem maior trabalhabilidade à pasta (Dow 2009). Uma mistura de parafinas microencapsuladas, com a designação comercial de 'Micronal DS5008', foi usada como PCM, com um ponto de fusão de 23 ºC, uma entalpia de 100-110 kJ/kg e 300 kg/m^3 de massa volúmica, aproximadamente (*v.* Tabela 2.6).

Depois de um processo iterativo (de tentativa e erro), que consistiu na preparação e observação de várias amostras (formulações A a L, apresentadas na Tabela 3.10), obteve-se a formulação mais adequada, isto é, sem fissuração aparente. A argamassa obtida por este processo corresponde à formulação L.

A formulação de uma argamassa de revestimento industrial (disponível atualmente no mercado), designada neste estudo por 'REF' (argamassa de referência), é também apresentada na Tabela 3.10, para melhor ilustrar a semelhança entre a formulação L da argamassa desenvolvida e a formulação de uma argamassa corrente.

Tabela 3.10 — Proporções da mistura das formulações A a L e da argamassa de referência (REF).

Formulação	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	REF
Cimento (ligante hidráulico)	40,00	40,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	12,00
Cal (ligante hidráulico)								20,00	20,00	10,00	10,00	5,00	2,48
Areia (agregado)	10,00	9,90	24,92	49,92	29,92								65,00
Carbonato de cálcio (agregado industrial)					20,00	49,87	49,85	42,80	42,70	52,80	52,65	57,65	20,00
Resinas (VAE, Tg = 15ºC)							0,02	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
Fibras (PAN, com 6mm)								0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,05
Fibras (Pó de alumínio)									0,10		0,10	0,10	0,09
Derivados à base de celulose (μ = 8000 a 12000 mPa.s 2%; 20ºC)		0,10	0,08	0,08	0,08	0,05	0,05						0,09
Derivados à base de celulose (μ = 2000 a 3000 mPa.s 2%; 20ºC)											0,05	0,05	
PCM (“Micronal DS5008”)	50,00	50,00	50,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	
Formiato de cálcio (repelente de água)						0,08							0,29

As imagens apresentadas na Figura 3.18 são representativas da fissuração presente nas primeiras amostras da argamassa endurecida (misturas A a G). Com a introdução da cal, na formulação H, a aparência da superfície começou a melhorar até à formulação L, sem fissuração aparente (*v.* Figura 3.19). Formulações com maior concentração de PCM foram depois testadas, embora sem sucesso. Todas as formulações estudadas estão apresentadas sob a forma tabular (*v.* Anexo A).



Figura 3.18 — Aparência da superfície das amostras da argamassa endurecida - formulações B e C.

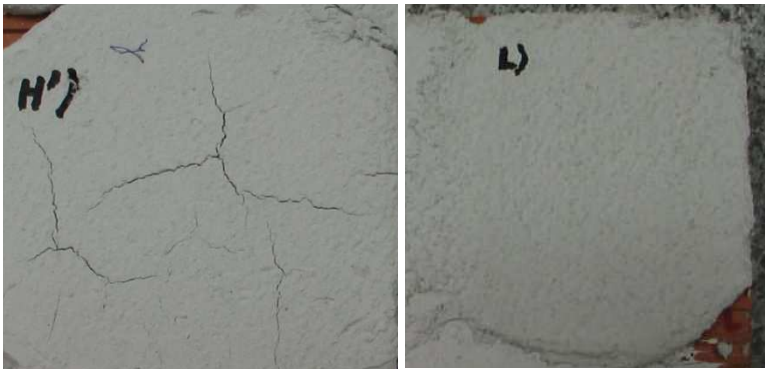


Figura 3.19 — Aparência da superfície das amostras da argamassa endurecida - formulações H e L.

Atendendo às duas últimas colunas da Tabela 3.10 é interessante verificar que, se o PCM pudesse ser considerado como um agregado, a formulação L obtida (com 15% de ligantes – cimento e cal, e 85% de "agregados" – agregado industrial e PCM) seria idêntica à apresentada pela argamassa de referência (REF), com aproximadamente 15% de ligantes inorgânicos (12% de cimento e 3% de cal) e 85% de agregados (65% de areia e 20% de carbonato de cálcio). De facto, as parafinas são materiais quimicamente estáveis e inertes, não interagindo com os outros componentes da mistura (He, Martin, e Setterwall 2004). Contudo, a incorporação de PCM implica a substituição de parte dos compostos normalmente utilizados na formulação das argamassas de revestimento (como o agregado, neste caso), tendo impacto no comportamento do produto final. As consequências desta alteração foram avaliadas ao longo dos ensaios de caracterização da nova argamassa que se apresentam na secção seguinte (secção 3.4).

3.4 Caracterização da argamassa com PCM

3.4.1 Avaliação de desempenho

O principal objetivo da caracterização da argamassa com PCM, tendo em vista a avaliação do respectivo desempenho (distinto do de uma argamassa corrente), foi identificar as propriedades térmicas deste produto, nomeadamente: a condutibilidade térmica, o calor latente, a temperatura de fusão, o intervalo de temperaturas de fusão e o calor específico. As restantes propriedades avaliadas são importantes para o enquadramento da argamassa desenvolvida no contexto das argamassas normalmente utilizadas no revestimento interior de paredes. A argamassa desenvolvida, correspondente à formulação L, foi submetida a um conjunto de ensaios requeridos pela Norma Europeia EN 998-1 (CEN 2010). Os procedimentos de teste, equipamentos e resultados obtidos em todos os ensaios realizados estão detalhados, sob a forma de boletim de ensaio, no Anexo B. Os resultados obtidos foram sintetizados na Tabela 3.11, em que o método de ensaio correspondente é também identificado (os ensaios realizados seguiram a normalização exigida: EN 1015 (CEN 2006), EN 1745 (CEN 2002), ISO 8301 (ISO 1991a), ISO 8302 (ISO 1991b) e EN 13501-1 (CEN 2007)).

Tabela 3.11 — Resultados e respetivos métodos de ensaio realizados sobre a argamassa com PCM – Formulação L.

Propriedades (argamassa endurecida)	Resultados experimentais	Métodos de ensaio
Massa volúmica [kg/m^3]	1170	EN 1015-10
Resistência à compressão [N/mm^2]	2,40	EN 1015-11
Aderência [N/mm^2] Configuração da rotura – FP: (A, B ou C)	0,35 FP: B	EN 1015-12
Absorção de água por capilaridade [$g/(dm^2.min^{1/2})$] (exigência para aplicações em elementos exteriores)	4,89	EN 1015-18
Coeficiente de difusão ao vapor (μ) (exigência para aplicações em elementos exteriores)	5 a 10*	*EN 1745, Tabela A.12

Tabela 3.11 — Resultados e respetivos métodos de ensaio realizados sobre a argamassa com PCM – Formulação L (continuação).

Propriedades (argamassa endurecida)	Resultados experimentais	Métodos de ensaio
Condutibilidade térmica [W/(m·K)]	0,30	ISO 8301 ISO 8302
Reação ao fogo (classe)	F ou superior	EN 13501-1
Entalpia [kJ/kg]	≈ 25	Ensaio DSC
Temperatura de fusão T_1 [ºC]	≈ 23	Ensaio DSC
Intervalo de fusão [ºC] (90%)	23 – 25	Ensaio DSC
Calor específico (sólido) [kJ/(kg.K)]	1,0*	*EN 1745, Tabela A.12

* Valores estimados (não obtidos experimentalmente).

O coeficiente de difusão ao vapor e o calor específico, apresentados na Tabela 3.11, foram estimados a partir dos valores da Tabela A.12 da EN 1745 (CEN 2002), em função da massa volúmica da argamassa compósita (1170 kg/m^3). O valor da condutibilidade térmica, λ, da argamassa com PCM, também foi estimado pela consulta dos valores presentes na Tabela A.12 da EN 1745 (CEN 2002). A aproximação dos valores tabelados a uma curva polinomial de 2º grau indica que a condutibilidade térmica da argamassa desenvolvida deveria ser próxima de $\lambda \approx 0{,}33$ W/(m·K) (*v.* Figura 3.20).

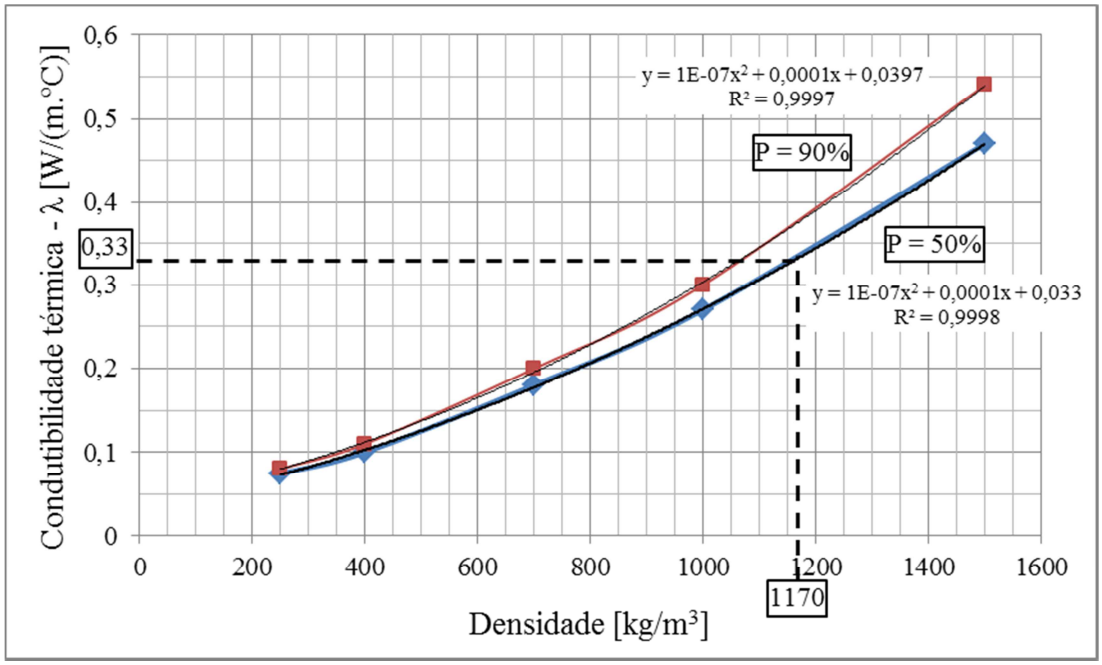


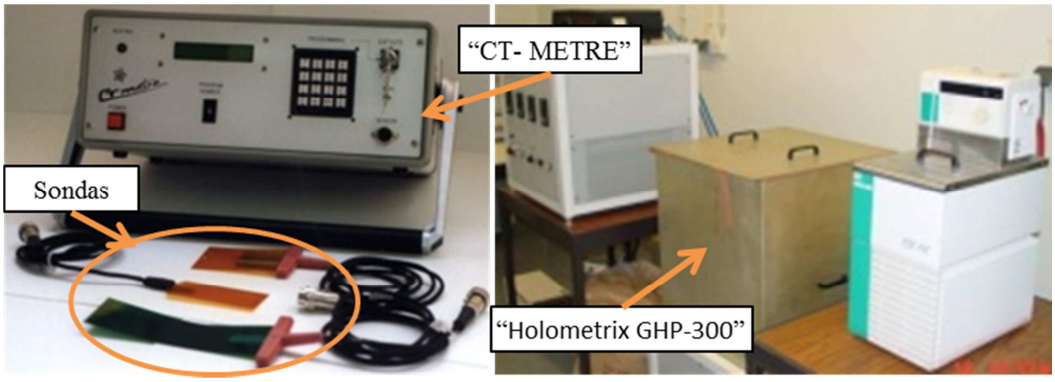
Figura 3.20 — Valor estimado para a condutibilidade térmica da argamassa com PCM (formulação L) – Dados da tabela A.12, EN 1745 (CEN 2002).

No entanto, tendo em vista a simulação numérica usada na avaliação do impacto da argamassa no conforto térmico interior e sabendo que o PCM incorporado na argamassa pode contribuir para que haja um desvio face ao comportamento esperado (previsto pela normalização vigente), realizaram-se ensaios complementares de caracterização das propriedades térmicas (*v.* subsecção 3.4.2).

3.4.2 Ensaios de caracterização térmica

3.4.2.1 Método do choque térmico e método da placa quente

A condutibilidade térmica foi medida por dois métodos distintos, nomeadamente: método do choque térmico e método da placa quente, sendo o primeiro método mais expedito. Neste método, utiliza-se um equipamento portátil, o chamado 'CT-Mètre', e respetivas sondas (*v.* Figura 3.21). Este equipamento, disponível no Laboratório de Física de Construções da FEUP (LFC/FEUP), permite obter valores da condutibilidade térmica compreendidos entre 0,05 W/(m·K) e 5,00 W/(m·K), de acordo com o método de ensaio descrito na norma ISO 8301 (ISO 1991a). O valor da condutibilidade térmica medido através deste procedimento, em laboratório, foi de $\lambda \approx 0{,}274$ W/(m·K), para uma temperatura de aproximadamente 23 ºC.



(a) *(b)*

Figura 3.21 — Equipamentos de ensaio (LFC/FEUP): *(a)* 'CT-Mètre' e *(b)* 'Halometrix GHP-300'.

O método da placa quente, realizado com o equipamento 'Holometrix GHP-300' (*v.* Figura 3.21) e baseado no método 'Guard-Hot-Plate' descrito na norma ISO 8302 (ISO 1991b), permite determinar com maior rigor a condutibilidade térmica em laboratório, para valores compreendidos entre 0,02 W/(m·K) e 2,00 W/(m·K). Este método foi utilizado para determinar o valor da condutibilidade térmica das placas de argamassa em duas situações distintas, com temperaturas inferiores e superiores à temperatura de fusão dos PCM incorporados na argamassa. Para temperaturas inferiores à temperatura de fusão do PCM (≈ 20ºC), o valor da condutibilidade térmica obtido foi de λ = 0,407 W/(m·K). Para temperaturas superiores à da temperatura de fusão do PCM (≈ 30ºC) a condutibilidade térmica foi de λ = 0,183 W/(m·K).

Face aos resultados obtidos através dos dois métodos de ensaio e sabendo que a argamassa vai ser utilizada em espaços interiores, onde a temperatura é variável, resolveu-se fixar a condutibilidade térmica da argamassa desenvolvida num valor intermédio correspondente a λ = 0,30 W/(m·K).

3.4.2.2 Ensaios DSC

Nos ensaios DSC, conforme o referido na subsecção 2.4.3, a amostra do material a medir (no caso em estudo, o PCM) e a referência (ar) são colocados em recipientes distintos, com fontes de aquecimento individuais (*v.* Figura 3.22). A amostra utilizada nos ensaios DSC é muito pequena, podendo ter no máximo 8 a 10 mg, encontrando-se inserida numa cápsula com 6,3 mm de diâmetro, designada por 'cadinho'.

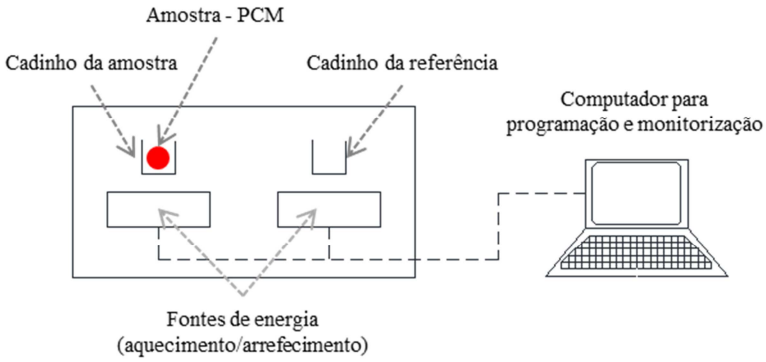
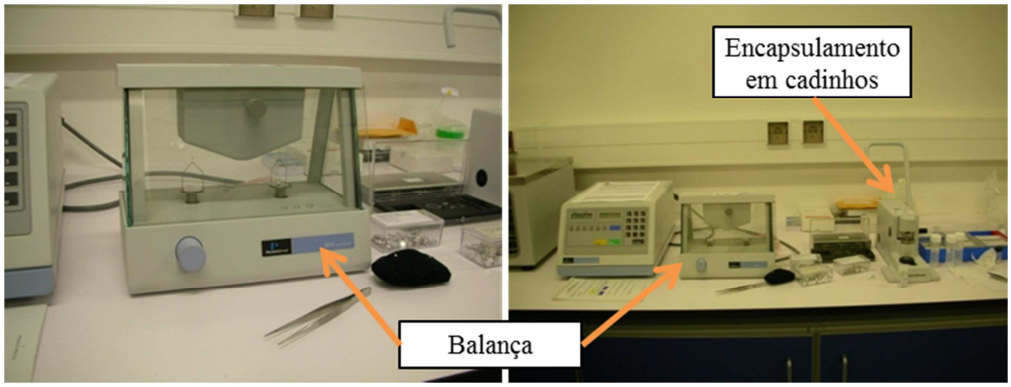


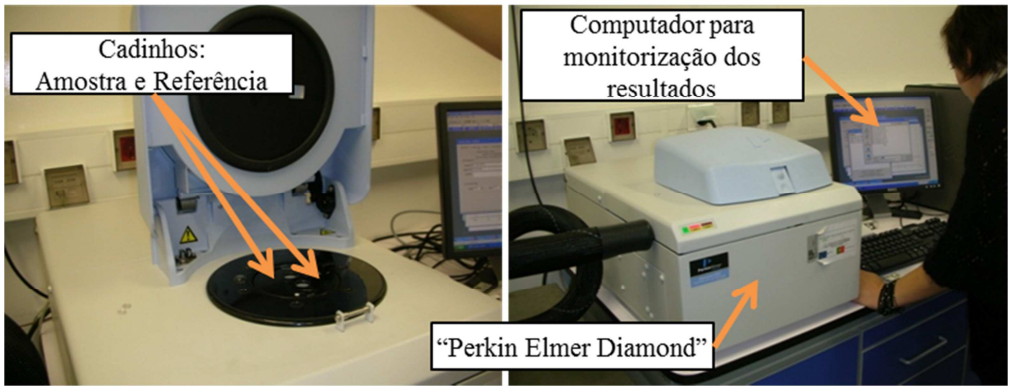
Figura 3.22 — Representação esquemática do equipamento utilizado nos ensaios DSC.

Uma amostra de PCM, de apenas 2,564 mg, foi submetida a ensaios DSC, num intervalo de temperaturas entre os 5 ºC e os 50 ºC com uma variação programada de 2 ºC/min (*v.* Figuras 3.23 e 3.24).



(a) *(b)*

Figura 3.23 — Registo fotográfico dos ensaios realizados no Laboratório de Química da Universidade de Aveiro: *(a)* pesagem e *(b)* encapsulamento em cadinhos.



(a) *(b)*

Figura 3.24 — Registo fotográfico dum ensaio DSC (Laboratório de Química da UA): *(a)* colocação dos cadinhos e *(b)* equipamento 'Perkin Elmer Diamond'.

A análise dos resultados e o tratamento dos valores obtidos nos ensaios permitiu conhecer algumas das características térmicas mais importantes na definição do PCM, tais como: a entalpia de mudança de fase, a temperatura de fusão e a temperatura do pico de fusão. O PCM utilizado apresentou o comportamento registado na Figura 3.25.

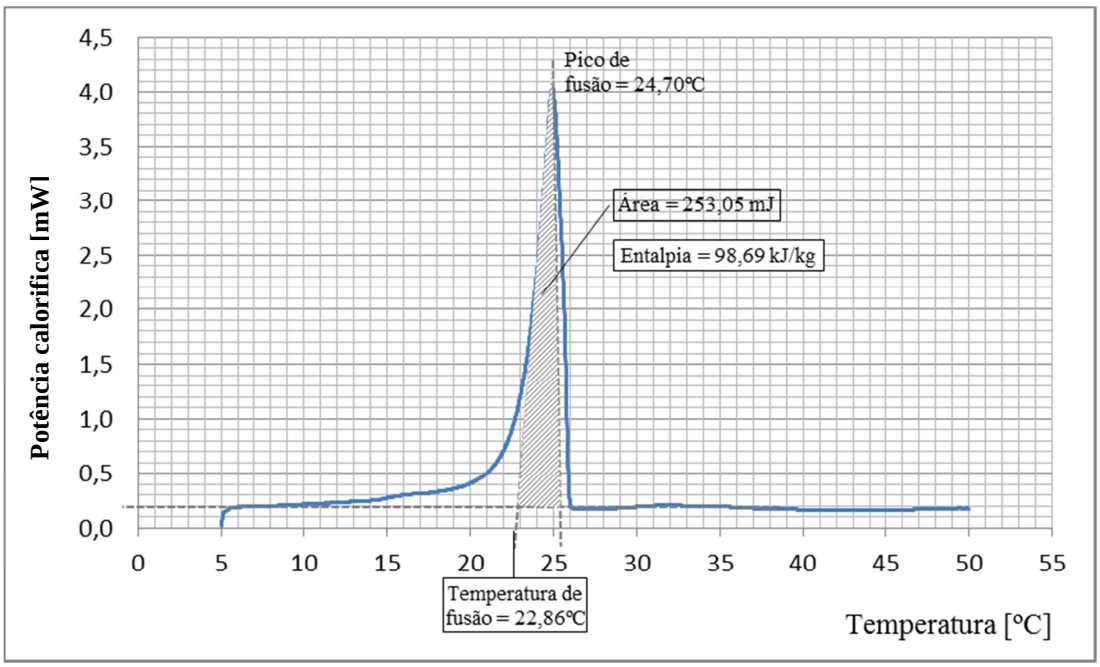


Figura 3.25 — Registo do ensaio DSC sobre uma amostra de PCM.

O gráfico da Figura 3.25 traduz a diferença entre o calor fornecido à amostra de PCM e à amostra do material de referência para os manter (PCM e material de referência) à mesma temperatura. Os segmentos horizontais, abaixo dos 10 ºC (imediatamente antes do início da fusão) e acima dos 25 ºC (logo após a fusão), demonstram que não há diferença entre a energia fornecida ao PCM e ao material de referência para provocar o aumento de 2 ºC/min imposto a ambos, o que significa que o PCM se mantem no mesmo estado físico durante as duas situações, ou seja, abaixo de 10 ºC (sólido) e acima dos 25 ºC (líquido), experimentando a mudança de fase entre os 10 ºC e os 25 ºC.

A área a tracejado (Figura 3.25), correspondente a, aproximadamente, 253 mJ, representa a diferença entre a energia fornecida ao PCM e ao material de referência durante a mudança de estado (de sólido para líquido), entre as temperaturas de ≈ 23 ºC e ≈ 25 ºC. Esta diferença pode ser traduzida na quantidade total de energia que aquela quantidade de material ensaiada tem capacidade de armazenar durante a mudança de fase. Assim, sabendo que a massa da amostra será igual a 2,56 mg, a entalpia especifica de mudança de fase, entre a gama de temperaturas de fusão de 22,86 ºC e 24,70 ºC, é de, aproximadamente 100 kJ/kg (≈ 253,05 mJ / 2,56 mg).

Atendendo aos resultados obtidos, considera-se que a fusão tem início na temperatura de 23 ºC e que o pico de fusão acontece aos 25 ºC, aproximadamente. O pico de fusão está associado à mudança de fase completa, ou seja, a temperatura a partir da qual todo o material passou de sólido a líquido, no sentido do aquecimento.

Em resumo, o tratamento dos dados fornecidos pelo ensaio DSC revela que o PCM utilizado apresenta uma gama de temperaturas de fusão relativamente alargada. A amostra de PCM ensaiada tem uma entalpia de 110 kJ/kg entre a gama de temperaturas de 10ºC a 25ºC, onde, mais de 90% da entalpia de mudança de fase, ou seja, cerca de 100 kJ/kg, está localizada num intervalo de apenas 2ºC, entre os 23ºC e os 25ºC, aproximadamente. Os resultados obtidos estão de acordo com os valores fornecidos pelo fabricante (Tabela 2.6, secção 2.5).

A transposição dos valores obtidos para a Figura 3.26 facilita a leitura dos resultados, dado que traduz a capacidade total do PCM armazenar energia para um dado intervalo de temperaturas (entre os -20ºC e os 60ºC, p.ex.), fornecendo as energias

acumuladas. A diferença de inclinação dos segmentos de reta, dos troços *a)* e *c)* (estado sólido e líquido, respetivamente) e do troço *b)* (transição entre o estado sólido e líquido), ajudam a compreender a variação abrupta da capacidade de armazenamento térmico do material durante a mudança de fase.

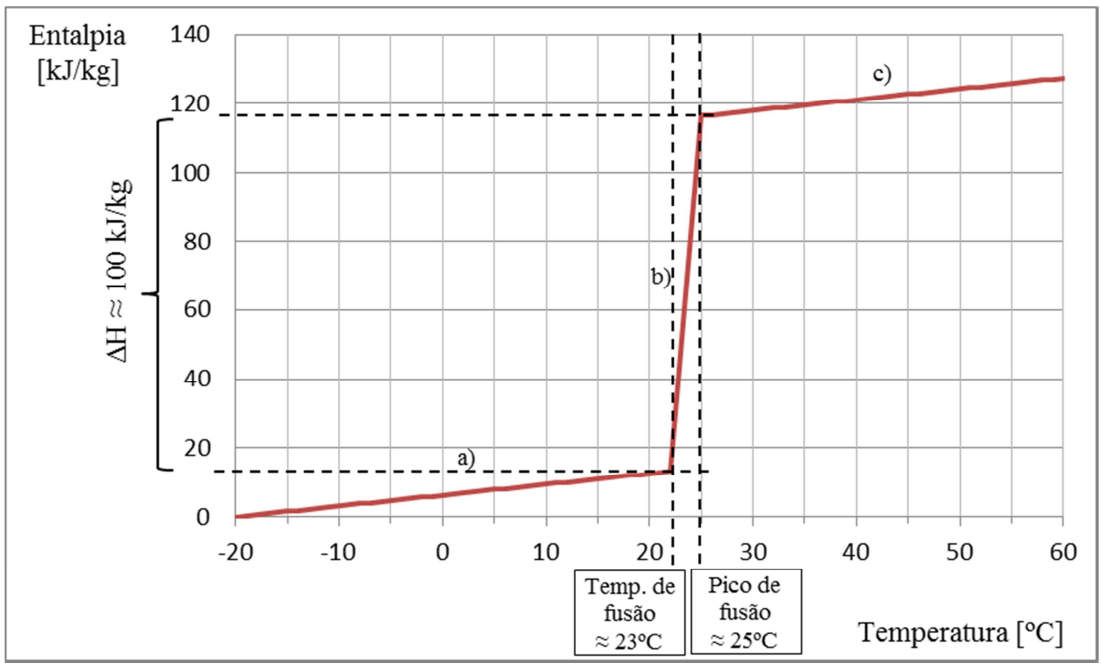


Figura 3.26 — Leitura de dados resultantes do ensaio DSC sobre uma amostra de PCM.

Com o intuito de verificar se o PCM mantem as suas características quando incorporado na argamassa de formulação L realizaram-se ensaios DSC em amostras resultantes do esmagamento da argamassa endurecida. Uma amostra (em pó) com aproximadamente 7,7 mg foi ensaiada, tendo-se obtido uma entalpia de mudança de fase de 22,6 kJ/kg (*v.* Figura 3.27).

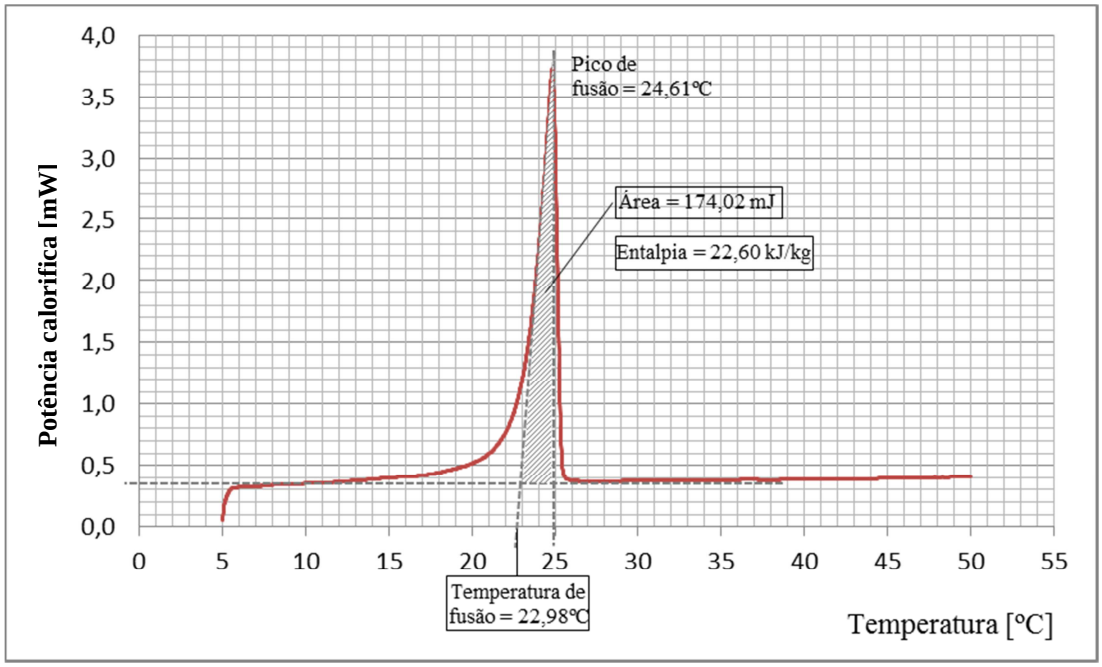


Figura 3.27 — Registo do ensaio DSC sobre uma amostra de argamassa com PCM.

O resultado obtido encontra-se muito próximo do valor esperado (25 kJ/kg), assumindo que a entalpia do material composto (a argamassa de formulação L) é linearmente proporcional à quantidade de PCM nele incorporado (25 %) e tendo em conta que a parafina é o único material a sofrer uma mudança de estado (de sólido para líquido) no intervalo de temperaturas estudado (entre os 5 ºC e os 50 ºC). Estes resultados permitem concluir que o PCM mantem as suas característica quando inserido na argamassa endurecida. Por conseguinte, foi considerado que a argamassa compósita de formulação L, contendo 25 % de PCM, apresenta uma temperatura de mudança de fase de 23 ºC e uma entalpia de 25 kJ/kg, num intervalo de temperaturas de fusão de 2 ºC.

3.5 Análise crítica dos resultados

A comparação dos resultados obtidos para a argamassa de formulação L e para a argamassa de referência (REF) está sintetizada na Tabela 3.12. Estes resultados confirmam a semelhança expectável entre o desempenho das duas argamassas, tendo em conta que os PCM são materiais inertes e que foram introduzidos na mistura em substituição de agregados igualmente inertes.

Tabela 3.12 — Análise crítica dos resultados: argamassa com PCM (formulação L), e propriedades da argamassa de referência (REF).

Propriedades (argamassa endurecida)	Resultados		Observações / Classificação da argamassa endurecida com PCM (Formulação L)
	Formulação L	REF	
Massa volúmica [kg/m^3]	1170	1400	LW PCM (com ≈ 300 kg/m3) confere à argamassa uma massa volúmica < 1300 kg/m3.
Resistência à compressão [N/mm^2]	2,40	> 1,25	CS I Desempenho equivalente.
Aderência [N/mm^2] Configuração da rotura – FP: (A, B ou C)	0,35 FP: B	> 0,25 FP: B	Desempenho equivalente.
Absorção de água por capilaridade [g/(dm^2.min$^{1/2}$)] (exigência para aplicações em elementos exteriores)	4,89	< 4,0	W 0 Desempenho equivalente.
Coeficiente de difusão ao vapor (μ) (exigência para aplicações em elementos exteriores)	5 a 10*	< 15	Desempenho equivalente (esperado).
Condutibilidade térmica [W/(m·K)]	0,30	0,61	Desempenho equivalente quando comparado com argamassas do tipo LW.
Reação ao fogo (classe)	F	Classe A	Desempenho "aparentemente" inferior.
Entalpia de fusão [kJ/kg]	≈ 25	-	-
Temperatura de fusão T_1 [ºC]	≈ 23 ºC	-	-
Intervalo de fusão [ºC] (90%)	23 ºC – 25 ºC	-	-
Calor específico (sólido) [kJ/(kg·K)]	1,0*	1,0	Desempenho equivalente (esperado).

* Valores estimados (não obtidos experimentalmente).

Assim, obteve-se um novo material compósito de características semelhantes às de uma argamassa corrente com alterações na massa volúmica e na condutibilidade térmica sem comprometer o desempenho mecânico (*v.* Anexo A e Anexo B), não se tendo verificado diferenças entre os valores da resistência à compressão ou da aderência da argamassa desenvolvida face à argamassa de referência.

3.6 Conclusões

Neste capítulo, apresentou-se a campanha experimental realizada no desenvolvimento do novo material compósito, nomeadamente uma argamassa à base de cimento e cal com PCM, tendo sido apresentado o estudo dos vários componentes utilizados e explanado o modo como se atingiu a formulação final da argamassa contendo 25 % de PCM (em massa).

A caracterização da argamassa desenvolvida obedeceu aos requisitos e métodos de ensaio requeridos pela normalização vigente (EN998-1 (CEN 2010)), tendo-se concluído que a adição de PCM em argamassas à base de cimento e cal é viável, sem afetar significativamente o desempenho da argamassa endurecida e conferindo ao novo material compósito elevada capacidade de armazenamento de calor num intervalo estreito de temperaturas (no caso estudado, uma entalpia de 100 kJ/kg no intervalo de 2 ºC, entre os 23 ºC e os 25 ºC).

No capítulo seguinte (Capítulo 4), através da monitorização das temperaturas interiores observadas em duas células de teste distintas, uma revestida com a argamassa de referência (REF) e outra revestida com a argamassa de formulação L, demonstra-se, através da primeira aplicação da argamassa desenvolvida, a ação dos PCM.

Capítulo 4
Ensaios laboratoriais e *in situ*

4.1 Preâmbulo

Neste capítulo, descrevem-se e discutem-se os ensaios laboratoriais e *in situ* realizados, tendo sido concebidas duas células de teste com dois objetivos distintos:

— Verificar a ação dos PCM quando incorporados na argamassa desenvolvida (formulação L – com as características apresentadas na Tabela 3.12 da secção 3.5), na sua primeira aplicação.

— Validar o modelo numérico utilizado na resolução do problema matemático de transferência de calor (desenvolvido no Capítulo 5).

Foram construídas duas células de teste (cubos ocos com 40 cm de aresta) com revestimentos interiores distintos: *(i)* uma com a argamassa de revestimento de referência (com as características apresentadas na Tabela 3.12 da secção 3.5), aqui designada por célula de teste SPCM (**S**em **PCM**); *(ii)* outra com a argamassa de formulação L (*v.* Tabela 3.12, secção 3.5), aqui designada por célula de teste CPCM (**C**om **PCM**). As duas células foram construídas com dimensões reduzidas para poderem ser facilmente manuseadas e para poderem ser monitorizadas num ambiente controlado, no interior de uma câmara climática, tendo ambas sido sujeitas a variações diárias de temperaturas correspondentes a condições atmosféricas diárias reais. A monitorização das temperaturas interiores, quer em ensaios realizados em laboratório (*v.* secção 4.3), quer em ensaios realizados *in situ* (*v.* secção 4.4), e a comparação dos resultados obtidos nas duas células (SPCM e CPCM) permitiram demonstrar o efeito do PCM incorporado na argamassa.

4.2 Descrição das células de teste

4.2.1 Propriedades dos materiais

Os materiais utilizados na construção das células de teste foram os seguintes: argamassa corrente (REF); argamassa com PCM (com a formulação L); argamassa reforçada com uma rede armada; e isolamento térmico (poliestireno extrudido, XPS). A Tabela 4.13 apresenta um resumo das principais características dos materiais utilizados nas duas células de teste (SPCM e CPCM).

Tabela 4.13 — Características dos materiais utilizados na construção das células de teste (SPCM e CPCM).

Camada	Massa volúmica ρ [kg/m^3]	Calor específico c_p [kJ/(kg·K)]	Calor específico volumétrico C [kJ/(m^3·K)]	Cond. térmica λ [W/(m·K)]	Entalpia de fusão H [kJ/kg]
Revestimento interior (REF) [a)]	1,40×10^3	1,00	1,40 ×10^3	0,61	-
Revestimento interior (c\ PCM) [b)]	1,17 ×10^3	1,00	1,17 ×10^3	0,30	≈ 25
Argamassa reforçada (paredes) [a)]	1,50 ×10^3	1,00	1,50 ×10^3	1,00	-
XPS (isolamento exterior) [a)]	55	1,40	40,00	0,04	-

NOTAS: [a)] Considerou-se que as propriedades dos materiais não variam com a temperatura.

[b)] Adotaram-se iguais valores para as propriedades do material nas fases sólida e liquida.

4.2.2 Geometria

As células de teste são cubos ocos com um volume interno de ar de 26 × 26 × 26 cm^3. Conforme o representado na Figura 4.28, as paredes são compostas por (do interior para o exterior do cubo): uma camada com 2 cm de espessura de argamassa de revestimento (com ou sem PCM), uma camada intermédia de argamassa reforçada, com 3 cm de espessura (que forma a estrutura da célula), e uma camada exterior de 2 cm de isolamento térmico (XPS). Uma das faces do cubo funciona como tampa, facilitando a respetiva conceção e permitindo o acesso ao interior da célula para monitorização.

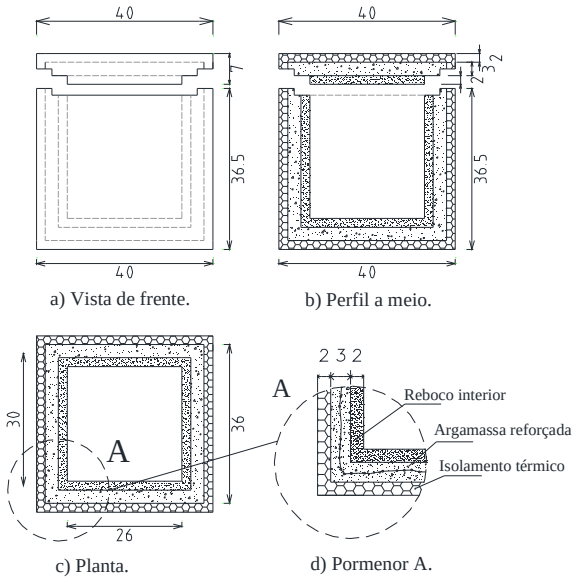


Figura 4.28 — Representação esquemática das células de teste (unidades: cm).

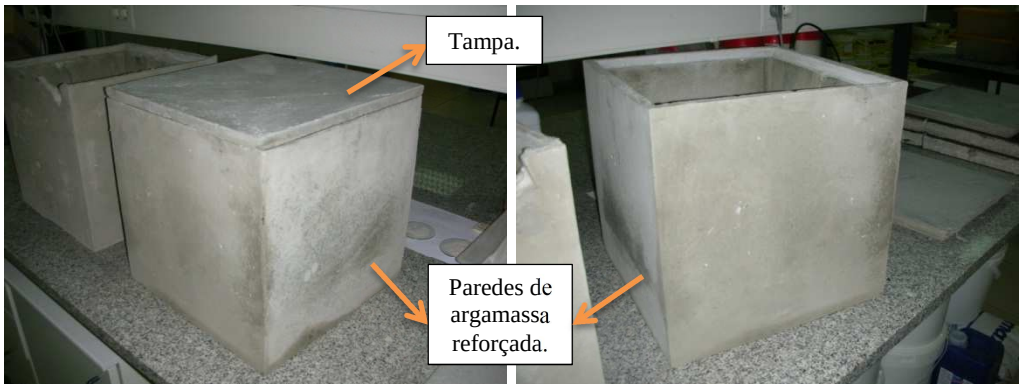
A constituição das paredes da célula de teste não está diretamente relacionada com a construção atual das paredes da envolvente dos edifícios. Na verdade, o objetivo foi criar células leves e de reduzidas dimensões, com paredes pouco espessas (7 cm), que no entanto garantissem uma transmissão de calor inferior ao limite máximo expresso na legislação portuguesa para elementos verticais da envolvente (de U = 1,45 W/(m^2.K)) (Ministério das Obras Públicas 2006). Atendendo ao objetivo delineado e à necessidade de aplicar a argamassa de revestimento interior com uma espessura realista, quer para avaliar o seu desempenho em uso, quer para conseguir observar o efeito do PCM nela incorporados, fixou-se, para este revestimento, uma espessura de 2 cm. A camada de argamassa reforçada foi concebida com a menor espessura possível (3 cm), de modo a garantir a integridade estrutural das paredes da célula. Tendo em conta as características do material de isolamento térmico (condutibilidade térmica λ = 0,04 W/(m.K) (ISO 2007)) e atendendo ao valor limite do coeficiente de transmissão de calor, a camada de XPS foi aplicada com 2 cm de espessura.

Nas Figuras 4.29, 4.30 e 4.31 estão reproduzidas imagens representativas do processo de conceção das células de teste, por ordem cronológica de execução das mesmas.



(a) *(b)* *(c)*

Figura 4.29 — Conceção das células de teste: *(a)* e *(b)* cofragem e colocação de rede armada nas paredes; *(c)* cofragem e colocação de rede armada na tampa.



(a) *(b)*

Figura 4.30 — Conceção das células de teste: *(a)* e *(b)* paredes e tampa das células após descofragem.



(a) *(b)*

Figura 4.31 — Conceção das células de teste: *(a)* argamassa de revestimento interior; *(b)* revestimento exterior (XPS).

4.3 Ensaios em Laboratório

4.3.1 Equipamentos e sistemas de monitorização

As células de teste foram acondicionadas no interior de uma câmara climática com paredes metálicas e volume aproximadamente de 335 litros (≈ 58 × 76,5 × 75 cm^3), garantindo, deste modo, um espaço de ar circundante entre os limites interiores da câmara e os limites exteriores da célula de teste (*v.* Figura 4.32). A câmara climática utilizada, com o modelo 'Votsch VC 4034', do LFC/FEUP, permite um controlo de temperatura entre - 40 ºC e +180 ºC, com uma flutuação no tempo inferior a ± 0,3 ºC. O controlo da humidade relativa permite variações entre 10 % e 98 %, com flutuações no tempo inferiores a ± 3 %.

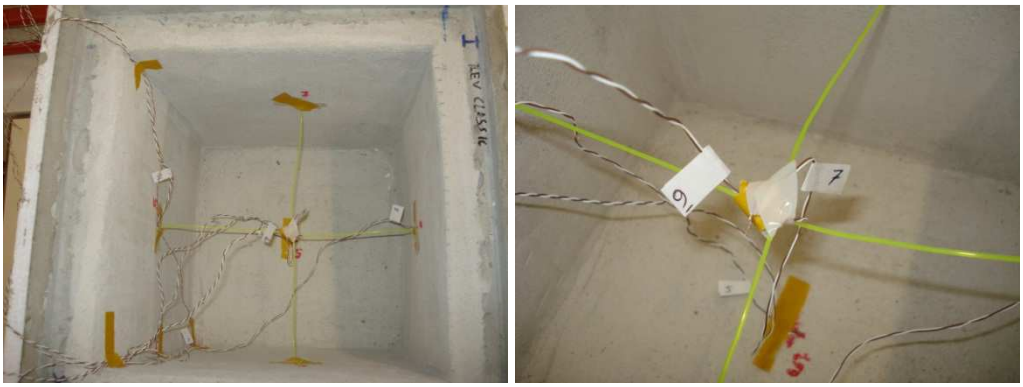


(a) *(b)*

Figura 4.32 — Equipamentos e sistemas de monitorização: *(a)* sistema de aquisição de dados; *(b)* câmara climática com o modelo 'Votsch VC 4034'.

No que respeita à monitorização das temperaturas, termopares do tipo T, com uma sensibilidade de ± 0,1 ºC, foram distribuídos pelo interior da célula de teste (no centro e em vários pontos da superfície interior das paredes). Um dos termopares foi colocado no interior da câmara climática (fora da célula de teste), com a intenção de confirmar e registar o ciclo de temperaturas imposto à câmara climática.

A observação das imagens representadas na Figura 4.33 permite visualizar a distribuição dos termopares no interior das células de teste. Todos os sensores de temperatura foram ligados a um sistemas de aquisição e armazenamento de dados, com o registo de uma medição por minuto durante todo o ciclo de ensaios, correspondente a um período de 48 horas (2 ciclos de 24 horas).



(a) *(b)*

Figura 4.33 — Disposição dos termopares no interior das células de teste: *(a)* superfície interior das paredes; *(b)* centro geométrico da célula.

4.3.2 Ciclos de temperatura

Tendo em vista a observação do efeito do PCM incorporado na argamassa de revestimento interior da célula de teste CPCM, o ciclo de temperaturas imposto à câmara foi baseado em condições atmosféricas diárias reais, capazes de garantir amplitudes térmicas diárias e picos de temperatura máxima relativamente elevados.

O ciclo diário de temperaturas foi programado de modo a igualar a chamada 'temperatura fictícia ar-sol'[1], contornando deste modo o facto de a câmara climática não estar preparada para simular o efeito da radiação solar. Todas as faces da célula de teste ficam expostas às mesmas condições de exposição e, portanto, apenas a temperatura fictícia ar-sol de uma das superfícies pôde ser considerada. A superfície horizontal, por ser a situação mais desfavorável durante a estação de arrefecimento (Primavera/Verão), foi a escolhida. Os valores máximos de radiação global incidente sobre superfícies exteriores são os que se apresentam na Tabela 4.14.

[1] A temperatura fictícia ar-sol, $T_{ar\text{-}sol}$, é a temperatura do ar exterior, que na ausência de quaisquer fluxos de calor por radiação, dará o mesmo fluxo de calor através da superfície real com a combinação da radiação solar incidente, das trocas de calor por radiação com a abóbada celeste e outras envolventes exteriores e das trocas de calor por convecção com o ar exterior (Abrantes 1984).

Tabela 4.14 — Valores máximos da radiação solar incidente sobre superfícies verticais e horizontais exteriores, em Portugal Continental (Sousa, Freitas, e Silva 2003).

Estação do ano	Radiação solar máxima – I_g [W/m^2]						
	Orientação solar das superfícies verticais						
	N	E	SE	S	SO	O	H[a)]
Inverno	90	680	940	1050	920	670	750
Primavera/Outono	150	720	980	790	940	700	-
Verão	180	900	880	460	800	780	1100

NOTA: [a)] Superfície horizontal, com inclinação entre 0º e 15º.

A temperatura fictícia ar-sol ($T_{\text{ar-sol}}$) foi calculada de acordo com a expressão seguinte (Abrantes 1984):

$$T_{ar-sol} = T_{ar} + \alpha_s I_g R_{se} + \frac{R_{se}}{R_r}(T_r - T_{ar}) \quad (4.\ 1)$$

em que:

T_{ar} – Temperatura exterior (ºC);

α_σ – Coeficiente de absorção da radiação solar da superfície exterior ($0 < \alpha < 1$);

I_g – Radiação solar total incidente numa superfície horizontal por unidade de área (W/m^2);

$\alpha_s I_g$ – Parcela da irradiação efetivamente absorvida pela superfície (W/m^2);

R_{se} – Resistência térmica superficial exterior [(m^2·K)/W];

R_r – Resistência térmica superficial exterior devido à radiação [(m^2·K)/W];

T_r – Temperatura radiante equivalente da abóbada celeste e envolvente exterior celeste (ºC).

São admitidos valores muito distintos no cálculo da temperatura fictícia ar-sol para a parcela (R_{se} / R_r) · (T_r - T_{ar}). À semelhança de autores, como Givoni (Givoni 1978) e Croiset (Croiset 1968), esta parcela foi considerada com um valor nulo, tendo sido desprezada.Os valores da temperatura exterior (T_{ar}) e da radiação solar total incidente (I_g) resultam de um valor de referência estimado com base nos dados dos registos efetuados entre os anos de 1961 e 1990 (US Department of Energy 2012), para um

dia ameno, de céu limpo, no Porto (zona climática[2] de verão V_1), estando representados no gráfico da Figura 4.34. O coeficiente de absorção solar (α_s) foi considerado com um valor elevado de 0,6, de modo a, conjugado com uma radiação solar intensa, provocar a amplitude térmica diária preconizada, ou seja, igualmente elevada. A resistência térmica superficial exterior de R_{se} = 0,04 $m^2 \cdot K/W$ foi considerada de acordo com a informação técnica ITE50 (Santos e Matias 2007). Em resultado da aplicação da equação para o cálculo da temperatura fictícia ar-sol (Equação 4. 1) foi calculado um ciclo de 24 horas, com temperaturas máximas de 37 ºC e mínimas de 9 ºC (*v.* Figura 4.34).

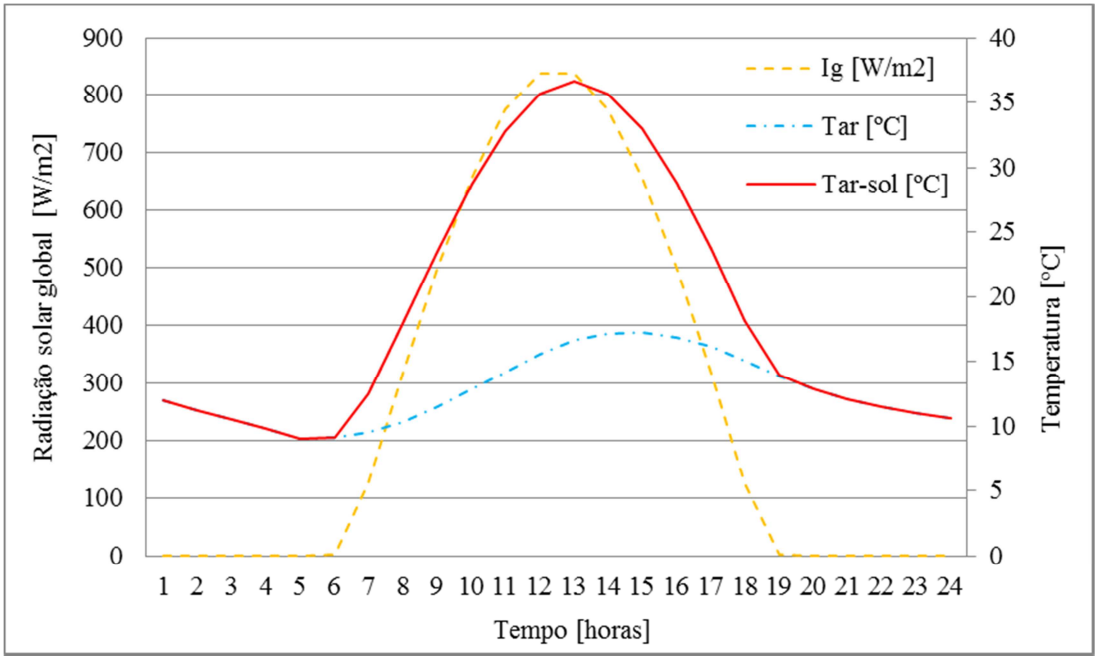


Figura 4.34 — Temperatura ambiente, Temperatura fictícia ar-sol e Radiação solar global no dia 7 de Abril, no Porto.

O ciclo diário representado na Figura 4.35, pelos parâmetros: radiação total incidente (I_g), temperatura exterior (T_{ar}) e temperatura fictícia ar-sol ($T_{ar\text{-}sol}$) foi obtido de acordo com o descrito anteriormente, para um dia da estação de arrefecimento no

2 Zona climática – O País está dividido em três zonas climáticas de inverno, I_1, I_2 e I_3 e em três zonas climáticas de verão V_1, V_2 e V_3. O zonamento climático faz a distribuição dos concelhos de Portugal consoante os correspondentes dados climáticos de referência. Os valores da 'temperatura exterior de projeto de verão' e da 'amplitude térmica média diária do mês mais quente' caraterísticos de cada concelho são os dados de referência que contribuem para o zonamento climático de verão. Ao índice inferior (V_1) correspondem os valores de referência mais baixos e ao índice superior (V_3) correspondem os valores mais elevados. A distribuição dos concelhos de Portugal segundo as zonas climáticas pode ser consultada no Anexo III do RCCTE (Ministério das Obras Públicas 2006) .

Porto, mas neste caso considerando um concelho da região sul de Portugal: Faro (zona climática de verão V_2).

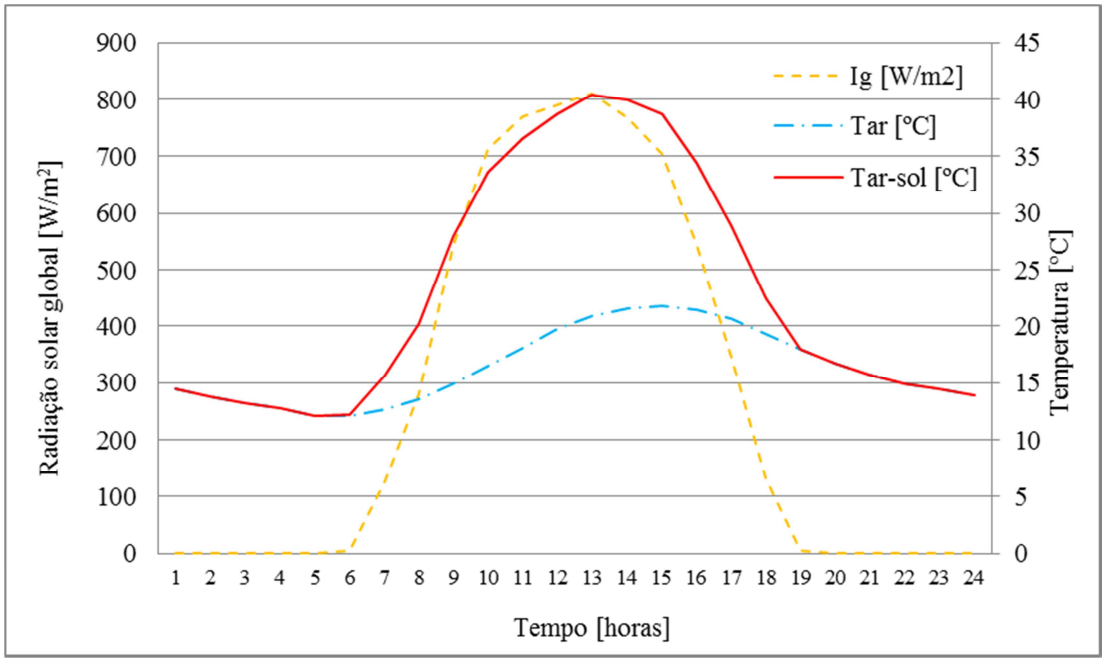


Figura 4.35 — Temperatura ambiente, Temperatura fictícia ar-sol e Radiação solar global no dia 7 de Abril, em Faro.

Os dias da estação de arrefecimento considerados, representados nas Figuras 4.34 e 4.35, conjugados com um coeficiente de absorção da radiação solar elevado ($\alpha_s = 0{,}6$), garantem amplitudes térmicas diárias e picos de temperatura máxima elevados (amplitude de, aproximadamente, 26 ºC e 28 ºC, e $T_{ar\text{-}sol(máx)}$ de 37 ºC ou 40 ºC), facilitando a observação do efeito do PCM introduzido na célula CPCM, de acordo com o objetivo inicialmente fixado.

As duas células de teste (SPCM e CPCM) foram submetidas a dois ciclos de temperaturas distintos, perfazendo um total de 4 ensaios, com uma duração de 48 horas cada. A **H**umidade **R**elativa (*H.R.)*, no interior da câmara climática, foi fixada com um valor constante de *H.R.* = 50 %, durante todos os ensaios.

A estação climática de aquecimento (outono/inverno) não foi estudada experimentalmente, uma vez que a gama de temperaturas de fusão do PCM utilizado é demasiado alta (23 ºC – 25 ºC) face às condições climáticas características da estação e à temperatura interior de conforto, que é de 20 ºC, sendo inferior à temperatura de fusão do PCM que é cerca de 23 ºC.

4.3.3 Resultados da monitorização de temperaturas

Ao longo dos ensaios, as temperaturas monitorizadas pelos sensores colocados no interior das células de teste SPCM e CPCM (superfícies e centro geométrico dos cubos) foram análogas, em cada instante de registo, com um desvio máximo de 0,2 ºC. Esta homogeneidade, entre os registos de temperaturas das superfícies e do centro, evidencia o comportamento adequado das células de teste, ou seja, sem pontes térmicas ou descontinuidades na construção. A semelhança nos resultados era expectável, dado que as células de teste foram seladas, evitando a circulação de ar no seu interior, e todas as paredes das caixas (horizontais e verticais) ficaram sujeitas às mesmas condições de exposição.

Atendendo aos resultados da monitorização de ambas as células de teste, quando sujeitas às condições climáticas de um dia da estação de arrefecimento no Porto, a temperatura máxima registada no interior da célula de teste SPCM foi de 26,3 ºC, enquanto na célula CPCM o valor máximo obtido foi de 23,7 ºC (*v.* Figura 4.36). As temperaturas mínimas registadas nas células foram muito próximas: 13,3 ºC no interior da célula de teste SPCM e 13,5 ºC e no interior da CPCM. O desfasamento entre os picos de temperaturas máximas registado no interior da câmara climática e no interior das células de teste SPCM foi de 3 horas e meia. A célula CPCM apresentou um desfasamento mais longo, de aproximadamente 4 horas.

Em resumo, os resultados da monitorização das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM, no Porto (*v.* Figura 4.36), são distintos evidenciando a ação dos PCM. A disparidade mais relevante entre os resultados da monitorização de ambas as células verificou-se nos registos dos picos de temperatura máxima, com uma diferença de 2,6 ºC. Esta diferença é consistente com os resultados obtidos por Bontemps (Bontemps et al. 2011), tendo registado diferenças de 3 ºC a 5 ºC no estudo experimental de células de teste constituídas por paredes de tijolo de vidro com e sem PCM. A temperatura máxima atingida no interior da célula CPCM é próxima da temperatura de fusão do PCM: 23 ºC (correspondendo também à temperatura de fusão da argamassa desenvolvida com PCM).

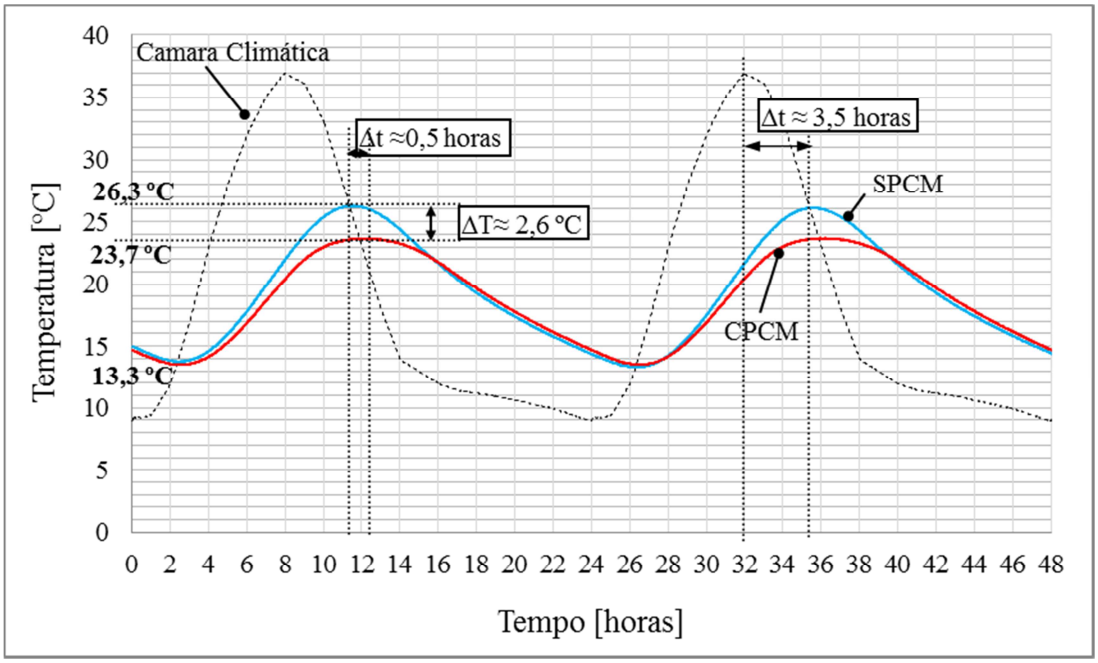


Figura 4.36 — Monitorização das temperaturas nas células de teste SPCM e CPCM no dia 7 de Abril, no Porto.

A monitorização feita durante a campanha experimental correspondente a um dia da estação de arrefecimento na região sul de Portugal, em Faro, encontra-se representada na Figura 4.37. As temperaturas máximas registadas no interior das células foram de 32 ºC para a célula de teste SPCM, e de 30 ºC para a CPCM. As temperaturas mínimas registadas foram muito diferentes: 18 ºC para a célula SPCM e 23 ºC para a célula CPCM, o que dá uma diferença de 5 ºC. A ação do PCM pode ser identificada ao longo de 15 horas por dia (conforme o evidenciado na Figura 4.37), ou seja, as temperaturas registadas no interior da célula CPCM estão compreendidas entre os 23 ºC e os 25 ºC (correspondentes à gama de temperaturas de fusão do PCM) durante 15 horas/dia. As observações feitas para este dia quente da estação de arrefecimento são coincidentes com as apresentadas por Ahmad (Ahmad et al. 2006) no estudo de células de teste revestidas a gesso cartonado com PCM, quando expostas a condições climáticas semelhantes, em que, a introdução de PCM conduz a uma redução dos picos de temperaturas máximas e a um aumento das temperaturas mínimas.

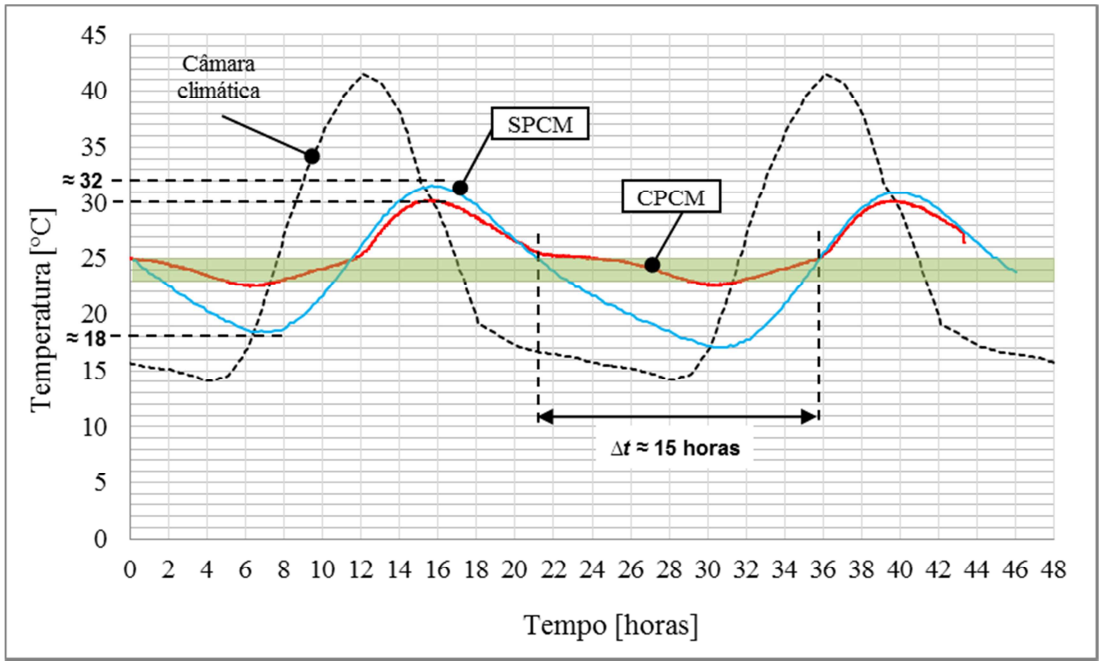


Figura 4.37 — Monitorização das temperaturas nas células de teste SPCM e CPCM no dia 7 de Abril, em Faro.

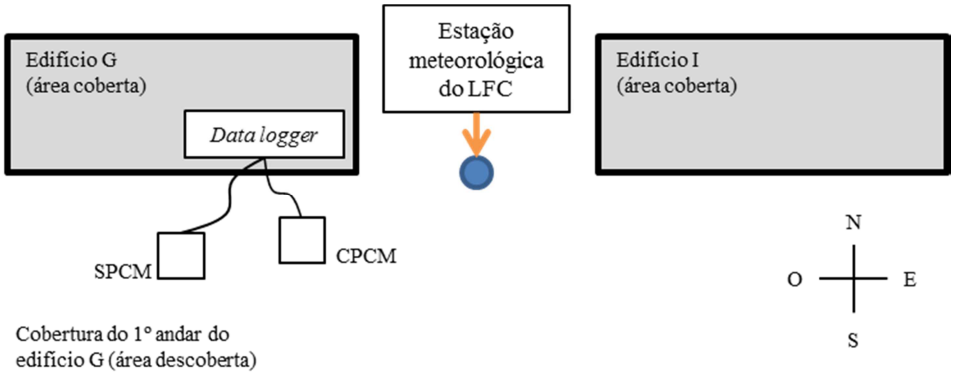
Em síntese, comparando os resultados obtidos em ambos os cenários impostos, em Faro, onde as temperaturas mínima e máxima são mais elevadas do que no Porto, o efeito do PCM é mais claro, tendo-se registado maiores diferenças entre as temperaturas interiores monitorizadas nas células de teste SPCM e CPCM. Neste dia, o efeito do PCM é percetível ao limitar as temperaturas mínimas à temperatura de fusão do PCM (23 ºC), enquanto que no cenário anterior, correspondente ao dia 7 de Abril no Porto, a ação do PCM é sentida, essencialmente, na redução do pico de temperaturas máximas. Nas duas situações estudadas a amplitude térmica interior na célula de teste CPCM é atenuada.

Atendendo aos resultados obtidos, correspondentes a dois dias distintos da estação de arrefecimento, pode-se aferir que o PCM atua reduzindo picos diários de temperatura, atenuando as flutuações da temperatura interior e tornando-as mais próximas dos níveis de conforto.

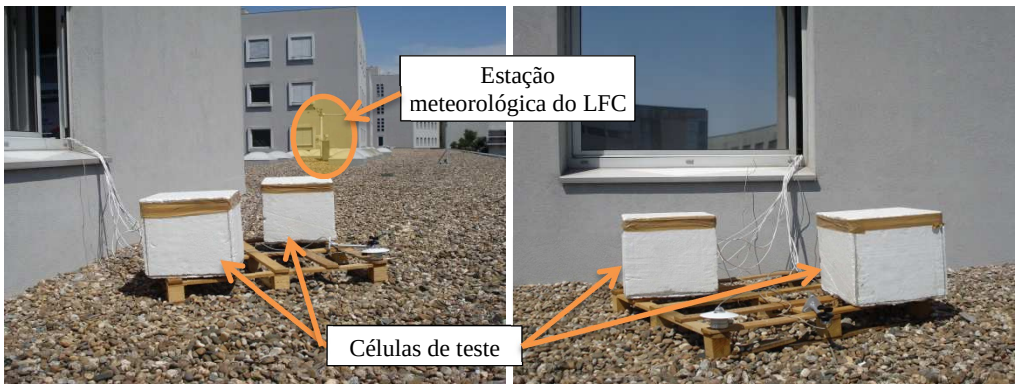
4.4 Ensaios *in situ*

4.4.1 Equipamentos e sistemas de monitorização

As células de teste foram colocadas na cobertura do edifício G da FEUP, próximas da estação meteorológica do LFC e junto ao corpo do edifício, conforme o representado na Figura 4.38, permitindo deste modo o acondicionamento dos equipamentos de monitorização no interior do edifício e a utilização dos dados da estação meteorológica. O local onde as células foram colocadas garantiu-lhes uma exposição solar diária contínua, durante todo o período em que decorreram os ensaios: maio de 2011.



(a)



(b) *(c)*

Figura 4.38 — Monitorização *in situ* das células de teste: *(a)* representação esquemática em planta; *(b)* e *(c)* fotografias da cobertura do 1º andar do edifício G da FEUP.

Relativamente à monitorização das temperaturas, sensores de temperatura do tipo ‘PT100’, com uma sensibilidade de ± 0,01ºC, foram distribuídos pelo interior da célula de teste, num total de dez sensores: oito ‘PT100’ no interior (quatro em cada célula) e dois ‘PT100’ no exterior (junto à face inferior de cada uma das células de teste). A distribuição dos sensores de temperatura no interior das células, representada na Figura 4.39, foi realizada do seguinte modo: um ‘PT100’ no centro da tampa; um ‘PT100’ no centro geométrico; um ‘PT100’ no centro da base (superfície inferior da célula) e um ‘PT100’ a meia altura do canto SE. Todos os sensores de temperatura foram ligados a um sistema de aquisição e armazenamento de dados, com o registo de uma medição por cada 10 minutos durante todo o ciclo de ensaios.



(a) *(b)*

Figura 4.39 — Disposição dos sensores tipo ‘PT100’ no interior das células de teste: *(a)* no centro e na base e *(b)* na tampa e no canto SE.

A monitorização da radiação solar global, da humidade relativa e da velocidade do vento, foi feita através da estação meteorológica do LFC. Esta estação está a funcionar desde Setembro de 2001 e os dados passaram a ser disponibilizados *on-line* em 2006 (Freitas 2007).

4.4.2 Condições climáticas

Nos ensaios experimentais *in situ*, realizados com o objetivo de avaliar a influência do PCM no desempenho térmico diário de espaços interiores, as células de teste ficaram expostas às condições climáticas de 4 dias consecutivos, entre os dias 15 a 19 de maio de 2011.

Os valores da temperatura do ar exterior (T_{ar}) e da radiação solar total incidente (I_g), representados na Figura 4.40, resultaram da aquisição dos dados registados pela estação meteorológica do LFC/FEUP (descrita na subsecção 4.4.1). A temperatura ambiente foi também registada por dois sensores de temperatura, do tipo 'PT100', colocados na base inferior de cada uma das células de teste (em contacto com o ar e protegidos da radiação solar).

Os primeiros ensaios realizados *in situ* consistiram na monitorização das temperaturas interiores das células de teste e sujeitas às condições climáticas representadas nas Figuras 4.40 e 4.41. Para além das temperaturas elevadas (temperatura exterior máxima próxima dos 30ºC) e da radiação solar intensa ($I_{g,máx}$ = 800 W/m^2), os dois primeiros dias, durante os quais decorreram os ensaios (15 e 16 de maio de 2011), caracterizaram-se por dias de céu limpo, de humidade relativa muito baixa (entre 19% e 45,5%) e reduzida velocidade do vento (velocidade média de 1,5 m/s). Os dois dias seguintes (17 e 18 de Maio) distinguiram-se dos primeiros pela nebulosidade e pela humidade relativa mais elevada (média de 70%).

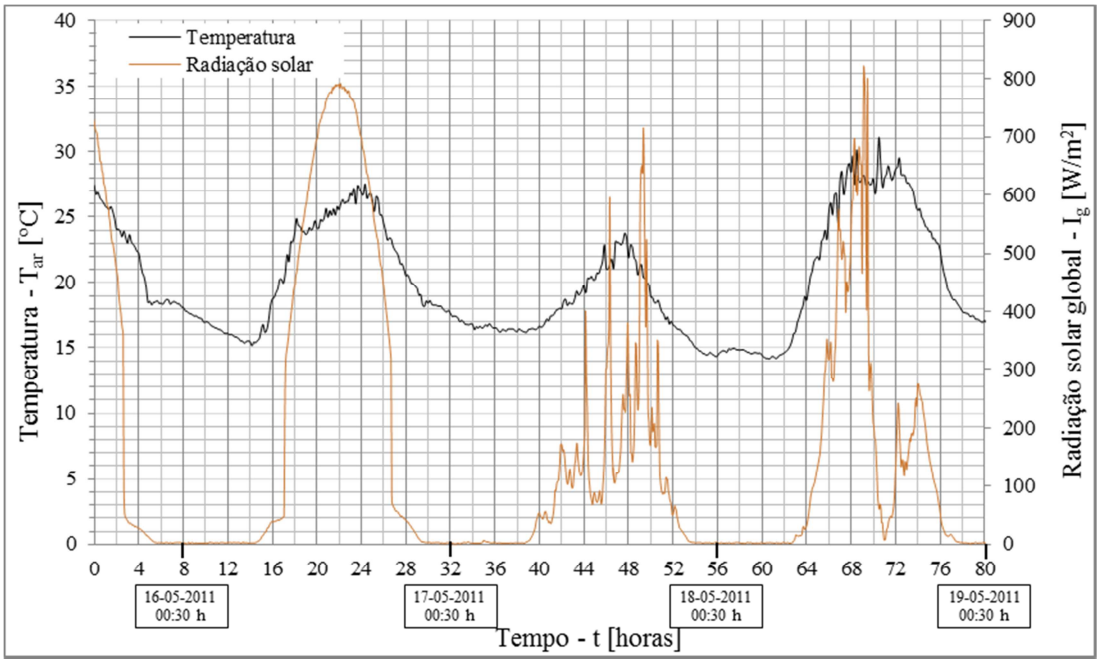


Figura 4.40 — Monitorização da temperatura exterior (T_{ar}) e da radiação solar (I_g) entre os dias 15 e 19 de maio de 2011.

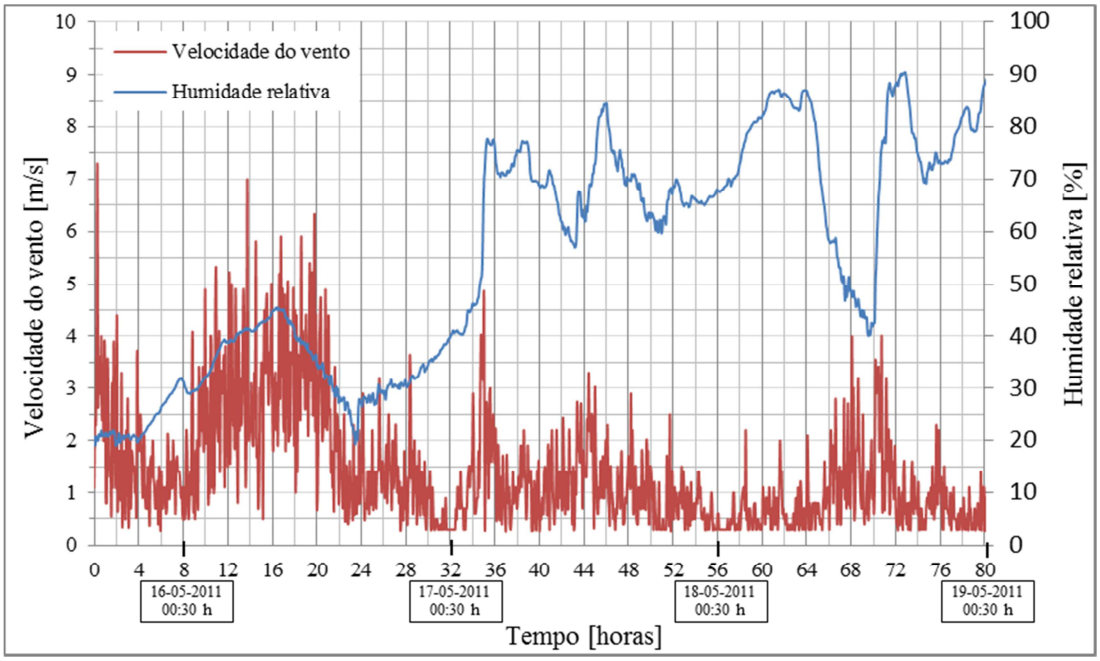


Figura 4.41 — Monitorização da velocidade do vento e da humidade relativa entre os dias 15 e 19 de maio de 2011.

4.4.3 Resultados da monitorização de temperaturas

Ao longo dos primeiros ensaios realizados *in situ*, a monitorização das temperaturas interiores das células de teste demonstrou que há uma diferença entre os registos obtidos a partir dos sensores colocados no centro da tampa e da face Sudeste (SE) e os registos dos sensores colocados no centro geométrico e na base das células. Essa diferença é observável, quer na célula SPCM, quer na célula CPCM, conforme o indicado na Figura 4.42. A ausência de homogeneidade no registo das temperaturas interiores, demonstrada pelos registos de temperaturas em diferentes pontos do interior de cada uma das células, evidencia a influência que a radiação solar tem sobre a temperatura superficial exterior e, consequentemente, sobre as temperaturas interiores (superficial e ambiente). Assim, as superfícies interiores das faces com maior exposição solar, nomeadamente a tampa da célula (face horizontal de topo) e o canto SE, apresentam temperaturas mais elevadas do que o centro e a base da célula.

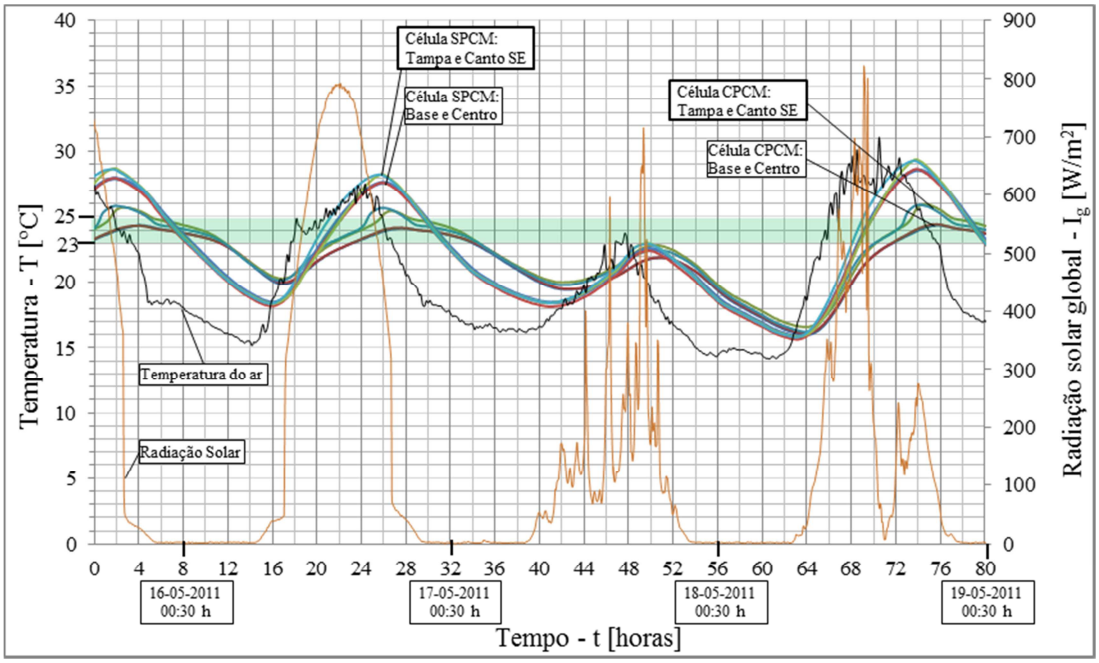


Figura 4.42 — Monitorização da temperatura ambiente, da radiação solar e do interior das células SPCM e CPCM, entre os dias 15 e 19 de maio de 2011.

Atendendo aos resultados da monitorização de ambas as células de teste para os sensores colocados na tampa e no canto SE, representados na Figura 4.43, a temperatura máxima registada no interior da célula de teste SPCM foi de 29,2 ºC, enquanto na célula de teste CPCM foi de 26 ºC. Nos dias de ensaio com temperaturas mais elevadas e radiação solar mais intensa, verificou-se uma diferença entre os picos de temperatura máxima registados no interior da célula de teste SPCM e os picos registados no interior da CPCM, com valores de: ΔT = 2,9 ºC; ΔT = 2,6 ºC e ΔT = 3,2 ºC, correspondente aos dias 15, 16 e 18 de Maio, respetivamente. Durante estes dias, a ação do PCM, sublinhada por uma mancha de cor verde no gráfico da Figura 4.43, é percetível ao longo de várias horas por dia. No dia 16 de Maio, essa ação (correspondente a temperaturas no interior da célula na gama de fusão do PCM (de ≈ 23 ºC a ≈ 25 ºC) é visível durante cerca de 12 horas, entre as 12 horas e 30 minutos e as 18 horas e 30 minutos e entre as 20 horas e 30 minutos e as 2 horas e 30 minutos.

Já no dia mais ameno, correspondente ao dia 17 de Maio, o efeito do PCM não é percetível, pois as temperaturas interiores não chegam a atingir a temperatura de fusão do PCM. Ao longo deste dia, a monitorização do interior de ambas as células

de teste permite observar que as temperaturas interiores na célula de teste SPCM e na CPCM são equivalentes.

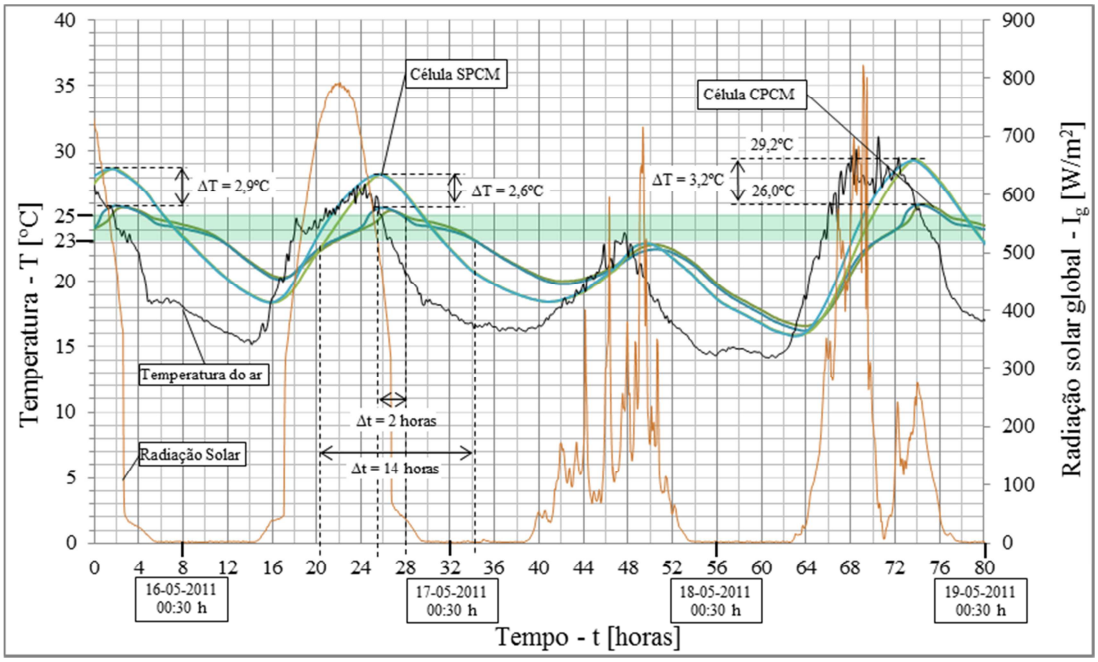


Figura 4.43 — Monitorização da temperatura ambiente, da radiação solar e do interior das células (canto SE e tampa), entre os dias 15 e 19 de maio de 2011.

A monitorização feita pelos sensores colocados na base e no centro geométrico do interior de ambas as células de teste encontra-se registada no gráfico da Figura 4.44. A temperatura máxima obtida por estes sensores no interior da célula de teste SPCM foi de 28,8 ºC, enquanto no interior da CPCM a temperatura máxima foi de 24,1 ºC. As diferenças entre os picos de temperatura máxima registados no interior das células de teste SPCM e CPCM foi de: ΔT = 3,9 ºC; ΔT = 3,7 ºC e ΔT = 4,8 ºC, respetivamente para os dias 15, 16 e 18 de Maio. Verificaram-se semelhanças entre o observado nos ensaios realizados em laboratório (*v.* secção 4.3) e os ensaios *in situ*: também aqui se verifica um desfasamento entre os picos máximos de temperatura registados no interior das células. Durante o tempo em que decorreram os ensaios o desfasamento máximo foi de, aproximadamente, 2 horas.

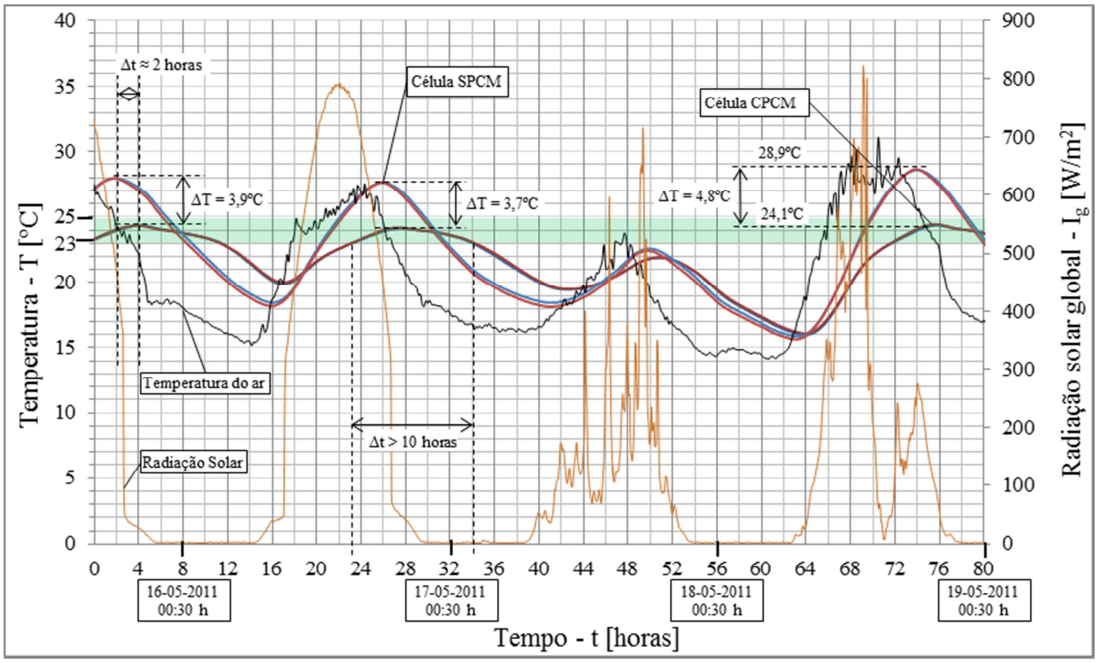


Figura 4.44 — Monitorização da temperatura ambiente, da radiação solar e do interior das células (base e centro geométrico), entre os dias 15 e 19 de maio de 2011.

Os resultados experimentais apresentados por Entrop (Entrop, Brouwers, e Reinders 2011) no estudo *in situ* de células de teste de pequenas dimensões constituídas por um pavimento em betão com PCM permitiu observar o efeito do PCM, garantindo, para as condições estudadas, uma diminuição das temperaturas interiores máximas e um aumento das temperaturas mínimas. Estes resultados substanciam o estudo experimental desenvolvido, em que a ação dos PCM é sentida essencialmente pela influência que têm na redução dos picos diários de temperatura (máximos e mínimos). A ação reguladora dos picos de temperatura contribui para a redução do intervalo de temperaturas registado no interior e para o aumento do desfasamento entre os picos de temperatura exterior e interior.

4.5 Síntese comparativa dos resultados obtidos: ensaios em laboratório *vs.* ensaios *in situ*

Os resultados experimentais, obtidos na monitorização das células de teste em laboratório e *in situ*, permitiram responder ao objetivo inicialmente imposto, tendo-se verificado a ação dos PCM quando incorporados na argamassa de revestimento interior. A monitorização dos ensaios experimentais permitiu aferir que o PCM atua

assim que a temperatura do ambiente interior atinge valores equivalentes à correspondente gama de fusão.

A ação dos PCM é mais evidente quando a temperatura de fusão do PCM é próxima da temperatura média registada no interior da célula de teste SPCM, como é o caso do cenário estudado para Faro (*v.* Figura 4.37) e dos dias 15, 16 e 18 de maio (*v.* Figura 4.42). Os trabalhos de investigação numérica publicados por Neeper (Neeper 1999) e por Xu *et al.* (Xu et al. 2005) aferem que a temperatura ótima de fusão do PCM deve ser equivalente à temperatura média interior. Nos dias mais amenos, 7 de Abril (*v.* Figura 4.36) e 17 de maio (*v.* Figura 4.42), a ação do PCM é mais discreta ou mesmo impercetível, demonstrando, mais uma vez, que a presença do PCM só é sentida na mudança de fase, ou seja, quando atinge a temperatura de fusão.

A principal distinção entre os registos dos ensaios laboratoriais e os registos dos ensaios *in situ* está na diferença entre as temperaturas interiores monitorizadas em pontos distintos das células de teste. Enquanto nos ensaios em laboratório a monitorização dos vários pontos do interior das células foi coincidente, nos ensaios *in situ* os vários pontos monitorizados apresentaram algumas diferenças, o que reflete o efeito que a radiação solar exerce sobre o comportamento térmico interior. A influência da radiação solar foi traduzida na monitorização de resultados distintos, durante os ensaios *in situ*, entre as faces interiores com maior exposição solar (tampa e canto SE das células) e as de menor exposição solar (a base das células), representada na Figura 4.42.

4.6 Análise crítica dos resultados

A investigação experimental apresentada neste capítulo teve como principal objetivo observar o comportamento dos PCM incorporados na argamassa desenvolvida, quando submetidos a ciclos de temperatura característicos da estação de arrefecimento.

As duas células de teste (uma revestida por uma argamassa corrente e outra revestida pela argamassa com PCM) foram sujeitas a ensaios laboratoriais e *in situ*, ambos representando cenários correspondentes a dias quentes da estação de arrefecimento em Portugal Continental. A monitorização das temperaturas no interior das duas

células de teste (SPCM e CPCM) permitiu a observação do comportamento distinto entre elas, evidenciando a ação dos PCM. Os PCM contribuem para a conservação das temperaturas interiores entre valores correspondentes à sua gama de fusão, garantindo deste modo a redução de picos diários de temperatura (máximos e mínimos), a atenuação das flutuações (ou a estabilização) da temperatura interior e o aumento do desfasamento entre os picos de temperatura exterior e os picos de temperatura interior.

Os resultados obtidos demonstraram ainda que a ação do PCM não é constante, sendo muito condicionada pelas condições de exposição. Em dois dias consecutivos, a presença de PCM pode passar de impercetível a essencial na conservação da temperatura interior dentro dos limites de conforto desejados. Este facto pode condicionar de algum modo a procura de uma solução ótima com PCM. A simulação numérica, apresentada nos capítulos seguintes, pretende ser uma ferramenta útil na procura de uma solução com PCM cujo desempenho seja prolongado ao longo do maior período possível.

Capítulo 5

Problema Matemático: análise da transferência de calor

5.1 Conceitos gerais

A formulação matemática do problema de transferência de calor impõe o conhecimento dos fenómenos envolvidos na caracterização do comportamento térmico. A transferência de calor ocorre quando existem diferenças de temperatura num meio, ou entre meios distintos, e pode ser de várias naturezas: condução, convecção, ou radiação. Frequentemente, estes três mecanismos atuam em simultâneo na distribuição das temperaturas através de um meio, não sendo possível isolar completamente um dos processos. No entanto, é usual a separação dos referidos mecanismos, o que introduz a uma significativa simplicidade de análise sem implicar erros grosseiros (Ozisik 1993).

Os diferentes mecanismos de transferência de calor estão representados na Figura 5.45.



Figura 5.45 — Mecanismos de transferência de calor (Azenha 2004).

Nas secções seguintes procede-se à descrição dos fenómenos de transferência de calor acima mencionados.

5.2 Condução

5.2.1 Definições e conceitos

A condução é o processo em que o calor se transmite de molécula em molécula sem movimento interno da matéria. Dá-se sobretudo no interior dos corpos sólidos ou entre dois corpos sólidos em contacto. A condução também se dá no interior dos líquidos e dos gases, mas com muito pouca intensidade, uma vez que estes são maus condutores de calor. A condução de calor pode ocorrer em regime estacionário (quando a temperatura em qualquer ponto não varia com o tempo) ou em regime transiente (com variação de temperatura no tempo).

A compreensão dos fenómenos de condução de calor assenta no conhecimento de algumas grandezas: a condutibilidade térmica, o calor específico, o calor específico volumétrico e a difusibilidade térmica, definidos anteriormente (*v.* Capítulo 2, secção 2.2).

5.2.2 Equação geral da condução de calor

A equação geral de condução de calor baseia-se nos princípios enunciados pela lei de Fourier. Esta equação, utilizada com o objetivo principal de determinar o campo de temperaturas num meio (resultante de condições de fronteira e eventual geração interna de calor), traduz o princípio de conservação de energia (Primeira Lei da Termodinâmica). O somatório dos fluxos de calor (positivos e negativos), que atravessam o volume elementar considerado, é igual à variação de energia interna (armazenamento ou cedência de calor) desse mesmo volume, por unidade de tempo. Assim, num sistema fechado, tem-se:

$$\dot{E}_{st} = \dot{E}_{g} + \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} \qquad (5.\ 1)$$

em que:

$\dot{E}_{st}$ – taxa de energia armazenada (W);

$\dot{E}_{g}$ – taxa de energia gerada internamente (W);

$\dot{E}_{in}$ – taxa de entrada de energia (W);

$\dot{E}_{out}$ – taxa de saída de energia (W).

Por outras palavras, a taxa de energia armazenada, $\dot{E}_{st}$, no volume elementar C_v, é igual à taxa de energia gerada internamente, $\dot{E}_g$, somada da taxa de entrada de energia, $\dot{E}_{in}$, e subtraída da taxa de saída de energia, $\dot{E}_{out}$, nesse mesmo volume.

A fim de deduzir a equação de Fourier considere-se o volume infinitesimal elementar de matéria, em coordenadas cartesianas, representado na Figura 5.46.

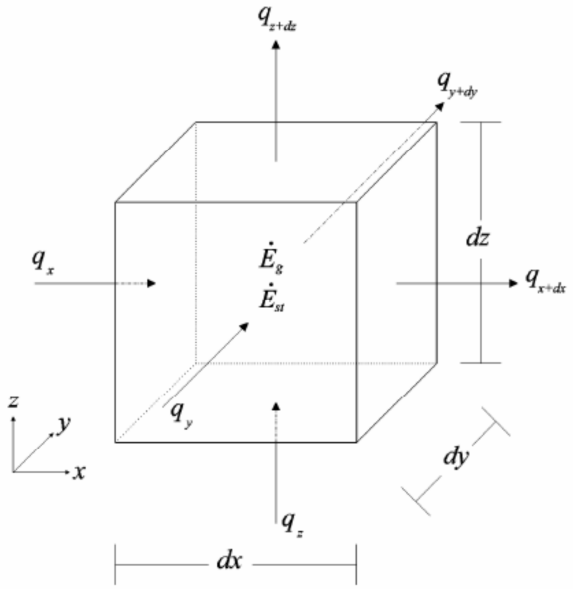


Figura 5.46 — Volume infinitesimal elementar de matéria - C_v.

Na presença de gradientes de temperatura haverá condução de calor através das faces da partícula infinitesimal, em direções perpendiculares às correspondentes superfícies. Em três das faces do volume infinitesimal, os fluxos de calor podem ser identificados por q_x, q_y e q_z. Nas faces opostas, os fluxos de calor podem ser representados em expansão em séries de Taylor (ignorando termos de ordem superior):

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \qquad (5.\ 2a)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \qquad (5.\ 2b)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \qquad (5.\ 2c)$$

Assim, considerando que os fluxos de calor nas faces da partícula se representam por $\dot{E}_{in}$ e por $\dot{E}_{out}$, representados por:

$$\dot{E}_{in} = q_x + q_y + q_z \tag{5. 3}$$

$$\dot{E}_{out} = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} \tag{5. 4}$$

Em que as taxas de energia armazenada e gerada internamente se traduzem nas expressões:

$$\dot{E}_{st} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz \tag{5. 5}$$

$$\dot{E}_{g} = \dot{Q}\, dxdydz \tag{5. 6}$$

em que:

T – temperatura (K);

t – tempo (s);

$\dot{Q}$ – taxa de geração de energia por unidade de volume no meio (W/m^3).

Substituindo as Equações (5.3) a (5.6) em (5.1) obtém-se:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz = \dot{Q} dxdydz + q_x + q_y + q_z - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} \tag{5. 7}$$

Substituindo (5.2) em (5.7) resulta:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} dxdydz = \dot{Q} dxdydz - \frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \tag{5. 8}$$

Os fluxos de calor nas faces da partícula podem ser obtidos por multiplicação das componentes de $\lambda \cdot \nabla T$ pelas áreas respetivas, isto é:

$$q_x = -\lambda dydz \frac{\partial T}{\partial x} \tag{5. 9a}$$

$$q_y = -\lambda dxdz \frac{\partial T}{\partial y} \tag{5. 9b}$$

$$q_z = -\lambda dxdy \frac{\partial T}{\partial z} \tag{5. 9c}$$

pelo que substituindo (5.9) em (5.8) se tem:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q} \tag{5. 10}$$

Esta expressão é a forma geral da equação de Fourier, a partir da qual se pode obter a distribuição de temperaturas *T (x, y, z, t).* Para valores constantes da condutibilidade térmica é usual reformular (5.10) em:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \dot{Q} \qquad (5.\ 11)$$

Note-se que a parcela $\dot{Q}$, a taxa de geração de energia por unidade de volume no meio, coincide com a geração interna de calor. Considerando que não há dissipação de calor, tem-se:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad (5.\ 12)$$

5.2.3 Condução de calor em materiais de mudança de fase

Os problemas de transferência de calor associados à solidificação e/ou fusão dos materiais são importantes para as mais diversificadas áreas de engenharia, nomeadamente no armazenamento de energia, tendo sido objeto de vários estudos. A solução para estes problemas não é fácil, dado que a interface entre os estados sólido e líquido se altera à medida que o calor latente é armazenado ou libertado. Assim, a fronteira entre o sólido e o líquido é desconhecida *a priori* e, por conseguinte, deve fazer parte da solução (Ozisik 1993).

No estudo desenvolvido, o método da entalpia, descrito por Ozisik (Ozisik 1993) e por Shamsundar (Shamsundar e Sparrow 1975) foi utilizado como base da solução numérica para o problema de transferência de calor em materiais de mudança de fase. Neste método, a entalpia é dependente da temperatura durante a mudança de estado, na transição de sólido para líquido ou de líquido para sólido. A forma geral da equação de calor, Equação (5.12), tendo em conta a variação da entalpia, *H*, com a temperatura, *T*, passa a representar-se por (Shamsundar e Sparrow 1975; Ozisik 1993):

$$\rho \frac{\partial H(T)}{\partial t} = \lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \qquad (5.\ 13)$$

em que *H* representa a entalpia de fusão e expressa-se em kJ/kg.

A grande vantagem deste método é que a mesma equação (Equação (5.13)) pode ser aplicada, quer ao estado sólido, quer ao estado líquido, facilitando a resolução numérica do problema de transferência de calor associado a PCM. Para além disso, este método permite a resolução de problemas em que a mudança de fase ocorre num intervalo de temperaturas, como é o caso dos PCM utilizados neste estudo, e não apenas a uma temperatura exata, como é o caso das substâncias puras.

Assumindo um armazenamento/libertação linear do calor latente durante a mudança de fase, a relação entre a entalpia, *H*, e a temperatura, *T*, pode ser expressa por:

$$H(T) = \begin{cases} c_p T & , \quad T < T_1 \quad \text{(sólido)} \quad \text{(5. 14a)} \\ c_p T + \dfrac{T - T_1}{T_2 - T_1} L & , \quad T_1 \leq T \leq T_2 \quad \text{(mudança de fase)} \quad \text{(5. 14b)} \\ c_p T + L & , \quad T > T_2 \quad \text{(líquido)} \quad \text{(5. 14c)} \end{cases}$$

onde L é o calor latente e T_1 e T_2, representam respetivamente as temperaturas de fusão (temperatura em que se dá início à transição de sólido para líquido) e de pico de fusão (temperatura em que todas as partículas do material estão no estado líquido, ou seja, a temperatura correspondente à capacidade máxima de armazenamento de energia).

5.3 Convecção

A convecção é a forma corrente de transmissão de calor entre um fluido e uma superfície sólida e ocorre devido ao movimento do fluido sempre que se verifica uma diferença de temperaturas, sendo o processo típico de transmissão entre dois meios distintos que compreende dois mecanismos principais: o movimento molecular aleatório (difusão) e o movimento macroscópico do fluido.

A Figura 5.47 ilustra o fenómeno de convecção como um todo, em que, pelo efeito da interação do fluido com a superfície se desenvolve uma região de fluido na qual a velocidade varia de zero (vizinhança da superfície) até um valor finito associado ao escoamento. A contribuição da difusão é dominante onde a velocidade do fluido é baixa, ou seja, junto à superfície.

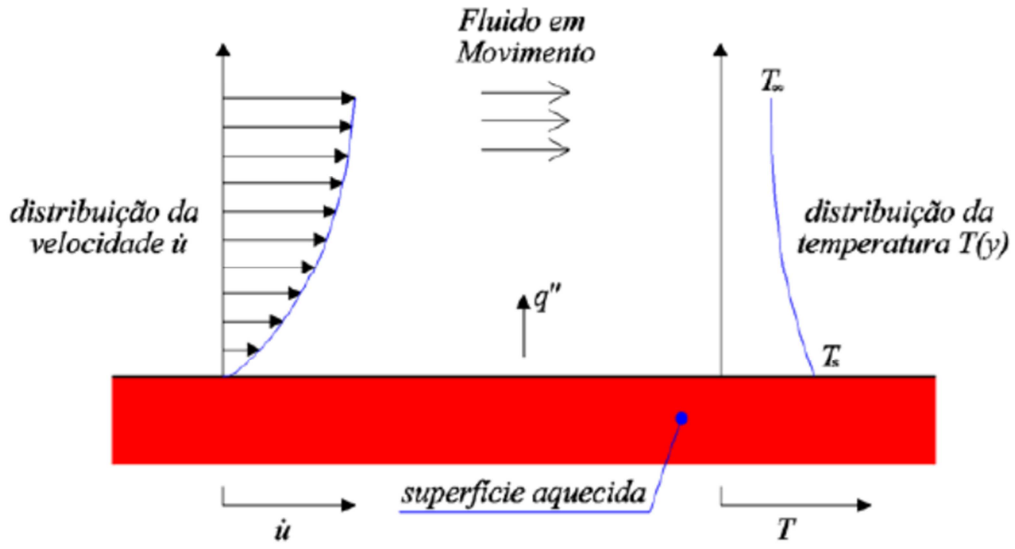


Figura 5.47 — Perfil da velocidade e da temperatura de um fluido na vizinhança de um sólido (Azenha 2004).

Entre os elementos construtivos de um edifício e o meio ambiente circundante existem simultaneamente diferenças de temperatura e vento. Por conseguinte, estão normalmente associados dois tipos de convecção:

— convecção livre: o fluxo é causado unicamente pelas diferenças locais de massa volúmica provocadas pelas diferenças de temperatura;

— convecção forçada: o fluxo é causado por meios externos (circulação de ar: vento, ventoinhas, etc.).

Independentemente do modo, a transferência de calor por convecção rege-se pela lei de Newton, que se traduz na seguinte expressão:

$$q'' = h_{conv}(T_s - T_f) \qquad (5.\ 15)$$

onde:

q'' – fluxo convectivo de calor por unidade de área (W/m^2);

h_{conv} – coeficiente de convecção (W/(m^2.K));

T_s – temperatura da superfície (K);

T_f – temperatura do fluido, em zona não perturbada pela superfície (K).

O fluxo de calor entre o sólido e o fluido varia linearmente com a diferença de temperaturas entre ambos. O fenómeno da convecção é bastante complexo, pois, para além de depender das diferenças de temperatura entre os dois meios, depende também das propriedades do fluido (massa volúmica, viscosidade, condutibilidade

térmica e calor específico), sendo ainda necessário ter em conta as características da superfície (geometria, rugosidade e orientação) e o regime do escoamento (laminar ou turbulento). O coeficiente de convecção, h_{conv}, é afetado pelos fatores enunciados, podendo o respetivo valor variar ao longo da superfície de contacto.

5.4 Radiação

5.4.1 Conceitos gerais

A transmissão de calor por radiação distingue-se bastante dos mecanismos anteriormente descritos. Enquanto as transmissões de calor por condução e por convecção requerem a presença de um meio material, a transmissão de calor por radiação pode dar-se mesmo na ausência de matéria. A transferência de energia térmica por radiação está associada à emissão de calor por um corpo em virtude da respetiva temperatura. Todos os corpos, mesmo a baixas temperaturas, emitem radiações. Segundo a hipótese de Plank, a transmissão de energia por radiação é realizada através de fotões discretos. Em alternativa, de acordo com a Teoria Clássica de Maxwell, a radiação é emitida sob a forma de ondas eletromagnéticas. Independentemente da forma como é emitida, a radiação térmica abrange o espectro das radiações eletromagnéticas compreendido entre os comprimentos de onda de 10^{-7} m e 10^{-3} m (Figura 5.48).

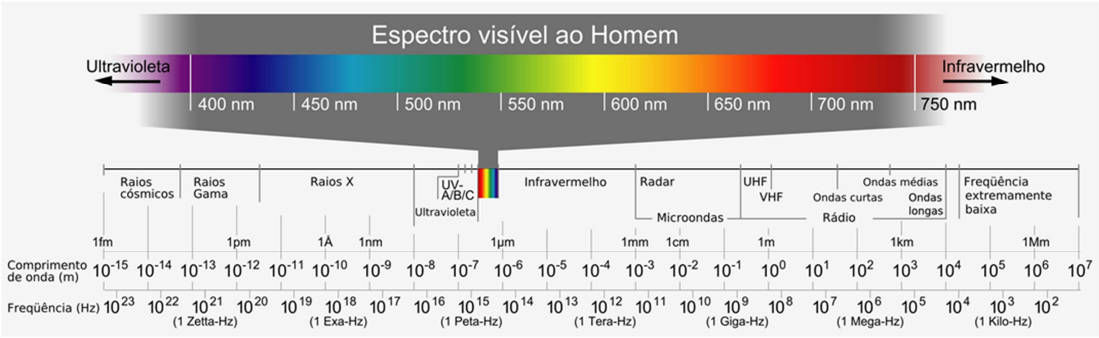


Figura 5.48 — Espectro das radiações eletromagnéticas (Botelho 2011).

As três grandezas associadas à incidência de energia radiante num corpo, nomeadamente: a absorvidade, α, a refletividade, ρ, e a transmissividade, τ, são

função do comprimento de onda da radiação incidente. O somatório das frações de energia absorvida, refletida e transmitida é igual à unidade, isto é: $\alpha + \rho + \tau = 1$.

A energia transmitida por radiação, por unidade de área da superfície, correspondente à taxa de emissão da radiação e é designada por radiância, *E*, obedecendo à chamada lei de Stefan-Boltzmann:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4 \qquad (5.\ 16)$$

em que:

ε – Emissividade (capacidade de emissão da radiação) [0 – 1];

σ – Constante de Stefan-Boltzmann ($5{,}67 \times 10^{-8}$ W/(m^{2}K^4));

T_s – Temperatura da superfície (K).

O corpo negro, corpo ideal que absorve toda a energia que nele incide, apresenta uma emissividade igual à unidade (ε = 1). Assim a radiância de um corpo negro é dada por:

$$E = \sigma T_s^4 \qquad (5.\ 17)$$

O corpo cinzento é um corpo ideal que absorve apenas uma fracção constante da energia que nele incide, sendo essa fração igual para todos os comprimentos de onda (ε < 1). Os corpos reais não são corpos negros nem cinzentos, mas comportam-se como corpos cinzentos para certas bandas de comprimento de onda. Segundo a Lei de Kirchoff, para os corpos cinzentos, ou para os que se comportam como tal, assume-se que $\varepsilon = \alpha = const.$.

A irradiação *G* é a taxa de radiação proveniente do meio circundante que incide sobre uma dada superfície, por unidade de área. O produto da absorvidade pela irradiação ($\alpha.G$) corresponde à parcela da irradiação efetivamente absorvida pela superfície. Admitindo que o meio envolvente, à temperatura T_f, é muito maior do que a superfície em análise, a irradiação do meio pode considerar-se equivalente à emissão de um corpo negro, $G = \sigma T_f^4$. Assumindo que a superfície se comporta como um corpo cinzento, absorvendo parte da energia emitida (com $\varepsilon = \alpha = const.$) então, $\alpha G = \varepsilon \sigma T_f^4$. Portanto, o balanço da transferência de calor de uma superfície (à temperatura T_s) exposta a um meio circundante (à temperatura T_f) é dado pela

diferença entre a energia térmica que é libertada por radiação pela superfície em estudo e a energia térmica ganha devida à absorção de radiação (do meio).

$$q''_{rad} = \frac{q}{S} = E - \alpha G = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_f^4) \quad (5.\ 18)$$

A Equação (5.18) representa as trocas de calor por radiação entre uma superfície e o meio circundante, podendo ser linearizada e reescrita, tornando-se análoga à utilizada no tratamento das trocas por convecção, do seguinte modo:

$$q''_{rad} = h_r(T_s - T_f) \quad (5.\ 19)$$

em que h_r é o coeficiente de transferência de calor por radiação e varia essencialmente com a geometria e com a temperatura da superfície. Este coeficiente é normalmente designado por condutância térmica superficial por radiação, dado pela seguinte expressão:

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s + T_f)(T_s^2 + T_f^2) \quad (5.\ 20)$$

A Equação (5.20) pode assumir a seguinte forma simplificada:

$$h_r = 4\varepsilon\sigma T_m^3 \quad (5.\ 21)$$

em que:

$T_m = \frac{T_s + T_f}{2}$, é a temperatura média entre a superfície e o meio circundante.

5.4.2 Modelo solar

5.4.2.1 Preâmbulo

Para além da forma de radiação apresentada anteriormente (a irradiação), há uma parcela muito importante de radiação que é normalmente tratada em separado com uma abordagem diferente: a radiação solar. A contabilização da contribuição da radiação solar para o comportamento térmico de edifícios reveste-se de especial importância, quer pelos ganhos significativos através da envolvente envidraçada, quer pela influência na temperatura superficial da envolvente opaca.

Ao atravessar a atmosfera terrestre, a radiação solar sofre perturbações pelo que é usual subdividir a radiação solar em dois tipos, a direta e a difusa. A radiação solar que atravessa a atmosfera sem ser desviada nem absorvida no respetivo percurso

corresponde à radiação direta, enquanto a radiação difusa corresponde à parte da radiação solar que é dispersa durante o respetivo percurso devido a perturbações dos componentes atmosféricos. A radiação difusa tem uma importância relativamente pequena nos dias de céu limpo, podendo no entanto representar uma importante parcela da radiação solar nos dias de céu nublado.

5.4.2.2 Radiação solar direta

A radiação solar direta que atinge as altas camadas da atmosfera apresenta um valor médio de 1376 W/m^2 (conhecido pela constante solar). Existe uma flutuação em relação a esta constante de cerca de 6,9% ao longo do ano (sendo 1412 W/m^2 em janeiro até 1321 W/m^2 em julho). Esta flutuação é devida à forma elíptica da órbita terrestre em torno do Sol, sendo por vezes desprezada na estimativa das temperaturas superficiais provocadas pela radiação solar incidente.

Contudo, para atingir uma superfície ao nível do mar, a radiação solar direta tem de atravessar a atmosfera, experimentando distúrbios mesmo em dias de céu limpo. A radiação que efetivamente atinge o nível do mar, q_m, pode ser estimada, de acordo com (Breugel e Koenders 2001), através da seguinte expressão:

$$q_m = q_0 e^{\frac{-T_l}{0{,}9+9{,}4\,sen(h)}} \qquad (5.\ 22)$$

em que:

q_0 – constante solar (W/m^2);

h – elevação solar (º);

T_l – fator de turbidez (FNU).

O fator de turbidez, T_l, descreve a espessura ótica da atmosfera devida à absorção pelo vapor de água e à absorção e distúrbios das partículas de aerossóis em relação a uma atmosfera limpa e seca, representando a opacidade da atmosfera, ou seja, a amortização da radiação solar direta. A turbidez é uma propriedade visual essencialmente subjetiva, não sendo uma grandeza física não pode ser medida diretamente recorrendo a uma única propriedade do fluido ou dos materiais nele suspensos, sendo antes avaliada pela comparação com padrões. Quanto maior for o fator de turbidez maior será a atenuação da radiação solar numa atmosfera limpa, sem nuvens. Assim, T_l descreve a transparência da atmosfera sem nuvens (se o céu fosse totalmente limpo e seco T_l apresentaria o valor de 1). Os valores correntes para

T_l estão compreendidos entre 3 e 7 e, em atmosferas com mais partículas em suspensão, como as de cidades poluídas, T_l será próximo de 6 ou 7, com um limite máximo de 10.

A elevação do sol, *h*, é definida mais adiante (*v.* subsecção 5.4.2.3). Este parâmetro representa a distância que o sol tem que percorrer na atmosfera até atingir a superfície da Terra. Ao meio-dia solar essa distância é menor do que ao nascer e ao pôr-do-sol, sendo a atenuação da radiação menor quanto menor a distância a percorrer (ou seja a amortização da radiação é menor ao meio-dia).

5.4.2.3 Parâmetros geométricos

A análise do fluxo de radiação solar direta numa superfície com determinada inclinação implica a consideração de vários parâmetros geométricos. Na Figura 5.49 encontram-se representados os parâmetros seguintes:

α – ângulo que a superfície faz com o plano horizontal (º);

$\bar{n}$ – vector perpendicular à superfície;

ψ – azimute da projeção de $\bar{n}$ no plano horizontal (º): 0º a Sul; 90º a Este; 180º a Norte e 270º a Oeste;

h – elevação solar (º), corresponde ao ângulo entre a direção dos raios solares e o horizonte;

i – ângulo de incidência dos raios solares em relação a $\bar{n}$.

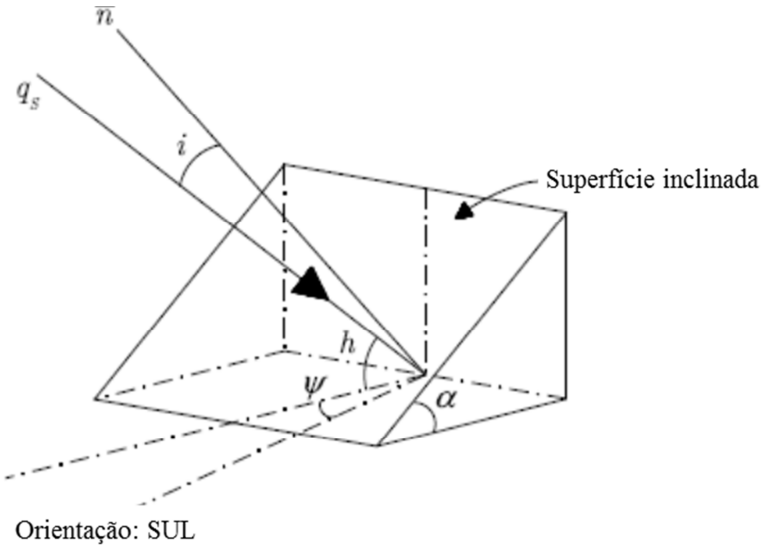


Figura 5.49 — Parâmetros geométricos considerados na análise do fluxo de radiação solar direta (Azenha 2009).

O cálculo da radiação que efetivamente incide numa superfície num determinado instante de tempo implica, para além dos parâmetros já enunciados, o conhecimento do seguinte:

δ – declinação do sol, que representa o ângulo entre os raios solares e plano do equador. O equador encontra-se a 23,44º em relação ao plano da órbita da terra à volta do sol. Assim, nos vários momentos ao longo do ano, a declinação varia entre 23,44º Norte e 23,44º Sul. Existem muitas formulações matemáticas para o cálculo deste parâmetro, tendo sido a utilizada neste trabalho a seguinte [88]:

$$sen(\delta) = 0{,}39782 sen\left[4{,}871 + \frac{\pi}{180} d + 0{,}033 sen\left(\frac{\pi}{180} d \right) \right] \qquad (5.\ 23)$$

onde, d é o número de dias após o solstício de inverno (22 de Dezembro).

Ω – O ângulo horário do sol que descreve a posição da terra face ao sol. É ao meio dia solar e varia linearmente entre -180º, para t = - 12horas, e 180º, para t = 12 horas, (sendo a rotação da terra de 360º em 24 horas, ou seja, de 15º por hora). Consequentemente, a definição de Ω é função do tempo solar t (em horas), entre -12 e 12, sendo:

$$\Omega = \frac{15^{o}}{hora} t \qquad (5.\ 24)$$

Nota: O meio-dia solar não coincide com as convencionais 12 horas. As correções deverão ser feitas em função do local (da latitude). Em Portugal, o desvio é de cerca de 30 minutos, durante o horário de inverno e de cerca de 1 hora e 30 minutos no horário de verão.

h – elevação do sol que pode ser calculada em função de δ, Ω e da latitude φ (º) do local, de acordo com a seguinte expressão:

$$sen(h) = sen(\varphi) sen(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\Omega) \qquad (5.\ 25)$$

Ψ – azimute da projeção da normal, $\bar{n}$, com o plano horizontal que pode ser calculado através da expressão:

$$sen(\Psi) = \frac{\cos(\delta) sen(\Omega)}{\cos(h)} \qquad (5.\ 26)$$

i – ângulo de incidência com a perpendicular à superfície que pode ser estimado do modo seguinte:

$$\cos(i) = \cos(\alpha) sen(h) + sen(\alpha)\cos(h)\cos(\Psi) \quad (5.\ 27)$$

5.4.2.4 Radiação absorvida pela superfície

A radiação solar absorvida por uma superfície, q_s, depende da radiação solar que atinge a superfície, q_m, do ângulo de incidência, i, da absorção α_s da superfície, que é função sobretudo da cor e que pode variar entre 0 e 1.

$$q_s = \alpha_s q_m \cos(i) \quad (5.\ 28)$$

Deve, no entanto, ser reforçado que o modelo solar apresentado não tem em consideração o sombreamento provocado por obstáculos.

5.5 Convecção e radiação

5.5.1 Transferência de calor por convecção-radiação

A semelhança entre as Equações (5.15) e (5.19) referentes às trocas de calor por convecção e às trocas de calor por radiação, respetivamente, conduz à utilização de uma única expressão capaz de traduzir os dois fenómenos em simultâneo. Assim, assumindo que $h_{eq} = h_{conv} + h_r$, representa o coeficiente equivalente de convecção-radiação, o fluxo de calor é dado por:

$$q_h'' = h_{eq}(T_s - T_f) \quad (5.\ 29)$$

em que:

q_h'' – fluxo de calor por convecção-radiação por unidade de área (W/m^2);

h_{eq} – coeficiente equivalente de convecção-radiação ($W/(m^2.K)$);

T_s – temperatura da superfície (K);

T_f – temperatura do fluido, em zona não perturbada pela superfície (K).

A utilização desta equação (Equação (5.29)) facilita a simulação numérica do problema de transferência de calor simplificando a definição de condições de fronteira.

5.5.2 Temperatura fictícia ar-sol

Os mecanismos de convecção e radiação que se verificam nos elementos opacos e/ou semitransparentes da envolvente exterior de um edifício podem ser simplificados recorrendo ao conceito de temperatura fictícia ar-sol. Abrantes (Abrantes 1984) descreve a temperatura fictícia ar-sol, $T_{ar\text{-}sol}$, como sendo a temperatura do ar exterior, que na ausência de quaisquer fluxos de calor por radiação, dará o mesmo fluxo de calor através da superfície real com a combinação da radiação solar incidente, das trocas de calor por radiação com a abóbada celeste e outras envolventes exteriores, e das trocas de calor por convecção com o ar exterior.

A dedução da expressão mais conhecida para a temperatura fictícia ar-sol pode ser consultada na referência (Abrantes 1984). Essa expressão traduz-se, de acordo com o referido na subsecção 4.3.2, na Equação (4.1).

5.6 Resolução do problema térmico

5.6.1 Métodos de resolução do problema térmico

A resolução de problemas de transferência de calor pode ser realizada a 1, 2 ou 3 dimensões, correspondendo a uma maior ou menor simplificação da equação que descreve o fenómeno. Existem três métodos distintos para a resolução do problema: métodos analíticos; métodos analógicos e métodos numéricos (*v.* Tabela 5.15). O método selecionado para a resolução do problema térmico de transferência de calor foi o método dos elementos finitos. Um método de resolução rápida de problemas complexos, bastante vulgarizado, em especial no domínio da geotecnia e estruturas.

Tabela 5.15 — Métodos de resolução do problema térmico de transferência de calor.

Método	Designação	Observações
Métodos analíticos	Método de Fourier (desenvolvimento em série) Transformada de Laplace	Resolução complexa.
Métodos analógicos	Modelo elétrico Modelo hidráulico	Menos utilizados após a vulgarização de programas de resolução numérica.
Métodos numéricos	Fatores de resposta Diferenças finitas Elementos finitos	Resolução rápida de problemas complexos.

5.6.2 Método dos Elementos Finitos

Na determinação do campo de temperatura gerado no interior de um compartimento submetido a amplitudes térmicas diárias exteriores e face à dificuldade (ou mesmo impossibilidade) de se obterem soluções analíticas para as equações diferenciais descritivas do fenómeno na generalidade das aplicações práticas, recorre-se a ferramentas numéricas. A eleição do **M**étodo dos **E**lementos **F**initos (MEF) como metodologia numérica para resolução do problema térmico associado à transferência de calor em materiais de construção correntes e materiais de mudança de fase faz sentido, uma vez que se trata de uma técnica bem conhecida, vulgarizada e dominada. No entanto, esta abordagem ainda se encontra muito pouco aplicada ao domínio da física das construções.

A forma geral da equação de Fourier, descrita na subsecção 5.2.2, a partir da qual se pode obter a distribuição de temperaturas *T (x, y, z, t)*, é usualmente escrita na forma seguinte (Equação (5.11)):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \dot{Q}$$

As condições fronteira referem-se ao fluxo de calor equivalente (por convecção-radiação), dado pela Equação (5.29), na direção normal à fronteira correspondente, designada por Γ_q (em que T_f representa a temperatura exterior do fluido, neste caso, do ar); as condições de Dirichlet dizem respeito à passagem da temperatura T ao longo da fronteira Γ_T [4].

$$-\left[\lambda\frac{\partial T}{\partial x}l + \lambda\frac{\partial T}{\partial y}m + \lambda\frac{\partial T}{\partial z}n\right] = h_{eq}\left(T_s - T_f\right) = q_h^{"} \qquad (5.30)$$

onde *l*, *m* e *n* são as coordenadas do vetor normal a Γ_T.

A discretização do campo de temperaturas através do MEF tem início com a definição da aproximação:

$$T = N\,T^e \qquad (5.31)$$

em que *N* representa a matriz de interpolação e T^e designa as temperaturas nodais de um **E**lemento **F**inito (EF) envolvendo um domínio com o volume Ω_e, podendo ser expressa na forma de integral:

$$\int_\Omega N^T\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{Q}-\rho c\dot{T}\right]d\Omega+$$
$$+\int_{T_q} N^T\left[q_h-h_{eq}\left(T_s-T_f\right)\right]dT_q=0 \qquad (5.\ 32)$$

Integrando os três primeiros termos da Equação (5.32), obtém-se:

$$-\int_\Omega\left[\frac{\partial N^T}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial N^T}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial N^T}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)-N^T\dot{Q}+N^T\rho c\dot{T}\right]d\Omega-$$
$$-\int_{\Gamma_q} N^T q_h d\Gamma_q+\int_{\Gamma_q} N^T\left[q_h-h_{eq}(T_s-T_f)\right]d\Gamma_q=0 \qquad (5.\ 33)$$

Após alguma manipulação matemática, a forma das equações de equilíbrio térmico correspondentes à Equação (5.11) assume, de acordo com (Cervera et al. 2002; Real 1993), a forma:

$$\int_\Omega N^T\rho c\dot{T}d\Omega+\int_\Omega \nabla N^T\lambda\nabla\dot{T}d\Omega=\int_\Omega N^T\dot{Q}d\Omega+$$
$$+\int_{\Gamma_q} N^T h_{eq}(T_s-T_f)d\Gamma_q \qquad (5.\ 34)$$

Implementando um esquema de integração, no qual seja considerada uma sequência de instantes separados por intervalos Δt, e assumindo uma aproximação de Euler incondicionalmente estável, a derivada $\dot{T}_{n+1}$ num instante $t_{n+1}=t_n+\Delta t$ pode definir-se como:

$$\dot{T}_{n+1}=\frac{T_{n+1}-T_n}{\Delta t} \qquad (5.\ 35)$$

Assim, a Equação (5.34), escrita no instante t_{n+1}, dá lugar à relação seguinte:

$$\frac{1}{\Delta t}[\int_\Omega N^T\rho cNd\Omega](T^e_{n+1}-T^e_n)+[\int_\Omega N^T\lambda\nabla Nd\Omega+\int_{\Gamma_q} N^T h_{eq}Nd\Gamma_q]T^e_{n+1}=$$
$$=\int_\Omega N^T\dot{Q}d\Omega+\int_{\Gamma_q} N^T h_{eq}T_f d\Gamma_q \qquad (5.\ 36)$$

Que pode ainda ser transformada na seguinte forma, adequada à implementação computacional:

$$\frac{1}{\Delta t}C^e_{n+1}\left(T^e_{n+1}-T^e_n\right)+G^e_{n+1}T^e_{n+1}=F^e_{T,n+1}+F^e_{Q,n+1} \qquad (5.\ 37)$$

em que,

$$C^e=\int_{\Omega^e} N^T\rho cNd\Omega \qquad (5.\ 38)$$

$$G^e = \int_{\Omega^e} \nabla N^T \lambda \nabla N d\Omega + \int_{\Gamma_q^e} N^T h_{eq} N d\Gamma_q \quad (5.\ 39)$$

$$F_T^e = \int_{\Gamma_q^e} N^T h_{eq} T_f \, d\Gamma_q \quad (5.\ 40)$$

$$F_Q^e = \int_{\Omega^e} N^T \dot{Q} d\Omega \quad (5.\ 41)$$

Recorrendo aos procedimentos usuais de agrupamento das contribuições dos diversos EF, obtêm-se as matrizes estruturais C e G e os vetores F_T e F_Q necessários à resolução pelo MEF do problema térmico, isto é:

$$\left(\frac{C_{n+1}}{\Delta t} + G_{n+1} \right) T_{n+1} = F_{T,n+1} + F_{Q,n+1} + \frac{C_{n+1}}{\Delta t} T_n \quad (5.\ 42)$$

sabendo que:

$$\hat{K}_{n+1} = \frac{C_{n+1}}{\Delta t} + G_{n+1} \quad (5.\ 43)$$

$$\hat{F}_{n+1} = F_{T,n+1} + F_{Q,n+1} + \frac{C_{n+1}}{\Delta t} T_n \quad (5.\ 44)$$

a Equação (5.42) pode assumir a forma simplificada:

$$\hat{K}_{n+1} T_{n+1} = \hat{F}_{n+1} \quad (5.\ 45)$$

5.7 Comentários síntese

A descrição dos conceitos associados ao problema térmico de transferência de calor considerados no modelo teórico, em que se baseia o programa de cálculo utilizado na simulação numérica desenvolvida neste estudo foi abordada no presente capítulo. Alguns aspetos relacionados com a implementação do programa foram também discutidos.

O modelo teórico utilizado apresenta como limitação mais relevante a consideração do fenómeno de transferência de calor apenas por condução, desprezando o movimento do ar no interior dos espaços, impossibilitando a observação dos fenómenos de convecção associados. Para além disso, a utilização do programa pressupõe o conhecimento aprofundado da respetiva estrutura e uma constante manipulação dos módulos que o constituem, tornando a sua aplicação pouco amigável quando comparada com outros programas comerciais.

No entanto, a implementação do modelo apresenta vários aspetos positivos, nomeadamente: a simplicidade de modelação, a aptidão ao estudo de materiais com características distintas, a facilidade de alteração de condições de exposição e definição de condições de fronteira, e o modo de apresentação de resultados (valores, gráficos e mapas cromáticos). Estas características foram motivadoras para a utilização do programa numérico selecionado.

A intenção do trabalho desenvolvido foi avaliar o comportamento diferenciado entre espaços interiores com e sem PCM, considerando flutuações livres das temperaturas interiores, numa análise em regime transiente de calor em elementos construtivos contendo PCM, com recurso ao método da entalpia. O que inviabiliza o recurso às ferramentas mais vulgarmente utilizadas na vida profissional (por projetitas) na avaliação do comportamento térmico de espaços interiores. De facto, ferramentas numéricas muito abrangentes como o EnergyPlus (US department of Energy 2010), ao terem em conta inúmeros aspetos relacionados com o conforto térmico: sistemas de climatização, equipamentos, iluminação, a ocupação dos espaços, entre outros; acabam por apresentar valores medianizados, interferindo na análise comparativa entre espaços interiores com e sem PCM.

Capítulo 6 Resolução Numérica

6.1 Introdução

Preconiza-se, para este capítulo, a resolução numérica do problema matemático de transferência de calor descrito no Capítulo 5 deste trabalho, efetuando análises térmicas sobre as células de teste utilizadas durante a campanha de ensaios experimentais, descrita no Capítulo 4. As análises térmicas desenvolvidas são comparadas com os resultados obtidos na monitorização experimental com o objetivo de validar o modelo numérico utilizado na resolução do problema matemático de transferência de calor. As referidas análises incidirão sobre:

— A resolução numérica do problema térmico associado à transferência de calor nas células de teste SPCM e CPCM quando submetidas às condições de exposição descritas na subsecção 4.3.2, comparação com a monitorização experimental realizada em laboratório;

— A resolução numérica do problema térmico associado à transferência de calor nas células de teste SPCM e CPCM quando submetidas às condições de exposição descritas na subsecção 4.4.2 e comparação com a monitorização experimental realizada *in situ*;

— A análise comparativa entre as células de teste SPCM e CPCM em termos da evolução do campo de temperaturas ao longo de um ciclo de 24 h (1 dia), com especial incidência sobre os momentos em que ocorre a mudança de fase (na célula de teste CPCM).

Nas análises mencionadas, foi utilizado o método dos elementos finitos (MEF) como suporte à modelação térmica, considerando uma análise tridimensional (3D) do problema de transferência de calor.

6.2 Formulação e condições de fronteira

A equação geral da condução de calor (descrita em 5.2.2) foi utilizada no tratamento numérico dos materiais correntes utilizados na construção das células de teste: poliestireno extrudido (XPS), argamassa reforçada e argamassa de referência (REF). Com o intuito de simplificar o modelo numérico, considerou-se o seguinte:

— Os materiais considerados são homogéneos e isotrópicos;

— As propriedades térmicas dos materiais não variam com a temperatura;

— Não existem fontes de calor no interior das células de teste ou geração interna de calor nos materiais utilizados;

— Não se verificam condensações nem infiltrações de humidade.

A camada interna de ar foi simulada recorrendo apenas à equação geral de condução de calor, ignorando fenómenos de convecção e de movimento do ar no interior das células de teste. Esta simplificação é aceitável, tendo em consideração os resultados da monitorização realizada ao longo da campanha experimental, em que se registou uma distribuição uniforme das temperaturas ao longo dos vários pontos do interior das células, podendo esta homogeneidade ser atribuída à reduzida circulação de ar sentida no interior das células celadas (*v.* subsecção 4.3.3).

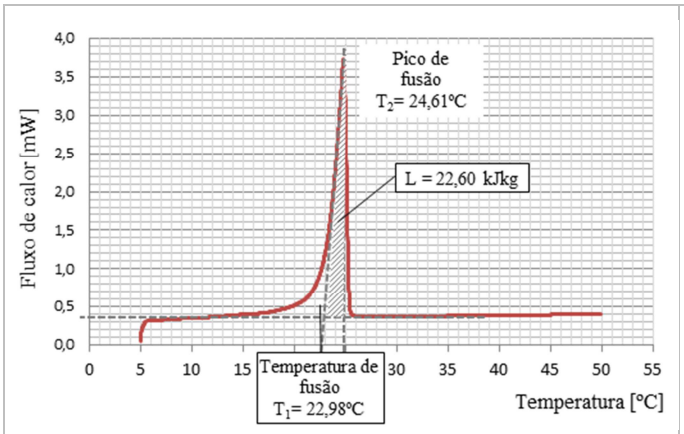
Assim, adotou-se a equação geral de transferência de calor, descrita na subsecção 5.2.2, escrita em função do tempo *t* e das coordenadas espaciais *x*, *y* e *z* (Equação (5.12)):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

A argamassa com PCM foi considerada, à semelhança dos restantes materiais, homogénea e isotrópica, tendo-se ignorado os fenómenos de convecção associados à transição entre o estado sólido e o estado líquido. Ao tratamento numérico desta camada, argamassa com PCM, aplicou-se o método da entalpia descrito na subsecção 5.2.3. Assim, considerou-se que o calor específico, constante nos estados líquido e sólido, é dependente da temperatura na mudança de fase, tendo-se utilizado a equação geral de transferência de calor substituindo a parcela $c(\partial T / \partial t)$ da Equação (5.12) por $\partial H(T) / \partial t$, em que *H* representa a entalpia de fusão, tem-se (Equação (5.13)):

$$\rho \frac{\partial H(T)}{\partial t} = \lambda(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2})$$

A aproximação da curva DSC (***D**ifferential **S**canning **C**alorimeter*) ao gráfico linear representado na Figura 6.50, que traduz a evolução da entalpia, *H*, em função das temperaturas, *T*, facilita a leitura das características térmicas (entalpia e temperatura de fusão) da argamassa com PCM, aplicadas às Equações (5.13) e (5.14).



Curva DSC: argamassa com PCM (formulação L).

Relação entre entalpia (*H*) e temperatura (*T*).

Figura 6.50 — Aproximação da curva DSC à relação linear entre entalpia (*H*) e temperatura (*T*), da argamassa com PCM (formulação L).

O método da entalpia, descrito por Shamsunder (Shamsundar e Sparrow 1975) e por Ozisik (Ozisik 1993), foi utilizado na modelação do problema de transferência de calor com um PCM, tendo sido resolvido numericamente por analogia a circuitos de resistências elétricas (Heim 2005) e através do método das diferenças finitas (Zhang et al. 2008; Xiao, Wang, e Zhang 2009). No presente trabalho, o método dos elementos finitos (MEF) é utilizado na resolução do problema matemático exposto, numa análise tridimensional (3D) do problema de transferência de calor.

As condições-fronteira aplicadas ao modelo térmico foram tidas em conta através da aplicação da Equação (5.29):

$$q''_h = h_{eq}(T_s - T_f)$$

que representa a transferência de calor por convecção-radiação e onde T_f é a temperatura exterior ; T_s é a temperatura da superfície exterior e h_{eq} representa o coeficiente equivalente de convecção-radiação.

O efeito da radiação solar sobre as várias faces das células foi estimado através de dois processos distintos: *(i)* igualando a temperatura ambiente à temperatura fictícia ar-sol (à semelhança do que foi imposto à câmara climática no decorrer dos ensaios experimentais) ou *(ii)* considerando as condições reais de exposição: temperatura do ar e radiação solar incidente em cada face, com o recurso ao modelo de radiação solar descrito na subsecção 5.4.2, aproximando a simulação numérica ao monitorizado nos ensaios *in situ*.

A formulação descrita anteriormente foi implementada no programa DIANA (TNO DIANA BV 2010). No modelo térmico 3D, em todas as camadas constituintes das células de teste, nomeadamente o isolamento térmico (XPS), a argamassa reforçada, a argamassa de revestimento (com e sem PCM) e a camada de ar interior, foram utilizados **E**lementos **F**initos (EF) quadriláteros de oito nós com 2 × 2 × 2 pontos de integração (nos nós). Para as fronteiras convectivas foram adotados elementos quadriláteros de quatro nós com 2 × 2 pontos de integração.

6.3 Propriedades térmicas utilizadas na modelação

As propriedades térmicas das camadas constituintes das células de teste SPCM e CPCM, consideradas durante a simulação numérica, foram sintetizadas na Tabela 6.16.

Tabela 6.16 — Propriedades das camadas das células de teste (SPCM e CPCM), consideradas na modelação numérica do problema térmico.

Camada	Massa volúmica ρ [kg/m^3]	Calor específico c_p [kJ/(kg·K)]	Calor esp. volumétrico C [kJ/(m^3·K)]	Cond. térmica λ [W/(m·K)]	Entalpia de fusão $H(T)$ [kJ/kg]
Ar [a)]	1,23	1,00	1,23	0,025	-
Revestimento interior (REF) [a)]	1,40×10^3	1,00	1,40 ×10^3	0,61	-
Revestimento interior (c\ PCM) [b)]	1,17 ×10^3	1,00	1,17 ×10^3	0,30	$\frac{T-T_1}{T_2-T_1}L$
Argamassa reforçada (paredes) [a)]	1,50 ×10^3	1,00	1,50 ×10^3	1,00	-
XPS (isolamento exterior) [a)]	55	1,40	40,00	0,04	-

NOTAS: [a)] Considerou-se que as propriedades dos materiais não variam com a temperatura.

[b)] Adotaram-se iguais valores para as propriedades do material nas fases sólida e liquida.

6.4 Geometria e parâmetros utilizados na modelação

6.4.1 Modelação dos ensaios laboratoriais e *in situ*: recurso à temperatura fictícia ar-sol

A modelação numérica das células de teste com 0,40 × 0,40 × 0,40 m^3 passou pela utilização da discretização 3D, com aproveitamento de três planos de simetria, válido se se considerar que a tampa das células não representa uma descontinuidade. Assim, a modelação recorreu apenas a um-oitavo das células (com 0,20 × 0,20 × 0,20 m^3), de acordo com o esquema representado na Figura 6.51. Cada elemento finito representado tem um volume de 2,35 cm^3, num total de 12100 nós e 12167 elementos, o que se traduz numa malha bastante estreita nas proximidades da camada com PCM, onde a comparação entre os resultados numéricos e experimentais irá incidir.

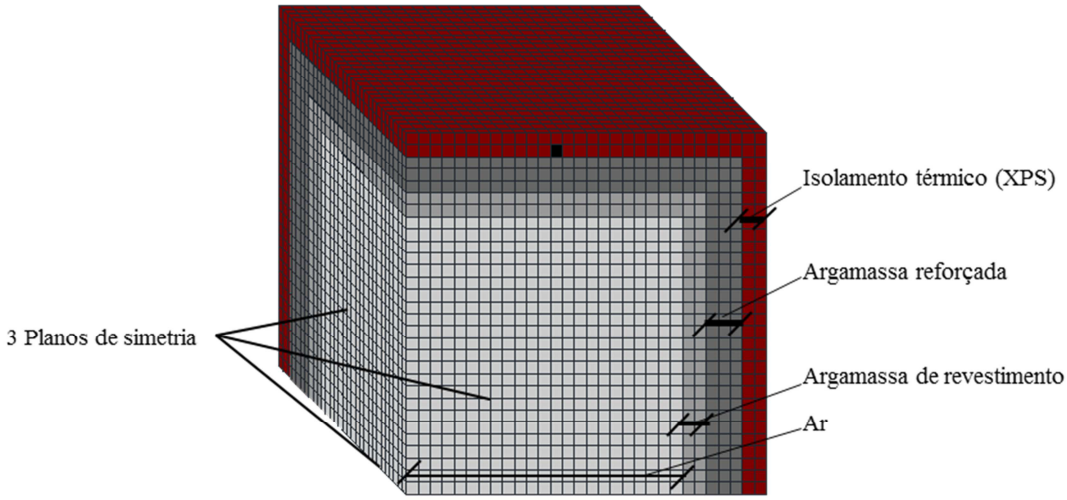


Figura 6.51 — Representação do modelo de 1/8 da célula de teste, utilizado na modelação numérica.

Nos ensaios realizados em laboratório foi considerado para o coeficiente de convecção um valor de h_{eq} = 5 W/(m.K), tendo em atenção a reduzida velocidade do ar (Azenha 2009) verificada nas proximidades das células de teste colocadas no interior da câmara climática com um ambiente controlado (*v.* subsecção 5.5.1). Nos planos de simetria, foram consideradas fronteiras adiabáticas (sem trocas de calor). A temperatura inicial no interior das células foi fixada em 15 ºC e 25 ºC, para os dias

que simulam as condições climáticas do dia 7 de Abril no Porto e em Faro, respetivamente, tendo em consideração a temperatura do interior das células aquando do início dos ensaios laboratoriais. As análises térmicas foram realizadas abrangendo um período de 48 horas (2 dias), dividido em incrementos de 10 minutos, conforme a monitorização experimental. A evolução programada das temperaturas é equivalente à imposta para o interior da câmara climática, tendo sido estimada para duas condições climáticas distintas, ambas da estação de arrefecimento, de acordo com o referido anteriormente (*v.* subsecção 4.3.2) e representada nas Figuras 6.52 e 6.53. Assim, os ciclos diários de temperatura foram simulados de modo a igualar a temperatura fictícia ar-sol. Os valores da temperatura exterior, T_{ar}, e da radiação solar total incidente, I_g, resultam de um valor de referência estimado com base nos dados dos registos efetuados entre os anos de 1961 e 1990 (US Department of Energy 2012), para um dia ameno, de céu limpo, da estação de arrefecimento: num dos cenários considerou-se um dia no Porto (zona climática de verão V_1), representado na Figura 6.52, e no outro cenário um dia em Faro (zona climática de verão V_2), representado na Figura 6.53. O coeficiente de absorção solar, α, foi considerado com um valor elevado de 0,6, de modo a que, conjugado com uma radiação solar intensa, provocasse uma amplitude térmica diária elevada e, deste modo, fosse mais evidente o efeito do PCM. A resistência térmica superficial exterior de R_{se} = 0,04 (m^2·K)/W foi considerada de acordo com a informação técnica ITE50 (Santos e Matias 2007). Como resultado da aplicação da equação para o cálculo da temperatura fictícia ar-sol, um ciclo de 24 horas, com temperaturas máximas de 37 ºC e mínimas de 9 ºC, no Porto (*v.* Figura 6.52) e temperaturas máximas de 40 ºC e mínimas de 14 ºC, em Faro (*v.* Figura 6.53), foi simulado.

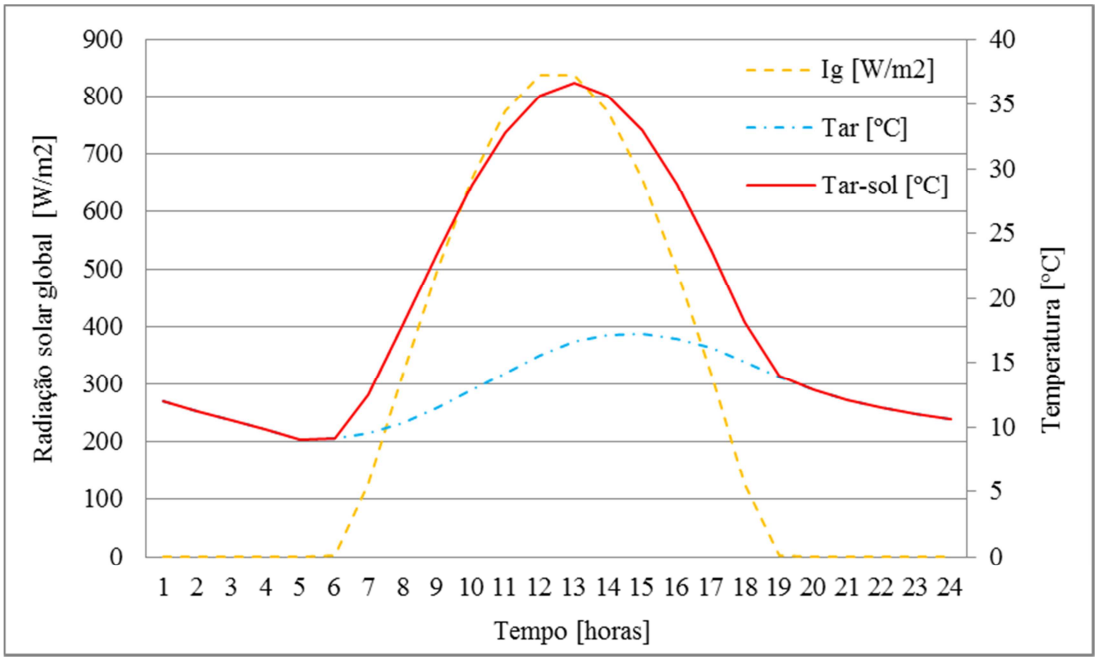


Figura 6.52 — Condições climáticas simuladas numericamente: temperatura fictícia ar-sol de um dia da estação de arrefecimento (dia 7 de Abril), no Porto.

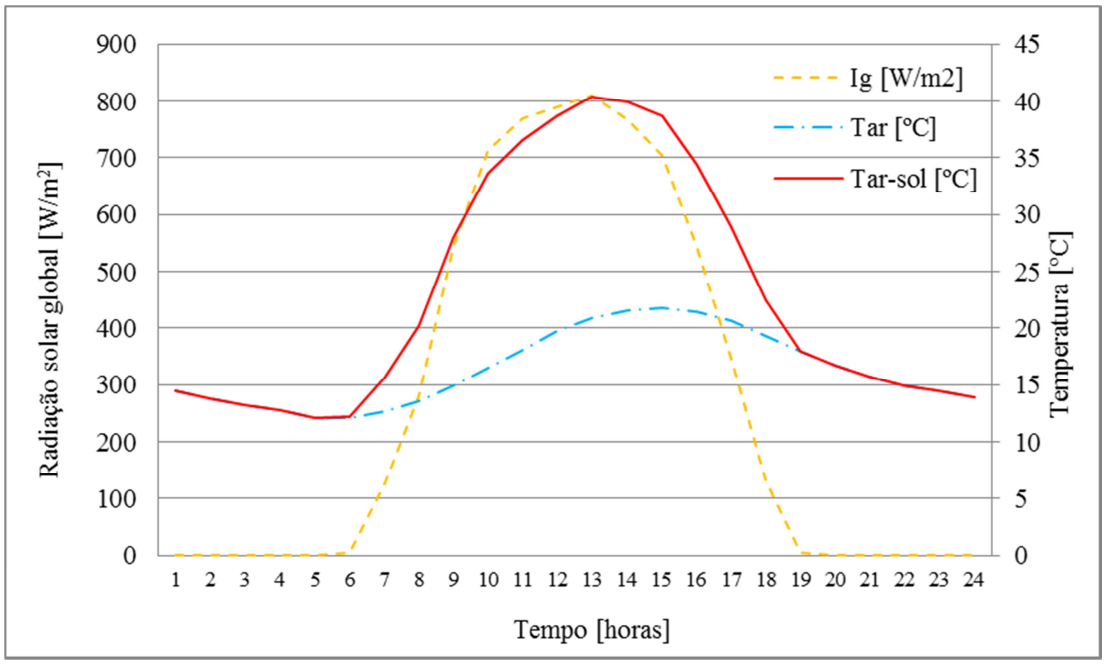


Figura 6.53 — Condições climáticas simuladas numericamente: temperatura fictícia ar-sol de um dia da estação de arrefecimento (dia 7 de Abril), em Faro.

Na simulação numérica dos ensaios *in situ* (descritos na secção 4.4) considerou-se um valor de h_{eq} =15 W/(m·K) para o coeficiente de convecção (v. subsecção 5.5.1),

tendo em conta as condições de exposição: zona limitada pela presença de vários edifícios e reduzida velocidade do vento sentida durante o período em que se realizou a campanha experimental (Figura 4.41, subsecção 4.4.2). A temperatura inicial no interior das células foi fixada em 25 ºC, à semelhança da temperatura registada no interior das células aquando do começo da monitorização *in situ*. As análises térmicas foram realizadas abrangendo um período correspondente aos dias monitorizados durante a campanha experimental, aproximadamente 4 dias, dividido em incrementos de 10 minutos. A evolução das temperaturas e da radiação solar programadas é equivalente às condições reais de exposição (temperaturas do ar e radiação solar global incidente) registadas durante a campanha experimental (*v.* Figura 4.40, subsecção 4.4.2) e representadas neste caso pela temperatura fictícia ar-sol. A evolução da temperatura em função do tempo, *T(t)*, representada na Figura 6.54, traduz a aplicação da equação associada à temperatura fictícia ar-sol, tendo-se considerado para a temperatura do ar, T_{ar}, e para a radiação global, I_g, valores equivalentes aos registados pela estação meteorológica do LFC (Figura 6.54). Consideraram-se dois valores distintos para o valor do coeficiente de absorção solar, α_s, nomeadamente 0,15 e 0,25, tendo em atenção os limites inferior e superior da superfície de revestimento exterior de cor branca (Sousa, Freitas, e Silva 2003).

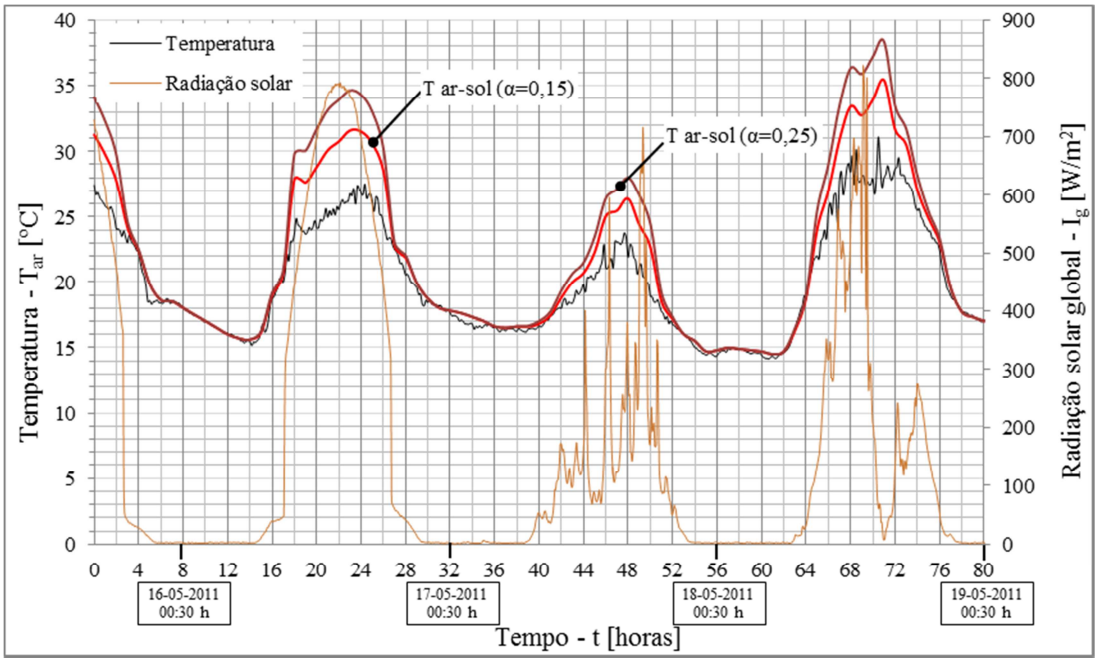


Figura 6.54 — Condições climáticas simuladas numericamente – Temperatura fictícia ar-sol: dias 15 a 19 de maio de 2011, no Porto.

6.4.2 Modelação dos ensaios *in situ*: recurso ao modelo solar

A simulação numérica de um-oitavo da célula de teste, onde cada face exterior (não adiabática) é simulada com a mesma radiação solar incidente, equivalente à temperatura fictícia ar-sol estimada, não traduz as condições reais de exposição dos ensaios realizados *in situ*. Nestes ensaios, cada face da célula, consoante a sua orientação solar e inclinação face ao plano horizontal, é afetada por uma radiação distinta.

Assim, ao considerar-se a radiação solar que incide em cada face das células de teste deixam de ser válidos os planos de simetria considerados na modelação simplificada descrita anteriormente, sendo necessário simular a célula de teste completa, com cada face exposta a condições-fronteira (temperatura ambiente e radiação solar) distintas.

Na modelação da célula de teste completa, na sua verdadeira grandeza, consideraram-se as seguintes dimensões exteriores: 0,40 × 0,40 × 0,40 m^3. Considerou-se, de acordo com o referido anteriormente, um coeficiente de convecção de h_{eq} = 15 W/(m.K). A temperatura inicial no interior das células foi fixada em 25 ºC e as análises térmicas foram realizadas abrangendo o período correspondente aos 4 dias consecutivos monitorizados durante a campanha experimental.

A evolução das temperaturas no tempo simulada corresponde às temperaturas monitorizadas durante a campanha experimental pela estação meteorológica do LFC. A radiação solar utilizada na simulação numérica teve em consideração os valores obtidos através do modelo descrito na subsecção 5.4.2. Através deste modelo, estimaram-se os valores da radiação solar incidente numa superfície horizontal (de α_s = 1) entre os dias 15 e 19 de maio de 2011. A aproximação dos valores simulados aos valores monitorizados foi conseguida por ajuste do valor da turbidez (descrito na subsecção 5.4.2.2), através de um processo iterativo (de tentativa e erro). A turbidez obtida, que melhor aproximou os valores da radiação simulados aos monitorizados pelo piranómetro da estação meteorológica, em dias de céu limpo (15 e 16 de maio de 2011), foi de T_l = 4,5. Os restantes parâmetros considerados foram de α = 0º (superfície horizontal) e *latitude* = 41,178º, sendo o valor de ψ irrelevante para superfícies horizontais. O registo dos valores simulados e dos valores medidos pelo piranómetro da estação meteorológica para a radiação solar incidente numa superfície horizontal (com coeficiente de absorção α_s = 1) são os representados no gráfico da Figura 6.55. Note-se que existe um desfasamento em relação ao meio-dia solar que,

para o local e os dias do ano em análise, corresponde a 1 hora e 34 minutos (Heavens-Above 2012), desfasamento corrigido no gráfico da Figura 6.55.

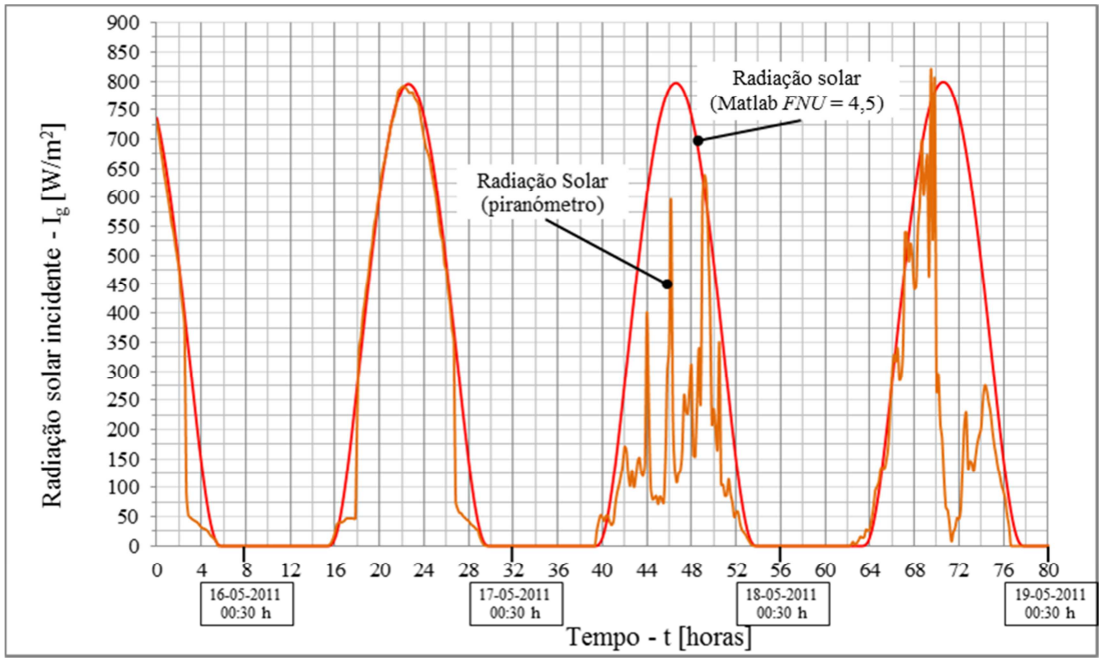


Figura 6.55 — Radiação solar monitorizada pelo piranómetro e radiação estimada pelo modelo solar para T_l = 4,5, nos dias 15 a 19 de maio de 2011.

Nos dias 15 e 16 de Maio, dias de céu limpo, os valores simulados são praticamente coincidentes com os valores monitorizados pelo piranómetro, acompanhando a curva de radiação resultantes dos dados monitorizados, quer em termos de intensidades de radiação quer em termos de amplitude. Nos restantes dias, dias 17 e 18 de Maio, os desvios entre os valores simulados e os valores medidos são justificados por sombreamentos intermitentes, provocados pela passagem de nuvens.

Tendo em conta a proximidade entre os valores simulados e os monitorizados para a radiação solar incidente de uma superfície horizontal, estimou-se a radiação absorvida por cada uma das 5 superfícies expostas das células de teste. Um valor de α_s = 0,25 foi considerado como coeficiente de absorção solar do revestimento exterior da célula, nomeadamente XPS, de cor branca (Sousa, Freitas, e Silva 2003). Na simulação das 4 superfícies verticais considerou-se um valor de α = 90º com valores de ψ distintos consoante a orientação solar de cada face: Ψ_{Norte} = 180º; Ψ_{Sul} = 0º; Ψ_{Este} = 90º e Ψ_{Oeste} = 270º. Esta simulação conduziu aos resultados representados no gráfico da Figura 6.56.

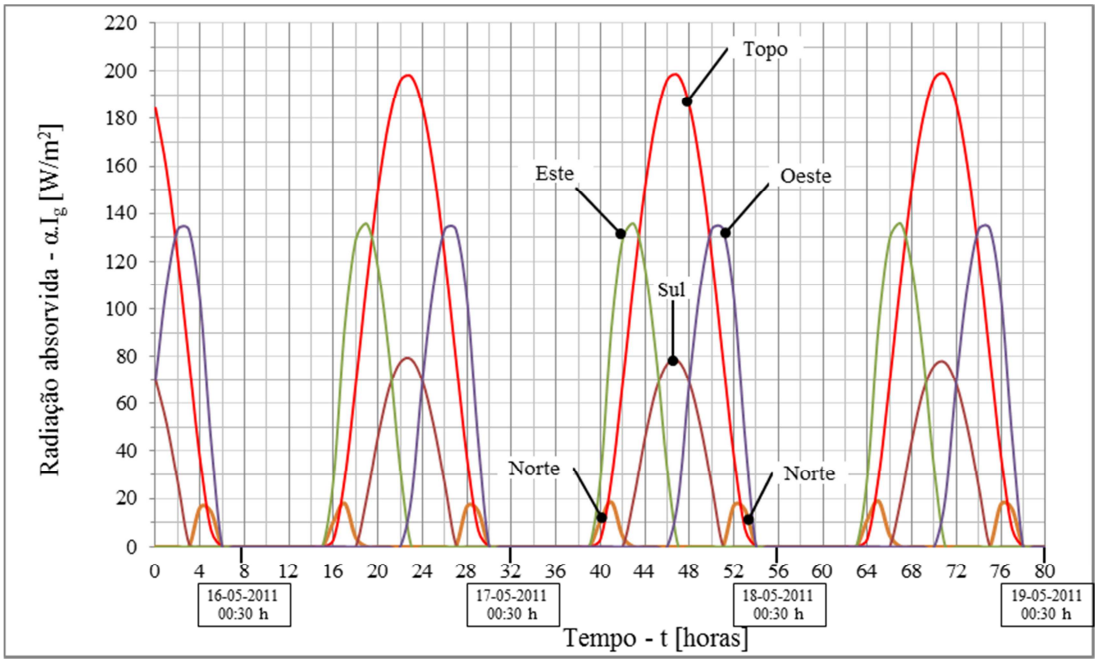


Figura 6.56 — Radiação absorvida por uma superfície de cor branca (α_s = 0,25) estimada pelo modelo solar para T_l = 4,5: dias 15 a 19 de maio de 2011.

Tendo em atenção a influência da radiação solar incidente sobre as temperaturas registadas nos vários pontos do interior das células de teste, sentiu-se necessidade de aproximar os valores da radiação monitorizados nos dias 17 e 18 (dias nublados) aos valores simulados. Encontrou-se a relação entre os valores monitorizados e os valores calculados pelo modelo para uma superfície horizontal (com α = 1), ou seja, a relação entre os valores representados no gráfico da Figura 6.55. Assim, a radiação solar calculada pelo modelo e posteriormente corrigida (afetada pelo parâmetro que relaciona a radiação monitorizada com a radiação calculada para dias de céu limpo), foi estimada, tendo-se representado os valores obtidos nos gráficos das Figuras 6.57 e 6.58.

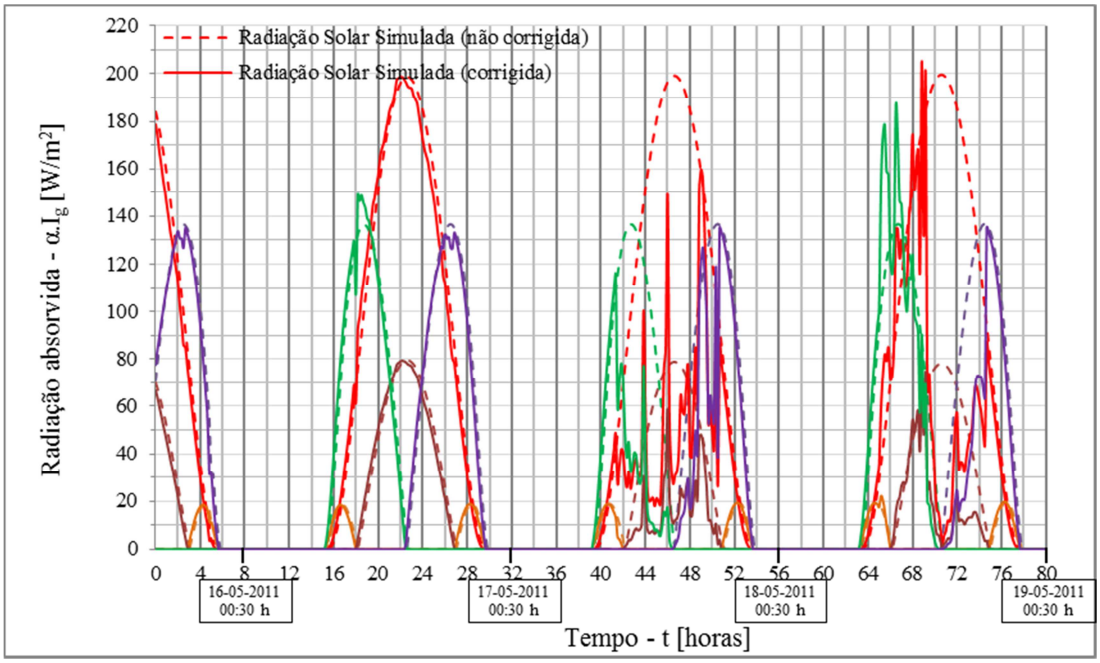


Figura 6.57 — Radiação absorvida por uma superfície de cor branca (α_s = 0,25) estimada pelo modelo solar para T_l = 4,5 e corrigida para a nebulosidade observada: dias 15 a 19 de maio de 2011.

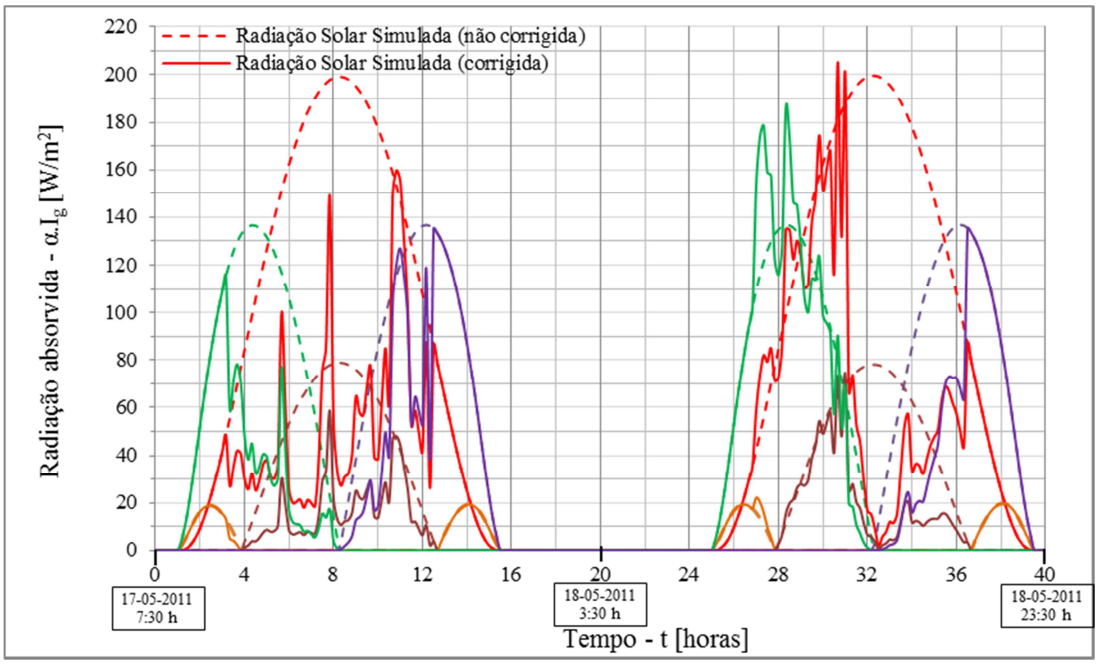


Figura 6.58 — Radiação absorvida por uma superfície de cor branca (α_s = 0,25) estimada pelo modelo solar para T_l = 4,5 e corrigida para a nebulosidade observada: dias 17 e 18 de maio de 2011.

Durante a simulação numérica, estudaram-se as duas situações descritas, considerando para os quatro dias em análise, quer os resultados dados pelo modelo da radiação solar, quer os resultados afetados da correção.

6.5 Resultados numéricos e comparação com a monitorização experimental

6.5.1 Resultados numéricos *vs.* campanha experimental em laboratório

A comparação entre os valores obtidos por via experimental, em laboratório, e por simulação numérica do interior das células de teste SPCM e CPCM encontra-se representada na Figura 6.59 para as condições climáticas do Porto (zona climática de verão V_1) e na Figura 6.60 para Faro (zona climática de verão V_2). A observação destas figuras permite aferir que os valores calculados numericamente, para evolução das temperaturas no tempo *T(t)*, são praticamente coincidentes com os valores monitorizados experimentalmente pelos termopares.

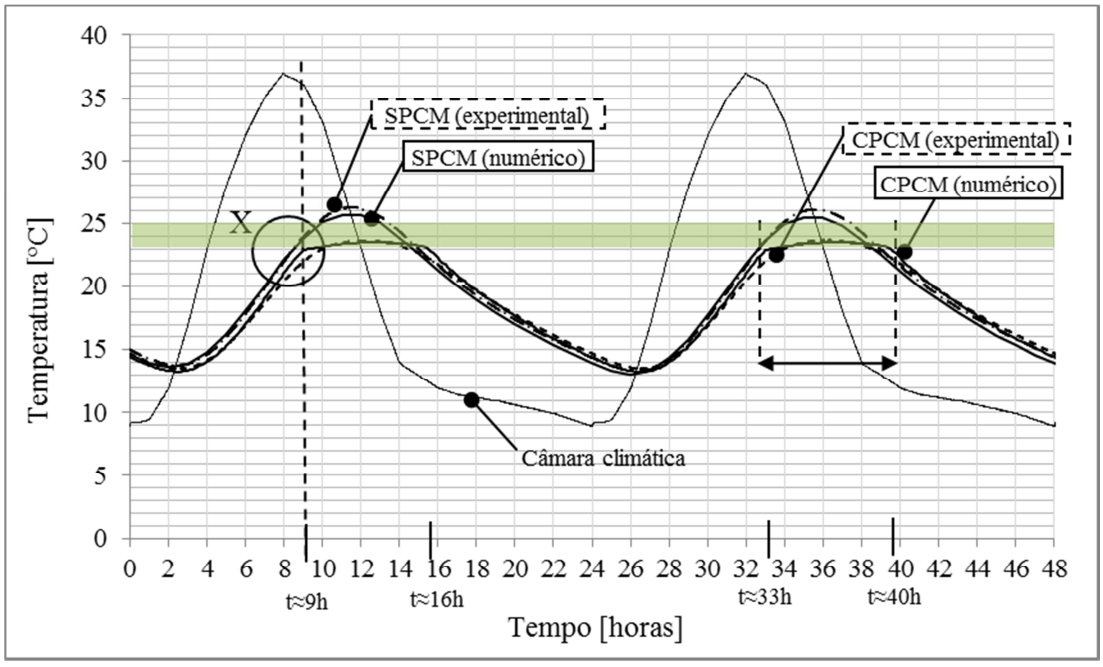


Figura 6.59 — Monitorização em laboratório e simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM, dia 7 de Abril (Porto).

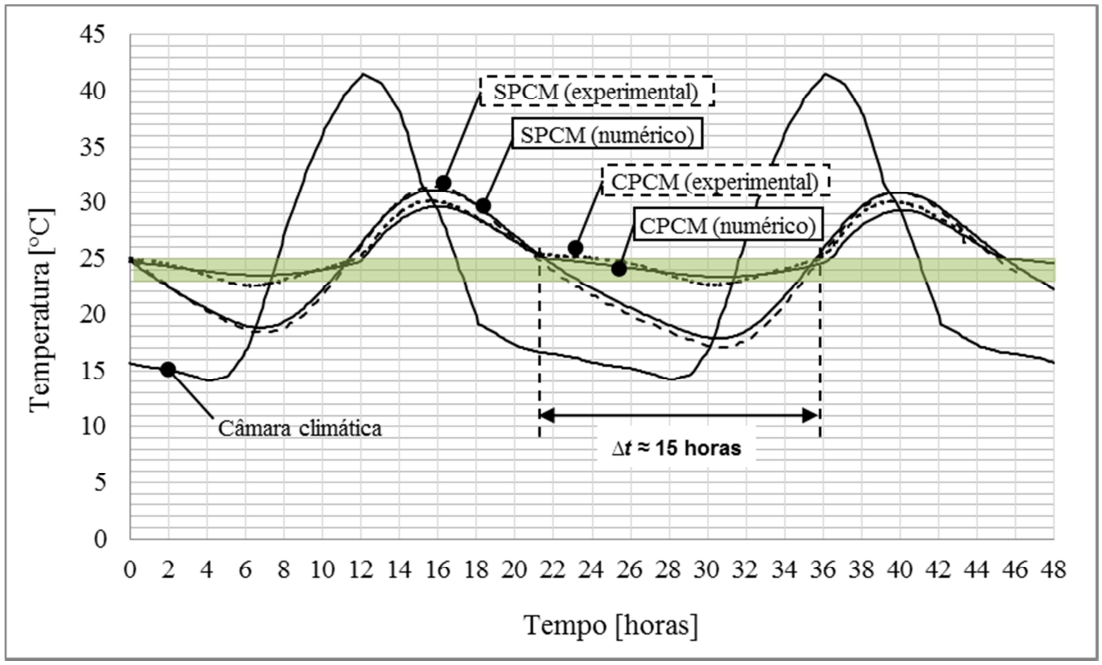


Figura 6.60 — Monitorização em laboratório e simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM, dia 7 de Abril (Faro).

No entanto, no dia 7 de Abril no Porto, na célula CPCM, nos instantes: $t \approx 9$ h, $t \approx 16$ h, $t \approx 33$ h e $t \approx 40$ h, correspondentes ao início e ao fim da mudança de fase, pode observar-se uma ligeira diferença entre os valores numéricos e experimentais (ver o ponto assinalado por 'X' na Figura 6.59). Nesses pontos, os resultados obtidos numericamente traduzem uma evolução de temperaturas no tempo mais brusca quando comparados com os resultados obtidos experimentalmente, em que se registou uma evolução mais ténue da temperatura. Esta diferença pode ser parcialmente justificada pelas simplificações introduzidas no modelo numérico, como, por exemplo, o facto de se ter considerado que o revestimento interior é um material homogéneo e isotrópico com o comportamento equivalente ao de uma mistura de argamassa com PCM, mas onde todo o material tem a capacidade de mudar de fase, entre os 23 ºC e os 25 ºC. Na realidade as pequenas micropartículas de PCM estão dispersas na argamassa compósita, encontrando-se umas mais próximas da superfície, enquanto outras se encontram mais distribuídas no interior da camada de revestimento. Assim, nem todas as cápsulas atingirão a temperatura de fusão em simultâneo, sendo, na verdade, o processo de mudança de fase mais gradual e mais coincidente com os valores obtidos experimentalmente.

A simulação numérica dos dias da estação de arrefecimento considerados exibe, à semelhança do observado na monitorização experimental (*v.* secção 4.6), uma atenuação das temperaturas no interior das células de teste CPCM. É visível uma redução de picos máximos de temperatura (*v.* Figura 6.59) e de picos mínimos de temperatura (*v.* Figura 6.60). Assim, a ação do PCM ficou claramente assinalada na simulação numérica realizada.

Em conclusão, em ambas as situações estudadas laboratorialmente, no que respeita à evolução interna das temperaturas (entre as temperaturas máximas e mínimas), existe uma boa coerência entre os valores monitorizados e os valores simulados, suficientemente consistente tendo em consideração a aplicação prática para a qual este instrumento de simulação foi proposto. Durante a campanha experimental a ação dos PCM incorporados na argamassa de revestimento interior da célula CPCM foi claramente assinalada e a ferramenta numérica utilizada traduziu fielmente o comportamento dos materiais de mudança de fase, tendo-se registado extrema consonância entre os resultados experimentais e os numéricos.

6.5.2 Resultados numéricos *vs.* campanha experimental *in situ*

6.5.2.1 Simulação numérica com recurso à temperatura fictícia ar-sol

Os resultados da monitorização das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM, adquiridos durante a campanha experimental realizada *in situ* (*v.* subsecção 4.3.3, Figura 4.42), revelaram um comportamento distinto entre as várias faces das células. Assim, as superfícies interiores das faces com maior exposição solar, tampa da célula (face horizontal de topo) e canto sudoeste (SE), apresentam temperaturas mais elevadas do que o centro e a base da célula, zonas caracterizadas pela ausência de radiação solar incidente.

A simplificação introduzida na resolução numérica pela consideração da evolução da temperatura nas proximidades das células de teste como sendo equivalente à temperatura fictícia ar-sol de uma superfície horizontal, permite a modelação de apenas um oitavo da célula de teste, não sendo possível no entanto observar a diferença de comportamento entre as faces mais expostas à radiação e as zonas das células com menor exposição. Assim, a distribuição uniforme das temperaturas por todas as faces das células, considerando que todas apresentam uma radiação solar incidente equivalente à de uma superfície horizontal, condiciona os resultados

obtidos, inflacionando as temperaturas simuladas. Portanto, sabendo que o valor do coeficiente de absorção solar, α_s, de uma superfície de cor branca deve estar compreendido entre 0,2 e 0,3 (Sousa, Freitas, e Silva 2003), consideraram-se, nas simulações efetuadas, dois valores distintos: um de α_s = 0,15, inferior ao limite mínimo e outro de α_s = 0,25, como valor intermédio, inferior ao limite máximo.

Os resultados representados nas Figuras 6.61 e 6.62 traduzem os valores obtidos na simulação numérica para o interior das células quando afetadas pela temperatura fictícia ar-sol correspondente ao valor de α_s = 0,15. A comparação entre os resultados obtidos por via numérica e experimental para o centro da célula de teste, quando no cálculo da temperatura fictícia ar-sol se considera um valor de α_s = 0,15, revelam uma excelente concordância de valores, quer na célula de teste SPCM (*v.* Figura 6.61), quer na célula de teste CPCM (*v.* Figura 6.62). No entanto, como era expectável, os resultados numéricos são equivalentes em todos os pontos do interior da célula, não traduzindo o efeito da variação da radiação solar incidente em função da orientação das faces das células.

Em conclusão, apenas os resultados monitorizados experimentalmente para o centro das células de teste se aproximam dos valores obtidos numericamente (*v.* Figuras 6.61 e 6.62). Já os valores monitorizados para as faces com maior exposição solar distanciam-se dos valores simulados (*v.* Figuras 6.63 e 6.64).

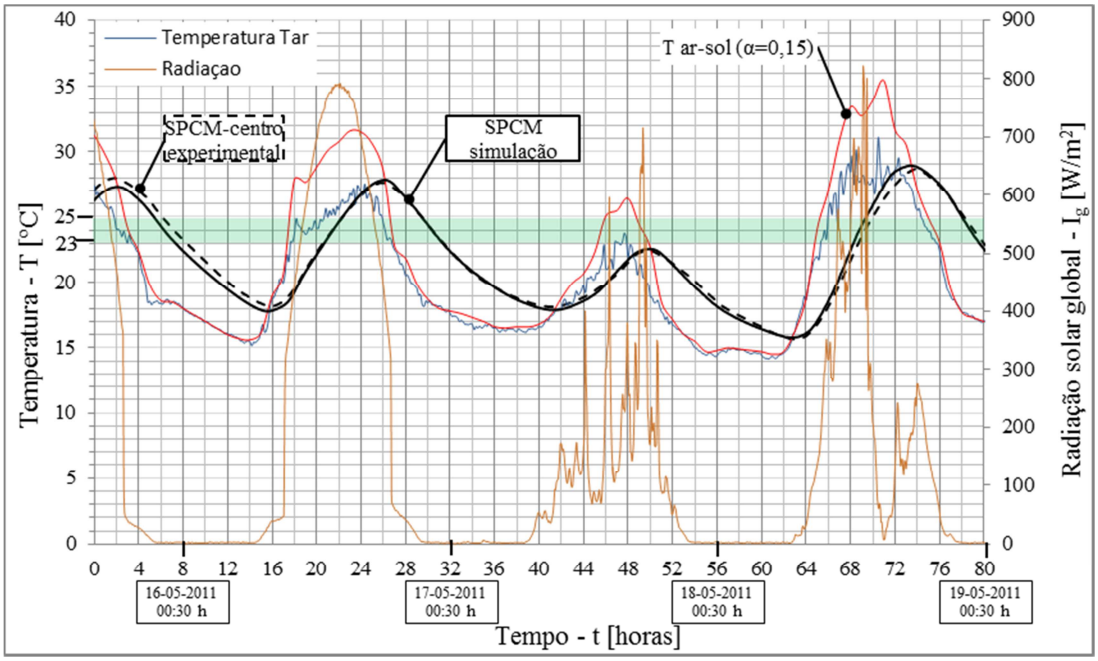


Figura 6.61 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,15) no interior centro da célula de teste SPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011.

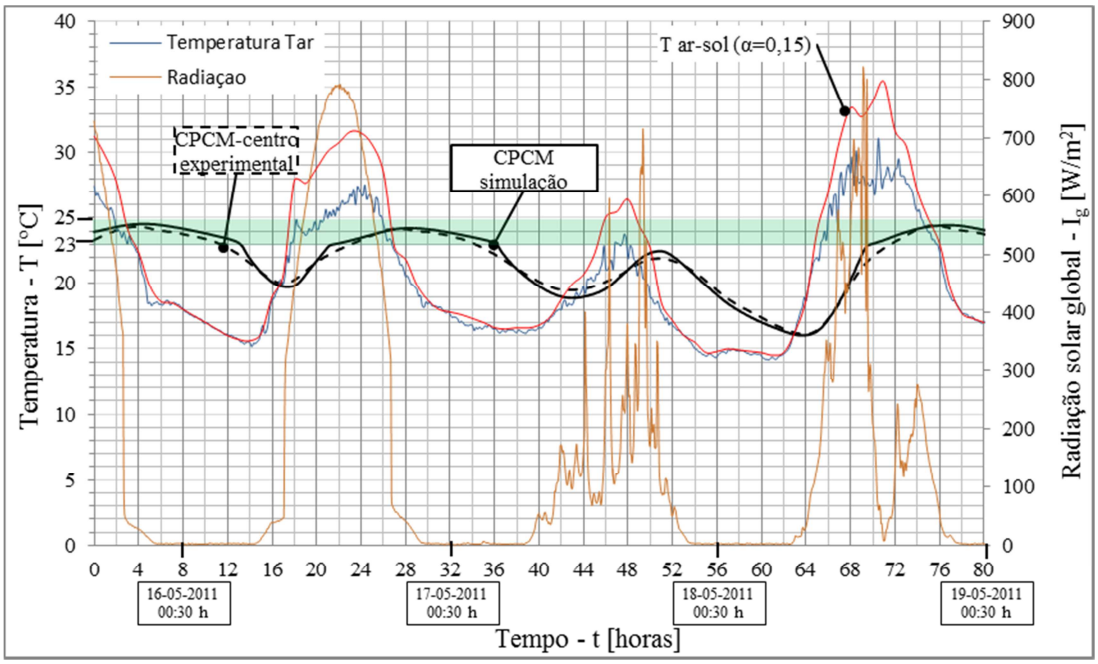


Figura 6.62 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,15) no interior centro da célula de teste CPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011.

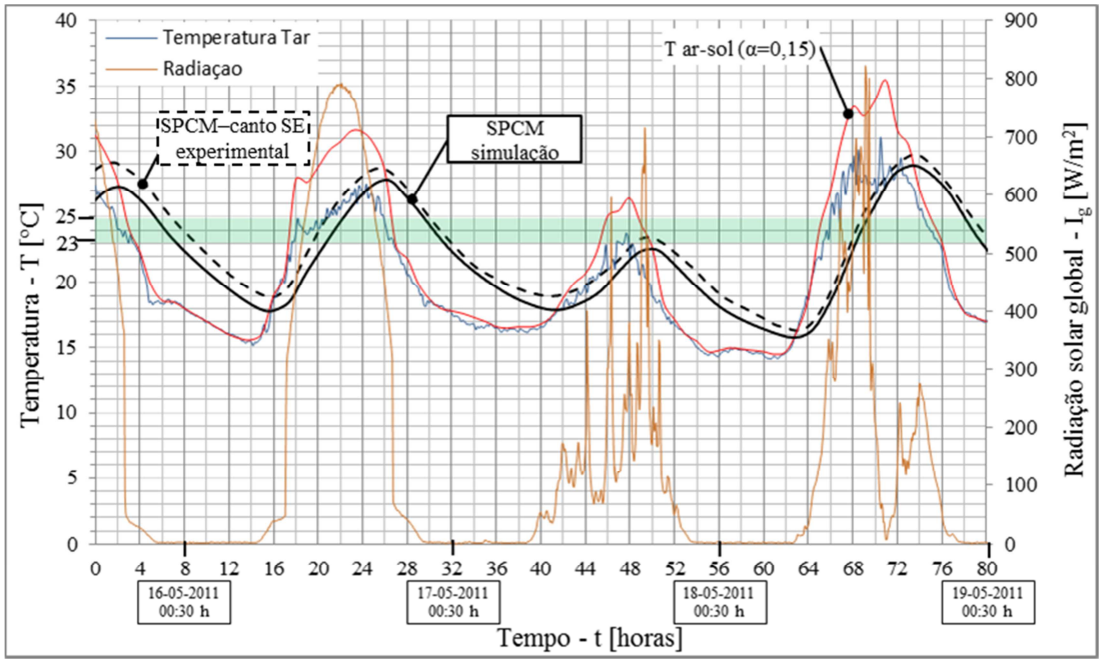


Figura 6.63 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,15) no canto SE das células de teste SPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011.

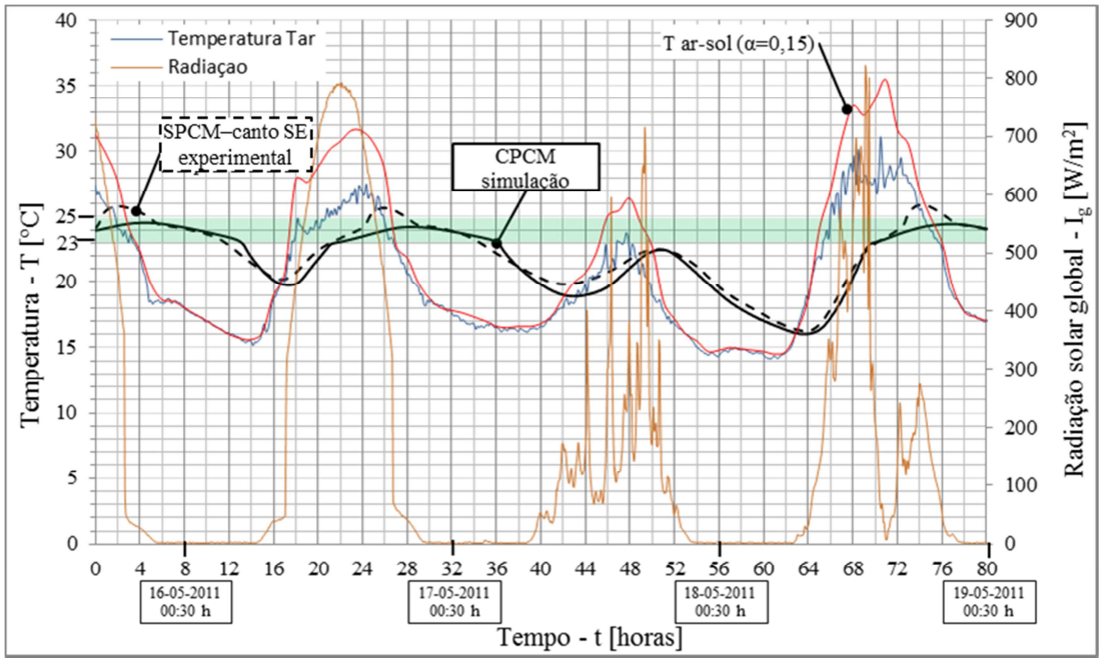


Figura 6.64 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,15) no canto SE da célula de teste CPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011.

Ao admitir na resolução numérica uma temperatura fictícia ar-sol correspondente a α_s = 0,25, as temperaturas simuladas para o interior das células de teste (célula de teste SPCM (*v.* Figura 6.65) e CPCM (*v.* Figura 6.66)) são ligeiramente superiores às monitorizadas para as faces do interior das células com maior exposição solar (horizontal e SE). Estes resultados revelam uma menor concordância entre os valores monitorizados experimentalmente e a simulação numérica realizada.

No entanto, os valores simulados para a célula de teste CPCM (*v.* Figura 6.66) traduzem o efeito do PCM, com valores máximos e mínimos próximos dos valores monitorizados, demonstrando-se novamente as potencialidades da simulação numérica no estudo da condução de calor com um PCM.

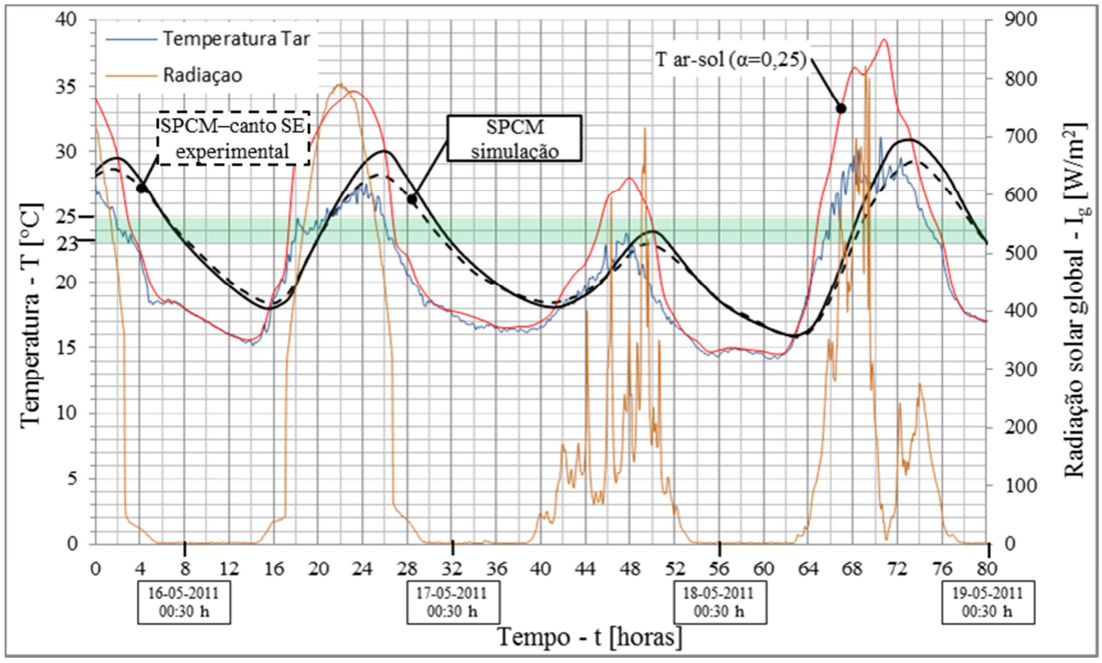


Figura 6.65 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,25) no canto SE das células de teste SPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011.

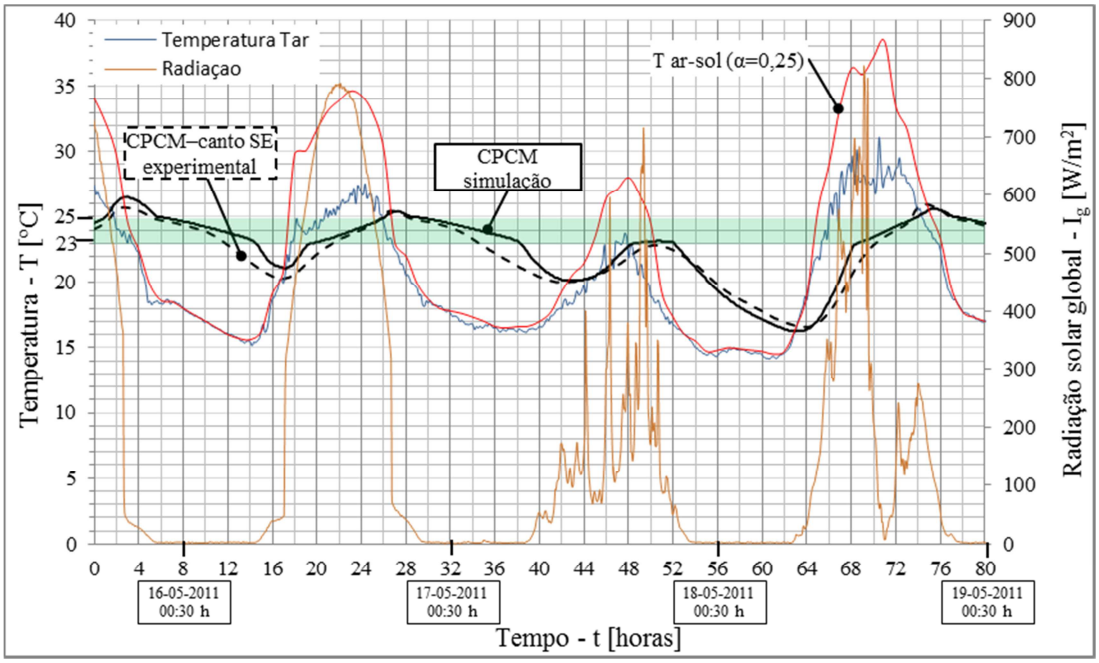


Figura 6.66 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas (para α_s = 0,25) no canto SE das células de teste CPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011.

Em síntese, a simulação numérica com o recurso à simplificação, modelando apenas um oitavo da célula de teste e considerando uma única temperatura nas proximidades das células de teste, equivalente à temperatura fictícia ar-sol de uma superfície horizontal, não traduz o comportamento das células de teste quando sujeitas a condições reais de exposição: temperatura ambiente e radiação solar incidente. As temperaturas simuladas para os vários pontos do interior das células de teste são coincidentes enquanto as monitorizadas experimentalmente distinguem a exposição solar das várias faces das células de teste.

6.5.2.2 Simulação numérica com recurso ao modelo solar

Na monitorização das temperaturas no interior das células de teste (CPCM e SPCM), realizada durante a campanha experimental realizada *in situ*, obtiveram-se valores distintos para os vários pontos medidos (horizontal de topo, canto SE, centro e base), tendo-se registado temperaturas mais elevadas nas faces com maior exposição solar: horizontal de topo e canto SE (*v.* subsecção 4.3.3, Figura 4.42). Assim, com o intuito de aproximar a simulação numérica às condições reais de exposição das células de teste, onde as várias faces apresentam exposições solares distintas, acoplou-se ao

programa DIANA (TNO DIANA BV 2010) uma rotina do programa MATLAB (MathWorks 2010). Este modelo, descrito na subsecção 5.4.2, é capaz de traduzir a radiação solar global (equiparada à registada pela estação meteorológica) na radiação solar incidente em cada face, consoante as suas condições de exposição: orientação solar e inclinação.

Os resultados representados nas Figuras 6.67 a 6.74 traduzem os valores obtidos na simulação numérica para o interior das células de teste (CPCM e SPCM) quando afetadas pela temperatura ambiente (monitorizada experimentalmente) e pelos valores da radiação solar absorvida por cada uma das 5 faces expostas das células calculados através do modelo solar adotado (*v.* subsecção 5.4.2).

Os valores obtidos pela simulação numérica com recurso ao modelo solar são, para os dias de céu limpo, coincidentes com os valores monitorizados experimentalmente. As Figuras 6.67 e 6.68 demonstram a similitude entre os valores simulados e monitorizados para o centro das células de teste SPCM e CPCM, respetivamente e as Figuras 6.69 e 6.70 traduzem essa mesma semelhança entre valores simulados e monitorizados no interior das células de teste, nomeadamente num ponto da face horizontal de topo (tampa) das células SPCM e CPCM.

Assim, para os dias 15 e 16 de Maio, dias de céu limpo, a simulação numérica traduz, para cada ponto do interior das células, o observado durante a campanha experimental. Nos dias nublados, dias 17 e 18 de Maio, os valores simulados apresentam temperaturas ligeiramente superiores, com uma variação face aos valores monitorizados que chega a atingir uma diferença de aproximadamente 2 ºC na célula de teste SPCM e de cerca de 1 ºC na célula de teste CPCM. Esta diferença era expectável, dado que os valores da radiação solar considerados na simulação numérica são superiores aos efetivamente observados nos dias de céu encoberto (dias 17 e 18 de Maio).

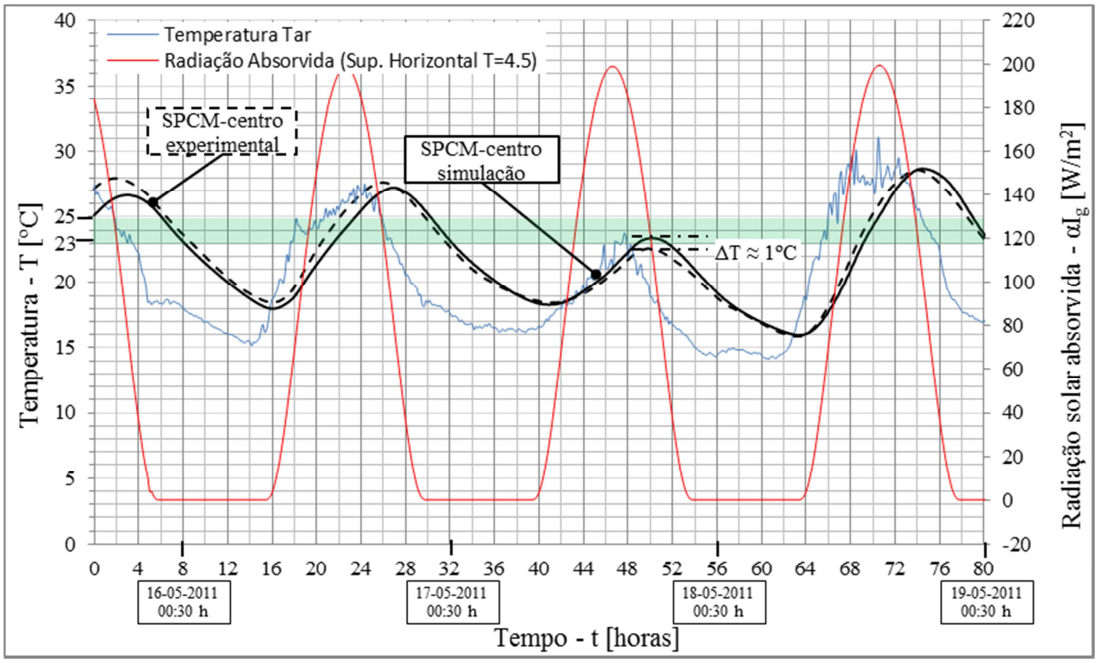


Figura 6.67 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas no centro da célula de teste SPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011.

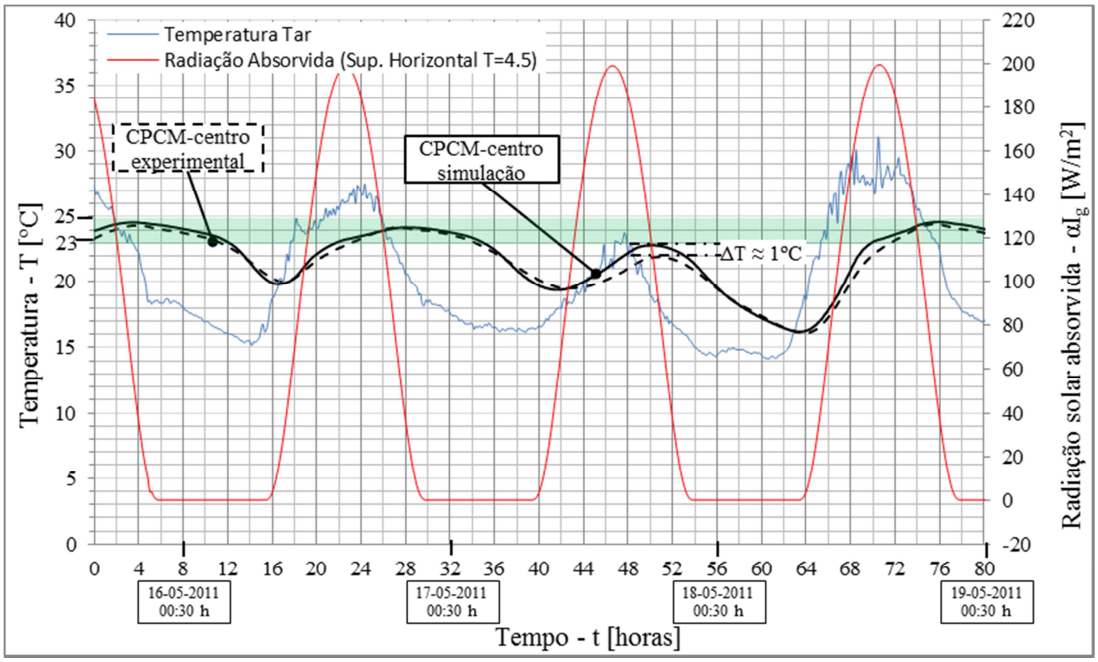


Figura 6.68 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas no centro da célula de teste CPCM dias 15 a 19 de maio de 2011.

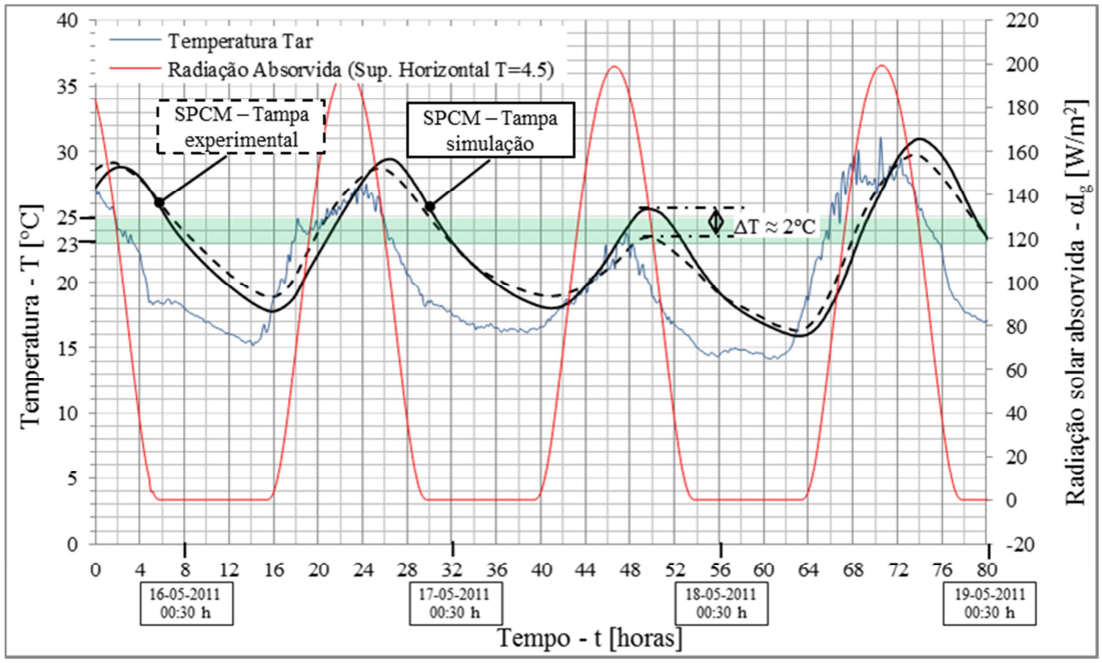


Figura 6.69 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas na tampa da célula de teste SPCM dias 15 a 19 de maio de 2011.

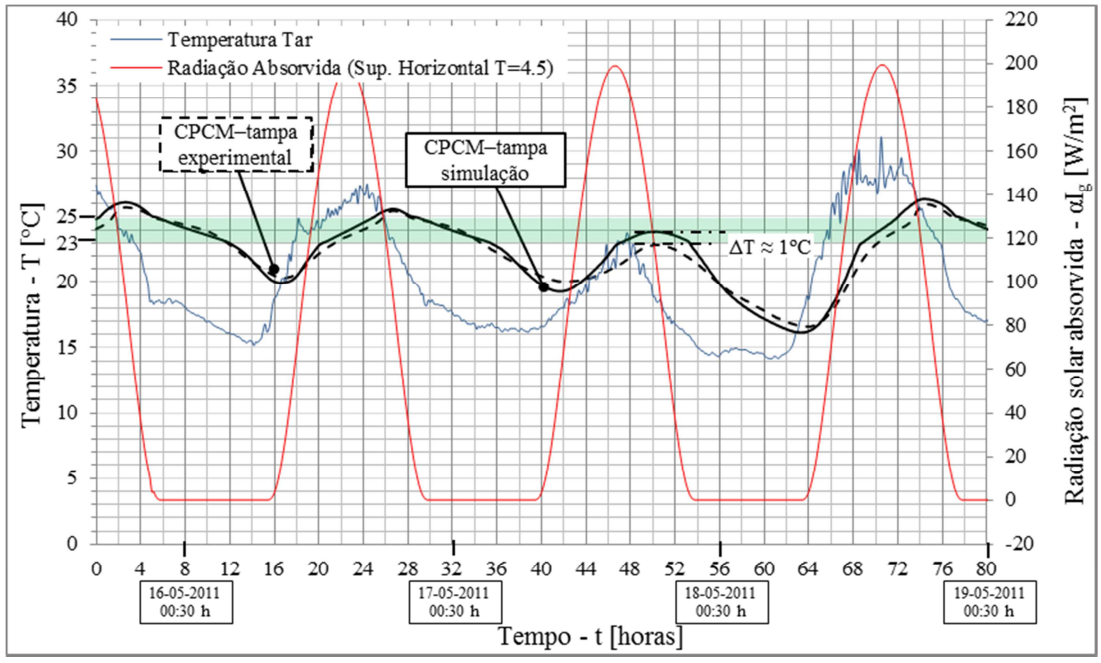


Figura 6.70 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas na tampa da célula de teste CPCM dias 15 a 19 de maio de 2011.

Na tentativa de aproximar as condições admitidas na simulação às condições reais de exposição *in situ* afetou-se a radiação estimada pelo modelo solar de um parâmetro capaz de traduzir a nebulosidade registada ao longo dos dias monitorizados. Assim, conforme o registado no gráfico da Figura 6.57, a radiação solar dos primeiros dias (15 e 16 de Maio) praticamente não é afetada, por serem dias de céu limpo. No entanto, os restantes dias monitorizados são afetados pelo parâmetro de correção que é, em média, de 0,3 para o dia 17 de maio e de 0,6 para o dia 18 de Maio.

Os resultados obtidos (registados nos gráficos das Figuras 6.71 a 6.74) refletem a aproximação feita às condições reais de exposição. Assim, quer na célula de teste SPCM, quer na célula de teste CPCM, os valores simulados para cada ponto do interior das células aproximam-se dos valores monitorizados durante os 4 dias da campanha experimental, quer para os dias de céu limpo, quer para os dias de céu nublado.

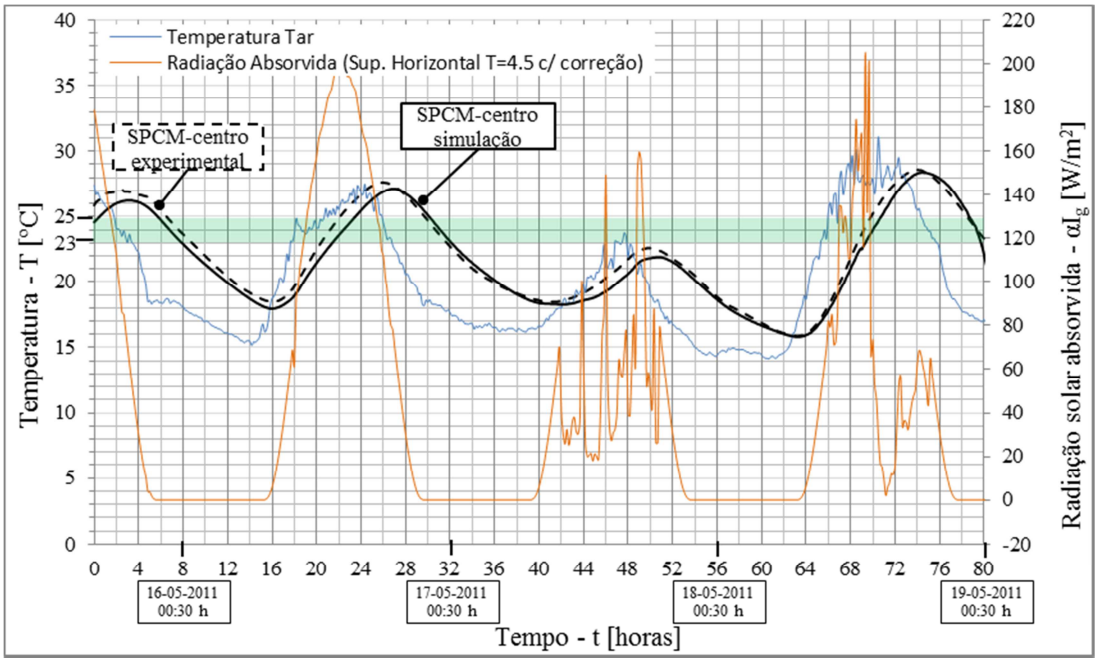


Figura 6.71 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas no centro da célula de teste SPCM, dias 15 a 19 de maio de 2011.

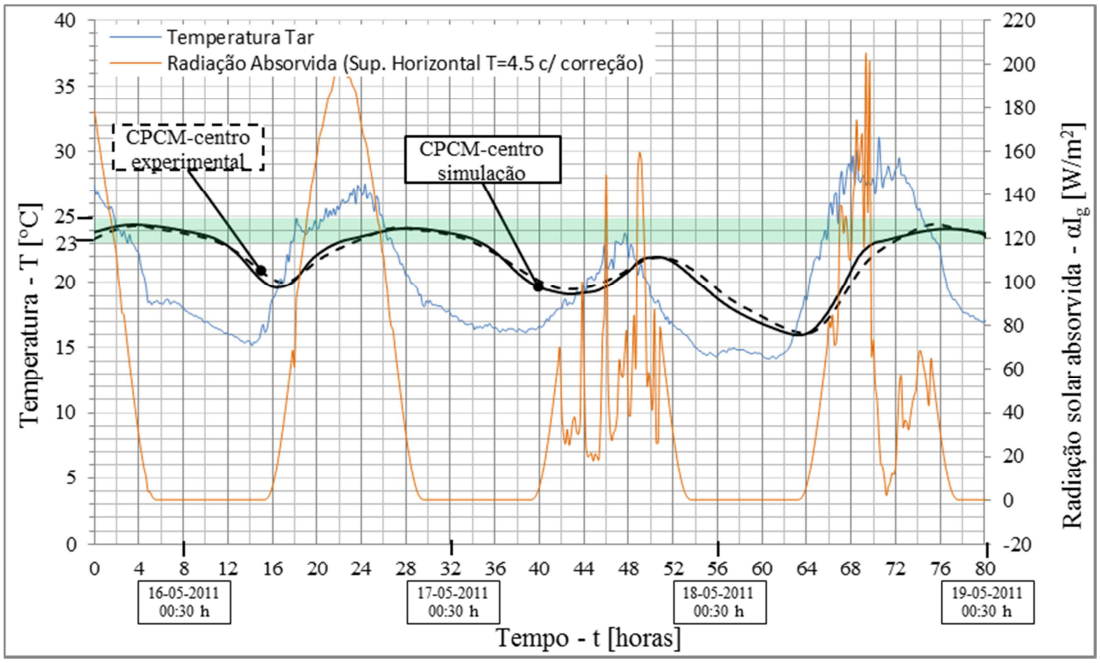


Figura 6.72 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas no centro da célula de teste CPCM dias 15 a 19 de maio de 2011.

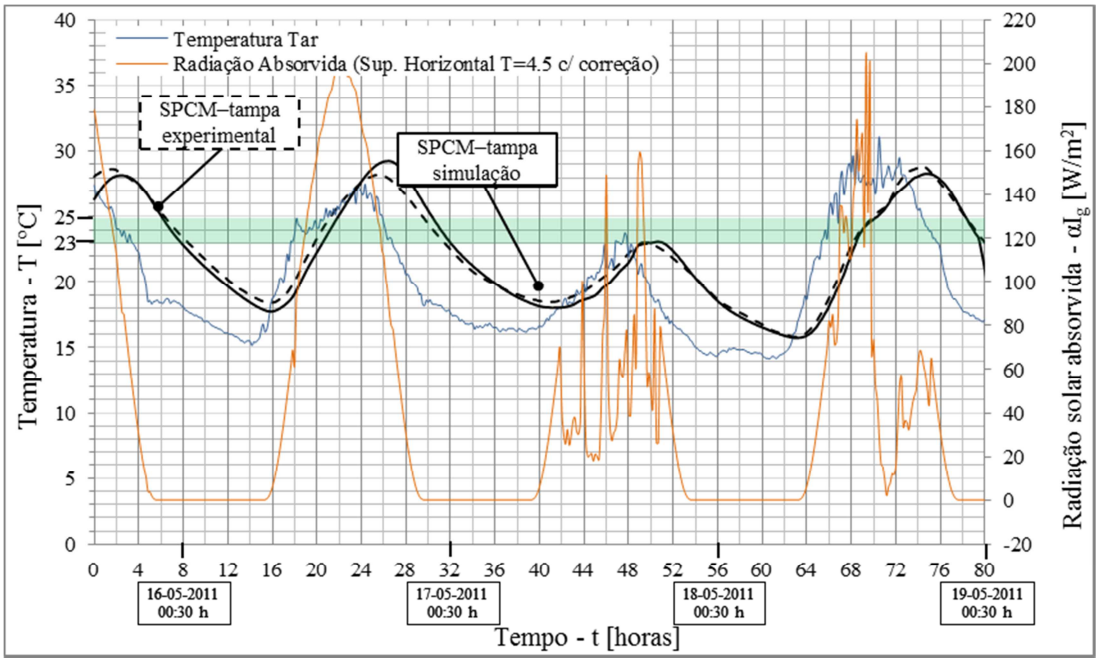


Figura 6.73 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas na tampa da célula de teste SPCM dias 15 a 19 de maio de 2011.

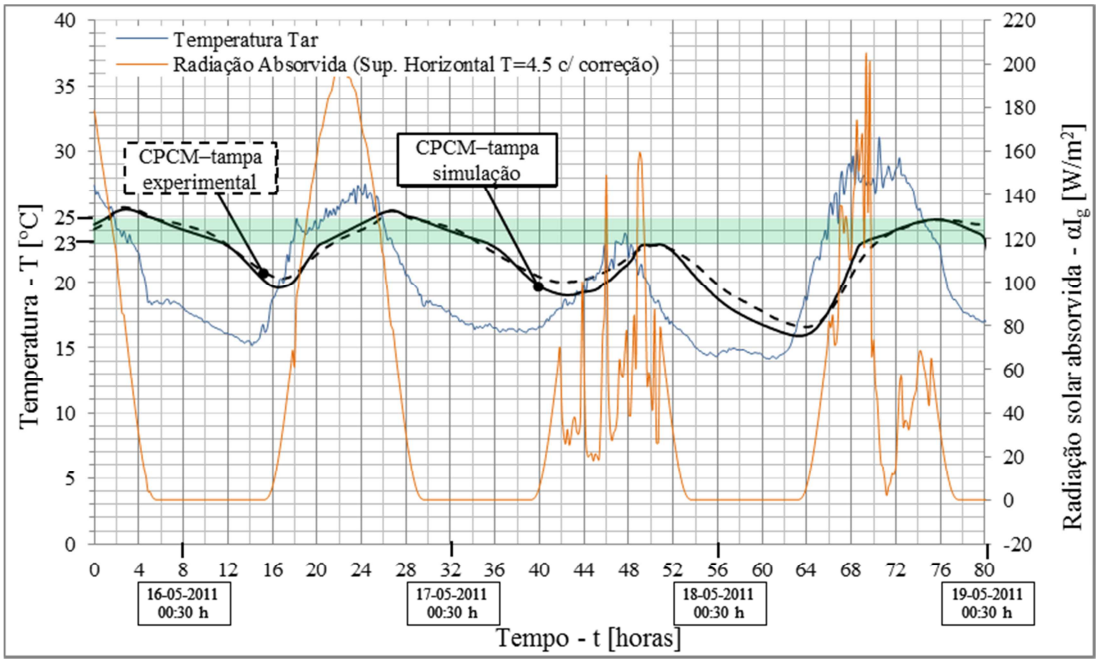


Figura 6.74 — Monitorização *in situ* e simulação numérica das temperaturas na tampa da célula de teste CPCM dias 15 a 19 de maio de 2011.

Em resumo, a acoplação do modelo de radiação solar serviu para aproximar a simulação às condições reais de exposição das células monitorizadas in situ. Foi possível observar, na simulação numérica, o efeito da radiação solar sobre as temperaturas interiores sem descorar o principal objetivo da simulação realizada: o de observar o comportamento diferenciado entre as células SPCM e CPCM, ou seja, o de observar o impacto dos materiais de mudança de fase.

6.5.3 Síntese de resultados

A resolução numérica do problema matemático de transferência de calor em PCM foi validada pela semelhança entre os resultados da simulação numérica e os resultados da monitorização experimental. Assim, a modelação numérica de um-oitavo da célula de teste com recurso ao método dos elementos finitos numa análise tridimensional do fenómeno de transferência de calor traduziu fielmente o observado no decorrer da campanha experimental realizada em laboratório.

Já na simulação numérica dos ensaios realizados *in situ* a modelação simplificada de um-oitavo da célula de teste não é capaz de traduzir a distribuição da radiação solar nas faces com diferentes orientações. O recurso ao modelo da radiação solar permitiu

simular o efeito da radiação solar incidente em cada face da célula de teste (com exposições solares distintas) sem descuidar o principal objetivo da simulação numérica preconizada: o estudo da ação dos PCM.

Ficou evidente, na resolução numérica do problema de transferência de calor, à semelhança do registado experimentalmente, que os PCM contribuem para a conservação das temperaturas interiores, garantindo uma menor flutuação das mesmas, reduzindo picos (máximos e mínimos) dessas temperaturas interiores; e aumentando o desfasamento entre as temperaturas exteriores e interiores.

6.6 Análise comparativa entre os resultados numéricos obtidos: células SPCM *vs* CPCM

A análise comparativa entre as células de teste SPCM e CPCM foi realizada com o intuito de analisar a ação dos PCM aplicados à argamassa de revestimento interior, demonstrando-se algumas das potencialidades do programa de resolução numérica utilizado. Na análise comparativa preconizada, utilizaram-se mapas de evolução dos campos de temperatura, em instantes selecionados, que possibilitam a observação da evolução temporal e espacial dos gradientes de temperatura ao longo da superfície interior das células de teste (SPCM ou CPCM).

No dia da estação de arrefecimento, representado no gráfico da Figura 6.75, até ao instante de tempo t = 9 h, e a partir de t = 16 h, a evolução das temperaturas no tempo nas células SPCM e CPCM é semelhante. O registo dos gradientes de temperatura ao longo da superfície de revestimento interior, apresentado nos mapas de evolução de temperatura, com intervalos de uma hora, confirma essa semelhança (*v.* Tabela 6.17). No entanto, na argamassa com PCM, por apresentar uma condutibilidade térmica inferior à argamassa de referência (REF), nota-se uma maior homogeneização na distribuição das temperaturas mesmo antes do efeito do PCM se sentir, ou seja, antes do PCM atingir a temperatura de fusão.

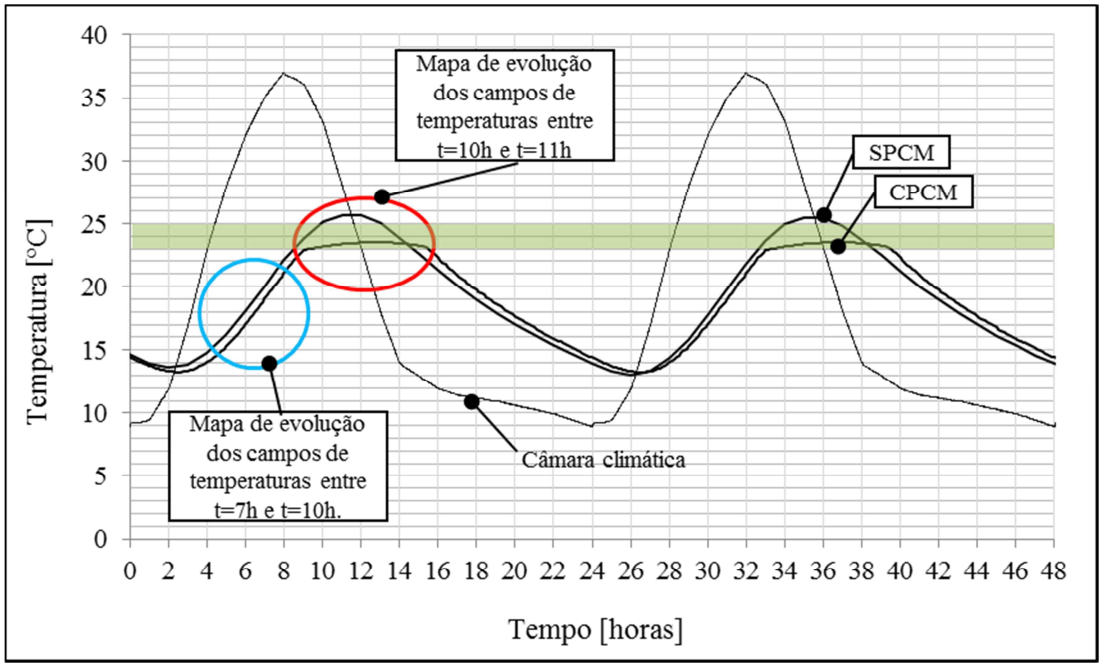


Figura 6.75 — Simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM, dia 7 de Abril, no Porto.

Entre as 9 e as 16 horas, a variação de temperaturas na camada de argamassa de PCM é sempre inferior a 1,5 ºC, entre os 23 ºC e os 24,5 ºC, a homogeneidade dos valores de temperatura registados é representada praticamente a uma só cor, em contraste com a variação cromática registada na camada de argamassa sem PCM (*v.* Tabela 6.18). No instante $t \approx$10 h e 15 min, por exemplo, a camada de argamassa com PCM apresenta temperaturas que variam entre os 23 ºC e os 24,3 ºC, com um $\Delta T \approx 1{,}3$ ºC. Enquanto o revestimento interior da célula de teste SPCM apresenta uma variação de temperaturas, nesse mesmo instante, de $\Delta T \approx 2{,}1$ ºC, com uma temperatura mínima de 23,6 ºC, localizada no canto da camada de revestimento interior da célula, aumentando radialmente até aos 25,7 ºC registados no centro das faces da camada. Entre os instantes $t \approx 9$ h e $t \approx 16$ h, a temperatura registada na camada com PCM está sempre dentro dos limites de conforto impostos pela temperatura de fusão (entre os 23 ºC e os 25 ºC) enquanto na argamassa sem PCM esse limite é ultrapassado, até se atingir a temperatura máxima de 26,5 ºC no instante $t \approx$ 11h (*v.* Tabela 6.18).

Tabela 6.17 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: Representação do revestimento interior de 1/8 das células de teste SPCM e CPCM – intervalos: t = 7 h, t = 8 h, t = 9 h e t = 10 h, dia 7 de Abril, no Porto.

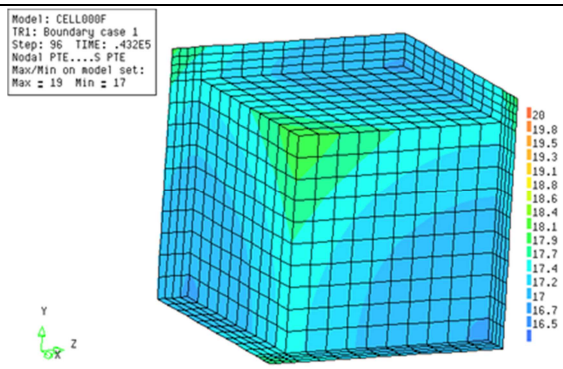
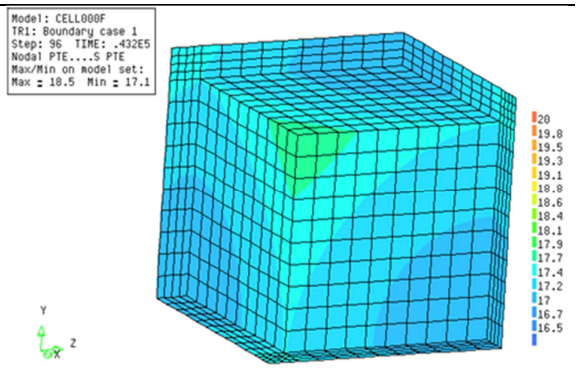
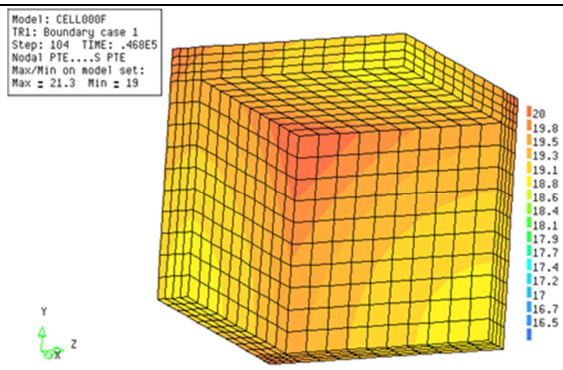
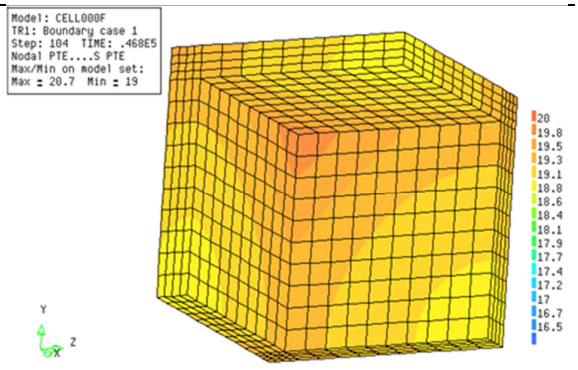
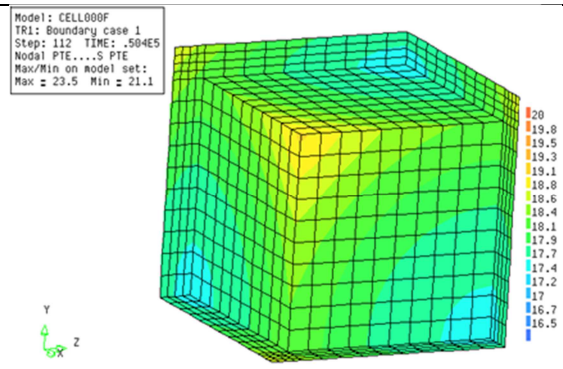
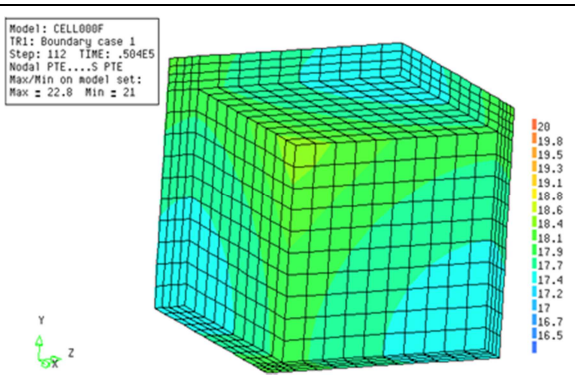
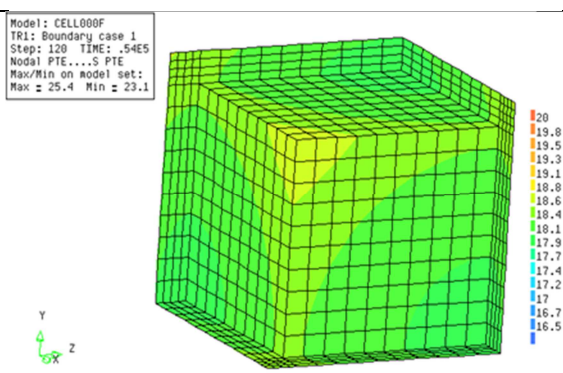
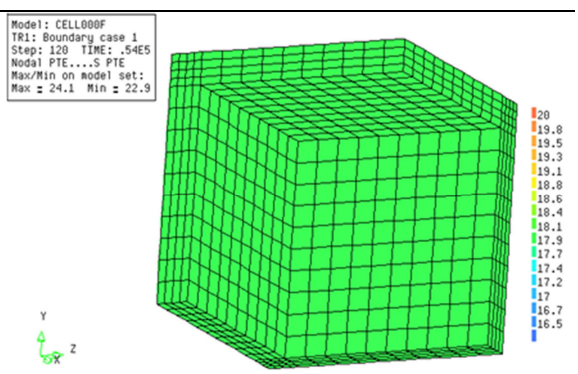
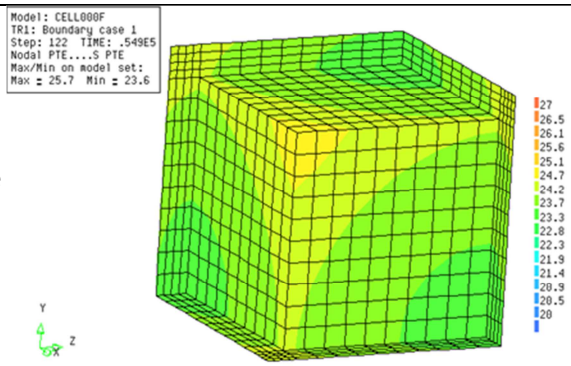
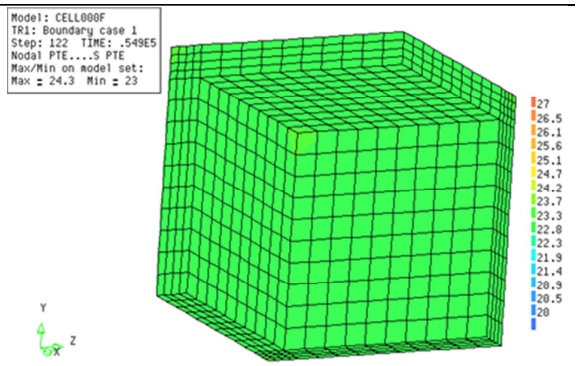
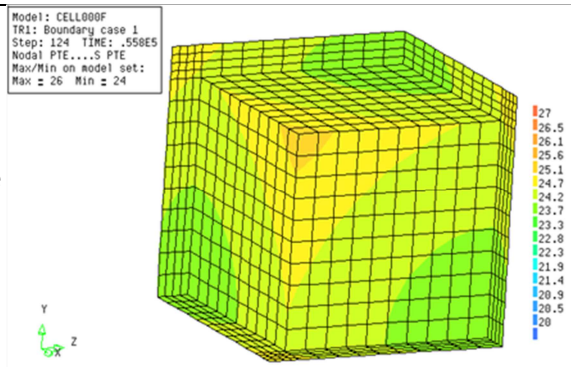
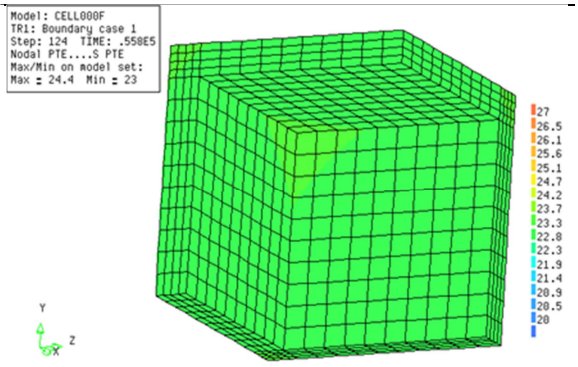
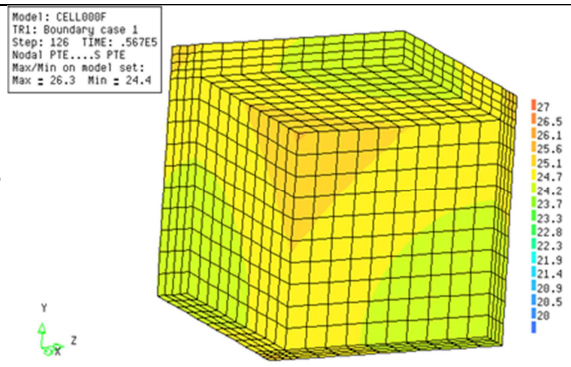
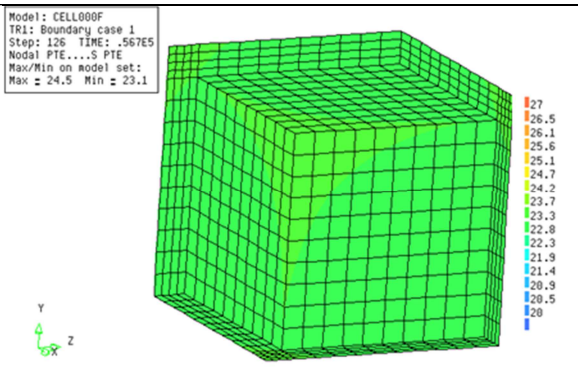
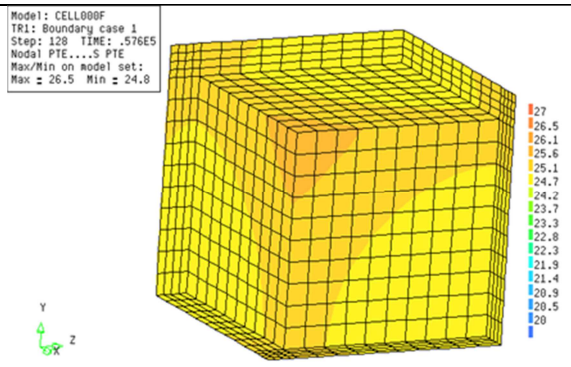
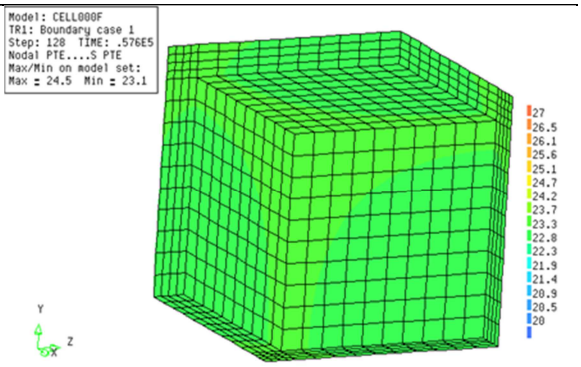
Intervalo	1/8 Célula de teste SPCM Revestimento interior: argamassa de referência REF	1/8 Célula de teste CPCM Revestimento interior: argamassa com PCM
t = 7 horas		
t = 8 horas		
t = 9 horas		
t = 10 horas		

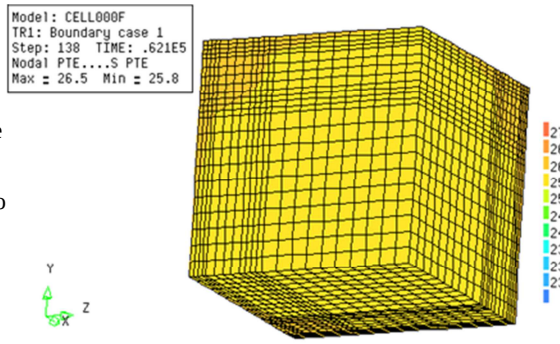
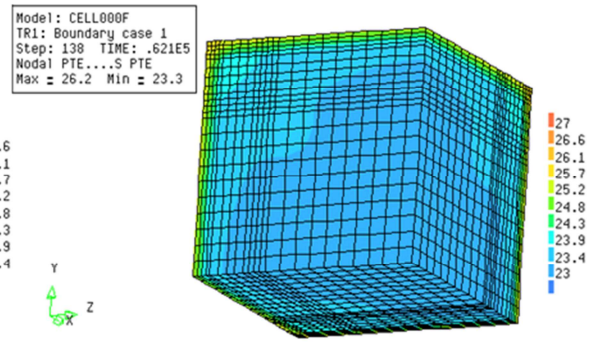
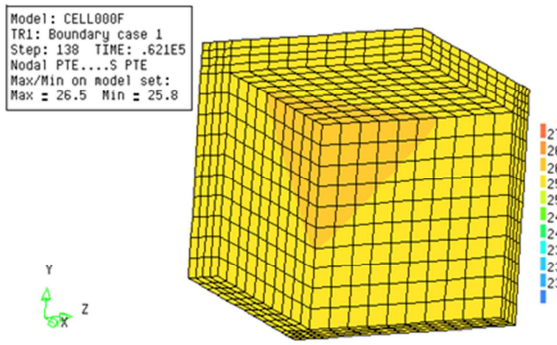
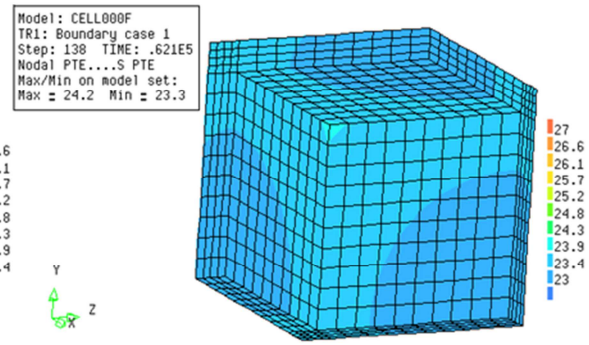
Tabela 6.18 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: Representação do revestimento interior de 1/8 das células de teste SPCM e CPCM – intervalos: *t* = 10 h e 15 min, *t* = 10h e 30 min, *t* = 10 h e 45 min e *t* = 11h, dia 7 de Abril, no Porto.

Intervalo	1/8 Célula de teste SPCM Revestimento interior: argamassa de referência REF	1/8 Célula de teste CPCM Revestimento interior: argamassa com PCM
t = 10 horas e 15 minutos		
t = 10 horas e 30 minutos		
t = 10 horas e 45 minutos		
t = 11 horas		

A homogeneização da temperatura registada na célula de teste CPCM, para o dia da estação de arrefecimento em análise, ao longo de 7 horas por dia (entre as 9 e as 16 horas), aumenta a sensação de conforto dada, por um lado, diretamente pela uniformização das temperaturas da superfície radiante (argamassa com PCM), e por outro lado, pelo contributo dado por este revestimento na estabilização das temperaturas registadas no interior da célula de teste CPCM.

O mapa das temperaturas de 1/8 das células de teste (SPCM e CPCM) e da camada de revestimento interior de cada uma das células de teste (argamassa sem e com PCM), para o instante t = 12 h e 15 min, está representado na Tabela 6.19. Neste mapa é possível verificar que a temperatura no ponto central do interior da célula é condicionada pelas temperaturas da superfície de revestimento interior. Assim, na célula de teste SPCM a temperatura interior é de T = 25,8 ºC (registada no ponto central da célula de teste), sendo coincidente com o valor mínimo registado na argamassa sem PCM (onde se registaram temperaturas de 25,8 ºC a 26,5 ºC), enquanto que na célula de teste CPCM o valor da temperatura interior é de T = 23,3ºC, coincidente com o valor mínimo da temperatura registada na camada com PCM, sendo inferior em 2,5 ºC ao da temperatura registada na célula SPCM, para o mesmo instante. Aliás, as temperaturas registadas ao longo das várias camadas da célula de teste SPCM (ar, argamassa de revestimento, argamassa reforçada e XPS) apresentam valores de temperatura entre os 25,8 ºC e os 26,5 ºC, exatamente os mesmos valores que se observam ao longo da camada de revestimento interior: argamassa de referência (REF, sem PCM). Enquanto na célula de teste CPCM as camadas exteriores de revestimento são afetadas pela temperatura imposta no exterior (interior da câmara climática), a camada de argamassa de revestimento interior, com PCM, consegue limitar as trocas entre o interior e o exterior, garantindo temperaturas dentro da gama de temperaturas de fusão do PCM utilizado (entre os 23 ºC e os 25 ºC).

Tabela 6.19 — Mapas de evolução dos campos de temperatura. Representação de 1/8 das células de teste SPCM e CPCM: intervalos: t = 12 h e 15 min, dia 7 de Abril, no Porto.

Intervalo	1/8 Célula de teste SPCM	1/8 Célula de teste CPCM
t = 12 horas e 15 minutos (início da ação do PCM)		
	Revestimento interior: argamassa de referência REF	Revestimento interior: argamassa com PCM
t = 12 horas e 15 minutos (ação do PCM)		

O dia da estação de arrefecimento, estudado experimentalmente, em que se registou o maior efeito da argamassa com PCM, desenvolvida e aplicada como revestimento interior da célula de teste CPCM, foi o dia 7 de Abril, em Faro (*v.* subsecção 4.3.3, Figura 4.37), tendo-se registado, para as condições climáticas admitidas, diferenças entre os picos de temperatura máximos das células SPCM e CPCM de $\Delta T \approx 2$ºC e diferenças entre os picos de temperatura mínimas de $\Delta T \approx 5$ºC. As temperaturas no interior da célula de teste CPCM mantiveram-se dentro da gama de temperaturas de fusão do PCM (entre os 23 ºC e os 25 ºC) durante cerca de 15 horas por cada ciclo de 24 horas. No gráfico da Figura 6.76, reproduzem-se os valores obtidos numericamente para as condições climáticas consideradas para o dia da estação de arrefecimento estudado e assinalam-se os instantes de tempo representados nos mapas de evolução dos campos de temperatura, representados nas Tabelas 6.20 e 6.21.

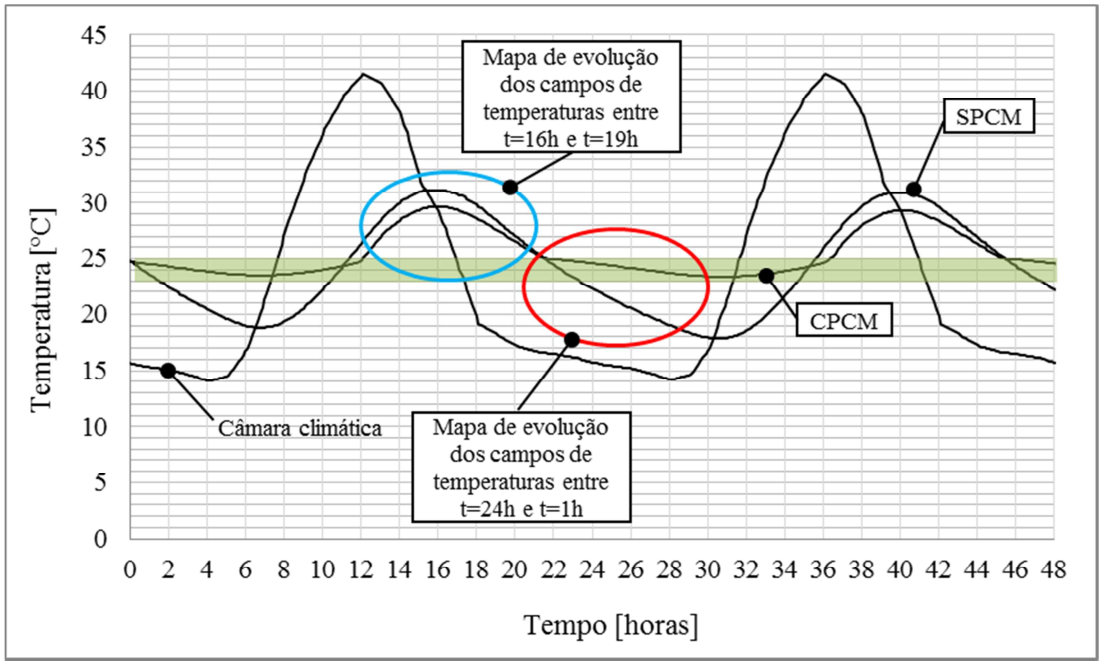


Figura 6.76 — Simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM, dia 7 de Abril, em Faro.

A ação do PCM, para as condições climáticas simuladas, é claramente identificada entre os instantes t = 0 horas e t = 12 horas e entre os instantes t = 21 horas e t = 36 horas. No entanto, mesmo quando as temperaturas no interior da célula de teste CPCM ultrapassam os 25 ºC (temperatura correspondente ao pico de fusão do PCM), as células de teste SPCM e CPCM apresentam temperaturas interiores distintas, sendo escassos os instantes em que a temperatura interior de ambas coincide. A diferença entre as temperaturas registadas no interior das células SPCM e CPCM, representada no gráfico da Figura 6.76, é também visível no mapa de temperaturas gerado para a camada de revestimento interior das duas células (*v.* Tabelas 6.20 e 6.21).

Assim, na camada de argamassa com PCM, fora da ação do PCM (acima da temperatura de pico de fusão, 25 ºC), registaram-se valores de temperatura inferiores às temperaturas registadas na camada de argamassa sem PCM (*v.* Tabela 6.20). No instante $t \approx 18$ horas, por exemplo, a diferença de temperaturas entre o revestimento interior sem PCM e com PCM é de $\Delta T \approx 2{,}9$ ºC, sendo a temperatura máxima registada na argamassa de referência de T = 31,1 ºC e na argamassa com PCM de T = 28,2 ºC.

Contudo, mesmo verificando-se esta diferença, que é significativa por se estar fora da gama de temperaturas de conforto, a evolução das temperaturas nas duas células de teste (entre os instantes t = 12 horas e t = 21 horas e entre os instantes t = 36 horas e t = 45 horas) é gradual, sendo condicionada pelas condições climáticas impostas e onde o efeito do PCM não é percetível no interior da célula CPCM (Figura 6.76).

Entre os instantes t = 21 horas e t = 36 horas, enquanto a temperatura na camada de argamassa com PCM está restringida à gama entre os 23 ºC e os 25 ºC, no revestimento interior de argamassa sem PCM (REF) a temperatura é menos constante, atingindo no instante t = 32 horas e 15 minutos uma temperatura de aproximadamente 20 ºC (*v.* Tabela 6.21). A homogeneização das temperaturas na camada com PCM é sentida, quer na distribuição das temperaturas ao longo do tempo, quer na distribuição das temperaturas ao longo da camada, existindo momentos em que a variação de temperaturas ao longo de toda a camada com PCM é de apenas ΔT = 0,3 ºC, como por exemplo para t = 32 horas e 15 minutos. De acordo com o observado anteriormente a estabilização das temperaturas no tempo e a homogeneização das temperaturas na camada de revestimento interior com PCM, reflete-se na constância das temperaturas registadas no interior da célula CPCM (*v.* Figura 6.76).

Tabela 6.20 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: Representação do revestimento interior de 1/8 das células de teste SPCM e CPCM – intervalos: t =18h, t =19h, t =20h e t =21h, dia 7 de Abril, em Faro.

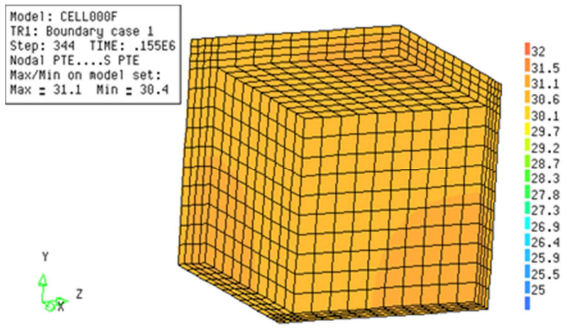
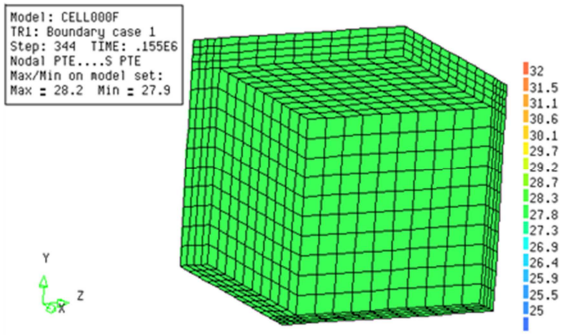
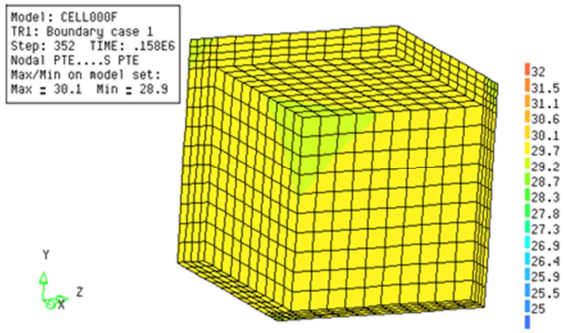
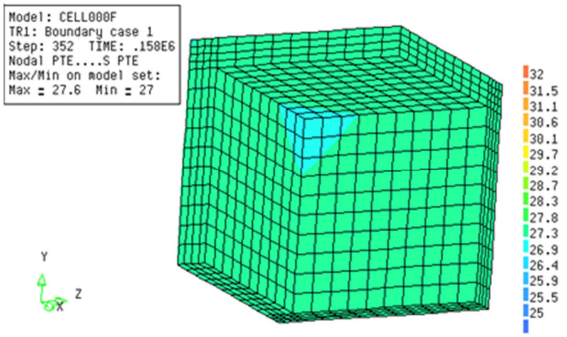
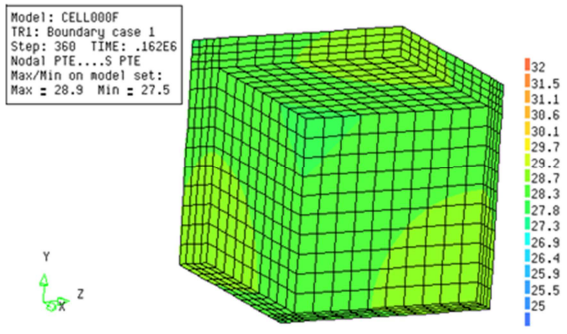
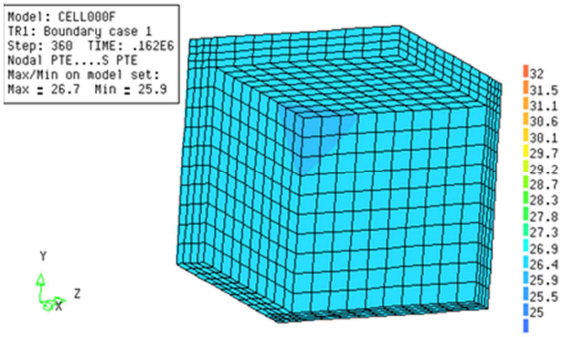
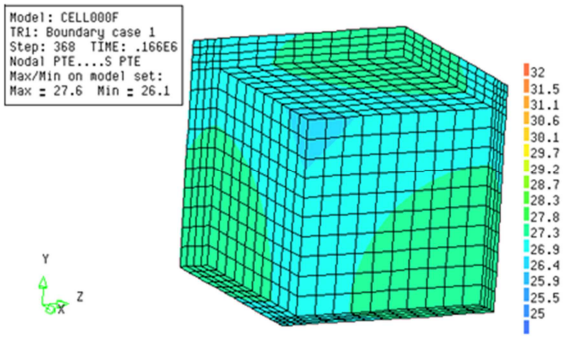
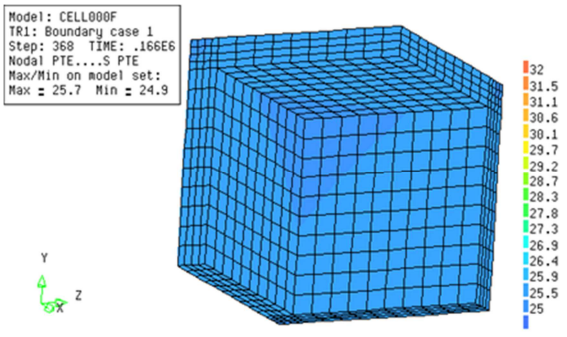
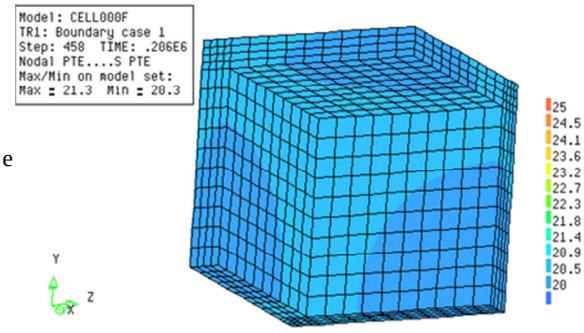
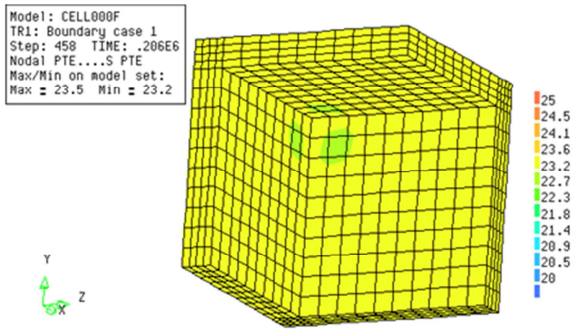
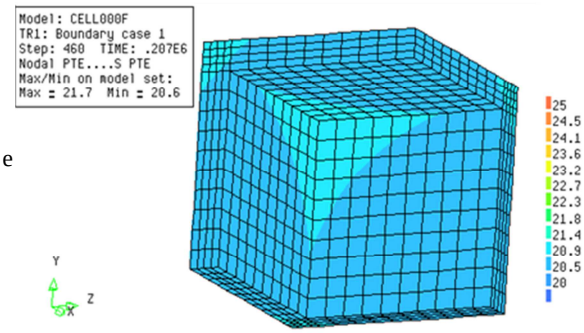
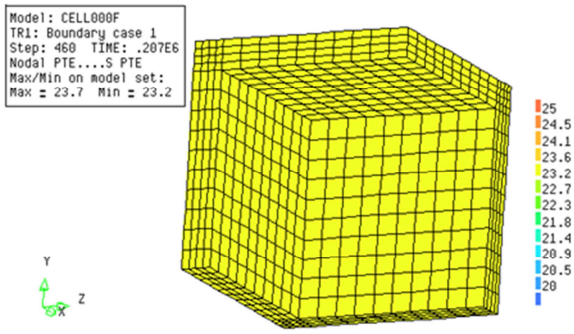
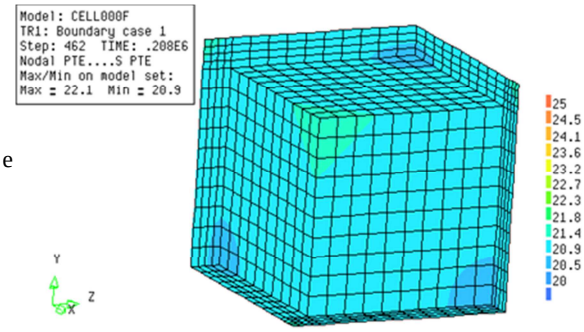
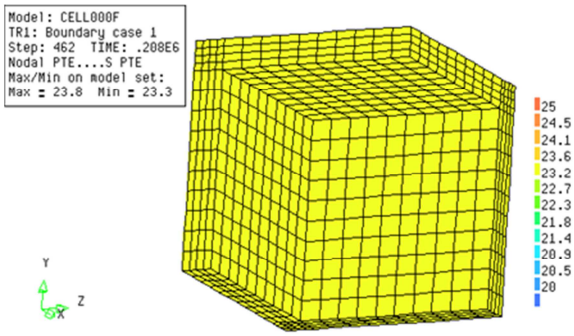
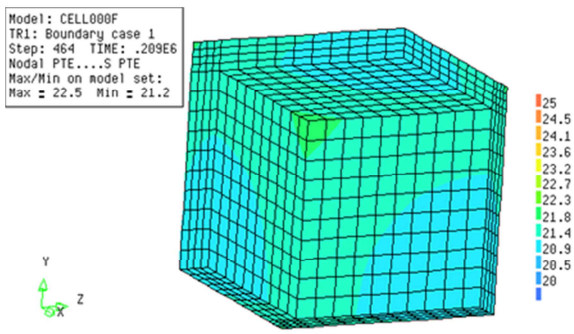
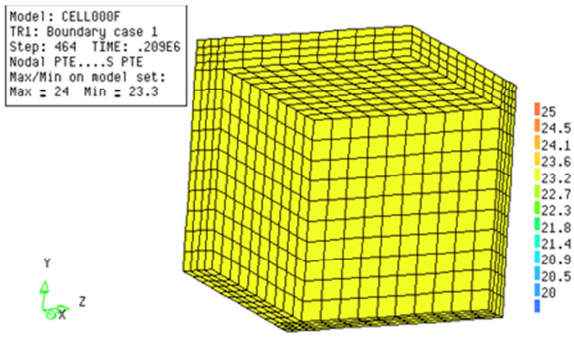
Intervalo	1/8 Célula de teste SPCM Revestimento interior: argamassa de referência REF	1/8 Célula de teste CPCM Revestimento interior: argamassa com PCM
t = 18 horas		
t = 19 horas		
t = 20 horas		
t = 21 horas		

Tabela 6.21 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: Representação do revestimento interior de 1/8 das células de teste SPCM e CPCM – intervalos: *t* = 32h e 15 min, *t* = 32 h e 30 min, *t* = 32 h e 45 min e *t* = 33 h, dia 7 de Abril, em Faro.

Intervalo	1/8 Célula de teste SPCM Revestimento interior: argamassa de referência REF	1/8 Célula de teste CPCM Revestimento interior: argamassa com PCM
t = 32 horas e 15 minutos		
t = 32 horas e 30 minutos		
t = 32 horas e 45 minutos		
t = 33 horas		

6.7 Conclusões

A simulação numérica preconizada para este capítulo foi realizada com três grandes objetivos:

— A resolução numérica do problema matemático de transferência de calor em materiais de mudança de fase com recurso ao método dos elementos finitos, numa análise tridimensional (3D);

— A validação da capacidade de simulação numérica do novo material desenvolvido (argamassa com PCM), por comparação dos resultados obtidos por via experimental com os resultados obtidos numericamente;

— Avaliação de algumas das potencialidades da ferramenta numérica na forma de tratamento e apresentação de resultados.

As temperaturas monitorizadas no interior das células de teste SPCM e CPCM durante a campanha experimental (Capítulo 4) foram comparadas com os valores resultantes da simulação numérica, através do método dos elementos finitos, recorrendo à discretização 3D, e os resultados obtidos revelaram uma significativa coerência de valores. Foi ainda possível a aplicação do método da radiação solar, tendo-se aproximado a resolução numérica dos ensaios experimentais realizados *in situ*, sem descuidar a observação do efeito dos PCM.

Em conclusão, as bases para a simulação numérica adequada de materiais de construção contendo materiais de mudança de fase foram estabelecidas. Os resultados obtidos na modelação numérica do novo material desenvolvido experimentalmente (argamassa com PCM) permite a realização de análises paramétricas sobre a célula de teste CPCM e a extrapolação da análise para a escala real. Na procura de soluções construtivas contendo PCM que garantam o desempenho térmico adequado em edifícios ou espaços interiores, à escala real, realizar-se-ão análises paramétricas para a estação de arrefecimento, tendo-se analisado o comportamento de uma célula de teste, à escala real, durante o período correspondente ao mês de agosto.

Capítulo 7 Análises Paramétricas

7.1 Introdução

Os ensaios experimentais, descritos no Capítulo 4 e a resolução numérica do problema de transferência de calor associado aos PCM (*v.* Capítulos 5 e 6) constituíram as peças fundamentais para a realização das análises paramétricas desenvolvidas neste capítulo. Assim, a extrema consonância entre os valores resultantes da monitorização experimental e os valores dos resultados numéricos (*v.* secção 6.5) deram a confiança necessária na ferramenta numérica utilizada, essencial à realização de análises paramétricas.

A alteração do desempenho térmico dado pela célula de teste CPCM quando revestida com uma argamassa com PCM, dotados de diferentes características, permitirá avaliar a influência da entalpia e da temperatura de fusão na eficácia do PCM. Conhecida a influência das características do PCM sobre o comportamento térmico dos espaços interiores fez-se a extrapolação, simulando-se uma célula de teste à escala real para as condições climáticas correspondentes a um mês (31 dias consecutivos) da estação de arrefecimento.

As análises paramétricas desenvolvidas tiveram como principais objetivos:

— Avaliar a influência das características do PCM utilizado sobre o comportamento térmico dos espaços interiores (célula de teste CPCM);

— Analisar a resposta térmica de um espaço interior à escala real submetido às condições climáticas do mês de agosto (mês da estações de arrefecimento).

Nas análises mencionadas, foi utilizado o método dos elementos finitos (MEF) como suporte à modelação térmica, considerando uma análise tridimensional (3D) do problema de transferência de calor.

7.2 Células de teste CPCM: modelação do PCM

7.2.1 Análises paramétricas realizadas

Com o intuito de compreender a influência da alteração das características do PCM no comportamento térmico de espaços interiores, as primeiras análises paramétricas realizadas incidiram sobre as células de teste estudadas experimentalmente (*v.* Capítulo 4) e simuladas numericamente (*v.* Capítulo 6), tendo-se estudado três situações distintas:

— Estudo do efeito da variação da entalpia de fusão do PCM;

— Estudo do efeito da variação do intervalo de temperaturas de fusão do PCM;

— Estudo do efeito da variação, em simultâneo, da entalpia e do intervalo de temperaturas de fusão do PCM.

7.2.2 Estudo do efeito da variação da entalpia de fusão do PCM

De acordo com o referido anteriormente, a sensação de conforto térmico de um espaço interior é transmitida pela estabilização das temperaturas num determinado nível (20 ºC, na estação de aquecimento, ou 25 ºC, na estação de arrefecimento). As primeiras análises paramétricas realizadas tiveram como objetivo avaliar se o aumento da entalpia de fusão do PCM poderia afetar o período de estabilização de temperaturas no interior da célula de teste CPCM, para o intervalo de fusão considerado (23 ºC a 25 ºC). A resposta dada pela célula de teste CPCM foi simulada numericamente para o cenário de evolução de temperaturas no tempo correspondente ao dia 7 de Abril em Faro, considerando uma argamassa com uma entalpia de ΔH = 50kJ/kg, o dobro do estudado anteriormente por via experimental e numérica. Os resultados obtidos encontram-se representados no gráfico da Figura 7.77.

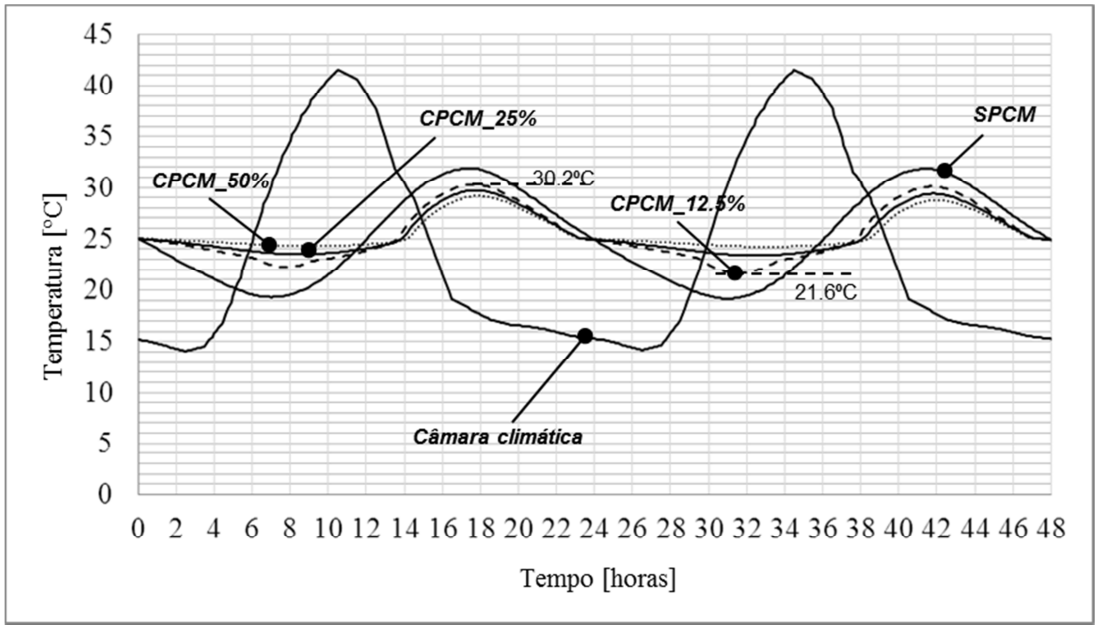


Figura 7.77 — Simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM (ΔH = 12,5 kJ/kg; ΔH = 25 kJ/kg; ΔH = 50 kJ/kg).

Comparando a resposta dada pela célula de teste CPCM quando revestida com uma argamassa de entalpia ΔH = 50kJ/kg com a célula de teste com PCM de entalpia ΔH = 25kJ/kg, observam-se diferenças muito reduzidas. De facto, as temperaturas no interior da célula CPCM (argamassa de 50 kJ/kg) são mantidas entre os 23 ºC e os 25 ºC durante sensivelmente o mesmo período de tempo (aproximadamente 15 horas por cada ciclo de 24 horas) e os picos de temperatura máxima registados fora do intervalo de fusão não são evitados. Apenas se registam ligeiros aumentos na temperatura mínima (ΔT = 0,3ºC) e um decréscimo de 0,5 ºC na temperatura máxima. O pico de temperaturas máximo calculado para o PCM de ΔH = 50 kJ/kg foi de 29,7 ºC, enquanto a temperatura máxima atingida pela célula CPCM, com argamassa de ΔH = 25kJ/kg, foi de 30,2 ºC.

Tendo em atenção os resultados obtidos, considerou-se a utilização de uma argamassa com apenas 12,5 kJ/kg de entalpia. Os resultados representados na Figura 7.77 revelaram que, apesar da célula de teste CPCM apresentar um comportamento semelhante, o efeito do PCM com ΔH = 12,5 kJ/kg é ligeiramente inferior. As temperaturas no interior da célula revestida a uma argamassa com menor entalpia (de 12,5 kJ/kg) são mantidas no intervalo de temperaturas de fusão (23 ºC a 25 ºC) durante um período de tempo mais curto: Δt = 9 h. Além disso, as temperaturas

máximas ultrapassam o limite de 25 ºC, imposto pela temperatura de fusão e a temperatura mínima atinge valores de 21,6 ºC, sendo inferior a 23 ºC.

As análises paramétricas realizadas confirmam que, para determinadas condições climáticas e para determinados materiais utilizados na envolvente, há uma entalpia de fusão mínima para o PCM que assegura o desempenho ótimo. O desempenho está relacionado com a capacidade em manter as temperaturas registadas no interior de um espaço dentro de certos limites, dados pela gama de temperaturas de fusão. A variação da entalpia influência os picos máximos e mínimos de temperatura registados e contribui para o aumento ou diminuição dos períodos de tempo em que a temperatura interior é mantida no intervalo de temperaturas de fusão, isto é, no intervalo de conforto considerado.

7.2.3 Estudo do efeito da variação do intervalo de temperaturas de fusão do PCM

No cenário imposto pelas condições climáticas consideradas para o dia da estação de arrefecimento, estudado experimentalmente, a célula de teste SPCM registou uma variação da temperatura interior entre os 18 ºC e os 32 ºC (*v.* Figura 7.78), sendo a temperatura média registada no interior da célula de 25 ºC. De acordo com os estudos publicados por Neeper (Neeper 1999) ou por Xu *et al.* (Xu et al. 2005), esta temperatura, sendo equivalente à temperatura média interior, corresponde à temperatura ótima de fusão.

Assim, mantendo a quantidade de PCM estudadas, ou seja, uma argamassa de reboco interior com 25 kJ/kg de entalpia de fusão, avaliou-se o comportamento da célula de teste CPCM para um intervalo de fusão distinto, nomeadamente entre os 24 ºC e os 26 ºC, portanto com 25 ºC de temperatura média.

Tendo em atenção os resultados obtidos (*v.* Figura 7.78) e comparando a utilização de uma argamassa com PCM de entalpia ΔH = 25 kJ/kg e intervalo de fusão de 23 ºC a 25 ºC com uma argamassa semelhante mas com um intervalo de fusão entre os 24 ºC e os 26 ºC, conclui-se que a solução alternativa, de utilização de um PCM com este último intervalo de fusão, garante um pico de temperaturas máximo, de T = 28ºC, ou seja, 2 ºC inferior, quando comparado com o pico de temperaturas atingido no interior da célula CPCM para um intervalo de fusão de 23 ºC a 25 ºC (que foi de T = 30,2 ºC). O período de tempo em que a atuação do PCM se verifica é semelhante,

sendo o intervalo de tempo correspondente de Δt = 15 horas. No entanto, a flutuação de temperaturas no interior da célula com PCM de 24-26ºC de intervalo de fusão é menor: entre os 22,5 ºC e os 28 ºC, com uma flutuação de ΔT = 5,5 ºC, enquanto no interior da célula de teste com o PCM original (com temperaturas de fusão entre os 23 – 25 ºC) a flutuação de temperaturas é de ΔT = 7 ºC, entre os 23 ºC e os 30 ºC.

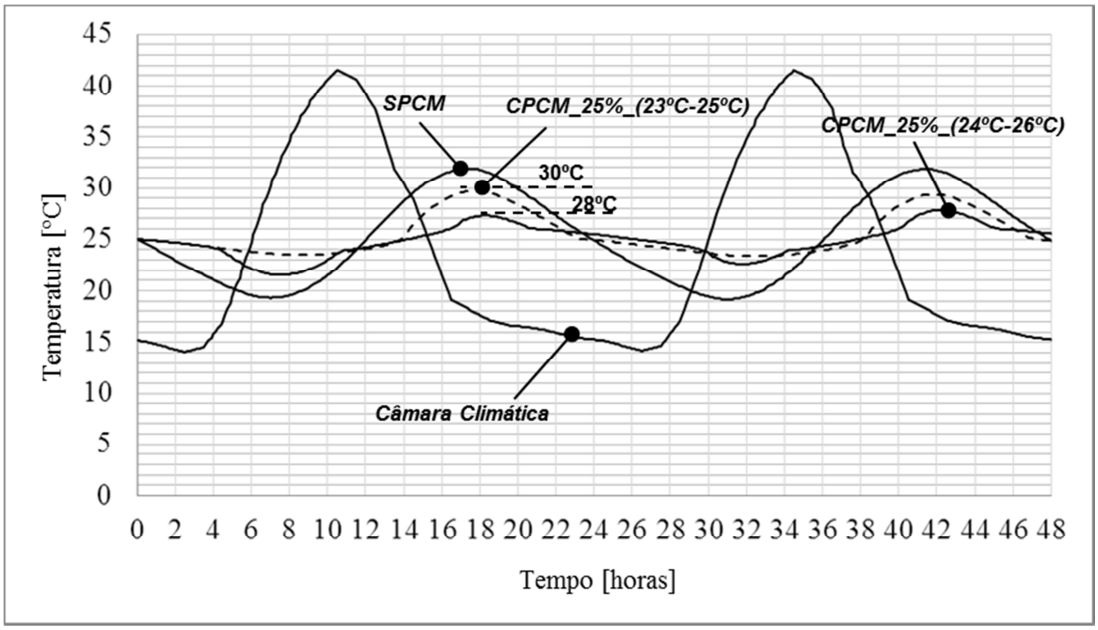


Figura 7.78 — Simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM (ΔH = 25 kJ/kg: T_1(23-25ºC) ou T_1(24-26ºC)).

7.2.4 Estudo do efeito da variação da entalpia e do intervalo de temperaturas de fusão do PCM

Tendo-se concluído que a resposta do PCM com intervalo de fusão entre os 24ºC e os 26ºC era a mais eficaz, avaliou-se a influência do aumento da entalpia de fusão na argamassa sobre o comportamento da célula de teste CPCM quando sujeita às condições climáticas fixadas. No gráfico da Figura 7.79 compara-se a resposta dada na simulação das temperaturas interiores de células de teste CPCM quando revestidas a argamassa de PCM com entalpia de fusão de 50 kJ/kg e intervalos de fusão distintos: 23-25ºC e 24-26ºC.

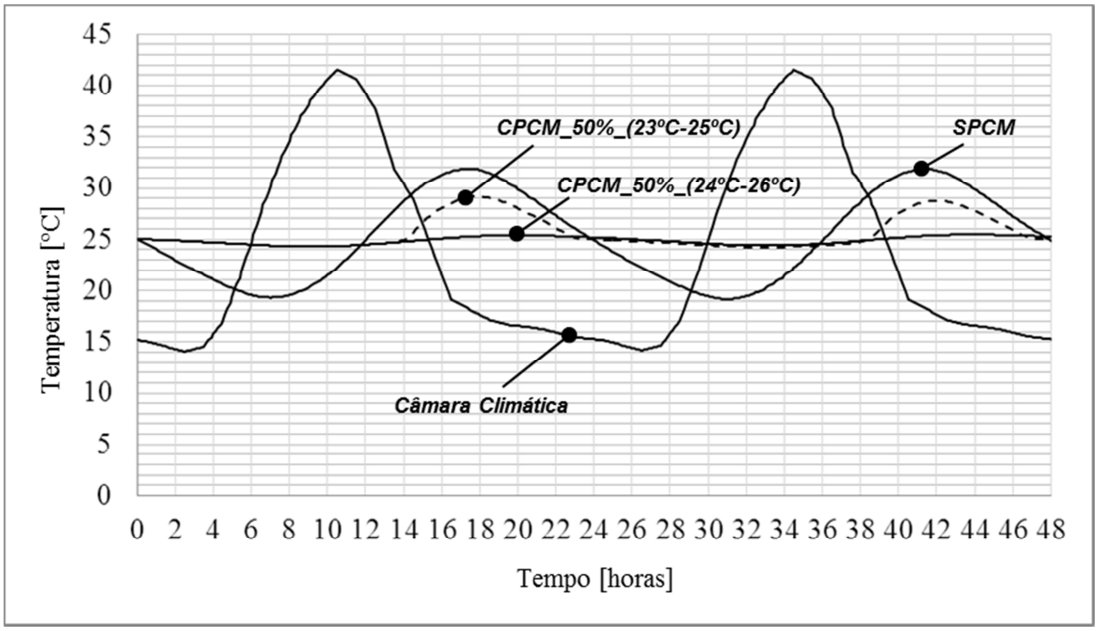


Figura 7.79 — Simulação numérica das temperaturas no interior das células de teste SPCM e CPCM (ΔH= 50 kJ/kg: T_1 (23-25ºC) ou T_1 (24-26ºC)).

A maior entalpia (50 kJ/kg) para a gama de temperaturas de fusão de 24-26ºC garante que as temperaturas no interior da célula de teste CPCM são mantidas no intervalo de fusão durante todo o ciclo de 24 horas, demonstrando-se que, de facto, para o cenário estudado, este seria o comportamento ótimo. A quantidade de PCM considerada para a célula de teste em estudo com uma temperatura de fusão média equivalente à temperatura interior média da mesma célula sem PCM (SPCM) garante um efeito contínuo do PCM, com amplitudes térmicas interiores de apenas 2 ºC (no intervalo de temperaturas de fusão) ao longo de todo o ciclo diário de temperaturas imposto (24 horas/dia). No entanto, este não deve ser considerado como o PCM ótimo, para aquela solução construtiva, já que pequenas alterações nas condições climáticas estudadas influenciam a resposta dada pelo PCM aplicado às células em estudo. Cada solução contendo PCM deve ser desenhada para responder às distintas condições climáticas a que um dado edifício pode estar sujeito. Podendo ser projetado para toda uma estação ou apenas para condições climáticas atípicas, de modo a apresentar um desempenho ideal, no intervalo de temperaturas de conforto, durante o maior período de tempo possível.

7.3 Células de teste à escala real: modelação de paredes

7.3.1 Introdução

As análises paramétricas aqui apresentadas foram realizadas com o intuito de observar o efeito da argamassa com PCM (cujo desenvolvimento se descreveu no Capítulo 3) quando utilizada no revestimento interior das paredes de fachada de uma célula de teste à escala real. Para tal, aplicou-se o método de resolução numérica de transferência de calor apresentado no Capítulo 5, e validado no Capítulo 6, ao estudo comparativo entre duas células de teste à escala **r**eal, uma **S**em **PCM**, designada por 'SPCMr', e outra **C**om **PCM**, a 'CPCMr'. Considerou-se que a envolvente exterior das células é definida por duas fachadas opostas, Este-Oeste, espaçadas de 4 metros, e que os restantes elementos que a confinam (lajes, superior e inferior, e paredes laterais, Norte e Sul) estão em contacto com espaços igualmente aquecidos. Assim, apenas se consideraram trocas de calor entre a célula de teste e o meio ambiente exterior através dos elementos da fachada Este e da fachada Oeste (*v.* Figura 7.80).

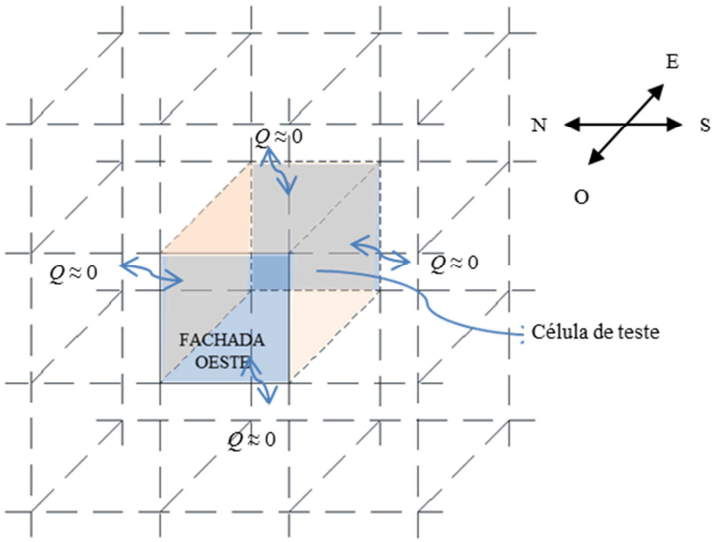


Figura 7.80 — Célula de teste com duas fachadas opostas de orientação Este-Oeste.

Através da simulação numérica fez-se a análise comparativa da resposta dada pelas células de teste SPCMr e CPCMr quando sujeitas às condições climáticas de 31 dias consecutivos de um mês da estação de arrefecimento (o mês de agosto), tanto para a zona climática de verão V_1 (Porto) como para a zona climática V_2 (Lisboa).

7.3.2 Formulação e condições de exposição

No tratamento numérico do problema associado à condução de calor através dos materiais constituintes das paredes de fachada (argamassa de revestimento, betão armado e isolamento térmico), à semelhança do considerado na modelação numérica das células de teste SPCM e CPCM (*v.* secção 6.2), adotou-se a equação geral da condução de calor escrita em função do tempo *t* e das coordenadas espaciais *x*, *y* e *z* na forma traduzida pela Equação (5.12):

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Ao tratamento numérico da camada de argamassa com PCM aplicou-se o método da entalpia descrito na subsecção 5.2.3 e traduzido pela Equação (5.13):

$$\rho \frac{\partial H(T)}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Os fenómenos de convecção e radiação foram considerados nas condições-fronteira aplicadas ao modelo térmico através da utilização da Equação (5.29):

$$q_h'' = h_{eq} (T_s - T_f)$$

A resolução do problema matemático exposto recorreu ao **M**étodo dos **E**lementos **F**initos (MEF), numa análise tridimensional (3D) do problema de transferência de calor (*v.* subsecção 5.6.2). A formulação descrita foi implementada no programa DIANA (TNO DIANA BV 2010). Na modelação das células de teste SPCMr e CPCMr utilizaram-se **E**lementos **F**initos (EF) quadriláteros de oito nós com 2 × 2 × 2 pontos de integração (nos nós). Para as fronteiras não adiabáticas foram adotados elementos quadriláteros de quatro nós com 2 × 2 pontos de integração.

7.3.3 Propriedades térmicas utilizadas na modelação

As trocas de calor entre as células de teste SPCMr e CPCMr e o meio envolvente fazem-se apenas através das paredes de fachada Este e Oeste. Estas paredes são constituídas por uma argamassa de revestimento interior (com ou sem PCM), uma parede de betão armado e uma camada exterior de isolamento térmico (XPS). As propriedades térmicas das camadas constituintes das células de teste à escala real consideradas nas análises paramétricas desenvolvidas foram análogas às adoptadas no estudo das células de teste SPCM e CPCM (*v.* Talela 6.16, secção 6.3).

7.3.4 Geometria e parâmetros utilizados na modelação

A modelação numérica de um espaço interior limitado exteriormente por duas fachadas verticais opacas e opostas, uma com orientação Este e outra Oeste, passou pela utilização da discretização 3D, considerando fronteiras adiabáticas nas restantes extremidades (nas lajes, superior e inferior, e nas paredes laterais Norte e Sul), válidas se se considerar apenas trocas de calor com o exterior (através dos elementos de fachada). Assim, a modelação recorreu ao desenho de duas paredes separadas por um espaço de ar de 4 metros. As paredes simuladas apresentam, do exterior para o interior: 4 cm de isolamento térmico (XPS), 20 cm de parede de betão, e 3 cm de argamassa de revestimento interior (com e sem PCM), de acordo com o esquema representado na Figura 7.81. O conjunto dos elementos representados foi modelado com uma espessura de 5 cm.

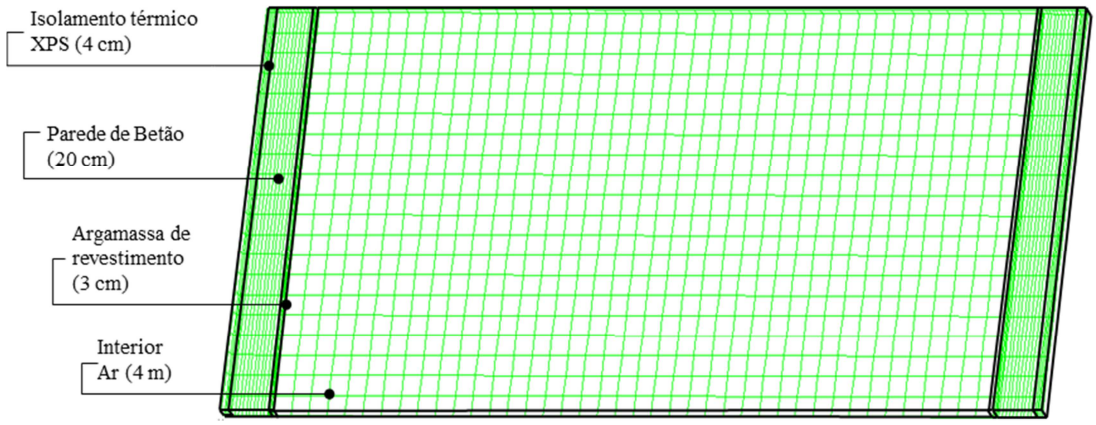


Figura 7.81 — Modelo de um espaço interior confinado exteriormente por duas paredes verticais opostas, com orientação Este-Oeste.

Um valor de h_{eq} = 15 W/(m·K) foi considerado para o coeficiente de convecção. Nas extremidades do modelo foram consideradas fronteiras adiabáticas. A temperatura inicial no interior das células foi fixada em 20 ºC, para os dias que simulam as condições climáticas do mês de agosto no Porto e em Lisboa. As análises térmicas foram realizadas abrangendo um período de 31 dias, dividido em incrementos de 15 minutos. A evolução das temperaturas e da radiação solar programadas foram estimadas de acordo com os valores da temperatura ambiente exterior e da radiação solar global incidente em superfícies verticais orientadas a Este e a Oeste resultantes

dos valores de referência, para o mês de agosto, no Porto e em Lisboa (US Department of Energy 2012). Esses valores são valores médios horários e estão representados nos gráficos das Figuras 7.82 e 7.83. O coeficiente de absorção solar, α_s, considerado para as superfícies exteriores das paredes verticais foi de 0,6. A resistência térmica superficial exterior de R_{se} = 0,04 ($m^2 \cdot K$)/W foi considerada de acordo com a informação técnica ITE50 (Santos e Matias 2007).

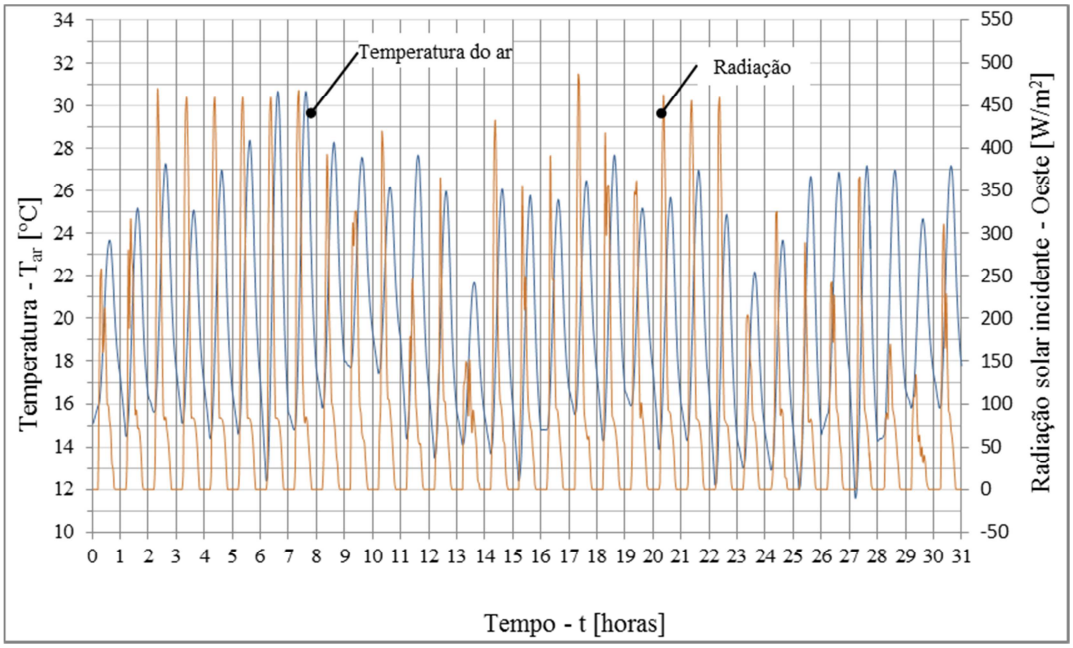


Figura 7.82 — Condições climáticas simuladas numericamente durante o mês de agosto, no Porto.

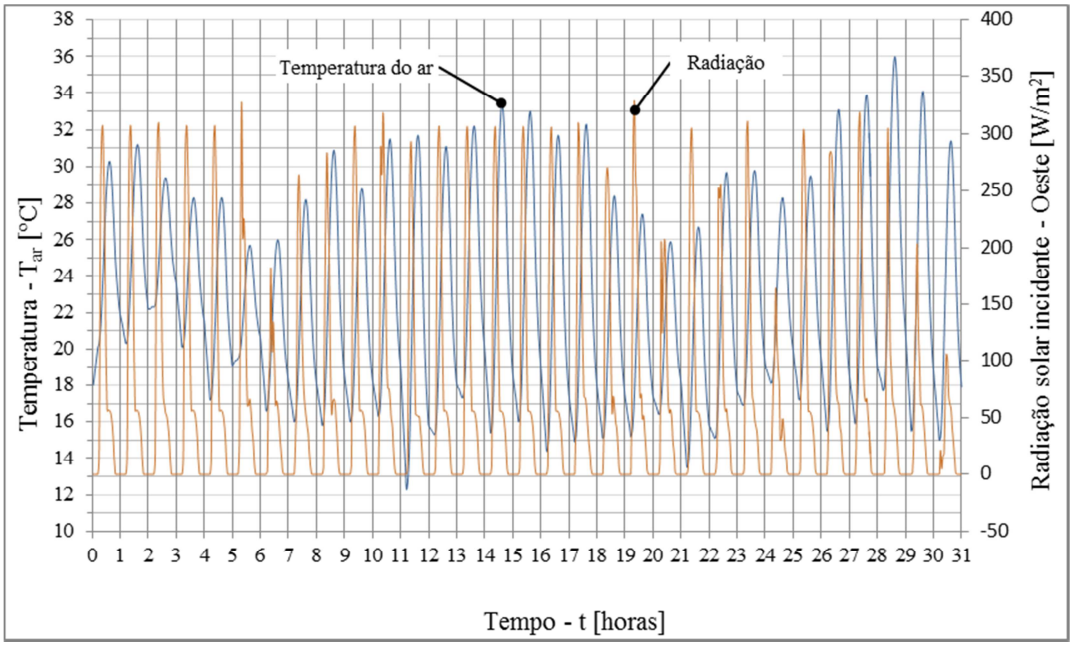


Figura 7.83 — Condições climáticas simuladas numericamente durante o mês de agosto, em Lisboa.

7.3.5 Análise dos resultados numéricos obtidos

7.3.5.1 Resultados numéricos: Porto, mês de agosto

Os valores das temperaturas registadas no interior do espaço confinado por duas fachadas opostas sujeitas às condições climáticas (temperatura e radiação solar) consideradas para o Porto durante o mês de agosto, encontram-se representados nos gráficos das Figuras 7.84 e 7.85. Na Figura 7.84, representam-se os valores da temperatura simulados numericamente, ou seja, a temperatura superficial exterior da face Oeste, no eixo das ordenadas da direita, e as temperaturas interiores adjacentes à camada de revestimento das paredes (orientadas a Oeste) revestidas a argamassa com e sem PCM, no eixo das ordenadas da esquerda. A análise dos resultados numéricos obtidos permite observar claramente a atuação dos PCM. Assim, até se atingir a temperatura de 23 ºC, correspondente à temperatura de fusão do PCM, as temperaturas superficiais interiores registadas nos compartimentos SPCMr e CPCMr são idênticas. A partir dos 23 ºC, o comportamento é claramente distinto. Na face interior da parede orientada a Oeste da célula de teste CPCMr, a flutuação diária de temperatura é inferior a 0,3 ºC, apresentando uma amplitude térmica máxima de $\Delta T \approx 1{,}5$ ºC, entre os 23 ºC e os 24,5 ºC, ao longo dos vários dias simulados. Na

superfície da parede orientada a Oeste da célula de teste SPCMr, a flutuação diária da temperatura é de aproximadamente 0,8 ºC e a amplitude térmica (acima dos 23 ºC) registada ao longo dos vários dias simulados é de $\Delta T \approx 3$ºC, entre os 23 ºC e os 26 ºC.

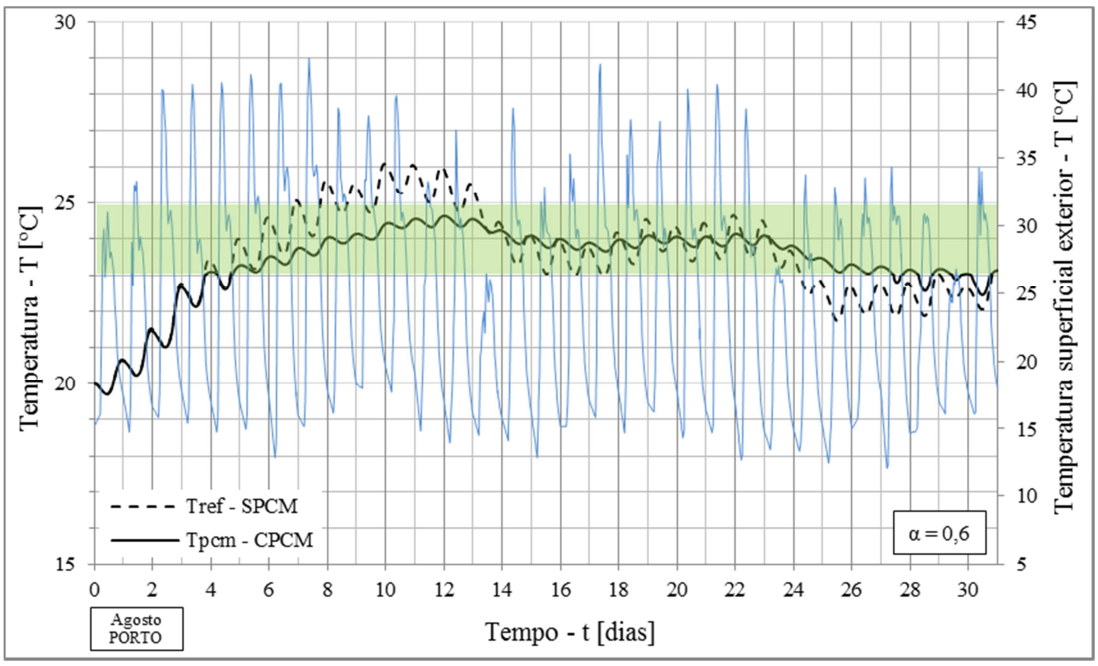


Figura 7.84 — Simulação numérica das temperaturas na face do revestimento interior das células de teste SPCMr e CPCMr, mês de agosto, Porto.

Na análise dos resultados simulados para um ponto equidistante das duas paredes em análise (*v.* Figura 7.85), verifica-se uma maior estabilização das temperaturas interiores face aos resultados obtidos na simulação das temperaturas adjacentes à superfície de resvestimento interior, quer na célula de teste SPCMr, quer na célula de teste CPCMr. Na análise comparativa entre os resultados simulados para o centro das células de teste SPCMr e CPCMr, importa realçar que a temperatura interior do espaço com PCM é sempre inferior ao limite máximo de conforto imposto, 25 ºC, enquanto que no espaço sem PCM esse limite é ultrapassado durante 6 dias consecutivos.

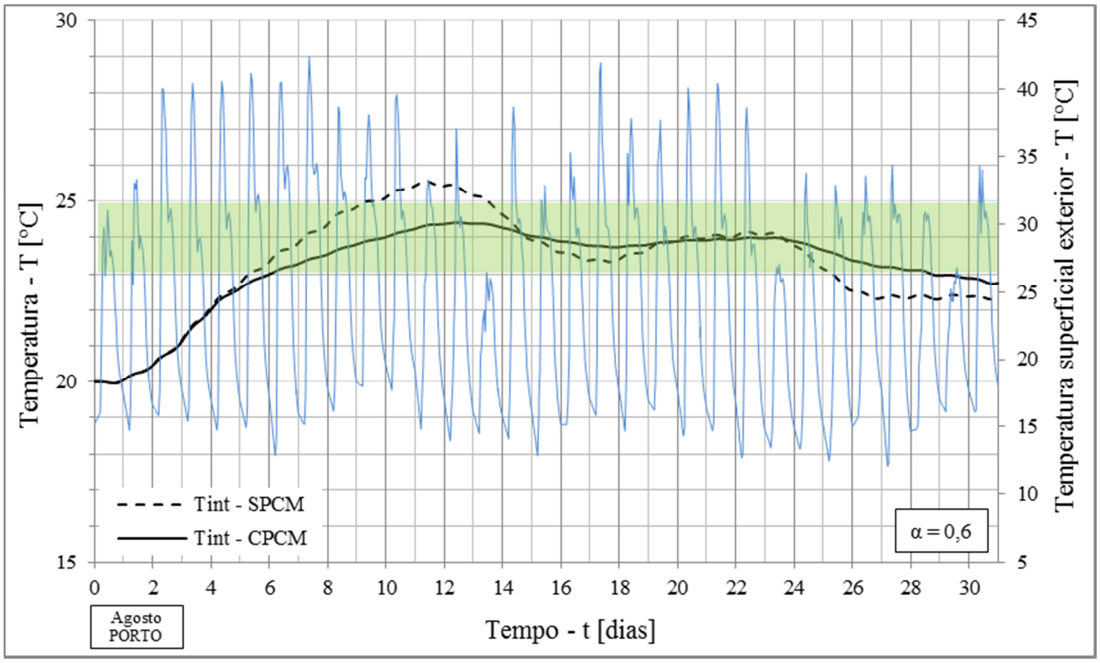


Figura 7.85 — Simulação numérica das temperaturas no centro das células de teste SPCMr e CPCMr, mês de agosto, Porto.

7.3.5.2 Resultados numéricos: Lisboa, mês de agosto

Os valores das temperaturas registadas no interior do espaço confinado por duas paredes opostas sujeitos às condições climáticas (temperatura e radiação solar) consideradas para Lisboa durante o mês de agosto, estão representados nos gráficos das Figuras 7.86 a 7.92. Na Figura 7.86, apresentam-se os resultados da simulação numérica da temperatura superficial exterior da face Oeste (eixo das ordenadas da direita) e das temperaturas interiores adjacentes à face das paredes das células de teste SPCMr e CPCMr (eixo das ordenadas da esquerda). As temperaturas interiores resultantes das características admitidas para as paredes e para as condições climáticas em estudo são muito elevadas, variando, à exceção dos primeiros dias, entre os 25 ºC e os 28 ºC, aproximadamente. Portanto, as paredes revestidas com o PCM considerado, com uma gama de temperaturas de fusão entre os 23 ºC e os 25 ºC, apresentam um comportamento semelhante ao das paredes sem PCM, logo após a passagem dos 25 ºC (correspondente à temperatura de pico de fusão).

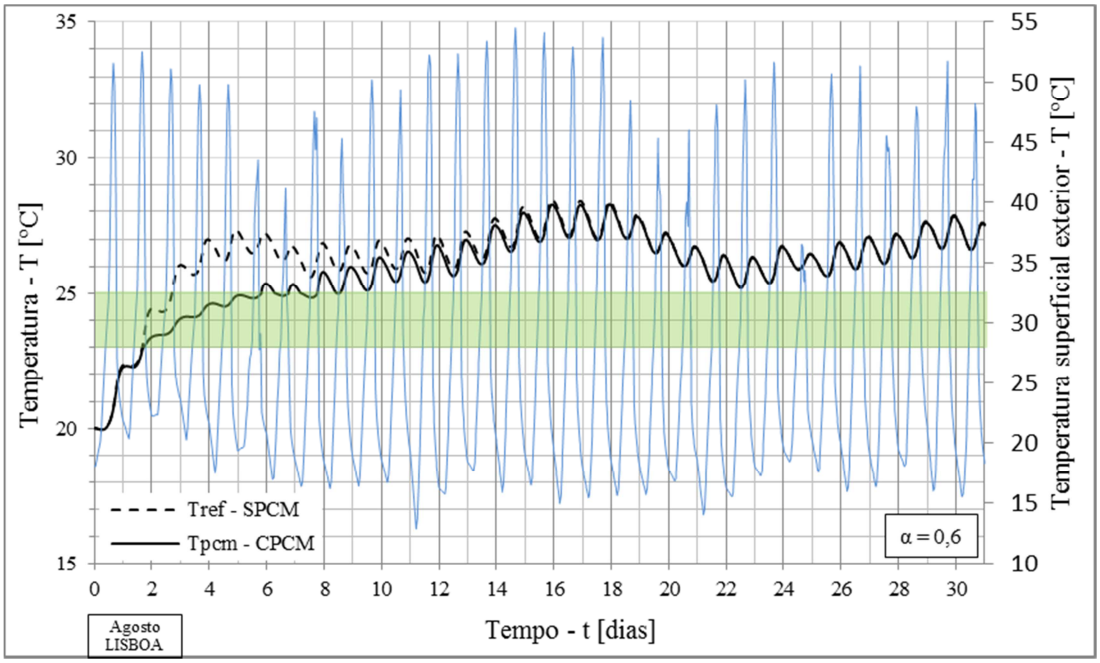


Figura 7.86 — Simulação numérica das temperaturas na face interior das células de teste SPCMr e CPCMr, para α_s = 0,6, durante o mês de agosto, em Lisboa.

Assim, para que a ação do PCM fosse sentida, no cenário imposto, teria que se estudar uma temperatura de fusão correspondente à temperatura média registada no interior da célula de teste SPCMr, ou seja entre os 25 ºC e os 28 ºC. No gráfico da Figura 7.87, apresentam-se os resultados da simulação numérica, admitindo a possibilidade de utilização de um PCM com temperaturas de fusão entre os 26 ºC e os 28 ºC, na célula de teste designada por 'CPCMr2628'. Nos resultados obtidos para o PCM com as novas características (em termos de temperaturas de fusão), representados a vermelho, na Figura 7.87, consegue observar-se claramente o efeito do PCM acima dos 26 ºC. Assim, as temperaturas na face interior da parede revestida a argamassa com PCM variam entre os 26 ºC e os 27 ºC, enquanto que na parede SPCM variam entre os 26 ºC e os 28 ºC. Encontrando-se a gama de temperaturas de fusão considerada acima dos valores admitidos como de conforto para a estação de arrefecimento, esta análise apenas serve para demonstrar que a temperatura do PCM deve estar compreendida entre os valores da temperatura média registados para o interior do espaço sem PCM. O PCM avaliado não é a solução adequada já que as temperaturas interiores registadas ao longo do mês de agosto (*v.* Figura 7.88) ultrapassam o limite de conforto admitido para a estação de arrefecimento, ou seja, os 25ºC, de acordo com o RCCTE (Ministério das Obras Públicas 2006).

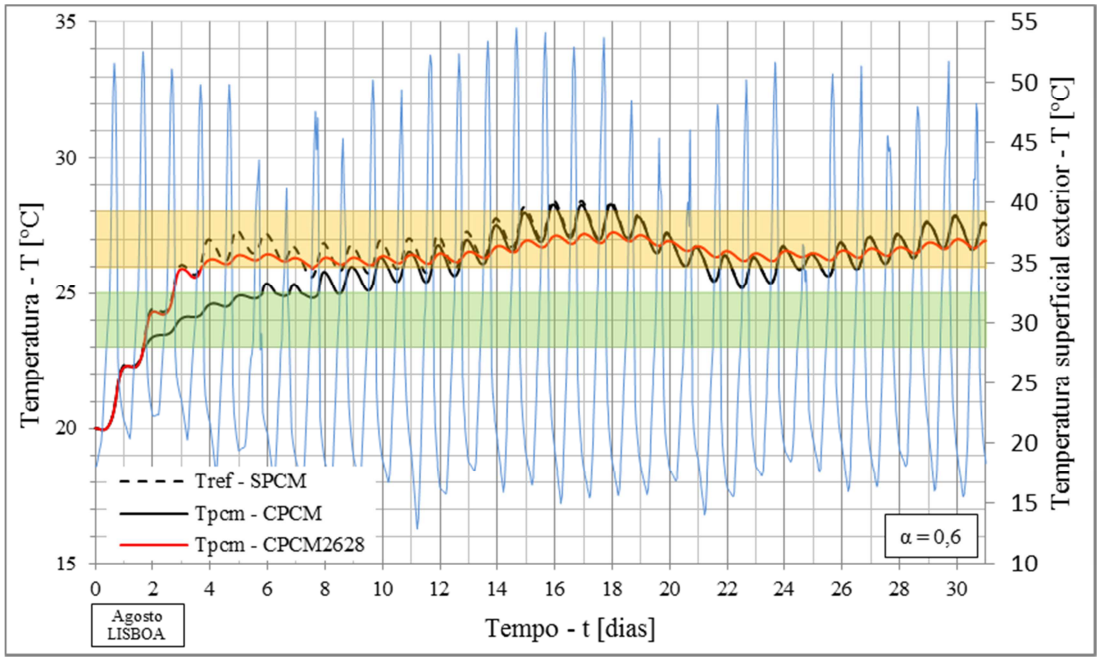


Figura 7.87 — Simulação numérica das temperaturas na face interior das células de teste SPCMr, CPCMr e CPCMr2628, para α_s = 0,6, durante o mês de agosto, em Lisboa.

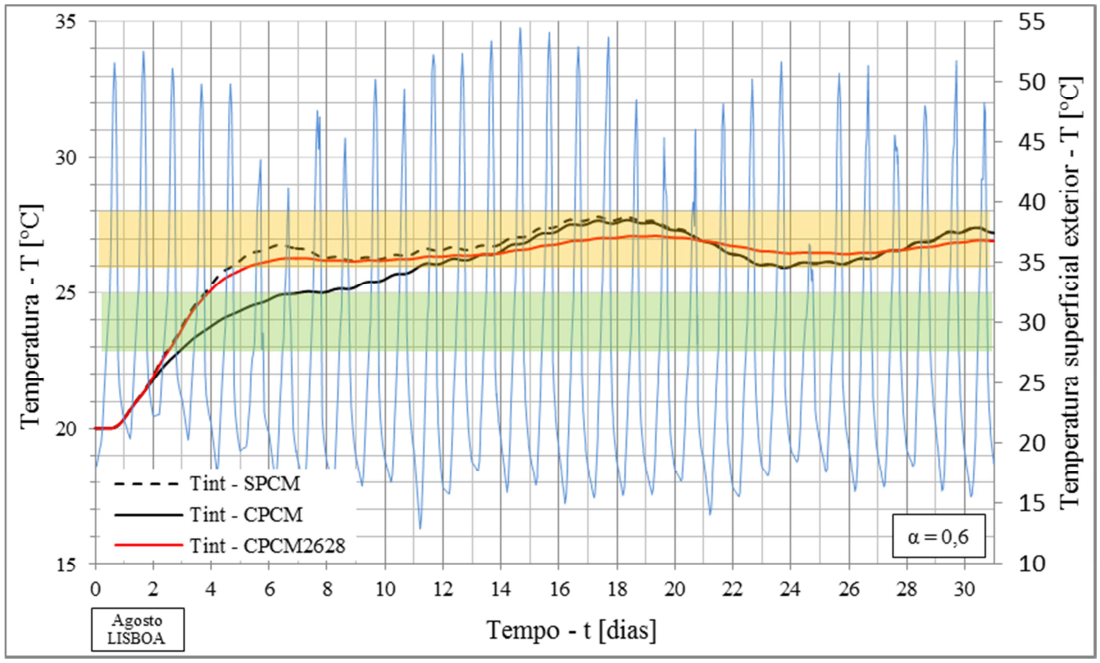


Figura 7.88 — Simulação numérica das temperaturas no centro das células de teste SPCMr, CPCMr e CPCMr2628, para α_s = 0,6, durante o mês de agosto, em Lisboa.

A redução das temperaturas registadas no espaço interior confinado pelos elementos da envolvente em estudo deve ser garantida pelas características dos materiais de construção correntes aplicados à respetiva construção, tentando garantir, com o recurso a esses materiais, temperaturas médias equivalentes à temperatura de conforto de 25ºC. O recurso aos PCM deve ser encarado como tendo em vista a redução de picos de temperaturas interiores (em dias atípicos, excecionalmente quentes) e a atenuação das flutuações das temperaturas interiores (ao longo dos restantes dias).

Com o intuito de reduzir as temperaturas registadas no espaço interior delimitado pelas paredes em análise, sem alterar a sua configuração, alterou-se o valor do coeficiente de absorção solar de α_s = 0,6 para α_s = 0,4. Os resultados representados nos gráficos das Figuras 7.89 e 7.90 demonstram a ação dos PCM ao longo dos vários dias em análise. No entanto, entre os dias 15 e 20 e depois do dia 28, a temperatura de 25 ºC, correspondente ao pico de fusão, é ultrapassada, e, a partir desse valor, a parede da célula de teste CPCMr passa a apresentar um comportamento semelhante ao da parede da célula de teste SPCMr.

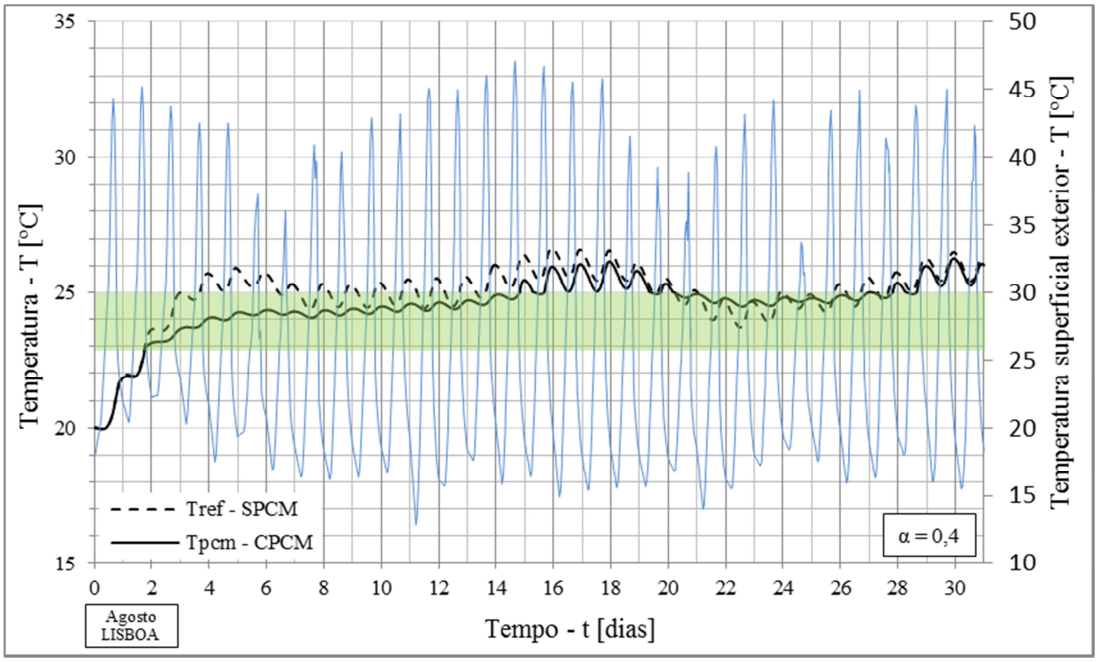


Figura 7.89 — Simulação numérica das temperaturas na face interior das células de teste SPCMr e CPCMr para α_s = 0,4, durante o mês de agosto, em Lisboa.

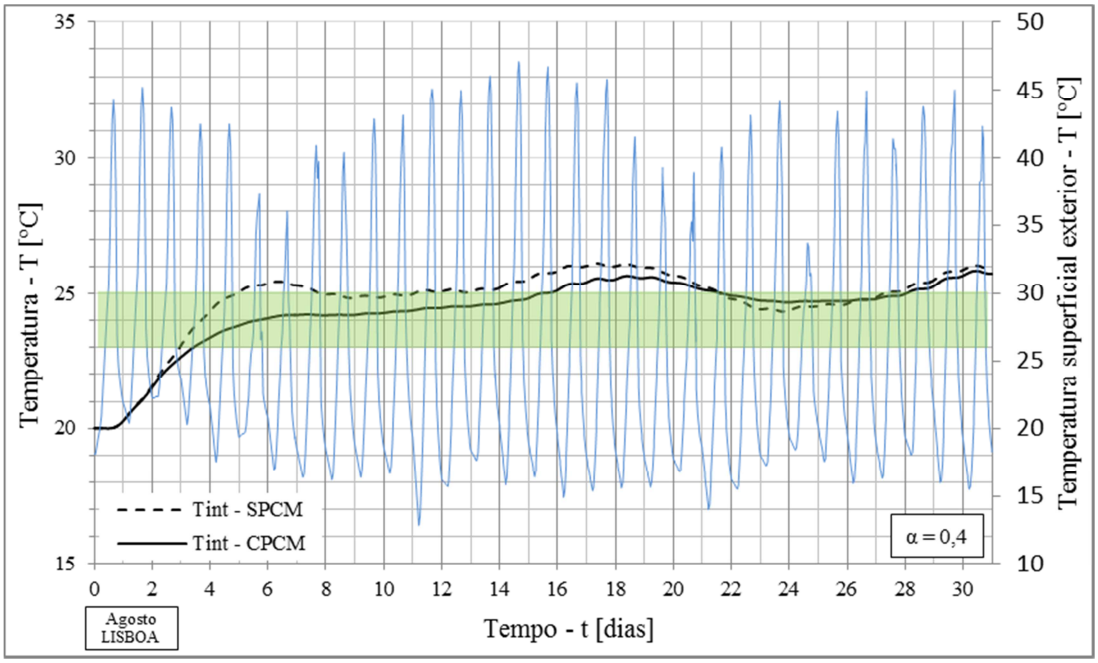


Figura 7.90 — Simulação numérica das temperaturas no centro das células de teste SPCMr e CPCMr para α_s = 0,4, no mês de agosto, em Lisboa.

A introdução de uma maior quantidade de PCM ou de um PCM com uma entalpia mais elevada, correspondente ao dobro da dos PCM considerados inicialmente, ou seja, 50% de PCM (em vez de 25 %) na massa de argamassa desenvolvida ou utilização de uma argamassa com entalpia de 50 kJ/kg (em vez de 25 kJ/kg) faz com que a ação do PCM seja percetível ao longo de todo o período em análise. Assim, as temperaturas no interior do espaço confinado pelas paredes revestidas com o novo PCM considerado, o 'CPCMr+', mantêm-se entre os 23 ºC e os 25 ºC, não sendo ultrapassado o limite de conforto térmico. As flutuações diárias de temperatura são muito reduzidas ($\Delta T \approx 0{,}1$ºC) e a diferença de temperaturas entre o espaço interior da célula de teste SPCMr e da célula de teste CPCMr chega a atingir os 2,5 ºC (*v.* Figuras 7.91 e 7.92).

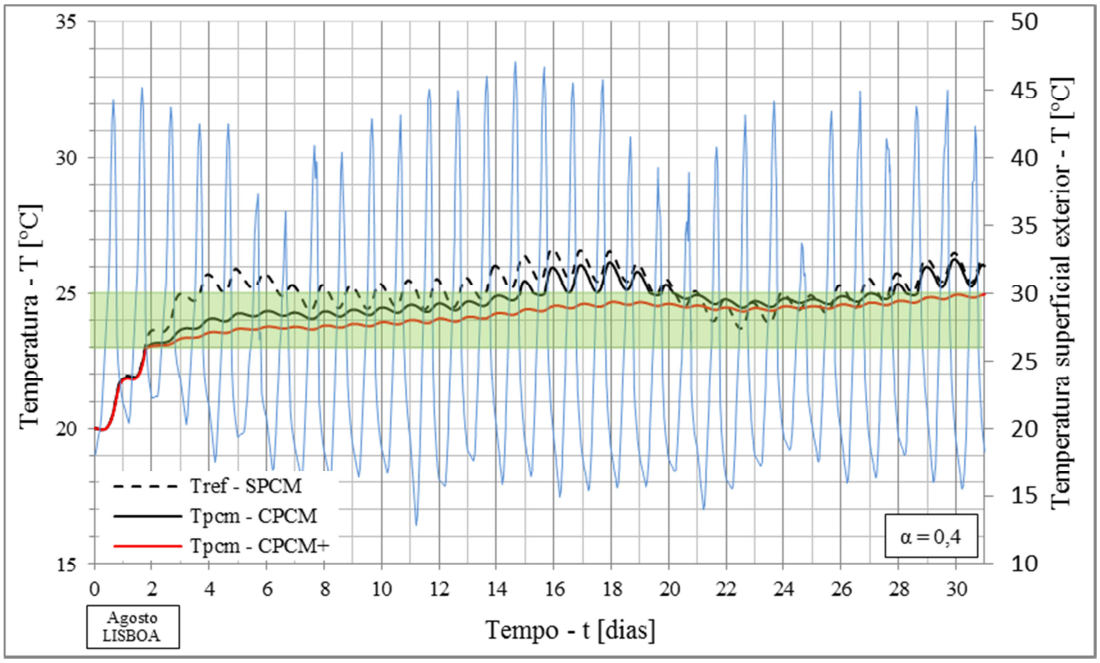


Figura 7.91 — Simulação numérica das temperaturas na face interior das células de teste SPCMr, CPCMr e CPCMr+ para α_s = 0,4, durante o mês de agosto, em Lisboa.

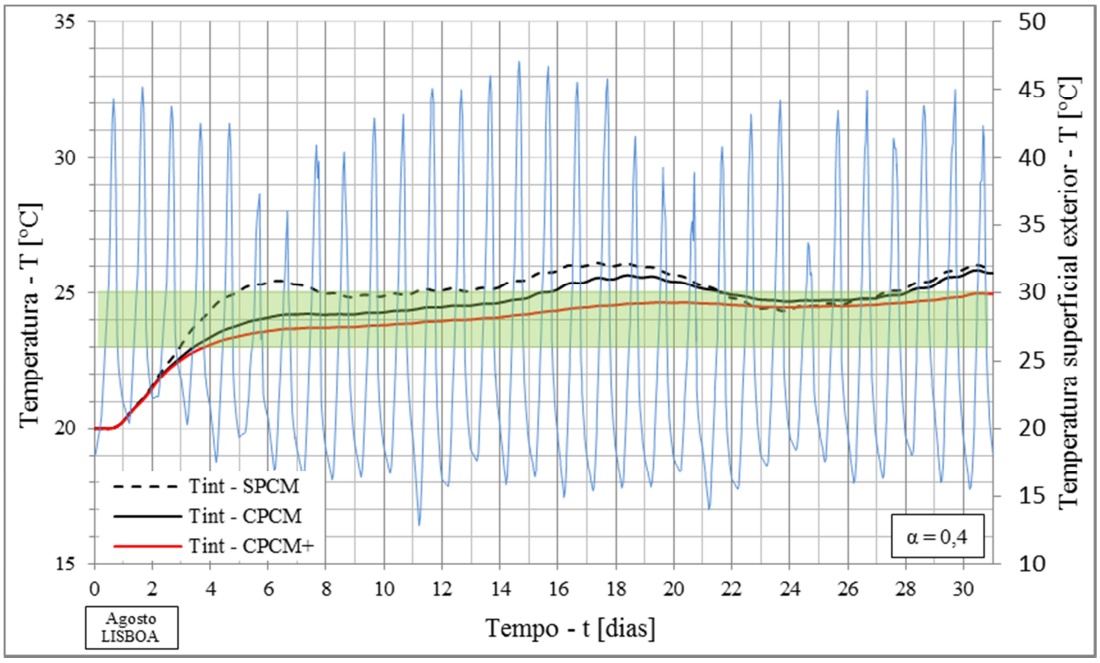


Figura 7.92 — Simulação numérica das temperaturas no centro das células de teste SPCMr, CPCMr e CPCMr+, para α_s = 0,4, durante o mês de agosto, em Lisboa.

7.3.5.3 Análise de mapas de evolução das temperaturas ao longo das paredes das células de teste SPCMr e CPCMr

Os mapas de temperaturas são uma das formas dadas pelo programa DIANA para apresentar resultados. Estes mapas possibilitam, em cada instante, a observação das temperaturas em cada ponto dos elementos em análise. Assim, pode observar-se a distribuição das temperaturas ao longo das paredes modeladas. Nas Tabelas 7.22 e 7.23 estão representadas as distribuições das temperaturas ao longo das paredes orientadas a Oeste das células de teste SPCMr e CPCMr. A análise comparativa entre as paredes das células de teste SPCMr e CPCMr realizada através dos mapas de temperaturas ao longo de um período de tempo selecionado permite visualizar a ação dos PCM inseridos na camada de revestimento interior. Na Tabela 7.23 estão representados os mapas de evolução das temperaturas das paredes orientadas a Oeste das células de teste SPCMr e CPCMr. Pode observar-se como o calor atravessa as várias camadas do elemento construtivo em estudo. Na parede de SPCMr, o calor atravessa gradualmente todas as camadas das paredes até que o revestimento interior atinge a temperatura de aproximadamente 26 ºC. Na parede de CPCMr, quando o revestimento interior atinge o pico de fusão do PCM (25 ºC), estabiliza, limitando o fluxo de calor para o interior, sendo a temperatura atingida por este revestimento, de argamassa com PCM, de aproximadamente 24 ºC.

Tabela 7.22 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: representação das paredes orientadas a Oeste das células de teste SPCMr e CPCMr – intervalo: t = 20 horas, dia 14 de agosto.

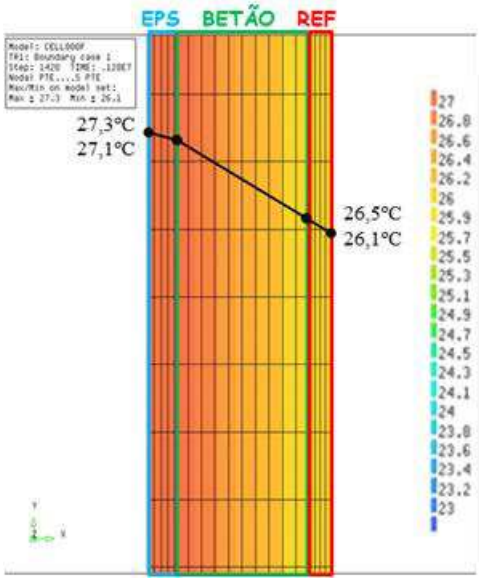
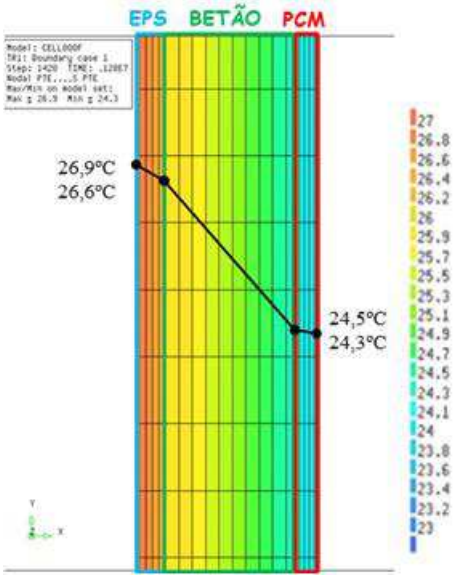
Intervalo	SPCMr	CPCMr
t = 20horas		

Tabela 7.23 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: representação das paredes orientadas a Oeste, SPCMr e CPCMr nos intervalos: t = 14h, t = 15h, t = 16h, t = 17h, t = 18h, t = 19h, t = 20h, t = 21h, t = 22h, t = 23h, t = 24h, dia 14 e t = 1h, dia 15 de agosto.

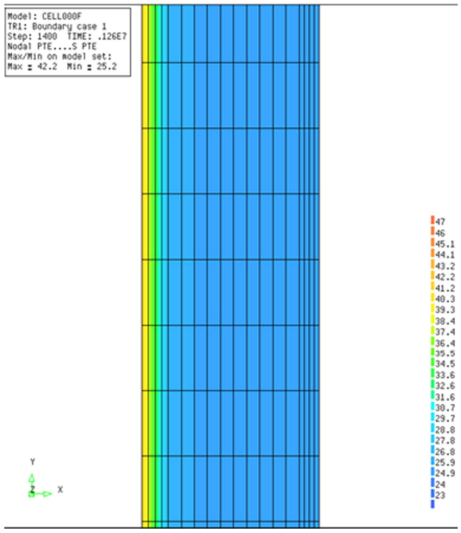
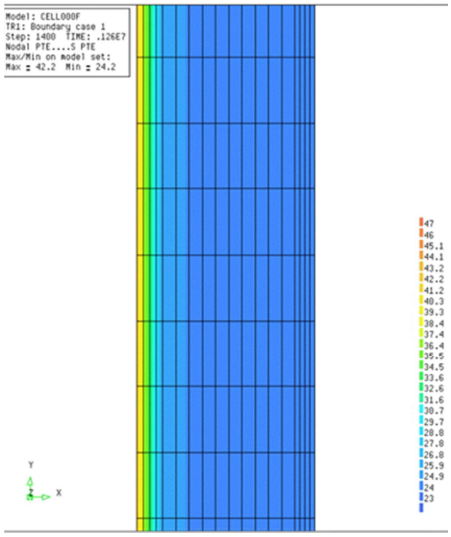
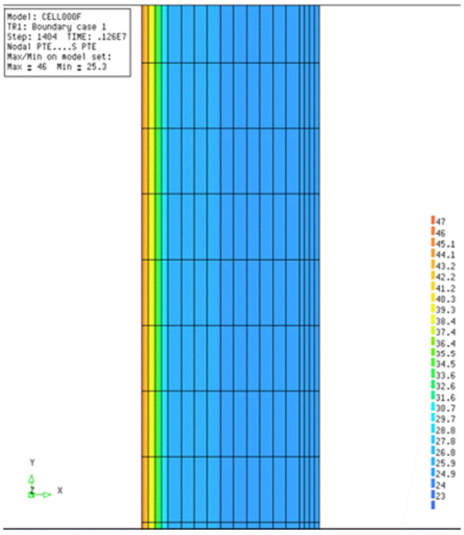
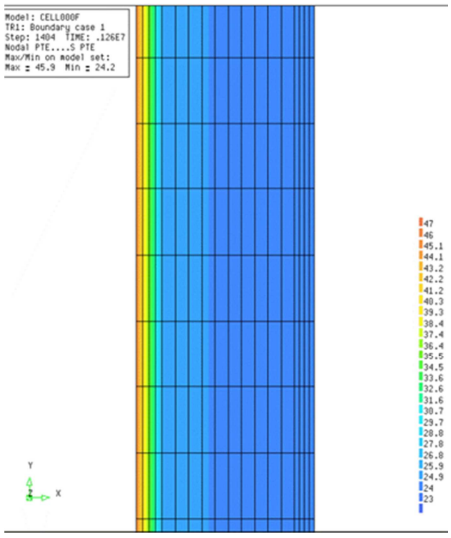
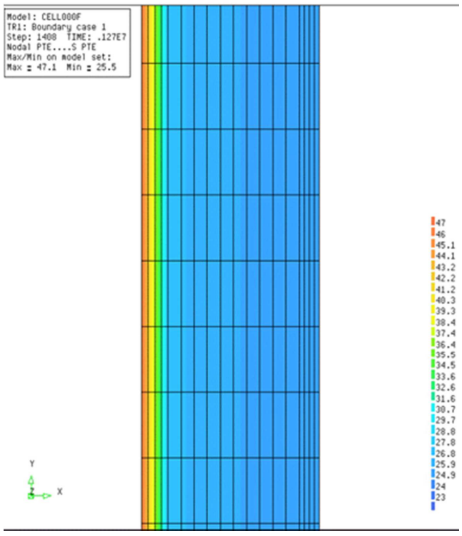
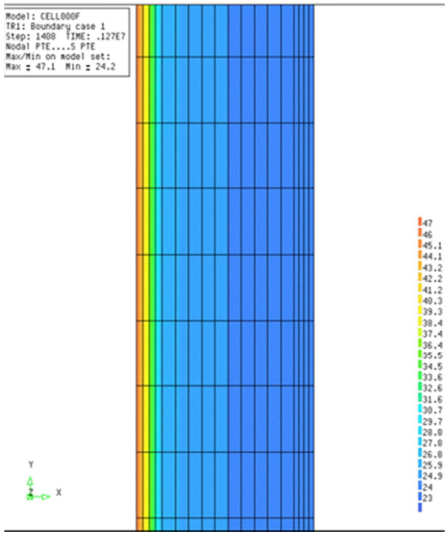
Intervalo	SPCMr	CPCMr
t= 14 horas		
t= 15 horas		
t= 16 horas		

Tabela 7.23 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: representação das paredes orientadas a Oeste, SPCMr e CPCMr nos intervalos: t = 14h, t = 15h, t = 16h, t = 17h, t = 18h, t = 19h, t = 20h, t = 21h, t = 22h, t = 23h, t = 24h, dia 14 e t = 1h, dia 15 de agosto.

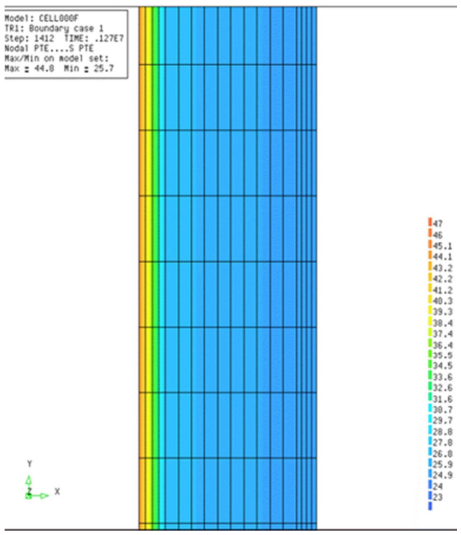
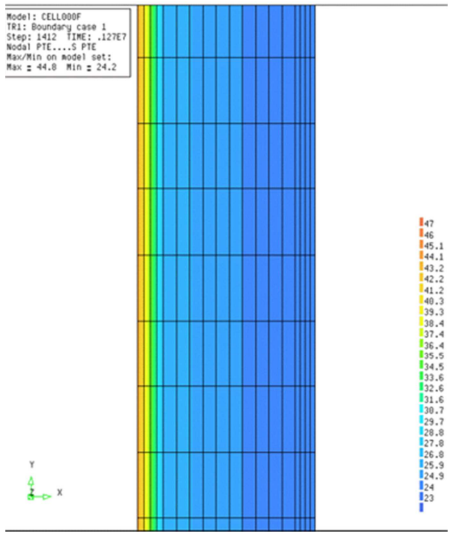
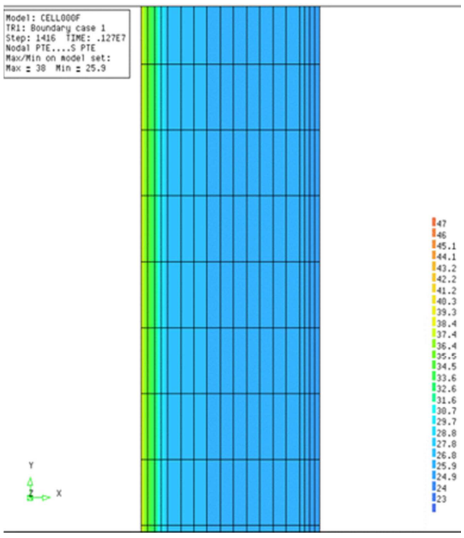
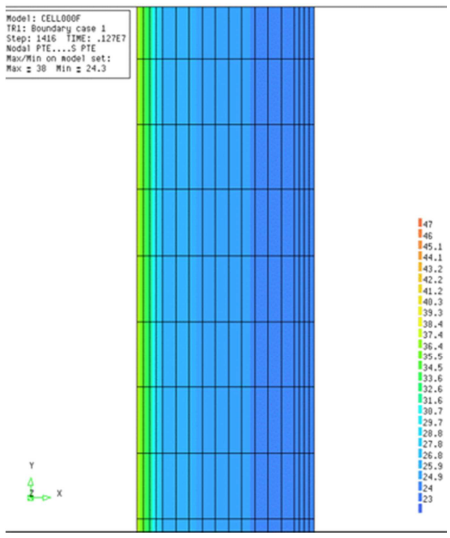
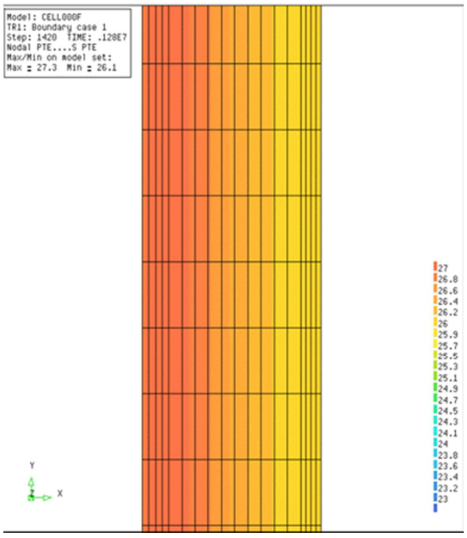
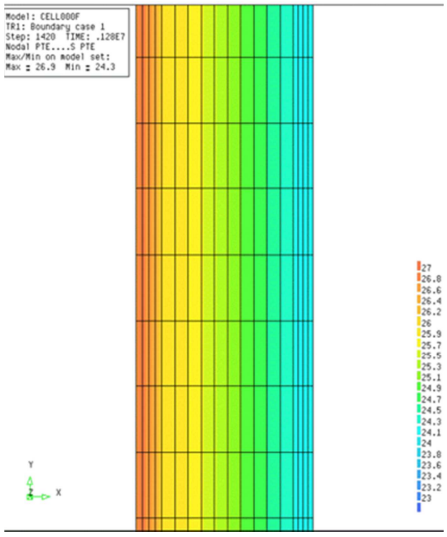
Intervalo	SPCMr	CPCMr
t= 17 horas		
t= 18 horas		
t= 19 horas		

Tabela 7.23 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: representação das paredes orientadas a Oeste, SPCMr e CPCMr nos intervalos: t = 14h, t = 15h, t = 16h, t = 17h, t = 18h, t = 19h, t = 20h, t = 21h, t = 22h, t = 23h, t = 24h, dia 14 e t = 1h, dia 15 de agosto.

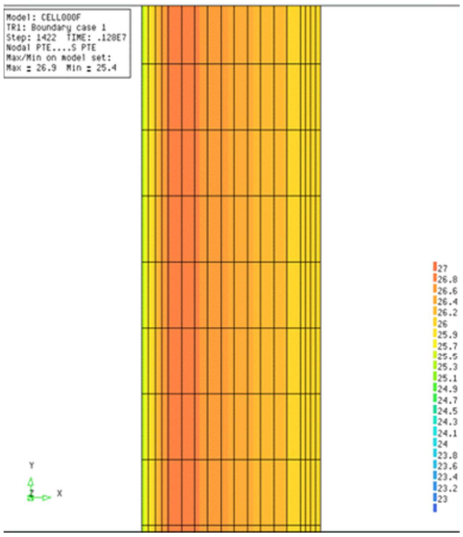
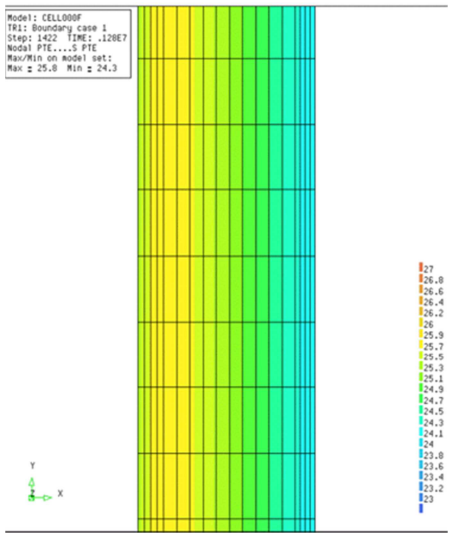
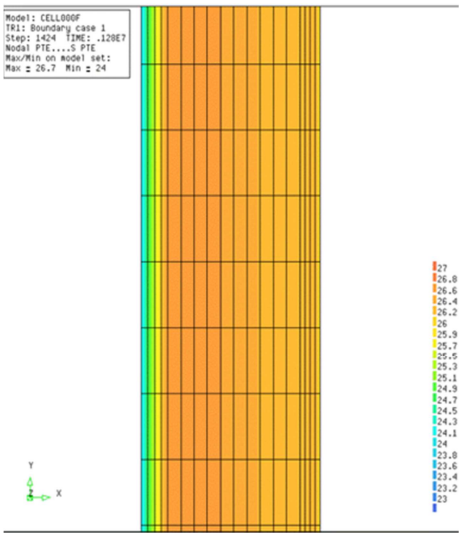
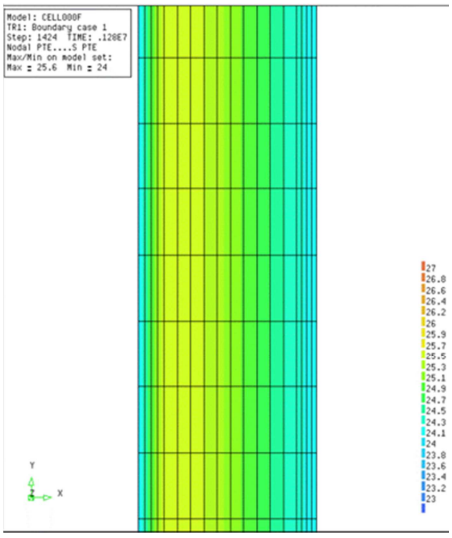
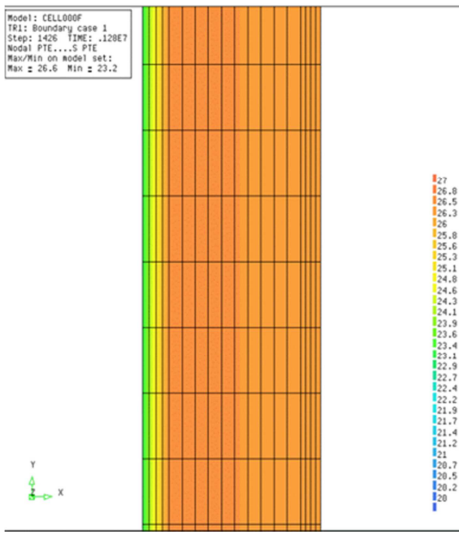
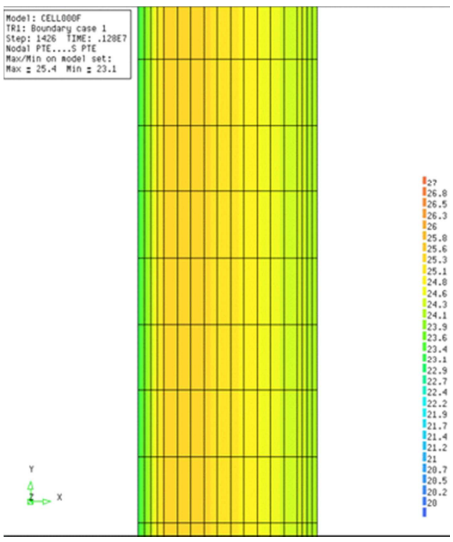
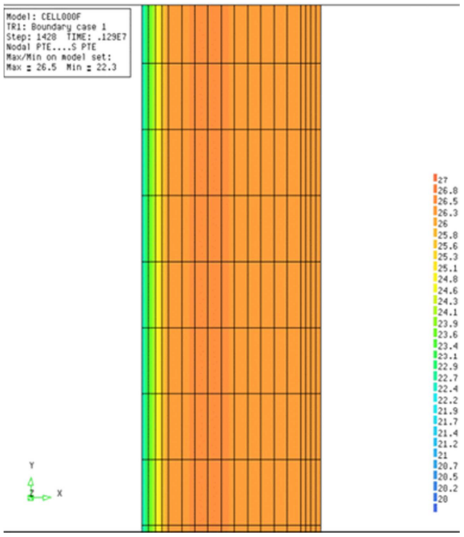
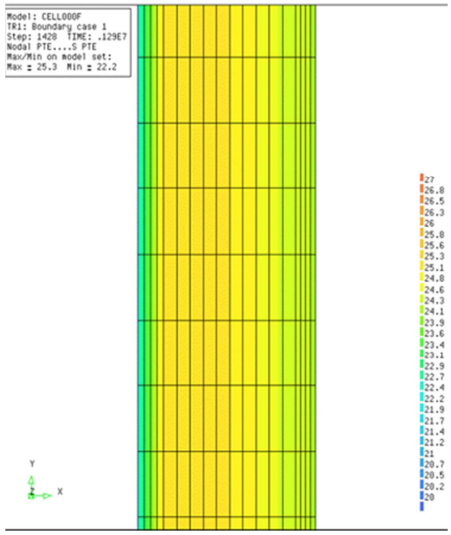
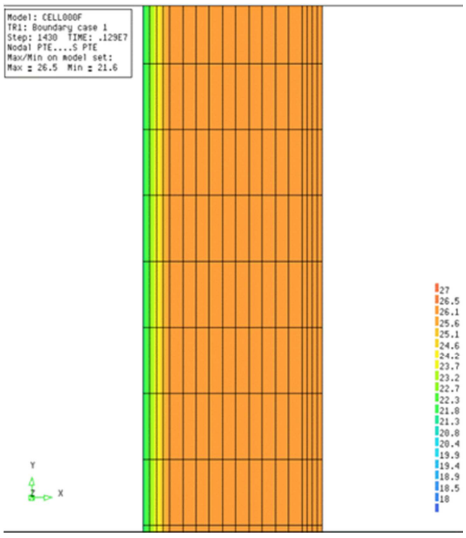
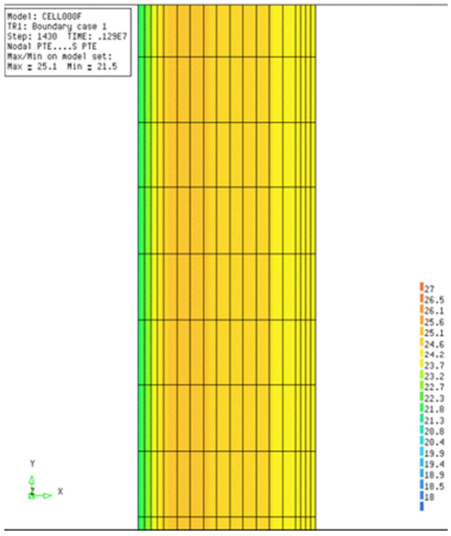
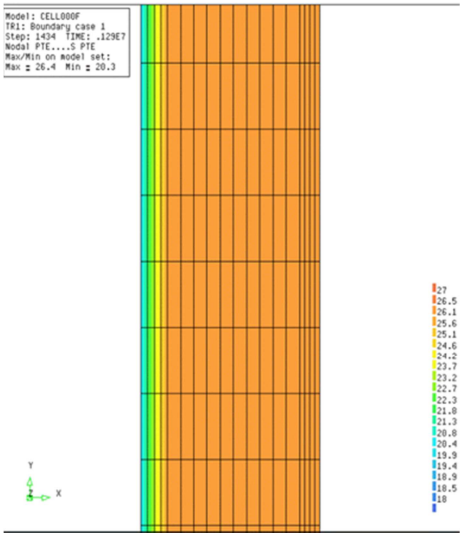
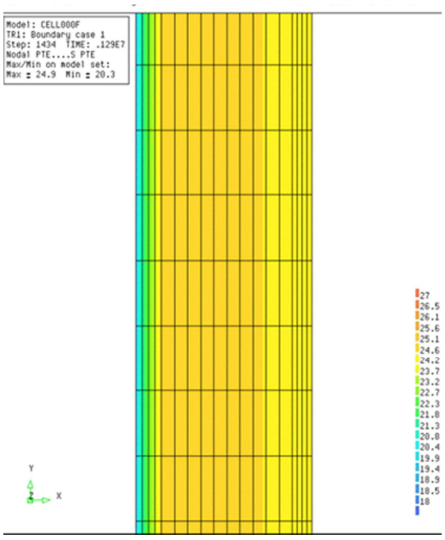
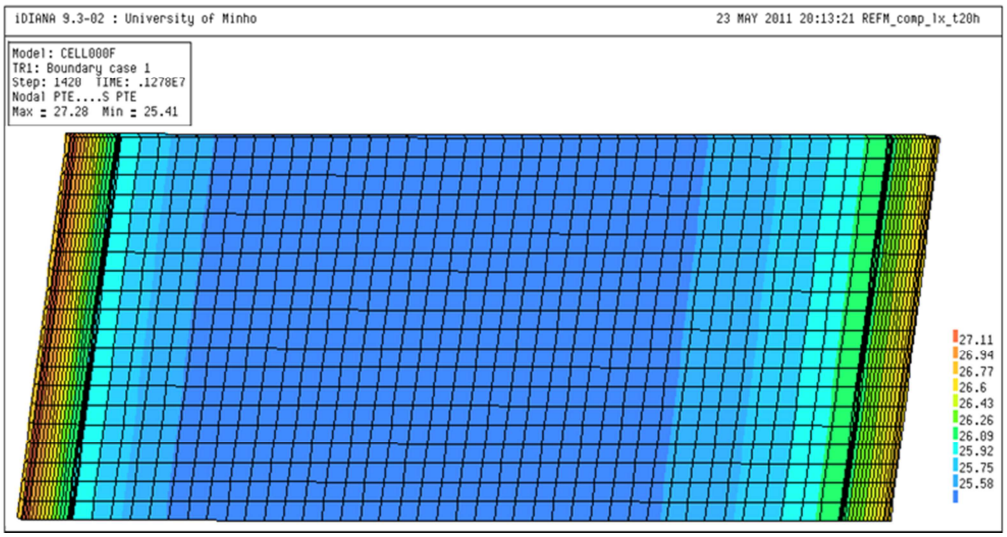
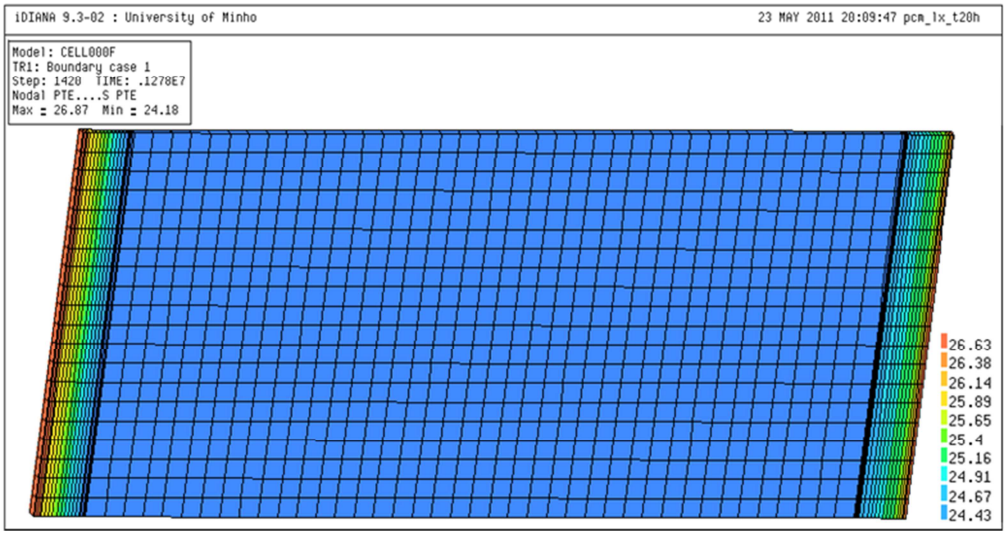
Intervalo	SPCMr	CPCMr
t= 20 horas		
t= 21 horas		
t= 22 horas		

Tabela 7.23 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: representação das paredes orientadas a Oeste, SPCMr e CPCMr nos intervalos: t = 14h, t = 15h, t = 16h, t = 17h, t = 18h, t = 19h, t = 20h, t = 21h, t = 22h, t = 23h, t = 24h, dia 14 e t = 1h, dia 15 de agosto.

Intervalo	SPCMr	CPCMr
t= 23 horas		
t= 24 horas		
t= 1 hora		

Na Tabela 7.24, pode observar-se a distribuição das temperaturas ao longo dos vários elementos simulados, nomeadamente as paredes Este e Oeste, e o espaço de ar interior, sendo visível uma maior estabilização das temperaturas no espaço interior com PCM. A influência do PCM, pelo bloqueio ao atravessamento do calor do exterior para o interior, é sentida ao longo de todo o espaço de ar interior, refletindo-se numa maior estabilização das temperaturas e na ausência de picos de temperaturas.

Tabela 7.24 — Mapas de evolução dos campos de temperatura: representação das células de teste SPCMr e CPCMr no intervalos t = 20h, dia 14 de agosto.

Intervalo	Célula de teste SPCMr
t = 20 horas	
	Célula de teste CPCMr
t = 20 horas	

7.4 Conclusões

Como se concluiu, a solução ótima de PCM não é única, sendo muito dependente das condições climáticas impostas, e devendo ser projetada uma solução de compromisso para responder de forma aproximada ao desempenho ótimo, limitando picos de temperatura e evitando flutuações internas da temperatura, durante o período de tempo mais extenso possível.

As análises paramétricas apresentadas neste capítulo foram realizadas com os seguintes objetivos:

— Avaliar o comportamento térmico de uma célula de teste à escala real;

— Compreender a influência das características do PCM sobre o comportamento térmico de espaços interiores.

As temperaturas simuladas para o interior das células de teste CPCMr revestidas a argamassa com PCM de diferentes características permitiram avaliar a influência dessas características sobre o comportamento térmico destes espaços interiores. Assim, a alteração das temperaturas de fusão e/ou da entalpia do PCM utilizado contribui para uma maior estabilização das temperaturas interiores e para a redução de picos internos de temperaturas. O comportamento térmico de uma célula de teste à escala real sujeito às condições climáticas da estação de arrefecimento foi estudado, tendo sido possível visualizar o efeito do PCM na estabilização das temperaturas interiores. De acordo com o referido anteriormente o recurso aos PCM deve ser encarado como tendo em vista a redução de picos de temperaturas interiores (em dias atípicos, excecionalmente quentes) e a atenuação das flutuações das temperaturas interiores (ao longo dos restantes dias).

Em conclusão, as bases para a simulação numérica adequada de edifícios à escala real, contendo materiais de mudança de fase foram estabelecidas. É possível, recorrendo à ferramenta numérica utilizada, a procura de soluções construtivas contendo PCM que garantam o desempenho térmico adequado de edifícios ou espaços interiores, à escala real, no que diz respeito à conservação das temperaturas interiores na gama de conforto.

Capítulo 8 Conclusões

8.1 Conclusões gerais

O trabalho desenvolvido nesta Tese permitiu observar o efeito no comportmento térmico de edifícios da incorporação dos PCM em elementos construtivos. Os PCM contribuem para a conservação das temperaturas interiores entre valores correspondentes à gama de conforto, centradas na temperatura de fusão dos PCM, garantindo deste modo a redução de picos diários de temperatura, a atenuação ou a estabilização das flutuações da temperatura interior e o aumento do desfasamento entre os picos de temperatura exterior e os picos de temperatura interior.

Os objetivos parciais do trabalho, estabelecidos no início desta Tese e desenvolvidos capítulo a capítulo, conduziram a um conjunto de resultados e de observações sintetizados neste capítulo.

O estado da arte sobre os materiais de mudança de fase apresentado no Capítulo 2 desta Tese, permitiu:

— a introdução de conceitos e definições essenciais no estudo do problema de transferência de calor associado aos PCM;

— a identificação dos vários tipos de PCM e a sua divisão em classes e categorias;

— a apresentação das propriedades mais importantes e decisivas na seleção do PCM mais adequado;

— a referência aos métodos utilizados na incorporação de PCM em materiais e componentes utilizados na construção, o que facilitou o desenvolvimento de um novo material compósito, a argamassa com PCM;

— a descrição de trabalhos realizados por vários autores sobre a utilização de PCM em materiais e componentes de construção.

O processo iterativo utilizado na procura de uma argamassa contendo PCM e todo o estudo experimental de desenvolvimento e caracterização deste novo material compósito, apresentados no Capítulo 3 deste trabalho, permitiram aferir o seguinte:

— a possibilidade de fabrico de uma argamassa à base de cimento e cal contendo uma fração de 25 % de PCM microencapsulados;

— o desempenho da argamassa desenvolvida é semelhante ao de uma argamassa de revestimento interior corrente, cumprindo os requisitos normativos;

— o novo material compósito, para além de apresentar as características comuns a uma argamassa de revestimento interior corrente, tem a capacidade de armazenamento de calor latente, apresentando, num intervalo estreito de temperaturas, entre os 23 ºC e os 25 ºC, um calor específico de 25 kJ/kg, sendo esta característica conferida à argamassa pelos PCM.

A realização das campanhas experimentais, em laboratório e *in situ*, descritas no Capítulo 4, recorrendo à monitorização das temperaturas no interior de duas células de teste de pequenas dimensões, com e sem PCM, permitiu:

— analisar o comportamento térmico distinto entre espaços interiores com e sem PCM;

— avaliar a ação dos PCM na redução de picos de temperaturas e na consequente estabilização das temperaturas interiores;

— aferir como a introdução de PCM contribui para o aumento do desfasamento entre temperaturas interiores e exteriores;

— compreender que o efeito dos PCM, em dias consecutivos, não é constante, sendo fortemente condicionado pelas condições de exposição, em especial pela amplitude térmica e pela radiação solar.

A descrição dos conceitos associados ao problema térmico de transferência de calor considerados no modelo teórico em que se baseia o programa de cálculo utilizado na simulação numérica desenvolvida neste estudo foi abordada em detalhe no Capítulo 5, permitindo:

— introduzir conceitos e apresentar o problema matemático associado à transferência de calor;

— adequar o modelo ao estudo de materiais de mudança de fase;

— selecionar o método de resolução numérica que melhor se adequasse à resolução do problema exposto.

A simulação numérica, apresentada no Capítulo 6, permitiu a concretização de três grandes objetivos:

— a resolução numérica do problema matemático de transferência de calor em materiais de mudança de fase com recurso ao método dos elementos finitos, numa análise tridimensional;

— a validação da simulação numérica do comportamento do novo material desenvolvido (argamassa com PCM), por comparação dos resultados obtidos por via experimental com os resultados numéricos;

— o estabelecimento das bases para a simulação numérica adequada de materiais de construção contendo materiais de mudança de fase.

A confiança adquirida na modelação numérica do novo material desenvolvido, a argamassa com PCM, permitiu a realização de análises paramétricas sobre a célula de teste CPCM e a extrapolação da análise realizada para células de teste à escala real. As análises paramétricas desenvolvidas (Capítulo 7) permitiram:

— avaliar a influência das características do PCM (entalpia e temperatura de fusão) sobre o comportamento térmico dos espaços interiores;

— analisar a resposta térmica de células de teste à escala real quando submetidas às condições climáticas da estação de arrefecimento;

— verificar que na estação de arrefecimento é garantida a estabilização das temperaturas interiores dentro da gama de temperaturas de conforto recorrendo à utilização de PCM.

A utilização de PCM, embora ainda pouco associada à construção e utilização de edificios em Portugal, perspetiva-se de grande importância pois as nececidades de conforto crescem mas também urge a diminuição de consumos supérfulos.

A incorporação em materiais ou componentes tradicionalmente utilizados na construção facilita a introdução dos PCM não havendo necessidade de adaptar técnicas construtivas já dominadas. A argamassa desenvolvida, sendo idêntica às

argamassas de revestimento interior existentes no mercado, reúne as vastagens de facilidade de introdução e vasta aplicabilidade aos sistemas construtivos atualmente empregues em Portugal.

Tendo em consideração os resultados obtidos neste trabalho preconiza-se que a introdução dos PCM na realidade construtiva atual, face às condições climáticas da estação de arrefecimento em Portugal, seja feita com a intenção de reduzir picos de temperaturas interiores em dias excecionalmente quentes e de atenuar as flutuações internas da temperatura ao longo dos restantes dias. Os PCM devem ser utilizados em complementaridade com os sistemas de isolamento térmico correntes, não substituindo a função mas contribuindo para a melhoria das condições de conforto térmico. Mais uma vez se reforça a ideia de que a solução ótima de PCM não é única, sendo muito dependente das condições climáticas impostas, e devendo ser projetada uma solução de compromisso para responder de forma aproximada ao desempenho ótimo, limitando picos de temperatura e evitando flutuações internas da temperatura, durante o período de tempo mais extenso possível.

8.2 Desenvolvimentos futuros

No seguimento do trabalho iniciado na presente dissertação e tendo consciência das dificuldades enfrentadas, enumeram-se algumas sugestões para desenvolvimentos futuros:

- verificação experimental dos modelos de previsão do comportamento térmico dos espaços interiores, por recurso à construção de células de teste à escala real onde se apliquem PCM com diferentes características;
- comparação dos resultados experimentais e numéricos obtidos com os resultados de outras ferramentas numéricas existentes no mercado (como o programa EnergyPlus (US department of Energy 2010));
- estudo da aplicabilidade de PCM à estação climática de aquecimento;
- desenvolvimento de novos materiais compostos por PCM com diferentes características capazes de responder às condições de exposição e utilização referentes às estações de aquecimento e de arrefecimento.

Os desenvolvimentos preconizados exigem o conhecimento profundo da realidade construtiva atual, das condições de utilização e das condições de exposição dos edifícios. Para além disso é imperativo dominar as ferramentas numéricas que facilitam a resolução de problemas matemáticos complexos associados à transferência de calor.

A experiência adequirida na realização deste trabalho estabelece uma base para a concretização dos avanços e melhorias sugeridos.

Anexos

Anexo A

Formulações testadas no desenvolvimento de uma argamassa com PCM

Tabela A.1 — Síntese das formulações testadas.

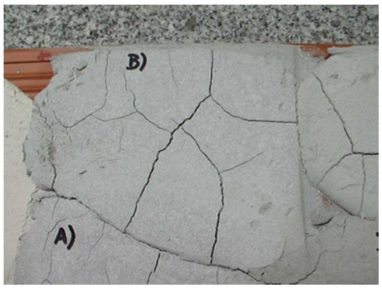
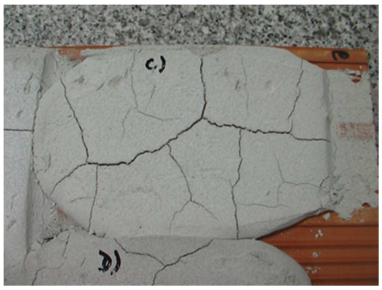
FORMULAÇÕES		[%]	IMAGEM	COMENTÁRIOS
A	Cimento	40,00		Aparência das fendas: fendas sem direção aparente, vão abrindo em direções aproximadamente perpendiculares formando um padrão de polignos de malha larga. Causas prováveis: Deficiente composição do reboco: **forte dosagem em ligante**; e **alto teor de finos**. Reboco muito rígido (Veiga 1998).
	PCM	50,00		
	Areia	10,00		
B	Cimento	40,00		Aparência das fendas: fendas sem direção aparente, vão abrindo em direções aproximadamente perpendiculares formando um padrão de polignos de malha larga. Causas prováveis: Deficiente composição do reboco: **forte dosagem em ligante**; e **alto teor de finos**. Reboco muito rígido (Veiga 1998).
	PCM	50,00		
	Areia	9,90		
	Derivados à base de celulose (μ=8000 a 12000 mPa.s, 2%; 20ºC)	0,10		
C	Cimento	25,00		Aparência das fendas: fendas sem direção aparente, vão abrindo em direções aproximadamente perpendiculares formando um padrão de polignos de malha larga. Causas prováveis: Deficiente composição do reboco: **alto teor de finos**.
	PCM	50,00		
	Areia	24,92		
	Derivados à base de celulose (μ=8000 a 12000 mPa.s, 2%; 20ºC)	0,08		

Tabela A.1 — Síntese das formulações testadas (continuação).

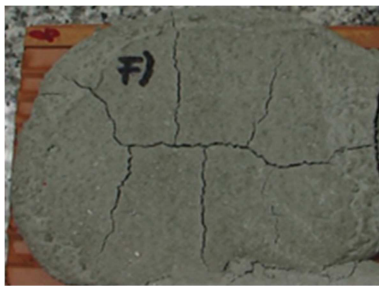
FORMULAÇÕES		[%]	IMAGEM	COMENTÁRIOS
D	Cimento	25,00		Aparência: Redução de fendas, melhor aparência. Causas prováveis: Granolumetria, redução da percentagem de finos na mistura.
	PCM	25,00		
	Areia	49,92		
	Derivados à base de celulose (μ=8000 a 12000 mPa.s, 2%; 20ºC)	0,08		
E	Cimento	25,00		Aparência: Redução de fendas, melhor aparência. Causas prováveis: Granolumetria, redução da percentagem de finos na mistura e utilização de agregado industrial para melhor controlo da granolumetria.
	PCM	25,00		
	Areia	29,92		
	Agregado industrial (carbonato de cálcio)	20,00		
	Derivados à base de celulose (μ=8000 a 12000 mPa.s, 2%; 20ºC)	0,08		
F	Cimento	25,00		Aparência: Redução de fendas, melhor aparência. Causas prováveis: Granolumetria, redução da percentagem de finos na mistura e utilização de agregado industrial para melhor controlo da granolumetria.
	PCM	25		
	Agregado industrial (carbonato de cálcio)	49,87		
	Derivados à base de celulose (μ=8000 a 12000 mPa.s, 2%; 20ºC)	0,05		
	Formiato de cálcio	0,08		
G	Cimento	25,00		Aparência: Fendas de malha larga e radial. Causas prováveis: Introdução do repelente de água (formiato de cálcio) o que influencia o tempo de secagem.
	PCM	25,00		
	Agregado industrial (carbonato de cálcio)	49,85		
	Derivados à base de celulose (μ=8000 a 12000 mPa.s, 2%; 20ºC)	0,05		
	Formiato de cálcio	0,08		
	Resinas (VAE, T_g=15ºC)	0,02		

Tabela A.1 — Síntese das formulações testadas (continuação).

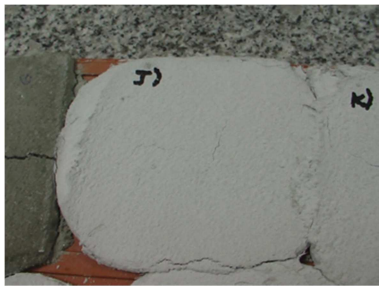
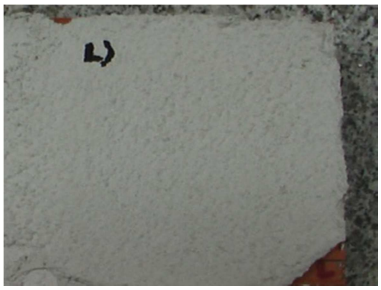
FORMULAÇÕES		[%]	IMAGEM	COMENTÁRIOS
H	Cimento	10,00		Aparência: Redução de fendas, melhor aparência. Causas prováveis: Introdução cal e de maior percentagem de resinas.
	Cal	20,00		
	PCM	25,00		
	Agregado industrial (carbonato de cálcio)	42,80		
	Resinas (VAE, T_g=15ºC)	2,00		
	Fibras (PAN, com 6mm)	0,20		
I	Cimento	10,00		Aparência: Redução de fendas, melhor aparência. Causas prováveis: Introdução de cal e de maior percentagem de resinas.
	Cal	20,00		
	PCM	25,00		
	Agregado industrial (carbonato de cálcio)	42,70		
	Resinas (VAE, T_g=15ºC)	2,00		
	Fibras (PAN, com 6mm)	0,20		
	Fibras (pó de alumínio)	0,10		
J	Cimento	10,00		Aparência: Boa aparência. Formulação utilizada em ensaios de caracterização posteriores. Resultado: Não satisfatório. Resistência à flexão muito baixa: (R_t << 1500 MPa). Causas prováveis: Percentagem de cal na mistura.
	Cal	10,00		
	PCM	25,00		
	Agregado industrial (carbonato de cálcio)	52,80		
	Resinas (VAE, T_g=15ºC)	2,00		
	Fibras (PAN, com 6mm)	0,20		
K	Cimento	10,00		Aparência: Boa aparência. Formulação utilizada em ensaios de caracterização posteriores. Resultado: Não satisfatório. Resistência à flexão muito baixa: (R_t << 1500 MPa). Causas prováveis: Percentagem de cal na mistura.
	Cal	10,00		
	PCM	25,00		
	Agregado industrial (carbonato de cálcio)	52,65		
	Resinas (VAE, T_g=15ºC)	2,00		
	Fibras (PAN, com 6mm)	0,20		
	Fibras (pó de alumínio)	0,10		
	Derivados à base de celulose (μ=2000 a 3000 mPa.s, 2%; 20ºC)	0,05		

Tabela A.1 — Síntese das formulações testadas (continuação).

FORMULAÇÕES		[%]	IMAGEM	COMENTÁRIOS
L	Cimento	10,00		Aparência: Boa aparência. Formulação utilizada em ensaios de caracterização posteriores. Resultado: Satisfatório: Consultar a Tabela 3.12. Baixa resistência à flexão, mas próxima dos 1500 MPa (*v.* Anexo B): ($R_t \approx 1320$ MPa). Adequado módulo de elasticidade, com valores de 3500 MPa < E < 7000 MPa (*v.* Anexo B): $E \approx 4826$ MPa. Relação $E/R_t \approx 3500$. A fraca relação E/R_t, para $E/R_t > 3500$, pode significar uma: Forte susceptibilidade à fendilhação (Veiga 1998).
	Cal	5,00		
	PCM	25,00		
	Agregado industrial (carbonato de cálcio)	57,65		
	Resinas (VAE, T_g=15ºC)	2,00		
	Fibras (PAN, com 6mm)	0,20		
	Fibras (pó de alumínio)	0,10		
	Derivados à base de celulose (μ=2000 a 3000 mPa.s, 2%; 20ºC)	0,05		

Anexo B

Boletins de ensaio

Formulação	**L**	**Data de ensaio**	15/05/2009

Local	Laboratório da weber-cimenfix - Zona Industrial de Taboeira, Aveiro

Norma de ensaio	EN 1015-18: 2002 - Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade de argamassa endurecida

Características das amostras	• Formulação: **L** • Descrição sucinta: argamassa leve, pré-doseada em fábrica, com propriedades de armazenamento de calor. • Constituição: argamassa com PCM. • Observações: argamassa seca produzida em fábrica pelo requerente.

Metodologia de ensaio	• Amostragem, preparação e condicionamento dos provetes: 3 Amostras endurecidas de argamassa. Dimensões das amostras: 160x40x40 mm3. As amostras resultaram dos ensaios de resistência à flexão. As amostras foram mantidas em laboratório com ambiente controlado até à data de ensaio (em sala condicionada com temperatura de 20ºC e H.R. de 60 %). • Procedimento (resumo): Secagem das amostras em estufa ventilada para se determinar a massa seca (M0). Colocação das amostras submersas em 10 mm de água para medição da massa de água que penetrou nas amostras após 10 minutos (M1) e 90 minutos (M2) de exposição à água (Figura 1). Determinação coeficiente de absorção de água por capilaridade com as medições efetuadas aos 10 e 90 minutos (C).  a) b) Figura 1 – Ensaio de determinação da absorção de água por capilaridade (a) colocação das amostras submersas em 10 mm de água b) pesagem das amostras).

Resultados

Referência das amostras		Massa das amostras (g)			Coeficiente de absorção de água C (kg/m²/min$^{0.5}$)		
Tipo	Nº	M0	M1	M2	Individual	Média	C.V.(%)
L (25 % PCM)	1	158,99	162,24	167,75	0,55	**0,55**	-%
	2	145,99	148,75	153,55	0,48		
	3	160,40	164,46	170,40	0,60		

Formulação	**L**	**Data de ensaio**	17/04/2009

Local	Laboratório da weber-cimenfix - Zona Industrial de Taboeira, Aveiro

Norma de ensaio	CSTB (2669-4) - Determinação das variações dimensionais e de massa de uma argamassa endurecida

Características das amostras	• Formulação: **L** • Descrição sucinta: argamassa leve, pré-doseada em fábrica, com propriedades de armazenamento de calor. • Constituição: argamassa com PCM. • Observações: argamassa seca produzida em fábrica pelo requerente.

Metodologia de ensaio	• Equipamentos: Um micrómetro e uma balança com precisão de 1/10g. • Amostragem, preparação e condicionamento dos provetes: 3 amostras endurecidas de argamassa. Dimensões das amostras: 160x40x40 mm. As amostras resultaram dos ensaios de resistência à flexão. As amostras foram mantidas em laboratório com ambiente controlado até à data de ensaio (em sala condicionada com temperatura de 20ºC e H.R. de 60 %). • Procedimento (resumo): Pesagem e medição das suas dimensões com o auxílio do micrómetro. Durante cada medida mantiveram-se os provetes nas condições padrão de armazenamento. As medidas levadas a cabo nos três provetes ensaiados foram efetuadas ao desmoldar os provetes (após 24 horas de secagem); aos 7 dias de secagem; e aos 28 dias de secagem (Figura 1).  a) b) Figura 1 – Ensaio de determinação das variações dimensionais: a) micrómetro b) pesagem das amostras.

Referência das amostras		Retração (mm/m)						
Tipo	Nº	24 horas		7 dias		28 dias		**Retração**
L (25 % PCM)	1	-4,832	6,156	-4,462	6,500	-4,684	6,306	**6,321**
	2	-5,047		-4,805		-4,863		
	3	-5,312		-5,682		-5,693		

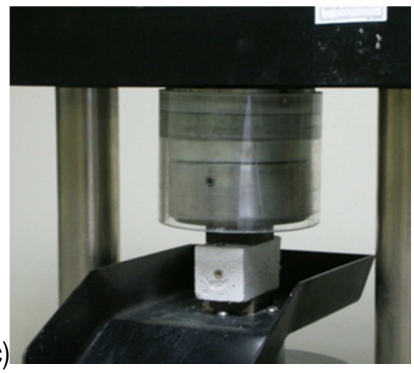
Referência das amostras		Massa (g)						
Tipo	Nº	24 horas		7 dias		28 dias		**Massa (g)**
L (25 % PCM)	1	332,07	98,44	331,76	100,77	332,80	100,41	**100,21**
	2	314,35		316,83		317,28		
	3	299,38		298,33		299,05		

Formulação	**L**	**Data de ensaio**	27/04/2009

Local	Laboratório da weber-cimenfix - Zona Industrial de Taboeira, Aveiro

Norma de ensaio	EN 1015-11: 2002 - Determinação da resistência à flexão e à compressão de uma argamassa endurecida

Características das amostras	• Formulação: **L** • Descrição sucinta: argamassa leve, pré-doseada em fábrica, com propriedades de armazenamento de calor. • Constituição: argamassa com PCM. • Observações: argamassa seca produzida em fábrica pelo requerente.

Metodologia de ensaio	• Equipamentos: Prensa automática de flexão e de compressão. • Amostragem, preparação e condicionamento dos provetes: 3 Amostras endurecidas de argamassa. Dimensões das amostras: 160x40x40 mm3. As amostras foram mantidas em laboratório com ambiente controlado até à data de ensaio (em sala condicionada com temperatura de 20ºC e H.R. de 60 %). • Procedimento (resistência à flexão): Colocam-se os provetes na máquina de flexão com uma das faces laterais de moldagem sobre os cilindros de apoio e o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios e centrado em relação a estes (Figura 1-b)). Inicia-se o ensaio de flexão aumentando a carga uniformemente à velocidade de 115 kPa/s. Regista-se a carga máxima suportada pelo provete até à sua rutura. • Procedimento (resistência à compressão): Aproveitam-se as metades dos provetes resultantes do ensaio anterior. Centram-se lateral e longitudinalmente cada meio-provete em relação aos pratos da máquina de compressão. Tal como no ensaio anterior uma das faces laterais de moldagem fica em contacto com os pratos da máquina de compressão. O ensaio de compressão teve início com o aumento uniforme da carga à velocidade de 245 kPa/s. Regista-se a carga máxima suportada pelo provete até à sua rutura. a)  b)  c)  Figura 1 – Ensaio de determinação da resistência à flexão e à compressão: a) prensa automática; b) ensaio de flexão; c) ensaio de compressão.

Resultados

Referência das amostras		**Resistência à Flexão** (N/mm2)		**Resistência à compressão** (N/mm2)	
Tipo	Nº	Individual	Média	Individual	Média
L (25 % PCM)	1	1,26	**1,32**	2,38	**2,40**
	2	1,35		2,41	
	3	1,35		2,42	

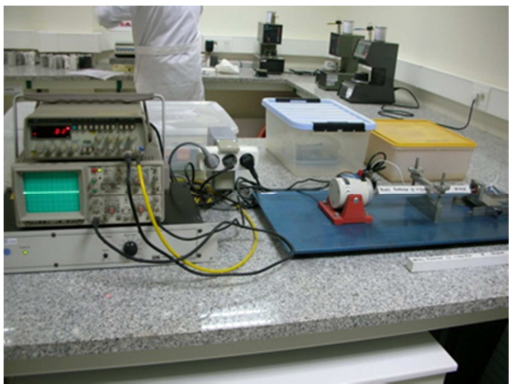
Formulação	**L**

Data de ensaio	27/04/2009

Local	Laboratório da weber-cimenfix - Zona Industrial de Taboeira, Aveiro

Norma de ensaio	CSTB (2669-4) - Determinação do módulo de elasticidade de uma argamassa endurecida

Características das amostras	• Formulação: **L** • Descrição sucinta: argamassa leve, pré-doseada em fábrica, com propriedades de armazenamento de calor. • Constituição: argamassa com PCM. • Observações: argamassa seca produzida em fábrica pelo requerente.

Metodologia de ensaio	• Equipamentos: Equipamento de frequência de ressonância uma balança com precisão de 1/10g. • Amostragem, preparação e condicionamento dos provetes: 2 amostras endurecidas de argamassa. Dimensões das amostras: 285x25x25 mm. As amostras foram mantidas em laboratório com ambiente controlado até à data de ensaio (em sala condicionada com temperatura de 20ºC e H.R. de 60 %). • Procedimento (resumo): Coloca-se o provete no banco de ensaio e fixa-se ao suporte através de roscas laterais, garantindo que o recetor e o emissor se encontram em contacto com os extremos do provete. Através do gerador de funções executar um varrimento de frequências desde 1 até 10 kHz e procurar a frequência fundamental de ressonância de maior amplitude (Figura 1).  Figura 1 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade: Equipamento de frequência de ressonância.

Referência das amostras		Módulo de elasticidade (Mpa)				
Tipo	Nº	7 dias		28 dias		**Módulo de elasticidade**
L (25 % PCM)	1	195,03g	4558,18	186,33g	4847,18	**4826,38**
		3,61/3,50		3,78/3,72		
	2	191,56	4229,88	181,83	4805,57	
		3,42/3,49		3,83/3,73		

Formulação	**L**	**Data de ensaio**	12/06/2009

Local	Laboratório da weber-cimenfix - Zona Industrial de Taboeira, Aveiro

Norma de ensaio	EN 1015-12: 2002 - Determinação da aderência de uma argamassa endurecida ao suporte

Características das amostras	• Formulação: **L** • Descrição sucinta: argamassa leve, pré-doseada em fábrica, com propriedades de armazenamento de calor. • Constituição: argamassa com PCM. • Observações: argamassa seca produzida em fábrica pelo requerente.

Metodologia de ensaio	• Equipamentos: Dinamómetro, discos metálicos de 50mm de diâmetro. • Amostragem, preparação e condicionamento dos provetes: Amostras endurecidas de argamassa resultantes do espalhamento da argamassa sobre o suporte de betão ou tijolo. Dimensões das amostras: espessura de 1 cm. As amostras foram mantidas em laboratório com ambiente controlado até à data de ensaio (em sala condicionada com temperatura de 20ºC e H.R. de 60 %). • Procedimento (resumo): Após 27 dias da data do ensaio realizam-se 5 cortes com cerca de 50 mm de diâmetro, nos quais se irão colar os discos metálicos com a cola de alta aderência. Passado 1 dia proceder à medição da resistência à tração com a ajuda do dinamómetro, arrancar a argamassa procurando exercer a força a uma velocidade constante de aproximadamente 250 +/- 50 N/s (Figura 1).  Figura 1 – Ensaio de determinação da aderência. Equipamento: dinamómetro.

Referência das amostras		**Aderência** (Mpa)			
Tipo	Nº	Tijolo		Betão	
L (25 % PCM)	1	0,46	**0,48 (coesivo)**	0,34	**0,35 (coesivo)**
	2	0,49		0,31	
	3	0,44		0,39	
	4	0,48		0,35	
	5	0,51		0,36	

Referências Bibliográficas

Abhat, A. 1983. "Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials." *Solar Energy* no. 30 (4):313-332. Acedido a 9 de maio de 2011. doi: 10.1016/0038-092x(83)90186-x.

Abrantes, Vitor. 1984. "Análise numérica e experimental do comportamento térmico de coberturas com desvão". Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

Ahmad, Maha, André Bontemps, Hébert Sallée e Daniel Quenard. 2006. "Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material." *Energy and Buildings* no. 38 (4):357-366. Acedido a 1 de fevereiro de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.07.008.

Alawadhi, Esam M. 2008. "Thermal analysis of a building brick containing phase change material." *Energy and Buildings* no. 40 (3):351-357. Acedido a 10 de setembro de 2010. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.001.

Almeida, Maria Manuela. 1994. "Simulação térmica de edifícios com um modelo numérico de capacidade térmica variável ". Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

Athienitis, A. K., C. Liu, D. Hawes, D. Banu e D. Feldman. 1997. "Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage." *Building and Environment* no. 32 (5):405-410. Acedido a 15 de abril de 2012. doi: 10.1016/s0360-1323(97)00009-7.

Azenha, Miguel. 2004. "Comportamento do betão nas primeiras idades. Fenomenologia e análise termo-dinâmica". Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

———. 2009. "Numerical simulation of the structural behavior of concrete since its early ages". Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

Baetens, Ruben, Bjørn Petter Jelle e Arild Gustavsen. 2010. "Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review." *Energy and Buildings* no. 42 (9):1361-1368. Acedido a 10 de janeiro de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.03.026.

BASF. 2008. Micronal® PCM Intelligent Temperature Management for Buildings. Acedido a February 2011. http://www.micronal.de/portal/streamer?fid=402747

———. 2010. "BASF The Chemical Company, GmbH. Phase Change Material. Micronal PCM.". Acedido a 18 de fevereiro. http://www.micronal.de/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_290798.

Bentz, Dale P. e Randy Turpin. 2007. "Potential applications of phase change materials in concrete technology." *Cement and Concrete Composites* no. 29 (7):527-532. Acedido a 23 de outubro de 2010. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2007.04.007.

Bhadeshia, H. K. 2002. "Thermal analyses techniques. Differential thermal analyses.".

Bontemps, André, Maha Ahmad, Kevin Johannès e Hébert Sallée. 2011. "Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls." *Energy and Buildings* no. 43 (9):2456-2461. Acedido a 25 de março de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.030.

Borreguero, Ana M., M. Luz Sánchez, José Luis Valverde, Manuel Carmona e Juan F. Rodríguez. 2011. "Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content." *Applied Energy* no. 88 (3):930-937. Acedido a 29 de abril de 2012. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.08.014.

Botelho. 2011. "Espectro Eletromagnético ". http://professorbotelho.blogspot.pt/2011_01_01_archive.html.

Bourdeau, L. E. 1980. "Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage". Comunicação apresentada em Proceedings of the fifth national passive solar conference, em Amherst, MA, USA, de 19 a 26 de outubro.

Breugel, Klaas van e E. A. B. Koenders. 2001. *Solar Radiation: Effect of solar radiation on the risk of cracking in young concrete*. Lule^{o}a: Univ. of Technology, Dep. of Civil & Mining Engineering, Div. of Structural Engineering.

Buddhi, D., H. S. Mishra e A. Sharma. 2003. "Thermal performance studies of a test cell having a PCM window in south direction". Comunicação apresentada em ECESIA Annex 17, Advanced thermal energy storage through phase change materials and chemical reactions – feasibility studies and demonstration projects, 4th Workshop, em Indore, India, de 21 a 24 de março.

Cabeza, Luisa F., Cecilia Castellón, Miquel Nogués, Marc Medrano, Ron Leppers e Oihana Zubillaga. 2007. "Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings." *Energy and Buildings* no. 39 (2):113-119. Acedido a 4 de março de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2006.03.030.

CEN. 2001. *EN 197-1: Cement. Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. Brussels: CEN (European Commitee for Stardardization).

———. 2002. *EN 1745: Masonry and masonry products. Methods for determining design thermal values*. Brussels: CEN (European Commitee for Stardardization).

———. 2006. *EN 1015: Methods of test for mortar for masonry*. Brussels: CEN (European Commitee for Stardardization).

———. 2007. *EN 13501-1: Fire classification of construction products and building elements. Part 1: Classification using data from reaction to fire tests.* Brussels: CEN (European Commitee for Stardardization).

———. 2010. *EN 998-1: Specification for mortar masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar*. Brussels: CEN (European Commitee for Stardardization).

Cerón, Isabel, Javier Neila e Mohamed Khayet. 2011. "Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use." *Energy and Buildings* no. 43

(8):1869-1874. Acedido a 4 de outubro de 2011. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.03.031.

Cervera, M., R. Faria, J. Oliver e T. Prato. 2002. "Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena." *Computers & Structures* no. 80 (18–19):1511-1521. Acedido a 9 de fevereiro de 2012. doi: 10.1016/S0045-7949(02)00104-9.

Chandra, S., R. Kumar, S. Kaushik e S. Kaul. 1985. "Thermal performance of a non-air-conditioned building with PCCM thermal storage wall." *Energy Conversion and Management* no. 25 (1):15-20. Acedido a 20 de maio de 2012. doi: 10.1016/0196-8904(85)90064-0.

Chen, Chao, Haifeng Guo, Yuning Liu, Hailin Yue e Chendong Wang. 2008. "A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard." *Energy and Buildings* no. 40 (5):882-890. Acedido a 17 de maio de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.07.002.

Climator. 2009. "Climator, GmbH. ClimSel". Acedido a 23 de fevereiro. http://www.climator.com/en/climsel/.

Coelho, Paulo José da Silva Martins. 2007. *Tabelas de termodinâmica*. Documentos Técnicos. Porto: FEUP edições.

Cristopia. 2010. "Cristopia Energy Systems. Downloads. STL documentation". Acedido a 30 de janeiro. http://www.cristopia.com/cristopia/english/products/documentation.html.

Croiset, Maurice. 1968. *L' hygrothermique dans le bâtiment. Confort thermique d' hiver et d' été. Condensations.* Paris: Editions Eyrolles.

Dean, John A. 1995. *The Analytical Chemistry Handbook*. New York: McGraw Hill.

DGEG. 2010. *Inquérito ao consumo de energia no sector doméstico*. Direcção Geral de Energia e Geologia. Acedido a 11 de dezembro de 2010. http://www.dgeg.pt/.

Dieckmann, J. 2008. *Latent heat storage in concrete*. Kaiserslautern, Germany: University of Kaiserslautern. Acedido a 22 de outubro de 2010. http://www.eurosolar.org/new/pdfs_neu/Thermal/IRES2006_Dieckmann.pdf.

Dow. 2009. *Product information: Walocel MKX 60000 PF 50*. Dow Chemical Company. Acedido a 7 de abril de 2011. http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_029a/0901b8038029a546.pdf?filepath=construcpolymers/pdfs/noreg/199-01465.pdf&fromPage=GetDoc.

Entrop, A. G., H. J. H. Brouwers e A. H. M. E. Reinders. 2011. "Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses." *Solar Energy* no. 85 (5):1007-1020. Acedido a 15 de fevereiro de 2012. doi: 10.1016/j.solener.2011.02.017.

Feldman, D., D. Banu e D. W. Hawes. 1995. "Development and application of organic phase change mixtures in thermal storage gypsum wallboard." *Solar Energy Materials and Solar Cells* no. 36 (2):147-157. Acedido a 8 de maio de 2012. doi: 10.1016/0927-0248(94)00168-r.

Frank, Bruno. 2004. "Using Phase Change Material (PCMs) for space heating and cooling in buildings". Comunicação apresentada em AIRAH performance enhanced buildings environmentally sustainable design conference, em Australia.

Freitas, Vasco Peixoto de. 2007. "Estação Meteorológica: Histórico". Acedido a 12 de abril. http://experimenta.fe.up.pt/estacaometeorologica/historico.php?lang=pt.

García, E., A. de Pablos, M. A. Bengoechea, L. Guaita, M. I. Osendi e P. Miranzo. 2011. "Thermal conductivity studies on ceramic floor tiles." *Ceramics International* no. 37 (1):369-375. Acedido a 7 de abril de 2012. doi: 10.1016/j.ceramint.2010.09.023.

Ghoneim, A. A., S. A. Klein e J. A. Duffie. 1991. "Analysis of collector-storage building walls using phase-change materials." *Solar Energy* no. 47 (3):237-242. Acedido a 11 de março de 2012. doi: 10.1016/0038-092x(91)90084-a.

Givoni, B. 1978. *L' Home, L' Architecture et le Climat.* Paris: Editions du Moniteur.

Grimm. 2010. *Aluminiumpowder and paste. Aditives for Building industries: Technical data Optonit 60*. Roth: Grimm Metallpulver Gmbh.

Hasse, Colas, Manuel Grenet, André Bontemps, Rémy Dendievel e Hébert Sallée. 2011. "Realization, test and modelling of honeycomb wallboards containing a Phase Change Material." *Energy and Buildings* no. 43 (1):232-238. Acedido a 21 de abril de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.09.017.

Hawes, D. W., D. Feldman e D. Banu. 1993. "Latent heat storage in building materials." *Energy and Buildings* no. 20 (1):77-86. Acedido a 22 de fevereiro de 2012. doi: 10.1016/0378-7788(93)90040-2.

He, Bo, Viktoria Martin e Fredrik Setterwall. 2004. "Phase transition temperature ranges and storage density of paraffin wax phase change materials." *Energy* no. 29 (11):1785-1804. Acedido a 26 de maio de 2012. doi: 10.1016/j.energy.2004.03.002.

Heavens-Above. 2012. "Heavens-Above, GmbH. Solar data". Acedido a 17 de abril. http://www.heavens-above.com/sun.aspx?lat=41.1783&lng=-8.59596&loc=FEUP&alt=0&tz=WET.

Heim, Dariusz. 2005. "Two solution methods of heat transfer with phase change within whole building dynamic simulation". Comunicação apresentada em Ninth International IBPSA Conference, em Montréal, Canada, de 15 a 18 de agosto.

Hittle, Douglas C. 2002. "Phase Change Materials in Floor Tiles for Thermal Energy Storage". Tese de doutoramento, Colorado State University.

Hunger, M., A.G. Entrop, I. Mandilaras, H.J.H. Brouwers e M. Founti. 2009. "The direct incorporation of micro-encapsulated Phase Change Materials in the concrete mixing process. A feasibility study". Comunicação apresentada em CMS2009 Conference on Construction Material Stewardship, em Rotterdam, de 12 a 15 de junho.

ISO. 1991a. *ISO 8301: Thermal insulation: Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Heat flow meter apparatus*. Geneve: ISO (International Organization for Standardization).

———. 1991b. *ISO 8302: Thermal insulation: Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Guarded hot plate apparatus*. Geneve: ISO (International Organization for Standardization).

———. 2005. *ISO 7730: Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretationof thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. Geneve: ISO (International Organization for Standardization).

———. 2007. *ISO 10456: Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*. Geneve: ISO (International Organization for Standardization).

———. 2010. *ISO 11925-2: Reaction to fire tests: Ignitability of building products subjected to direct impingement of flame. Part 2: Single-flame source test*. Geneve: ISO (International Organization for Standardization).

———. 2011. *ISO 15686-1: Buildings and constructed assets. Service life planning. Part 1: General principles and framework*. Geneve: ISO (International Organization for Standardization).

Kaasinen, H. 1992. "The absorption of phase change substances into commonly used building materials." *Solar Energy Materials and Solar Cells* no. 27 (2):173-179. Acedido a 30 de maio de 2011. doi: 10.1016/0927-0248(92)90118-9.

Knowles, T. R. 1983. "Proportioning composites for efficient thermal storage walls." *Solar Energy* no. 31 (3):319-326. Acedido a 6 de maio de 2012. doi: 10.1016/0038-092x(83)90020-8.

Kondo, T., S. Iwamoto e T. Ibamoto. 2006. *Research on Thermal Storage using Rock Wool PCM Ceiling Board*. Tokyo, Japan: Kanagawa University. Acedido a 19 de maio de 2011. http://intraweb.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/FINAL_PAPERS/4B-1.pdf.

Kuznik, F. e J. Virgone. 2009. "Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling." *Energy and Buildings* no. 41 (5):561-570. Acedido a 4 de maio de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2008.11.022.

Kuznik, Frédéric, Joseph Virgone e Jean Noel. 2008. "Optimization of a phase change material wallboard for building use." *Applied Thermal Engineering* no. 28 (11-12):1291-1298. Acedido a 19 de janeiro de 2012. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.10.012.

Kuznik, Frédéric, Joseph Virgone e Jean-Jacques Roux. 2008. "Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: A full-scale experimental investigation." *Energy and Buildings* no. 40 (2):148-156. Acedido a 26 de maio de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.01.022.

Lai, Chi-ming, R. H. Chen e Ching-Yao Lin. 2010. "Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM." *Energy and Buildings* no. 42 (8):1259-1266. Acedido a 14 de maio de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.02.018.

Lane, Geaorge Ashel. 1983. *Solar heat storage: latent heat materials*. Vol. 1. Universidade de Michigan: CRC Press.

Lin, Kunping, Yinping Zhang, Hongfa Di e Rui Yang. 2007. "Study of an electrical heating system with ductless air supply and shape-stabilized PCM for thermal storage." *Energy Conversion and Management* no. 48 (7):2016-2024. Acedido a 11 de abril de 2012. doi: 10.1016/j.enconman.2007.01.014.

Lin, Kunping, Yinping Zhang, Xu Xu, Hongfa Di, Rui Yang e Penghua Qin. 2005. "Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates." *Energy and Buildings* no. 37 (3):215-220. Acedido a 11 de janeiro de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2004.06.017.

MathWorks. 2010. "MathWorks Accelerating the pace of engineering and science. Products & Services. Matlab the Language of Technical Computing". Acedido a 4 de junho. http://www.mathworks.com/products/matlab/.

Mendonça, Paulo. 2005. "Habitar sob uma segunda pele : estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados". Tese de Doutoramento, Departamento de engenharia civil, Universidade do Minho. Acedido a 10 de maio de 2012. http://hdl.handle.net/1822/4250.

Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações. 2006. Decreto-Lei n.º80/2006 de 4 de Abril. *Diário da República*, 1ª série-A (67):2468-2513. Lisboa: INCM. Acedido a 4 de novembro de 2011. http://dre.pt/pdf1sdip/2006/04/067A00/24682513.PDF.

Morabito, Paolo. 2001. *Thermal properties of concrete. Variations with the temperature and during the hydration phase.* Milan: IPACS - Improved Production of Advanced Concrete Structures. Acedido a 23 de Outubro de 2011. https://www.ltu.se/webbarkiv/SHB/ipacs/3b20b24e19223.pdf.

Neeper, D. A. 1999. "Thermal dynamics of wallboard with latent heat storage." *Solar Energy* no. 68:p.393-403. Acedido a 19 de maio de 2012. doi: PI I : S0038 – 092X(00)00012 – 8.

Ozisik, M. Necati. 1993. *Heat conduction*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.

PCM Energy. 2009. "PCM Energy P., Ltd. Phase Change Material PCM Manufacturers for Air Conditioning". Acedido a 20 de fevereiro. http://www.teappcm.com/.

Peippo, K., P. Kauranen e P. D. Lund. 1991. "A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating." *Energy and Buildings* no. 17 (4):259-270. Acedido a 22 de abril de 2012. doi: 10.1016/0378-7788(91)90009-r.

Ramírez, Alicia. 2009. "PCM integration in gypsum boards reinforced with polypropylene fibers", Arquitecture, Universidad Politécnica de Madrid.

Real, P. Vila. 1993. "Modelação por elementos finitos da solidificação e comportamento termo-mecânico de peças vazadas em moldações metálicas". Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

Rubitherm. 2009. "Rubitherm, GmbH. Innovative PCM's and Thermal Technology". Acedido a 2 de maio. http://www.rubitherm.de/english/index.htm.

Santos, Carlos A. Pina dos e Luís Matias. 2007. *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da ebvolvente dos edifícios.* Editado por Laboratório Nacional de Engenharia Civil. ICT Informações Ciêntificas e Ténicas, Edifícios - ITE 50. LNEC, Lisboa.

Scalat, S., D. Banu, D. Hawes, J. Paris, F. Haghighata e D. Feldman. 1996. "Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard." *Solar Energy Materials and Solar Cells* no. 44.

Schmidt, Marco. 2007. *Phase Change Materials. Latent heat storage for interior climate control*. Ludwigshafen, Germany: BASF. Acedido a 4 de fevereiro. http://www.micronal.de/portal/streamer?fid=309980.

Shamsundar, N. e B. M. Sparrow. 1975. "Analysis of multidimensional conduction phase change via the enthalpy model." *J. Heat Transfer* no. 97:333-340. Acedido a 15 de maio de 2012. doi: citeulike-article-id:4732385.

Shilei, Lv, Feng Guohui, Zhu Neng e Dongyan Li. 2007. "Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards."

Energy and Buildings no. 39 (10):1088-1091. Acedido a 20 de março de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2006.11.012.

Shilei, Lv, Zhu Neng e Feng Guohui. 2006. "Eutectic mixtures of capric acid and lauric acid applied in building wallboards for heat energy storage." *Energy and Buildings* no. 38 (6):708-711. Acedido a 6 de janeiro de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2005.10.006.

Shukla, Anant, D. Buddhi e R. L. Sawhney. 2008. "Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials." *Renewable Energy* no. 33 (12):2606-2614. Acedido a 2 de maio de 2012. doi: 10.1016/j.renene.2008.02.026.

Sousa, Augusto Vaz Serra e, Vasco Peixoto de Freitas e J. A. Mendes da Silva. 2003. *Manual de aplicação de revestimentos cerâmicos*. Coimbra: APICER - Associação Portuguesa da Indústria de Cerâmica.

Swet, CJ. 1980. "Phase change storage in passive solar architecture". Comunicação apresentada em Proceedings of the fifth national passive solar conference, em Amherst, MA, USA, de 19 a 26 de outubro.

TNO DIANA BV. 2010. *User's Manual - Release 9.4.3*. Delft: TNO DIANA BV. Acedido a 12 de maio de 2010. https://support.tnodiana.com/manuals/d943/MatLib/MatLib.html.

Tyagi, Vineet Veer e D. Buddhi. 2007. "PCM thermal storage in buildings: A state of art." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* no. 11 (6):1146-1166. Acedido a 21 de janeiro de 2012. doi: 10.1016/j.rser.2005.10.002.

US department of Energy. 2010. *Getting Started with EnergyPlus: Basic concepts manual*. ed University of Illinois. University of Illinois: US department of Energy. Acedido a 16 de março de 2011. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/gettingstarted.pdf.

———. 2012. Energy Efficiency & Renewable Energy. EnergyPlus Energy Simulation Software: Weather Data: Portugal. Acedido a 4 de abril. http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal

Veiga, Maria do Rosário. 1998. "Comportamento de argamassas de revestimento de paredes: contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação". Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto.

Wacker. 2008. *Mineral plasters for long-lasting masonary protection*. München: Wacker Chemie AG.

Xiao, Wei, Xin Wang e Yinping Zhang. 2009. "Analytical optimization of interior PCM for energy storage in a lightweight passive solar room." *Applied Energy* no. 86 (10):2013-2018. Acedido a 9 de abril de 2012. doi: 10.1016/j.apenergy.2008.12.011.

Xu, Xu, Yinping Zhang, Kunping Lin, Hongfa Di e Rui Yang. 2005. "Modeling and simulation on the thermal performance of shape-stabilized phase change material floor used in passive solar buildings." *Energy and Buildings* no. 37 (10):1084-1091. Acedido a 13 de maio de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2004.12.016.

Zalba, Belén, José M. Marín, Luisa F. Cabeza e Harald Mehling. 2003. "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications." *Applied Thermal Engineering* no. 23 (3):251-283. Acedido a 3 de setembro de 2010. doi: 10.1016/s1359-4311(02)00192-8.

Zhang, Yinping, Kunping Lin, Yi Jiang e Guobing Zhou. 2008. "Thermal storage and nonlinear heat-transfer characteristics of PCM wallboard." *Energy and Buildings* no. 40 (9):1771-1779. Acedido a 1 de março de 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2008.03.005.

Zhou, D., C. Y. Zhao e Y. Tian. 2012. "Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications." *Applied Energy* no. 92 (0):593-605. Acedido a 30 de maio de 2012. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.08.025.