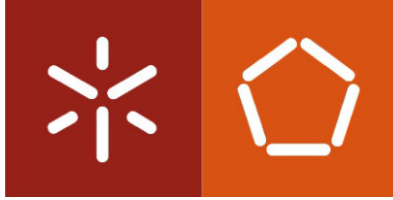


Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Nuno André Oliveira de Sá

**Identificação do tipo e quantidade de
PCM adequado ao clima Português**



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Nuno André Oliveira de Sá

**Identificação do tipo e quantidade de
PCM adequado ao clima Português**

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação da
Professora Doutora Sandra Monteiro da Silva

Declaração

Nome: Nuno André Oliveira de Sá

Endereço eletrónico: nunoaosa88@gmail.com

Número do B.I.: 13387440

Título do Relatório: Identificação do tipo e quantidade de PCM adequado ao clima Português

Orientadora: Professora Doutora Sandra Monteiro da Silva

Ano de Conclusão: 2015

Designação do Mestrado: Mestrado Integrado em Engenharia Civil

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTE RELATÓRIO, APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.

Universidade do Minho, 30/10/2015

Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a todos aqueles que têm por mim apreço e amizade: a minha família e os meus amigos e de um modo particular o tio Arquiteto Anton Graf, por me ter facultado, orientando, a primeira experiência na área da construção civil.

“Pedras no caminho?

Guardo todas, um dia vou construir um castelo...”

Fernando Pessoa

AGRADECIMENTOS

À professora Sandra Monteiro da Silva que me orientou nesta dissertação, pelo seu apoio sempre disponível e por todas as sugestões que contribuíram para o enriquecimento deste projeto.

Aos meus pais Helena e Lino, as pessoas mais importantes da minha vida. Sempre estiveram presentes, confiaram em mim quando eu próprio duvidei, com o seu apoio e motivação me transmitiram sempre muita coragem. Sem eles não seria a pessoa que sou, obrigado.

À minha irmã Ana, por todo o apoio, compreensão, ajuda não só nesta etapa final, mas em todo o meu percurso académico que sempre esteve ao meu lado.

À minha amiga Alexandra, agradeço o enorme apoio, motivação e disponibilidade pessoal por todos os conselhos que me deu e que adicionaram qualidade a este trabalho.

A todos os meus verdadeiros amigos, por existirem, fazerem parte da minha vida e apoiarem-me em todos os momentos.

Um muito obrigado a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho.

RESUMO

Os edifícios de habitação e serviços são responsáveis por grande parte da energia consumida mundialmente. O aumento dos níveis de conforto destes edifícios tem sido feito com base no consumo de energias não renováveis, o que provoca graves impactos no meio ambiente e tem originado preocupações na sociedade em geral. A comunidade científica centra atualmente a investigação na procura de soluções construtivas inovadoras e na utilização de novos materiais que assegurem os mesmos níveis de conforto, mas que contribuam para a diminuição da fatura energética.

Os materiais de mudança de fase (PCM, do inglês *Phase Change Materials*) possuem a capacidade de armazenamento térmico de energia sob a forma de calor latente. A utilização destes materiais permite regular a temperatura no interior dos edifícios mantendo os níveis de conforto, diminuindo o recurso a equipamentos de climatização alimentados por energias poluentes provenientes de combustíveis fósseis.

Esta dissertação tem por objetivo estudar o impacto energético resultante da incorporação de PCM nas soluções construtivas de uma habitação unifamiliar em diferentes zonas de Portugal (Bragança, Porto e Évora). O primeiro passo foi identificar o tipo e as quantidades de PCM adequados ao clima português, e de seguida analisar os ganhos energéticos resultantes da utilização de energia passiva nessas cidades.

A metodologia utilizada para a concretização dos objetivos foi a simulação da inclusão de PCM numa parede simples e para o efeito, utilizou-se a ferramenta de simulação computacional de comportamento térmico de edifícios – *EnergyPlus*. Da utilização de dois tipos e de duas quantidades de PCM, obtiveram-se resultados diferenciados e após a análise desses resultados, definiram-se as poupanças energéticas associadas ao uso e à quantidade de determinado PCM. Os resultados obtidos confirmam que a utilização de PCM sem outros sistemas de climatização não assegura as condições de conforto térmico ideais dentro das habitações; no entanto foi possível verificar que em cidades com o mesmo tipo de clima que na cidade do Porto, existe algum potencial na utilização deste tipo de materiais.

Palavras-chave: Energia, armazenamento térmico, materiais de mudança de fase (PCM), calor latente, *Energy Plus*.

ABSTRACT

Residential and office buildings are responsible for a great amount of the world's energy consumption. The increase in the comfort levels of these buildings has been granted mainly using of non-renewable energies sources, which have a great impact in the environment and concerns the society, the scientific community is focusing its research in the search for innovative construction solutions and materials, to the same comfort levels while contributing towards the reduction of the energy consumption.

Phase change materials (PCM) have the capacity to store thermal energy as latent heat. The use of these materials enables the control of temperature in buildings while maintaining comfort levels, reducing the need to use HVAC systems that, in general, use energies sources, derived from fossil fuels.

The aim of this dissertation is to study the energetic impact that results from the incorporation of PCM in the construction of a single house family in different areas in Portugal (Bragança, Porto and Évora). First, has been identified the type and quantity of PCM that is most suitable for the Portuguese climate and then has been optimized the energy gains that result from the usage of passive energy.

In order to fulfill this objective, the methodology consisted on a simulation of the inclusion of PCM in a simple wall, using a simulation software for thermal behavior in buildings – *EnergyPlus*. A differentiated result was obtained, for two kinds and two quantities of PCM, which was then analyzed and used for defining the energetic savings associated with the usage and quantity of a type of PCM. The conclusions allow an assessment of the incorporation of PCM in situations similar to the ones in this study.

Keywords: Energy, thermal storage, phase change materials (PCM), latent heat, *Energy Plus*.

ÍNDICE GERAL

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 ENQUADRAMENTO.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	6
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7
2. ESTADO DE ARTE.....	9
2.1 PCM – MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE	10
2.2 CONCEITO DE PCM.....	10
2.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS PCM	11
2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS PCM	14
2.4.1 PCM Orgânicos	15
2.4.2 PCM Inorgânicos.....	18
2.4.3 Misturas Eutéicas	19
2.5 PROPRIEDADES DOS PCM.....	22
2.6 ENCAPSULAMENTO DOS PCM	24
2.6.1 Macroencapsulamento.....	26
2.6.2 Microencapsulamento.....	27
2.7 APLICAÇÕES DOS PCM	30
2.7.1 Aplicações de PCM na Construção	31
2.7.1.1 Construção Sustentável.....	31
2.7.1.2 Estudos Realizados	35
2.7.1.3 Aplicação de PCM em Edifícios.....	36
2.7.1.4 Comercialização de PCM	48
2.7.2 Outras aplicações	49
3. METODOLOGIA	53
3.1 ENQUADEAMENTO DA METODOLOGIA.....	54
3.2 PROGRAMA INFORMÁTICO UTILIZADO	55
3.3 PCM	66
3.3.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26.....	68
3.3.2 Delta®-Cool 24.....	71
3.4 O EDIFÍCIO	73
3.4.1 Descrição Geral do Edifício	73
3.4.2 Soluções Construtivas.....	75
3.4.2.1 Parede Exterior.....	76

3.4.2.2 Parede Exterior com PCM.....	77
3.4.2.3 Parede Divisória Interior.....	79
3.4.2.4 Laje de Pavimento Térreo.....	80
3.4.2.5 Laje de Cobertura Horizontal.....	80
3.4.2.6 Portas	81
3.4.2.7 Envidraçados	81
4. RESULTADOS.....	83
4.1 ENQUADEAMENTO DOS RESULTADOS	84
4.2 FASE 1	85
4.2.1 Bragança - Dia típico de Inverno	85
4.2.1.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26	85
4.2.1.2 Delta®-Cool 24	88
4.2.2 Bragança - Dia típico de Verão	90
4.2.2.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26	90
4.2.2.2 Delta®-Cool 24	93
4.2.3 Porto - Dia típico de Inverno	95
4.2.3.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26	95
4.2.3.2 Delta®-Cool 24	98
4.2.4 Porto - Dia típico de Verão	100
4.2.4.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26	100
4.2.4.2 Delta®-Cool 24	103
4.2.5 Évora - Dia típico de Inverno	105
4.2.5.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26	105
4.2.5.2 Delta®-Cool 24	108
4.2.6 Évora - Dia típico de Verão.....	110
4.2.6.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26	110
4.2.6.2 Delta®-Cool 24	112
4.2.7 Conclusão da Análise dos Resultados	114
4.3 - FASE 2	115
4.4 - FASE 3	117
4.4.1 - BRAGANÇA.....	117
4.4.2 - ÉVORA.....	119
4.4.3 - PORTO.....	120
4.4.4 – Conclusões da Análise dos Resultados	122
4.5 - FASE 4	122
4.5.1 – Necessidades Energéticas Anuais e Custos Inerentes	122

5. CONCLUSÕES	125
5.1 – CONCLUSÕES FINAIS.....	126
5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
ANEXOS	139

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1- DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO EUROPEU DE ENERGIA POR SETOR DE ATIVIDADE NA UNIÃO EUROPEIA EM 2011 (A) E ENERGIA CONSUMIDA NO SETOR RESIDENCIAL EM PORTUGAL EM 2010 (B) [ADAPTADO DE 4].....	3
FIGURA 2 – CUMPRIMENTO DAS METAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE FONTES RENOVÁVEIS ATÉ 2020 NA EU [5]	4
FIGURA 3 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UM MATERIAL DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO (PCM) [ADAPTADA DE 12]	12
FIGURA 4 – PROCESSOS DE TRANSIÇÃO DO AQUECIMENTO DE UMA SUBSTÂNCIA [13].....	12
FIGURA 5 – CLASSIFICAÇÃO DOS PCM.....	14
FIGURA 6 – ESTRUTURA DE UMA PARAFINA [17].....	15
FIGURA 7 – ENCAPSULAMENTO DO PCM [17].....	25
FIGURA 8 – MACROENCAPSULAMENTO DE PCM COMERCIALIZADO [23]	27
FIGURA 9 – MODO DE ENCAPSULAMENTO DE PCM ATRAVÉS DE ESFERAS [23]	27
FIGURA 10 – IMAGEM MICROSCÓPICA DE UM PCM MICROENCAPSULADO [26]	29
FIGURA 11 – MICROENCAPSULAMENTO DE PCM [26].....	29
FIGURA 12 – UTILIZAÇÃO INDEVIDA DE ENERGIA [22]	31
FIGURA 13 – CONTRIBUTO DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE PARA UMA CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL [22]	32
FIGURA 14 – RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA TÉRMICA E A TEMPERATURA A QUE OCORREM AS MUDANÇAS DE FASE [ADAPTADA DE 29].....	32
FIGURA 15 – VARIAÇÕES DE TEMPERATURA VERIFICADAS COM O USO DE PCM EM EDIFÍCIOS [ADAPTADA DE 30]	34
FIGURA 16 – COMPARAÇÃO DAS TEMPERATURAS PARA UM EDIFÍCIO COM E SEM INCORPORAÇÃO DE PCM [22]	34
FIGURA 17 – APLICAÇÃO DE PCM EM EDIFÍCIOS	37
FIGURA 18 – PLACA DE PAREDE DE PCM [14].....	38
FIGURA 19 – REPRESENTAÇÃO DA SEÇÃO TRANSVERSAL DO MODELO [41]	39
FIGURA 20 – VISTA ESQUEMÁTICA DA JANELA COM CORTINA CIRCULANTE DE PCM [36]	41
FIGURA 21 – PCM APLICADO NO INTERIOR DE ENVIDRAÇADOS DUPLOS [45]	41
FIGURA 22 – TELHADO DE BETÃO INTEGRANDO ELEMENTOS CÔNICOS DE PCM [48]	42
FIGURA 23 – SISTEMA DE ARREFECIMENTO NATURAL: (A) MODO DIURNO; (B) MODO NOTURNO [54]	45
FIGURA 24 – MODELO EXPERIMENTAL EM TIJOLOS [56].....	47
FIGURA 25 – TEMPERATURAS REGISTADAS EM ARGAMASSAS SEM E COM INCORPORAÇÃO DE PCM EM PERCENTAGEM DE 30% E 50% [57]	48

FIGURA 26 – TECIDO COM PCM INCORPORADO [61].....	51
FIGURA 27 – ESTRUTURA E MÓDULOS DO <i>ENERGYPLUS</i> [66]	57
FIGURA 28 – INTERFACE VISUAL DA FUNCIONALIDADE <i>EP-LAUNCH</i>	61
FIGURA 29 – INTERFACE DO <i>IDF EDITOR</i> RELATIVO AO CAMPO DO EDIFÍCIO.....	62
FIGURA 30 – DEFINIÇÃO DA ESTAÇÃO CONVENCIONAL DE ARREFECIMENTO E AQUECIMENTO	63
FIGURA 31 – CAMPO DE INTRODUÇÃO DAS SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS DO EDIFÍCIO	64
FIGURA 32 – VARIÁVEIS DE RESULTADOS UTILIZADOS NO <i>ENERGYPLUS</i>	66
FIGURA 33 – PLACA DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26 [72].....	69
FIGURA 34 – CURVA DO CALOR ESPECÍFICO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD 23/26	70
FIGURA 35 – CURVA DA ENTALPIA DE FUSÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD	70
FIGURA 36 - CURVA DO CALOR ESPECÍFICO DO PCM DELTA®-COOL 24	72
FIGURA 37 – CURVA DA ENTALPIA DE FUSÃO DO DELTA®-COOL24.....	72
FIGURA 38 – EDIFÍCIO EM PLANTA.....	74
FIGURA 39 – FACHADA SUL DO EDIFÍCIO	74
FIGURA 40 – PAREDE EXTERIOR SEM PCM.....	76
FIGURA 41 – LOCALIZAÇÃO DA PAREDE EXTERIOR SIMPLES	77
FIGURA 42 – PAREDE EXTERIOR COM PCM	78
FIGURA 43 – LOCALIZAÇÃO DA PAREDE EXTERIOR ORIENTADA A SUL COM PCM	78
FIGURA 44- PAREDE DIVISÓRIA INTERIOR.....	79
FIGURA 45 – LOCALIZAÇÃO DA PAREDE DIVISÓRIA INTERIOR.....	79
FIGURA 46 – LAJE DE PAVIMENTO TÉRREO	80
FIGURA 47 – LAJE DE COBERTURA	80
FIGURA 48 – PORTAS INTERIORES E PORTAS EXTERIORES	81
FIGURA 49 - ENVIDRAÇADOS	81
FIGURA 50 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 2	86
FIGURA 51 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 1	86
FIGURA 52 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE INVERNO, NA SALA	87
FIGURA 53 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 2	88
FIGURA 54 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 1	89
FIGURA 55 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE INVERNO, NA SALA	90

FIGURA 56 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 2	91
FIGURA 57 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 1	91
FIGURA 58 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE VERÃO, NA SALA	92
FIGURA 59 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 2	93
FIGURA 60 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 1	94
FIGURA 61 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A BRAGANÇA NUM DIA DE VERÃO, NA SALA	94
FIGURA 62 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 2	96
FIGURA 63 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 1	96
FIGURA 64 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE INVERNO, NA SALA	97
FIGURA 65 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 2.....	98
FIGURA 66 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 1.....	99
FIGURA 67 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE INVERNO, NA SALA.....	100
FIGURA 68 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 2.....	101
FIGURA 69 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 1.....	101
FIGURA 70 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE VERÃO, NA SALA.....	102
FIGURA 71 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 2	103
FIGURA 72 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 1	104
FIGURA 73 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE VERÃO, NA SALA	105

FIGURA 74 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 2	106
FIGURA 75 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 1	106
FIGURA 76 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE INVERNO, NA SALA	107
FIGURA 77 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 2	108
FIGURA 78 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE INVERNO, NO QUARTO 1	109
FIGURA 79 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE INVERNO, NA SALA	109
FIGURA 80 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 2	110
FIGURA 81 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 1	111
FIGURA 82 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE VERÃO, NA SALA	112
FIGURA 83 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 2	113
FIGURA 84 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 1	113
FIGURA 85 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, RELATIVAS A ÉVORA NUM DIA DE VERÃO, NA SALA	114
FIGURA 86 – TEMPERATURAS INTERIORES COM UMA E COM DUAS CAMADAS DE DELTA®-COOL 24 E SEM A INCORPORAÇÃO DO PCM, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 2	116
FIGURA 87 - TEMPERATURAS INTERIORES COM UMA E COM DUAS CAMADAS DE DELTA®-COOL 24 E SEM A INCORPORAÇÃO DO PCM, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE VERÃO, NO QUARTO 1	116
FIGURA 88 - TEMPERATURAS INTERIORES COM UMA E COM DUAS CAMADAS DE DELTA®-COOL 24 E SEM A INCORPORAÇÃO DO PCM, RELATIVAS AO PORTO NUM DIA DE VERÃO, NA SALA	117
FIGURA 89 - TEMPERATURAS INTERIORES COM UMA CAMADA DE DELTA®-COOL 24 E MICRONAL® SMARTBOARD 23/26 E SEM A INCORPORAÇÃO DE PCM, RELATIVAS AO MÊS DE_FEVEREIRO EM BRAGANÇA	118
FIGURA 90 - TEMPERATURAS INTERIORES COM UMA CAMADA DE DELTA®-COOL 24 E MICRONAL® SMARTBOARD 23/26 E SEM A INCORPORAÇÃO DE PCM, RELATIVAS AO MÊS DE JULHO EM BRAGANÇA.....	118
FIGURA 91 - TEMPERATURAS INTERIORES COM UMA CAMADA DE DELTA®-COOL 24 E MICRONAL® SMARTBOARD 23/26 E SEM A INCORPORAÇÃO DE PCM, RELATIVAS AO MÊS DE_FEVEREIRO EM ÉVORA	119

FIGURA 92 - TEMPERATURAS INTERIORES COM UMA CAMADA DE DELTA®-COOL 24 E MICRONAL® SMARTBOARD 23/26 E SEM A INCORPORAÇÃO DE PCM, RELATIVAS AO MÊS DE JULHO EM ÉVORA.....	120
FIGURA 93 - TEMPERATURAS INTERIORES COM UMA CAMADA DE DELTA®-COOL 24 E MICRONAL® SMARTBOARD 23/26 E SEM A INCORPORAÇÃO DE PCM, RELATIVAS AO MÊS DE FEVEREIRO NO PORTO.....	121
FIGURA 94 - TEMPERATURAS INTERIORES COM UMA CAMADA DE DELTA®-COOL 24 E MICRONAL® SMARTBOARD 23/26 E SEM A INCORPORAÇÃO DE PCM, RELATIVAS AO MÊS DE JULHO NO PORTO.....	121
FIGURA 95 – NECESSIDADES ENERGÉTICAS ANUAIS DO EDIFÍCIO.....	122

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – TIPOS DE PCM ORGÂNICOS [16]	17
TABELA 2 – COMPOSTOS ORGÂNICOS DE PCM NÃO PARAFÍNICOS (ÁCIDOS GORDOS) [16]	18
TABELA 3 – TIPOS DE PCM INORGÂNICOS [16].....	19
TABELA 4 – COMPOSTOS EUTÉCTICOS INORGÂNICOS [16]	20
TABELA 5 – COMPOSTOS EUTÉCTICOS ORGÂNICOS [16]	20
TABELA 6 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS PCM ORGÂNICOS, INORGÂNICOS E EUTÉCTICOS	21
TABELA 7 – MATERIAIS DE ARMAZENAMENTO DE CALOR LATENTE E SUAS FAIXAS DE TEMPERATURAS [10].	22
TABELA 8 – PROPRIEDADES DO REVESTIMENTO COM PCM [30].....	45
TABELA 9 – TEMPERATURAS EXTERIORES DOS TIJOLOS COM E SEM PCM [55]	46
TABELA 10 – PCM COMERCIAIS [7].....	49
TABELA 11 – COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DOS PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO [65]	56
TABELA 12 – PROPRIEDADES DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD [72]	69
TABELA 13 – FICHA TÉCNICA DO DELTA®-COOL 24 [73].....	71
TABELA 14 –PERFIL DO EDIFÍCIO	75
TABELA 15 – COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO TÉRMICA	76
TABELA 16 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 2	86
TABELA 17 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 1	87
TABELA 18 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NA SALA	87
TABELA 19 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO2	89
TABELA 20 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO1	89
TABELA 21 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NA SALA	90
TABELA 22 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 2	91
TABELA 23 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 1	92
TABELA 24 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NA SALA	92
TABELA 25 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO2	93

TABELA 26 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO1	94
TABELA 27 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NA SALA	95
TABELA 28 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 2	96
TABELA 29 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 1	97
TABELA 30 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NA SALA	97
TABELA 31 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO2	99
TABELA 32 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO1	99
TABELA 33 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NA SALA ..	100
TABELA 34 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 2	101
TABELA 35 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 1	102
TABELA 36 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NA SALA	102
TABELA 37 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO2	104
TABELA 38 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO1	104
TABELA 39 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NA SALA ..	105
TABELA 40 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 2	106
TABELA 41 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 2	107
TABELA 42 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NA SALA	107
TABELA 43 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO2	108
TABELA 44 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO1	109
TABELA 45 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NA SALA ..	110

TABELA 46 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 2	111
TABELA 47 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NO QUARTO 1	111
TABELA 48 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD™ 23/26, NA SALA	112
TABELA 49 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO2	113
TABELA 50 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NO QUARTO1	114
TABELA 51 - TEMPERATURAS INTERIORES COM E SEM A INCORPORAÇÃO DO DELTA®-COOL 24, NA SALA ..	114
TABELA 52 – GASTOS ENERGÉTICOS DO EDIFÍCIO COM E SEM PCM	124
TABELA 53 - VALORES DA TEMPERATURA E ENTALPIA DE FUSÃO A INTRODUIR NO ENERGYPLUS DO MICRONAL® PCM SMARTBOARD 23/26 (ANEXO À FIGURA 35).....	140
TABELA 54 - VALORES DA TEMPERATURA E ENTALPIA DE FUSÃO A INTRODUIR NO ENERGYPLUS DO DELTA®-COOL 24 (ANEXO À FIGURA 37).....	141
TABELA 55 - COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA PARA A PAREDE EXTERIOR SIMPLES	142
TABELA 56 - COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA PARA A PAREDE EXTERIOR SIMPLES COM PCM MICRONAL® PCM SMARTBOARD	142
TABELA 57 - COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA PARA A PAREDE EXTERIOR SIMPLES COM PCM DELTA®-COOL 24.....	143
TABELA 58 - COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA PARA A PAREDE DIVISÓRIA INTERIOR	143
TABELA 59 - COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA PARA A LAJE DE PAVIMENTO TÉRREO	144
TABELA 60 - COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA PARA A LAJE DE COBERTURA	144

LISTA DE SIGLAS E DE SÍMBOLOS

AQS	Águas Quentes Sanitárias
AVAC	Aquecimento, ventilação e ar condicionado
CO ₂	Dióxido de carbono
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (National Aeronautics and Space Administration)
PCM	Material de mudança de fase (Phase Change Materials)
E+	EnergyPlus
PNAEE	Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética
PNAER	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
UE	União Europeia
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
REH	Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação
cm	Centímetro
U	Coeficiente de transferência térmica global
°C	Grau Celsius
°F	Grau Fahrenheit
h	Hora
K	Kelvin
l	Litro
l/h	Litro por hora
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
µm	Micrometro
mg	Miligrama
mm	Milímetro
kg	Quilograma
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico

$\text{kg/m}^3/\text{h}$	Quilograma por metro cúbico por hora
kJ	Quilojoule
kJ/kg	Quilojoule por quilograma
kJ/kg.K	Quilojoule por quilograma por Kelvin
kWh	Quilowatt-hora
kWh/m^2	Quilowatt-hora por metro quadrado
pH	Potencial de hidrogénio
W	Watt
W/(m.K)	Watt por metro por Kelvin
W/m^2	Watt por metro quadrado
W/m.K	Watt por metro por Kelvin
Wh	Watt-hora
Wh/m^2	Watt-hora por metro quadrado
J/kg.K	Joule por quilograma por Kelvin
ΔT	Amplitude térmica

CAPÍTULO 1.

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A abundância de recursos energéticos na natureza, aliada à facilidade da sua obtenção com baixos custos, conduziu mundialmente a excessos na sua utilização. Os consumos de energia tornaram-se insustentáveis à escala global, perturbando o equilíbrio ambiental. As manifestações mais visíveis destes desequilíbrios são o aquecimento global, as emissões de dióxido de carbono (CO₂), as chuvas ácidas responsáveis pela degradação dos edifícios e florestas e pelas alterações climáticas e consequente degradação dos ecossistemas [1].

Desenvolver e implementar campanhas de sensibilização para o consumo racional de energia, e a procura de fontes alternativas às energias fósseis, são caminhos a percorrer hoje pela humanidade, sob o risco de hipotecar ela própria a sustentabilidade do planeta. Os novos desafios do Homem exigem que se perspetivem novas atitudes e hábitos futuros, a partir dos conceitos de sustentabilidade e desenvolvimento.

É neste sentido, que a União Europeia (UE) através da Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho Europeu, relativa ao desempenho energético dos edifícios, de 19 de Maio de 2010, adverte para a necessidade de se aumentar a eficiência energética na UE. Esta Diretiva define como objetivo a redução até 2020, de 20% do consumo de energia e das emissões globais de gases com efeito de estufa. Esta redução equivale a uma redução de 368 milhões de toneladas equivalente de petróleo (Mtep), em relação aos níveis de 1990. O cumprimento destes objetivos permitirá à União Europeia cumprir o Protocolo de Quioto da Convenção - Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas [2].

Segundo esta Diretiva, os edifícios representam 40% do consumo de energia total na UE e nos últimos anos, as exigências ao nível do conforto no interior dos edifícios têm como consequência o aumento do número de aparelhos de ar condicionado nos países europeus. Este facto aumenta as dificuldades económicas devido aos custos cada vez mais elevados da energia. Além disso, representa um aumento dos consumos de energia e consequente deterioração do equilíbrio energético e ambiental [2].

A Comissão Europeia apresentou em Lisboa em Janeiro de 2014, o novo quadro de política climática e energética que prevê a diminuição das emissões de gases com efeito de estufa em 40% até 2030 e o aumento para 27% da contribuição das energias renováveis no total do

consumo energético. Em matéria de clima e energia, para 2030 a União Europeia prevê investimentos de cerca de 38 mil milhões de euros anuais na renovação de equipamentos visando reduzir as emissões de carbono, medida que permitirá poupar 18 mil milhões de euros em combustíveis. Além da descarbonização da economia, a UE refere que o conjunto de medidas trará "mais valor acrescentado" na inovação e criação de emprego, devido à utilização de novas tecnologias, e recordou que na UE existem muitos sistemas obsoletos na área dos combustíveis que necessitam de renovação [3].

Na Figura 1 está representada a distribuição do consumo europeu de energia, por setor de atividade (a) e a energia consumida nos edifícios residenciais em Portugal (b).

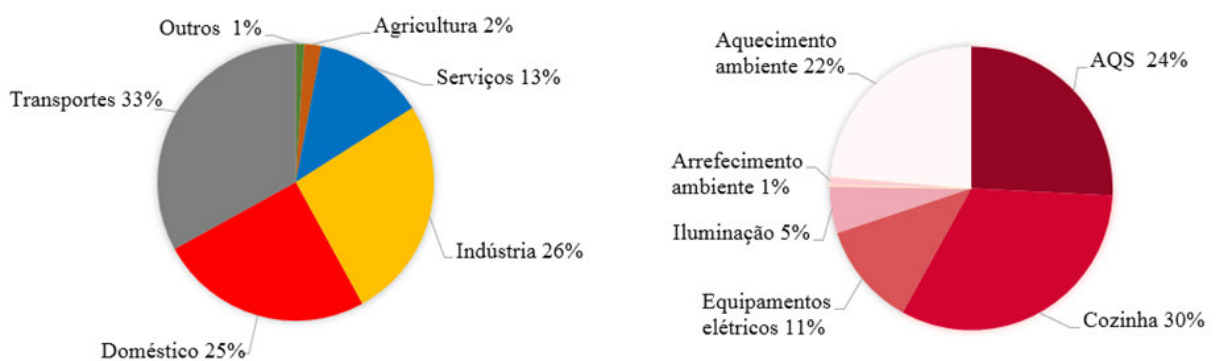


Figura 1- Distribuição do consumo europeu de energia por setor de atividade na União Europeia em 2011 (a) e energia consumida no setor residencial em Portugal em 2010 (b) [adaptado de 4]

O documento de apoio à revisão dos Planos Nacionais de Ação para a Eficiência Energética e para as Energias Renováveis de 18 de Abril de 2012 (PNAEE/PNAER) refere que em 2009 Portugal já tinha cumprido 79% dos objetivos traçados: à sua frente estão apenas a Suécia (97%), a Finlândia (80%), e a Áustria (87%) (Figura 2). Segundo este documento Portugal tem apenas em falta 6% da meta de 25% do peso das renováveis face ao consumo energético nacional [5].

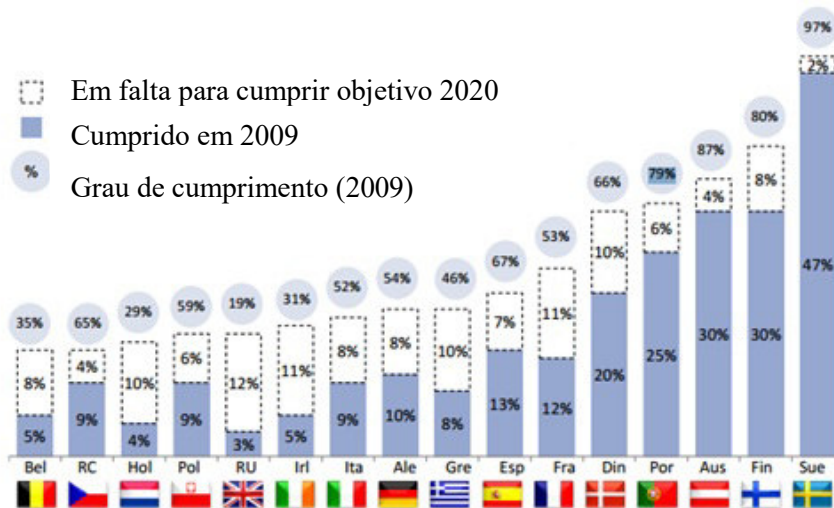


Figura 2 – Cumprimento das metas de produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis até 2020 na EU [5]

A redução do consumo de energia e a utilização de energia proveniente de fontes renováveis no setor dos edifícios, constituem medidas importantes e necessárias para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e a dependência energética da União Europeia. A estratégia da UE aponta para maiores investimentos em eficiência energética nas habitações [2].

O setor dos edifícios representa 27,1% do consumo total de energia e assume-se como um dos principais consumidores de energia, prevendo-se que em 2035 esse setor, à escala mundial, seja o quarto maior emissor de CO₂ [6].

No entanto, o setor da construção tem desenvolvido alguns progressos com vista à diminuição do consumo energético dos edifícios. Pode-se enumerar como bons exemplos, o desenvolvimento de novos materiais de isolamento térmico e de elementos construtivos dos edifícios que têm impacto significativo no desempenho energético da envolvente. Outros exemplos são a aplicação de novos conceitos de construção, o aproveitamento de energias renováveis, com especial aproveitamento da energia solar e a incorporação nas construções de resíduos de construção ou de demolição.

Por outro lado, também se verifica que a utilização de equipamentos mecânicos para melhorar o conforto térmico desejado nos edifícios, tem também vindo a aumentar, o que, por sua vez, leva ao aumento do consumo de energia [6]. Na procura de novas e melhores soluções, deverá

ser dada prioridade a estratégias que contribuam para melhorar o desempenho térmico dos edifícios.

Os sistemas de arrefecimento, tais como os sistemas de climatização têm vindo a assumir relevância, para se obter condições de conforto térmico. Em consequência do aumento da utilização desses equipamentos, aumentam também os consumos energéticos. Para se reduzirem esses aumentos energéticos, deverão privilegiar-se medidas inovadoras que evitem o sobreaquecimento, tais como a proteção solar e uma inércia térmica suficiente no edifício, bem como o desenvolvimento e aplicação de técnicas de arrefecimento/aquecimento passivo, que melhorem as condições de conforto no interior dos edifícios e que tenham menor impacto ambiental [7].

Relativamente a Portugal, os gastos com a energia são significativos uma vez que o país importa grande parte da energia que consome. A viver uma grave crise económica, Portugal paga uma fatura elevada em energia porque apenas produz cerca de 15% da que necessita. Como na sua maioria a energia consumida é de origem fóssil, a fatura é ainda maior porque para além da vertente económica, também há a vertente ambiental [8, 9].

É importante que soluções inovadoras sejam implementadas para potencializar os muitos recursos naturais de que o país dispõe, como o sol, o mar ou o vento [8, 9].

O armazenamento de calor latente apresenta-se como uma tecnologia muito promissora em desenvolvimento, devido a diversas vantagens operacionais que ela oferece. No desenvolvimento de sistemas de armazenamento de calor latente, a investigação em curso tem sido feita com base na procura e utilização de materiais de mudança de fase conhecidos por PCM (Phase Change Material) [10]. Zhu et al. [11] reconheceu os sistemas de armazenamento de energia térmica utilizando PCM como uma das tecnologias mais avançadas para melhorar a eficiência energética e garantir a sustentabilidade dos edifícios.

Já testados e aplicados com sucesso em outras áreas, os PCM estão atualmente a ser uma aposta no setor da construção. Práticas inovadoras e estudos científicos têm sido realizados e apontam estes materiais como potencialmente inovadores na termorregulação dos edifícios, capazes de contribuírem para a redução do consumo energético. Neste sentido, qualquer

trabalho de investigação científica acerca das potencialidades destes materiais, assume-se com elevada importância e atualidade na área da construção civil.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o impacto nos consumos energéticos, no conforto térmico resultantes da incorporação de PCM em soluções construtivas correntes em Portugal, a sua adequação ao clima nacional, mais concretamente nas cidades de Bragança, Porto e Évora, e quais as poupanças energéticas inerentes. Pretende-se que seja um trabalho inovador e capaz de dar um contributo válido na procura de soluções construtivas que potenciem avanços significativos ao nível do desempenho energético.

Para além deste objetivo pretende-se com esta investigação:

- Avaliar a influência do PCM como elemento termorregulador no interior dos edifícios. Analisar o seu potencial como elemento de armazenamento e libertação de energia, capaz de contribuir para a obtenção de níveis aceitáveis de conforto térmico.
- Estudar os vários tipos de PCM existentes no mercado, para determinar qual o material que reúne características que associadas ao clima possibilitem maior capacidade de aproveitamento passivo da radiação solar.
- Determinar as quantidades adequadas e definir as condições de aplicação do PCM selecionado de modo a garantir o maior benefício do armazenamento de calor latente capaz de diminuir a amplitude do fluxo de calor no interior dos edifícios.
- Fornecer recomendações, com base nos resultados obtidos, que contribuam significativamente para a utilização de PCM em situações construtivas semelhantes às utilizadas.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação é estruturada da seguinte forma:

1 – Introdução: Apresenta-se neste capítulo o enquadramento do trabalho. São apresentados os problemas económicos, sociais e ambientais relacionados com os consumos de energia a nível global. São definidas as metas propostas a nível mundial e europeu para se diminuir a dependência face ao consumo de energia de origem fóssil. No caso de Portugal, é referido o impacto dos consumos energéticos dos edifícios, e a necessidade de investigação para se conseguir desenvolver estratégias que diminuam os consumos energéticos. É proposto o uso de materiais de mudança de fase como meio de o conseguir. Neste capítulo são ainda apresentados os objetivos do trabalho e a estrutura da dissertação.

2 – Estado de Arte: Neste capítulo é realizado um estudo teórico sobre o tema e a sua importância enquanto agente termorregulador dos edifícios. É apresentado a definição de PCM e o seu princípio de funcionamento, tendo por base o ponto de fusão destes materiais. É realizado o estudo das suas propriedades e com base nestas, é feita a sua classificação. Faz-se o estudo dos métodos de encapsulamento e da comercialização. Apresentam-se as vantagens da sua aplicação, em particular no setor da construção de edifícios.

3 – Metodologia: Neste capítulo apresenta-se o programa de simulação computacional de comportamento térmico dos edifícios que foi utilizado neste trabalho - *EnergyPlus*. São elencadas as suas características principais, as suas potencialidades e linhas orientadoras para sua utilização. Apresenta-se o edifício utilizado no estudo, e as principais características dos seus elementos construtivos e é feita a seleção dos PCM a utilizar no caso em estudo.

4 – Resultados: Apresentam-se, neste capítulo, os resultados obtidos nas diferentes simulações efetuadas. É feita a sua interpretação de acordo com as condições em que foram obtidos e é realizada a análise comparativa dos mesmos tendo em conta as diferentes simulações.

5 – Conclusões: Neste capítulo são apresentadas as conclusões da investigação realizada. Estas conclusões terão como suporte científico os resultados obtidos e as análises realizadas acerca dos mesmos. Serão também apresentadas as limitações e dificuldades encontradas ao

longo do desenvolvimento do trabalho e serão apresentadas possíveis propostas de aplicação do PCM em novas construções de edifícios em trabalhos futuros.

Referências bibliográficas

Anexos

CAPÍTULO 2.

ESTADO DE ARTE

2.1 PCM – MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE

A necessidade da utilização racional e eficiente da energia nos edifícios, conduziu à utilização de técnicas cada vez mais evoluídas que requerem um conjunto de processos para que o seu aproveitamento seja otimizado. Essas técnicas desenvolvem-se sobre o conceito de armazenamento de energia [10].

Existem dois princípios básicos de armazenamento de energia térmica: o armazenamento de calor sensível, em que a temperatura do material de armazenamento varia com a quantidade de energia armazenada, e o de armazenamento de calor latente, que faz uso da energia armazenada quando uma substância muda de uma fase para a outra [10].

O armazenamento de calor latente é uma tecnologia em desenvolvimento que é promissora, devido a diversas vantagens operacionais que oferece, e a investigação em curso, tem sido feita com base na investigação e utilização de materiais de mudança de fase, conhecidos por PCM [10].

Neste capítulo estuda-se o conceito de material de mudança de fase, que genericamente se denomina por PCM. Para além do conceito, apresenta-se o princípio de funcionamento destes materiais, baseado nas suas propriedades físicas e térmicas; a sua classificação de acordo com os materiais que os compõem; as propriedades dos PCM, referindo as diferentes propriedades físicas, químicas, cinéticas e económicas, bem como o processo geral e as técnicas do seu encapsulamento.

2.2 CONCEITO DE PCM

Os PCM são materiais com a capacidade de alterar o seu estado físico num determinado intervalo de temperatura, e que ao fazê-lo, absorvem ou libertam energia do meio envolvente [7]. Durante este processo de mudança de fase, a temperatura do PCM mantém-se praticamente constante. Quando a mudança de fase está completa, o aquecimento ou arrefecimento resultam no aumento ou diminuição da temperatura de forma gradual e definida por uma propriedade denominada, calor sensível. Os PCM armazenam muito calor por unidade de volume e os processos de armazenamento e libertação de calor ocorrem

isotermicamente, o que os torna num material ideal para situações de aquecimento ou arrefecimento [7].

Nestes materiais, a capacidade de armazenamento energético é dezoito vezes maior que num elemento em material cerâmico [6].

2.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS PCM

Para se compreender o funcionamento de um PCM é necessário o conhecimento dos seguintes conceitos:

Fusão - processo de transição do estado sólido para o estado líquido e o processo inverso é o de solidificação;

Vaporização - processo de transição do estado líquido para o estado gasoso enquanto o processo inverso se denomina condensação.

A cada um destes processos de transição está associada uma quantidade de energia, geralmente denominada de entalpia ou simplesmente calor latente, de fusão ou condensação.

Os materiais de mudança de fase possuem a capacidade de mudar o seu estado em função da temperatura ambiente. A Figura 3 ilustra o modo como o PCM funciona no processo de armazenamento e libertação de energia. Quando a temperatura ambiente que rodeia o PCM aumenta e ultrapassa o ponto de fusão do material, este passa do estado sólido para o estado líquido. Como esta reação física é endotérmica, o PCM absorve e armazena a energia calorífica ambiente sob a forma de calor latente [6]. Posteriormente, quando a temperatura ambiente baixa, e passa o ponto de solidificação do PCM, este transita de fase novamente, neste caso do estado líquido para o estado sólido. Como esta reação é exotérmica o PCM liberta sob a forma de calor, a energia anteriormente armazenada [6].

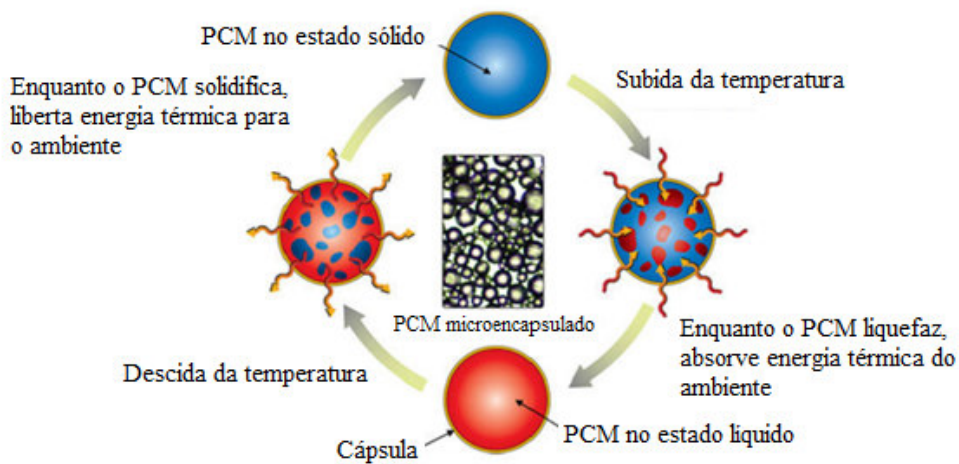


Figura 3 – Esquema de funcionamento de um material de armazenamento térmico (PCM)

[adaptada de 12]

Tal como representado na Figura 4, é principalmente nos processos de transição do estado sólido para o estado líquido (fusão), e no processo inverso (solidificação), que interessa considerar a ação dos PCM nos processos de armazenamento de calor devido às quantidades relativamente grandes de calor acumulado e às pequenas alterações de volume associadas ao longo de uma estreita faixa de temperatura. Os estados líquido-gás têm geralmente elevadas temperaturas de transição, no entanto, devido à grande variação de volume durante a transformação, não são geralmente utilizados em aplicações práticas [10].

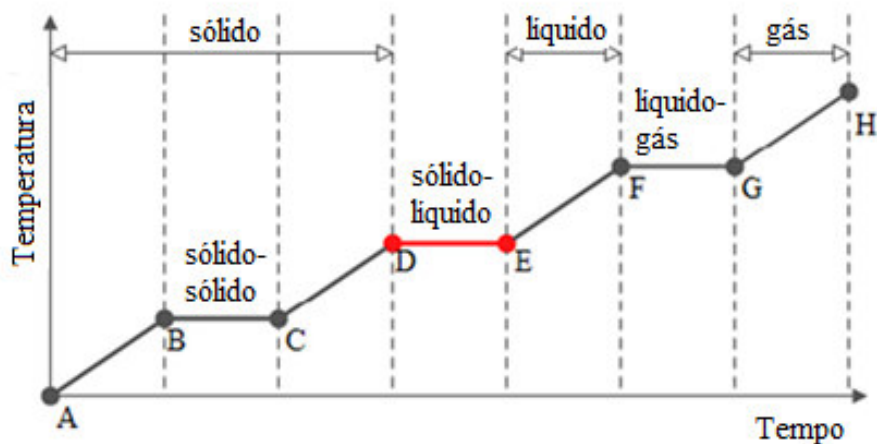


Figura 4 – Processos de transição do aquecimento de uma substância [13]

Qualquer sistema de armazenamento de calor latente de energia térmica deve possuir pelo menos três componentes básicos [10]:

- Uma substância de armazenamento de calor (PCM) que passa por uma transição de fase sólida para líquida na gama de temperaturas de funcionamento desejado e onde a maior parte do calor adicional é armazenado como calor latente de fusão;
- Um recipiente para conter a substância de armazenamento (cápsula);
- Uma superfície de troca de calor para transferir calor a partir da fonte de calor para o PCM e deste último para o dissipador de calor.

Para o correto funcionamento do PCM é necessário que a temperatura de transição do PCM seja adequada à temperatura ambiente exterior. Caso contrário não se tira benefício na utilização deste material.

Este processo de armazenamento de calor latente é uma técnica eficaz para ser usada em edifícios, uma vez que proporciona uma alta densidade de armazenamento de energia e tem a capacidade de armazenar calor na forma de calor latente de fusão, a uma temperatura constante, que corresponde à temperatura de transição de fase dos materiais de mudança de fase. Esta capacidade de armazenamento de calor confere ao PCM a possibilidade de aumentar os níveis de conforto térmico dos edifícios.

A inclusão destes materiais em soluções construtivas assegura ainda a redução da amplitude térmica, sem um aumento do peso próprio das soluções construtivas ou alterações consideráveis na geometria e resistência da superestrutura do edifício.

Kuznik et al. [14] sugere também que nas aplicações destes materiais, o volume de PCM deve ser otimizado porque se for muito grande, o tempo necessário para que o calor penetre no PCM torna-se maior do que o número total de horas de sol disponíveis e o processo de armazenamento pode não ser completo durante um dia.

Eckert et al. [15] em 1994, conclui que a análise da transferência de calor nos processos de fusão e de solidificação, é por vezes complicada porque depende da velocidade a que o calor latente é absorvido ou libertado, e é difícil de conhecer a posição limite do processo de fusão ou de solidificação. Quando a substância que solidifica é pura, a solidificação ocorre a uma

única temperatura, enquanto no caso contrário (com misturas, ligas e materiais impuros) a solidificação ocorre ao longo de uma gama de temperaturas (fronteira em movimento) e, portanto, aparece uma zona de duas fases entre as zonas de sólidos e líquidos com propriedades físicas térmicas diferentes [16].

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS PCM

De acordo com os materiais utilizados, a sua composição química e principais propriedades, os PCM são classificados em três grupos distintos: os orgânicos, os inorgânicos e as misturas eutéticas. Os compostos orgânicos são ainda divididos em parafínicos e não parafínicos enquanto os compostos inorgânicos se dividem em sais hidratados e metálicos. Uma mistura eutética é uma composição de dois ou mais componentes que fundem e cristalizam congruentemente formando uma mistura de cristais compostos.

Na Figura 5, apresenta-se um organograma que representa a classificação dos PCM nas suas classes e subclasses.

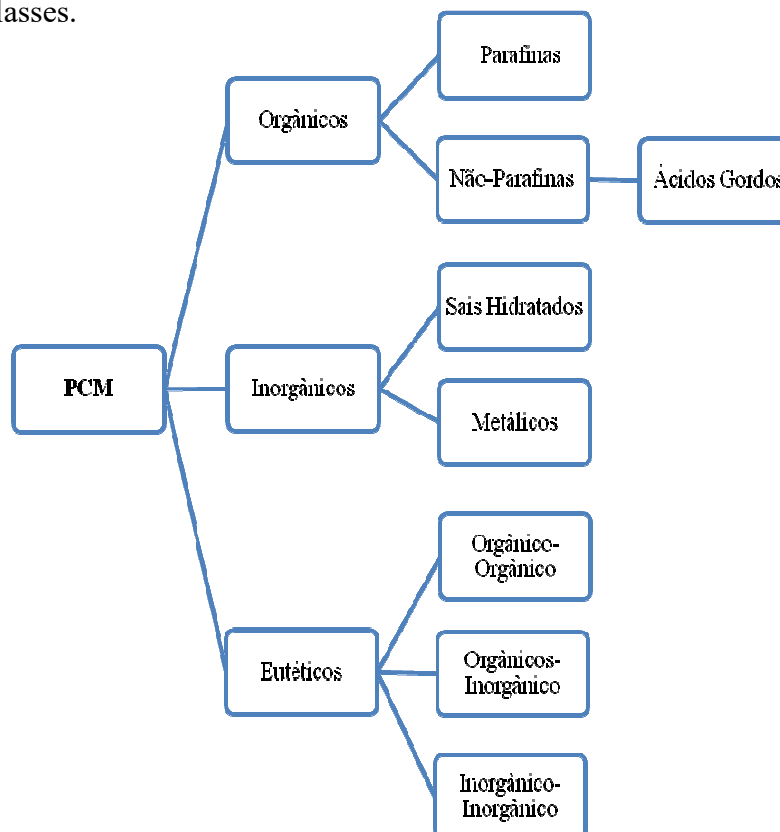


Figura 5 – Classificação dos PCM

2.4.1 PCM Orgânicos

Estes PCM são os mais comuns. São materiais orgânicos obtidos por refinação do crude ou obtidos sinteticamente.

Os compostos orgânicos são geralmente baseados em parafinas, que são polímeros com moléculas de longas cadeias lineares constituídas por carbono e hidrogénio e cuja temperatura de fusão varia em função do número de átomos de carbono que as constituem. As parafinas puras contêm geralmente entre 14 e 40 átomos de carbono enquanto as ceras parafínicas contêm geralmente entre 8 e 15 átomos de carbono. A fórmula química geral é C_nH_{2n+2} . Na Figura 6, está representada uma fórmula da estrutura de uma parafina, onde se evidencia os seus átomos de carbono e hidrogénio e as ligações entre eles [17].

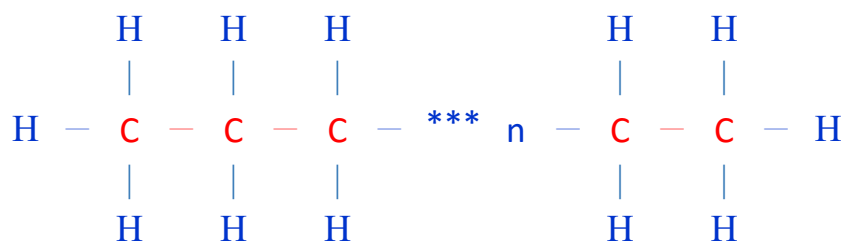


Figura 6 – Estrutura de uma parafina [17]

Os nomes atribuídos às parafinas diferem entre si de acordo com o número de átomos de carbono que compõem a cadeia. Por exemplo, um hexadecano terá na sua cadeia 16 átomos de carbono, um heptadecano 17 átomos de carbono, um octadecano 18, e assim sucessivamente.

Os PCM orgânicos, especialmente os parafínicos, são os que possuem menores temperaturas de fusão, normalmente pertencentes ao intervalo de 21.7°C e 22.8°C ¹ consoante o tamanho da cadeia que os compõem, aumentando à medida que aumenta o número de átomos de carbono. Têm fusão congruente (não se decompõem nos seus elementos) e são materiais não-corrosivos para o material do recipiente. Estes PCM são os que têm maior capacidade de armazenamento térmico, absorvendo de 206 a 232kJ/kg de energia durante o processo de fusão, o que lhes confere uma grande vantagem relativamente aos outros materiais no uso como termorregulador dos edifícios.

¹ No documento é usado “.” como casa decimal uma vez que os resultados da simulação aparecem com esta configuração.

Os PCM orgânicos são quimicamente mais estáveis em relação a outros tipos de PCM. Para além destas características, as parafinas têm outras que lhes conferem uma considerável utilização como PCM, para aplicações de armazenamento térmico, tais como o sub-arrefecimento insignificante (arrefecimento abaixo do seu ponto de congelamento), a baixa pressão de vapor no material fundido, serem quimicamente inertes e estáveis, possuírem auto nucleação, e estarem disponíveis comercialmente a custos razoáveis [10].

Podem misturar-se diferentes parafinas. Estes novos materiais orgânicos assim obtidos, constituem uma classe formada por ligas à base de alcano, que têm a vantagem de serem termoajustáveis, isto é, que permitem a alteração da temperatura de mudança de fase através da alteração da sua composição [16].

Apesar das múltiplas potencialidades que apresentam, os PCM orgânicos possuem alguns constrangimentos à sua utilização: podem ser inflamáveis, durante o processo de combustão produzem fumos tóxicos e podem estar sujeitos a oxidação térmica ao longo do tempo. Outras dificuldades que apresentam são a baixa condutibilidade térmica e o aumento significativo de volume durante a fase de transição.

Na Tabela 1 está representada uma lista de substâncias orgânicas com potencial para serem usadas como PCM. Apresenta-se também na Tabela 1, o ponto de fusão e a entalpia de fusão, ou capacidade de armazenamento térmico, de vários compostos orgânicos de materiais de mudança de fase.

Os materiais de mudança de fase orgânicos não parafínicos incluem uma grande variedade de materiais orgânicos, tais como ácidos gordos, ésteres, álcoois e glicóis. Hale et al. [18] identificaram aproximadamente 70 materiais orgânicos não-parafínicos com pontos de fusão a variarem entre 7°C e 187°C e entalpias de fusão na gama de 42-250kJ/kg, o que confere a estes tipos de materiais uma vasta gama de aplicações e um grande potencial como material termorregulador.

Tabela 1 – Tipos de PCM orgânicos [16]

Composto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Estearato de butilo $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COO}(\text{CH}_2)_3\text{CH}_3$	19	140
Parafina $\text{C}_{16} - \text{C}_{18}$	20 – 22	152
Estearato de vinil	27 – 29	122
Dimetil de sabacate	21	120
Poliglicol E 600	22	127.2
Parafina $\text{C}_{13} - \text{C}_{24}$	22 – 24	189
Palmitato de propilo $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOC}_3\text{H}_7$	19	186
1 – Dodecanol $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OH}$	26	200
Parafina C_{18} (45 a 55%)	28	244
1 – Tetradecanol $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{OH}$	38	205

Os ácidos gordos têm pontos de fusão adequados para aplicações em aquecimento e o seu calor de fusão tem valores comparáveis aos de parafinas e sais hidratados. Estes materiais apresentam excelentes características de fusão/solidificação sem qualquer sub-arrefecimento, no entanto têm um custo cerca de três vezes superior ao das parafinas, o que dificulta a sua comercialização.

Os ésteres de ácidos gordos, tais como estearato de butilo, estearato de vinilo e metil-12 hidroxiestearato, podem ser considerados adequados para o armazenamento de calor passivo.

A utilização conjunta de ácidos gordos com os materiais geralmente utilizados na construção, ainda carece de investigação aprofundada, porque ainda não foram feitos testes que tenham fornecido resultados conclusivos [10].

Na Tabela 2 está representado a lista dos compostos orgânicos de PCM não parafínicos e suas respectivas temperatura e entalpia de fusão.

Tabela 2 – Compostos orgânicos de PCM não parafínicos (ácidos gordos) [16]

Composto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Ácido cáprico	32	152.7
Ácido esteárico	69 – 70	199 - 209
Ácido láurico	42 – 44	178
Ácido mirístico	54 - 58	190 - 200
Ácido palmítico	62 – 63	164 – 212

Analisando e comparando os valores da Tabela 1 e da Tabela 2, conclui-se que de um modo geral os PCM parafínicos apresentam maiores valores de entalpia e menores pontos de fusão.

2.4.2 PCM Inorgânicos

Os materiais inorgânicos são classificados como hidratos de sal e metálicos. Os seus pontos de fusão variam entre 20°C e 32°C, têm um elevado calor latente por unidade de massa e volume, e têm condutibilidade térmica elevada (quase o dobro da parafina) [7]. Não são inflamáveis, têm um custo baixo e facilidade de aquisição, em comparação com os compostos orgânicos. Os sais hidratados são o grupo mais importante dos PCM inorgânicos e têm vindo a ser estudados para avaliar a sua utilização em sistemas de armazenamento térmico [7]. O sal de Glauber (sulfato de sódio decahidratado) é um dos materiais que tem vindo a ser estudado desde os primeiros estudos sobre PCM.

Apesar das potencialidades que apresentam como PCM, são conhecidos alguns problemas com a maior parte dos hidratos de sais. O sub-arrefecimento, a decomposição, o seu peso e o facto de serem corrosivos, podem afetar as suas propriedades de mudança de fase o que limita a sua utilização para armazenamento térmico [10].

Já foram realizados estudos para superar estas dificuldades de utilização: o sub-arrefecimento foi impedido em vários hidratos de sal pela adição de agentes de nucleação ou através da promoção de nucleação por utilização de paredes ásperas no recipiente [10]. Para evitar a decomposição, foram usados agentes de espessamento e dispositivos de armazenamento e transferência de rotação de contacto ao calor direto [10].

A Tabela 3 apresenta a lista dos PCM inorgânicos mais usados. Para cada material apresenta-se o seu ponto de fusão e a sua entalpia de fusão.

Tabela 3 – Tipos de PCM inorgânicos [16]

Composto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
KF·4H ₂ O	18.5	231
Mn(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	25.8	125.9
CaCl ₂ ·6H ₂ O	29	190.8
LiNO ₃ ·3H ₂ O	30	296
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32	251

2.4.3 Misturas Eutéticas

As misturas eutéticas resultam da combinação de dois ou mais compostos de natureza orgânica, inorgânica ou ambas que se fundem e cristalizam congruentemente. O comportamento dos materiais assim obtidos, normalmente assemelha-se bastante ao de um sal hidratado. Têm um grande potencial de aplicabilidade porque permitem obter temperaturas de transição mais aproximadas às necessidades existentes nos edifícios, comparativamente com os compostos que as originam [10].

Um exemplo deste tipo de materiais são as misturas de hidrocarbonetos alquílicos lineares que possibilitam o ajuste das propriedades térmicas [8]. Os pontos de fusão dos materiais eutéticos variam na gama 25°C a 30°C e os valores de entalpia entre 127kJ/kg e 200kJ/kg por unidade de massa, possuem uma boa estabilidade química e uma baixa pressão de vapor à temperatura ambiente. Não são materiais corrosivos, tóxicos ou perigosos para a saúde [8].

Apesar do elevado potencial que oferecem como material de mudança de fase, as misturas eutéticas têm um custo elevado, o dobro ou o triplo de um PCM orgânico ou inorgânico, o que constitui um constrangimento à sua utilização como material termorregulador.

Na Tabela 4 apresenta uma lista com alguns compostos eutéticos inorgânicos, o respetivo ponto de fusão e entalpia de fusão.

Tabela 4 – Compostos eutéticos inorgânicos [16]

Composto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
66,6% $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + + 33,3% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25	127
48% CaCl_2 + 4,3% NaCl + + 0,4% KCl + 47,3% H_2O	26.8	188
47% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ + + 53% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30	136
60% $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ + + 40% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	30	200.5
49,3% $\text{MgCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + + 50,7% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	58	132.3
32,5% Na_2SO_4 + 41,4% H_2O + + 6,66% NaCl + 6,16% NH_4Cl	13	146
61,5% $\text{Mg}(\text{NO}_3) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + + 38,5% NH_4NO_3	51	131.3
58,3% $\text{Mg}(\text{NO}_3) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + + 41,7% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	58	106
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + $\text{CaBr}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	14	140

A Tabela 5, apresenta a lista de compostos eutéticos orgânicos, o respetivo ponto de fusão e entalpia de fusão.

Tabela 5 – Compostos eutéticos orgânicos [16]

Composto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Ácido láurico-cáprico	18	120
Ácido palmítico-esteárico	51	160
Ácido láurico-palmítico	33	145
Ácido láurico-esteárico	34	150
(34% de ácido mirístico + + 66% de ácido cáprico)	24	147.7

Pode-se verificar nos valores apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5, que estes materiais têm pontos de fusão numa gama de 13°C a 58°C e valores de calor latente ou entalpia de fusão a variar entre 106kJ/kg a 200.5kJ/kg.

O conhecimento das propriedades dos PCM permitem conhecer as vantagens e desvantagens da utilização destes materiais. Na Tabela 6 apresenta-se um quadro resumo das principais vantagens e desvantagens de cada tipo de PCM orgânicos, inorgânicos e eutéticos.

Tabela 6 – Vantagens e desvantagens dos PCM orgânicos, inorgânicos e eutéticos

	Orgânicos	Inorgânicos	Eutéticos
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Não corrosivos • Baixo ou nenhum sub-arrefecimento • Estabilidade química e térmica • Fusão congruente • Capacidade de armazenamento térmico • Custos razoáveis • Disponibilidade comercial • Gama de temperaturas de mudança de fase 	<ul style="list-style-type: none"> • Maior entalpia de mudança de fase • Condutibilidade térmica elevada • Não inflamáveis • Baixo custo • Disponibilidade comercial 	<ul style="list-style-type: none"> • Grande aplicabilidade • Estabilidade química • Baixa pressão de vapor à temperatura ambiente • Não corrosivo
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Menor entalpia de mudança de fase • Baixa condutibilidade térmica • Inflamabilidade • Variação de volume na mudança de fase 	<ul style="list-style-type: none"> • Sub-arrefecimento • Corrosão • Separação de fases • Segregação de fases • Instabilidade térmica 	<ul style="list-style-type: none"> • Tóxicos • Custo elevado

Uma ordenação dos materiais, feita com base nos seus pontos de fusão pode ser útil para uma escolha mais fácil do tipo de material. Na Tabela 7, ordenam-se vários produtos indicando os intervalos aos quais pertencem as temperaturas de fusão, que por sua vez, estão ordenadas por ordem crescente.

Tabela 7 – Materiais de armazenamento de calor latente e suas faixas de temperaturas [10]

Material	Faixa de temperatura (°C)	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Água		0	335
Parafina	0 - 100	20 – 60	140 – 280
Hidrato de Sal		30 – 50	170 – 270
AlCl ₃		192	280
LiNO ₃	100 - 400	250	370
Na ₂ S ₂		360	314
50LiOH/50LiF		427	512
KClO ₄	400 - 800	527	1253
LiH		699	2678
LiF		868	932
NaF	800 - 1500	993	750
MgF ₂		1271	936
Si		1415	1654

Na Tabela 7 inclui-se a água porque, pelas suas propriedades, pode ser considerada como o mais simples e mais barato material de mudança de fase. No entanto, a temperatura de solidificação da água é, 0°C, o que a torna inadequada para a maioria das aplicações de armazenamento de energia. Este facto realça ainda mais a necessidade de se identificarem outros materiais que solidifiquem e fundam como a água/gelo, mas a outras temperaturas e desenvolver estudos, de modo a que possam oferecer reais potencialidades como PCM [19].

2.5 PROPRIEDADES DOS PCM

Depois de feita a classificação dos vários PCM em 2.3, foram apresentadas as propriedades destes materiais. De seguida, classificam-se essas propriedades e apresentam-se outras, que contribuem para se compreender o comportamento destes materiais quando usados como materiais de termorregulação da energia térmica.

Podem-se distinguir nestes materiais quatro tipos de propriedades: as propriedades termofísicas; as propriedades cinéticas; as químicas; e as económicas dos materiais de mudança de fase [7, 16].

Propriedades termofísicas

- Temperatura de fusão num intervalo de temperatura desejado ou seja, temperatura de fusão na zona de conforto térmico;
- Elevada entalpia ou seja, elevado calor latente de fusão por unidade de volume, de modo a que o volume necessário para armazenamento de uma quantidade de energia seja menor;
- Elevado calor específico para fornecer armazenamento de calor adicional significativo;
- Elevada condutibilidade térmica das fases sólidas e líquidas auxiliando o armazenamento e libertação de energia nos sistemas de armazenamento de calor;
- Alteração mínima do volume na mudança de fase, e pequena pressão de vapor na temperatura de funcionamento;
- Fusão congruente na mudança de fase para uma capacidade de armazenamento constante.

Propriedades cinéticas

- Alta taxa de nucleação para evitar sub-arrefecimento na fase líquida;
- Elevada taxa de crescimento de cristais, de modo a que o sistema possa conseguir uma recuperação de calor a partir do seu sistema de armazenamento.

Propriedades químicas

- Ciclo reversível de solidificação-fusão;
- Nenhuma degradação depois de um grande número de ciclos de fusão/solidificação;

- Não corrosivo, o que facilita a incorporação nos materiais de construção;
- Não é um material tóxico, inflamável ou explosivo e por isso é seguro;
- Estabilidade química.

Propriedades económicas

- Baixo custo;
- Grande disponibilidade.

Um aspeto importante é conhecer o tempo de vida útil destes materiais, bem como o número de ciclos que podem resistir, sem qualquer degradação das suas propriedades. Estudaram-se ensaios com três misturas de parafina e verificou-se que as propriedades das parafinas não sofreram alterações devido ao número de ciclos realizados [16]. Gibbs [20] verificou que nem os ciclos nem o contacto com metais degradam o comportamento térmico da parafina o que permite concluir que estes materiais têm uma boa estabilidade térmica.

Apesar da validade destas propriedades convém realçar que nem sempre é fácil efetuar ensaios conclusivos. Yinping [21] analisou os métodos convencionais de análise das propriedades dos PCM acima mencionadas e apontou dificuldades e limitações, das quais se destacam:

- São analisadas pequenas quantidades de amostra (1-10mg), embora o comportamento de alguns PCM depende da quantidade com que são utilizados;
- Os instrumentos de análise são complexos e dispendiosos;
- As alterações de fase não podem ser observadas visualmente.

2.6 ENCAPSULAMENTO DOS PCM

Para ser possível usar os materiais de mudança de fase é necessário garantir que, aquando da passagem de um estado para outro, especialmente do sólido ao líquido, esses materiais mantenham as propriedades e que não há deslocamento do seu ponto de aplicação. Por isso, estes materiais devem ser encapsulados (Figura 7), isto é, envolvidos em cápsulas que os

protejam, garantindo o isolamento desses produtos, e o seu manuseamento em condições normais, ao mesmo tempo que permitam as trocas energéticas com o exterior, interagindo indiretamente com o ambiente que o envolve.

Esta barreira de proteção do PCM, deve ter uma superfície que permita a transferência adequada de calor, garantir a estabilidade estrutural e o fácil manuseio destes produtos.

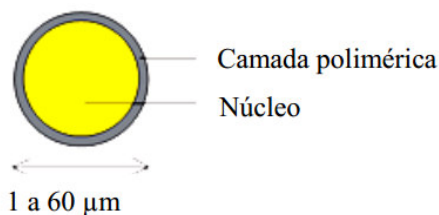


Figura 7 – Encapsulamento do PCM [17]

Estes meios de proteção dos PCM devem também obedecer a parâmetros relacionados com a resistência mecânica, a flexibilidade, resistência à corrosão e estabilidade térmica dos materiais de mudança de fase. Existem estudos que apontam para a importância da geometria destes invólucros no sentido de facilitarem as trocas de energia [22].

Pelas mesmas razões expostas anteriormente, também se devem encapsular os materiais compostos, constituídos por PCM e outro tipo de material.

Uma das dificuldades da utilização de PCM orgânico é a sua inflamabilidade, que é uma condição indesejável, no que se refere à incorporação de PCM na maioria das aplicações. As normas de segurança impõem precauções e o encapsulamento do PCM pode resolver este problema. Para tal pode-se alterar a parede de revestimento do PCM com materiais não inflamáveis como uma folha de alumínio ou uma película rígida de PVC, ou através da incorporação de derivados de bromo com a capacidade de autoextinção ou aplicação posterior de revestimentos retardadores de chama.

Outra dificuldade na utilização deste tipo de PCM é a variação do seu volume durante a fase de transição. Utilizando cápsulas de plástico com diferentes geometrias minimiza-se este problema [10].

O microencapsulamento permite aumentar a área de transferência de calor o que permite contrariar a baixa condutibilidade térmica de alguns PCM.

Existem dois tipos de cápsulas que definem o tipo de encapsulamento: o macroencapsulamento e o microencapsulamento [23]. De seguida, descrevem-se estes dois tipos de encapsulamento.

2.6.1 Macroencapsulamento

O macroencapsulamento é a forma mais comum de encapsulamento dos PCM. O macroencapsulamento é a incorporação de PCM em cápsulas, em forma de tubos, esferas, painéis ou outras. Estas cápsulas têm em geral diâmetros superiores a 1cm [23].

Estes elementos de proteção podem ser aplicados diretamente em elementos construtivos, como revestimento, por exemplo, ou incorporados em materiais de construção.

O macroencapsulamento é um processo de proteção dos PCM que apresenta as seguintes vantagens [10]:

- Retém o PCM quando este se apresenta no estado líquido evitando alterações do local de aplicação do material;
- Melhora a compatibilidade do material com os elementos em contacto, devido à barreira criada;
- Facilita a manipulação de PCM na sua produção;
- Reduz alterações no volume exterior, pelo que se trata de um aspeto positivo para esta forma de encapsulamento.

Apesar das vantagens, o uso deste processo de encapsulamento está condicionado devido aos custos que lhe estão associados e à possibilidade de, em alguns casos, poder ocorrer uma transferência de calor deficiente pois pode ocorrer solidificação nas extremidades [23].

Existem sistemas de macroencapsulamento de PCM em forma de esferas, sendo estas preenchidos com PCM (Figura 8).



Figura 8 – Macroencapsulamento de PCM comercializado [23]

São também comercializados esferas a partir de uma mistura de poliolefinas e com PCM, (Figura 9).

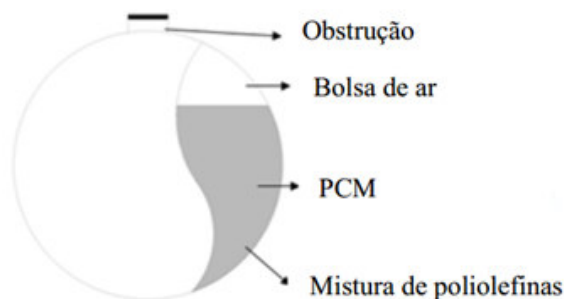


Figura 9 – Modo de encapsulamento de PCM através de esferas [23]

2.6.2 Microencapsulamento

Se as cápsulas que envolvem o PCM tiverem diâmetro inferior a 1mm, então há um microencapsulamento. O diâmetro das cápsulas pode variar entre 1 a 1000 μ m, sendo mais frequente que se situe entre 1 e 60 μ m. O diâmetro é muito pequeno para que seja garantida uma rápida transferência de calor com o meio envolvente. Estas partículas esféricas são revestidas por um material polimérico, orgânico ou inorgânico, como por exemplo poliureia, poliuretano, polimetilmetacrilato, polivinilacetato, poliestireno ou resinas de ureia-formaldeído, melamina-formaldeído ou gelatina-formaldeído ou metal [23].

Este processo de encapsulamento apresenta ainda mais vantagens relativamente ao anterior na medida em que:

- Melhora a transferência de calor entre a cápsula e os elementos em contacto;
- Garante estabilidade nos vários ciclos de mudança de fase, uma vez que a separação de fases é restrita por distâncias microscópicas.

Apesar destas vantagens, têm sido observados em microcápsulas de PCM de origem parafínica múltiplos picos nas curvas de fusão, que são indicadores de sobreaquecimento. Este fenómeno conduz à redução das temperaturas de cristalização do PCM, originando a libertação da energia latente a temperaturas mais baixas (eventualmente fora da gama de operação desejada) ou em gamas de temperaturas mais largas [24]. Esta situação é considerada um constrangimento que limita a sua aplicação.

As microcápsulas de PCM têm um processo de fabrico constituído por vários processos, tais como químicos, físico-químicos ou mecânicos [25]. De seguida, são indicados os processos de microencapsulamento.

Processos Químicos

- Polimerização por emulsão, dispersão, suspensão;
- Policondensação interfacial, por dispersão ou suspensão.

Processos Físico-Químicos

- Evaporação do solvente;
- Suspensão por croos-linking;
- Coacervação;
- Extrusão.

Processos Mecânicos

- Revestimentos;
- Extrusão;
- Spray;
- Deposição de fluídos;
- Micronização.

Na Figura 10 pode-se ver, através de uma imagem microscópica, o PCM microencapsulado, podendo-se ainda verificar a “casca” que é formada à superfície deste, revestindo o material.

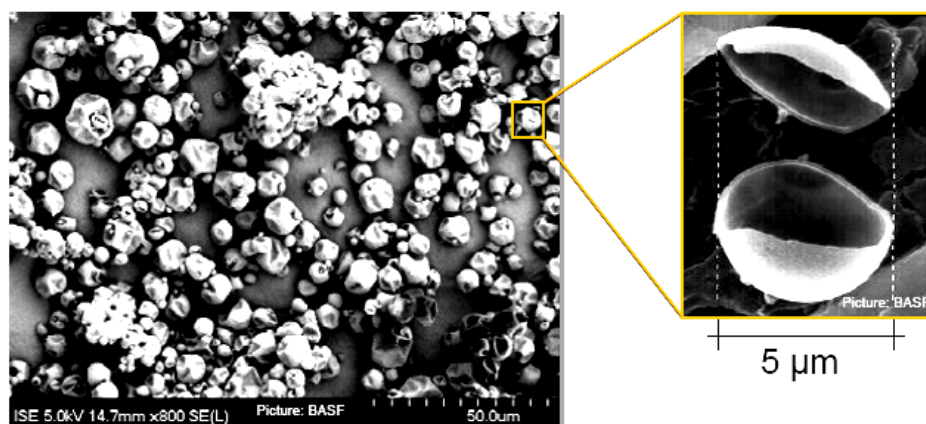


Figura 10 – Imagem microscópica de um PCM microencapsulado [26]

Na Figura 11 apresenta-se esquematicamente um processo para a produção de PCM microencapsulado.

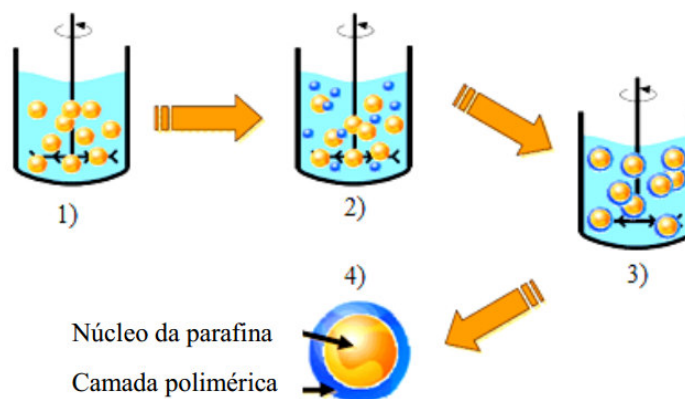


Figura 11 – Microencapsulamento de PCM [26]

O processo representado na Figura 11, consiste em efetuar uma emulsão de cera parafínica em água quente, adicionando-se detergentes, e misturando-se por meio de um misturador; de seguida, adicionam-se monómeros, iniciando-se o microencapsulamento; dá-se a formação do revestimento, uma “casca”, à superfície da cera parafínica e obtém-se um polímero altamente reticulado revestindo cada gota de cera parafínica [26].

Existem outros métodos para o microencapsulamento de PCM. Os processos *in-situ* permitem a obtenção de microcápsulas com paredes mais rígidas e resistentes [27].

O processo de microencapsulação de PCM através de policondensação interfacial consiste na utilização de algumas resinas como a de melamina-formaldeído, como pré-polímero que dará origem à parede da microcápsula. Neste processo, um óleo é emulsionado em água usando polímeros solúveis e agitadores de elevada rotação que originam uma emulsão estável contendo gotículas de óleo do tamanho desejado. Outra resina de melamina é adicionada à emulsão. Devido ao pH ácido da emulsão é iniciado o processo de polimerização, o qual conduz à reticulação da resina que polimeriza na interface entre as gotículas de óleo e a fase aquosa, e à medida que vai reticulando conduz à formação da parede polimérica em redor das gotículas de óleo [13].

As resinas contendo formaldeído são de grande utilização na produção de microcápsulas em virtude da sua maior durabilidade. No entanto, este tipo de resinas tende a libertar formaldeído o que limita a sua aplicação [27].

A escolha do processo de microencapsulamento, bem como do material para formação da cápsula é de especial relevância, pois a sua posterior aplicação depende da sua estabilidade química, física e mecânica [25].

2.7 APLICAÇÕES DOS PCM

As aplicações dos PCM, segundo Dincer e Rosen [28], podem ser divididas em dois grupos principais: proteção térmica ou de inércia e de armazenamento. Uma diferença entre estes dois grupos refere-se à condutibilidade térmica da substância utilizada. Em alguns casos de proteção térmica, é adequado ter baixos valores de condutibilidade, enquanto que em sistemas

de armazenamento, poderá haver energia armazenada em quantidade suficiente mas a capacidade de dispor dessa energia com a rapidez necessária poderá ser insuficiente.

Neste capítulo assume-se como relevante estudar as aplicações dos PCM na Indústria da Construção Civil.

2.7.1 Aplicações de PCM na Construção

2.7.1.1 Construção Sustentável

A nível mundial, os consumos energéticos relacionados com a construção civil devem-se à extração e transporte das matérias-primas, à produção de materiais e aos que são utilizados para aumentar os níveis de conforto nos edifícios. Estes consumos têm registado acréscimos significativos. A energia que utilizam é, em grande parte, proveniente de fontes não renováveis, o que provoca graves impactos no meio ambiente.

Na Figura 12 está representada uma situação em que é visível uma utilização indevida dos recursos energéticos para obtenção de conforto térmico.



Figura 12 – Utilização indevida de energia [22]

A investigação centra-se agora em duas áreas: no uso de fontes renováveis de energia e no desenvolvimento de novas técnicas de armazenamento de energia, como a incorporação de PCM em soluções construtivas do edifício. O objetivo é contribuir para a redução global do consumo de energia e desta forma reduzir a fatura energética salvaguardando os níveis de conforto térmico e a diminuição do impacto ambiental, social e económico.

A utilização de materiais de mudança de fase no setor da construção promove assim melhorias consideráveis ao nível social, pois permite equilíbrios térmicos e maior conforto às pessoas, ao nível ambiental já que pode reduzir a necessidade de recorrer a sistemas com base

em fontes de energia não renováveis e ao nível económico porque diminui os custos energéticos, como esquematizado na Figura 13.

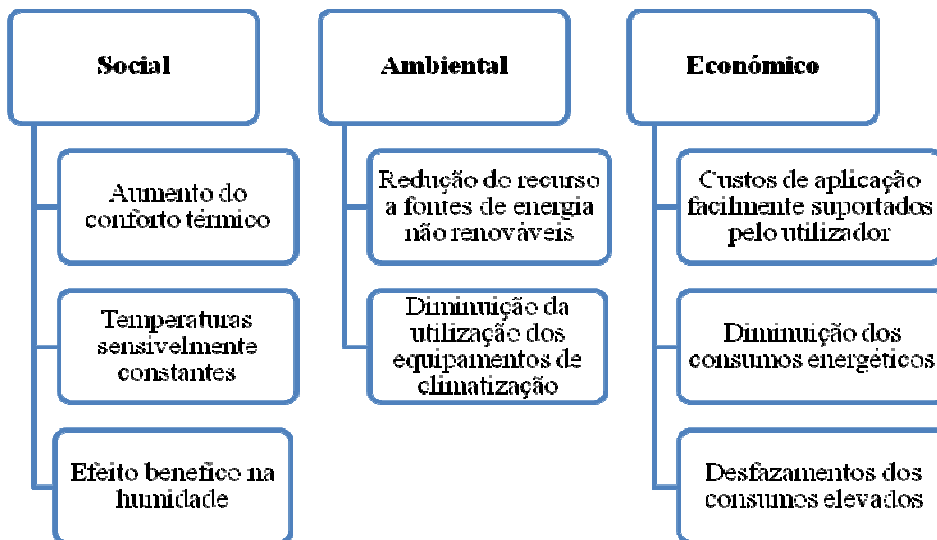


Figura 13 – Contributo dos materiais de mudança de fase para a construção sustentável [22]

Os materiais de mudança de fase podem ser usados na construção de edifícios novos ou em reabilitações. Quando comparados com outros materiais de construção comuns, os PCM podem armazenar mais energia com menores espessuras. Esta potencialidade permite a diminuição de utilização de equipamentos de climatização, a necessidade de uso de energias fósseis e a emissão de gases de efeito de estufa. A utilização destes materiais contribui assim para o desempenho sustentável do edifício, tornando-o mais funcional, económico e contribuindo sobretudo para o seu desempenho ambiental.

A Figura 14 representa a relação entre a energia térmica e a temperatura a que ocorrem as mudanças de fase.

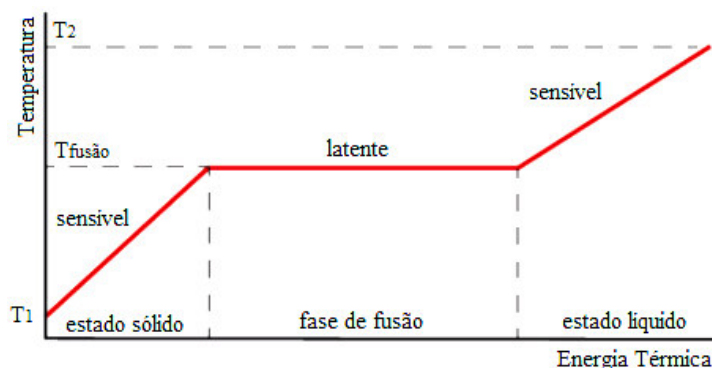


Figura 14 – Relação entre a energia térmica e a temperatura a que ocorrem as mudanças de fase [adaptada de 29]

A temperatura interior dos edifícios depende de vários fatores [6]:

- A estrutura do edifício, as características do sistema construtivo e dos materiais utilizados (espessuras das paredes, do isolamento térmico, dimensão dos vãos envidraçados, condutibilidade térmica e calor específico dos materiais), fontes de calor internas, taxa de renovação de ar e funcionamento de equipamentos auxiliares de aquecimento ou arrefecimento;
- A inércia térmica associada à estrutura do edifício que contribui para a redução das oscilações de temperatura;
- As condições climatéricas exteriores tais como temperatura exterior, velocidade do vento e a intensidade da radiação solar;
- Implementação no terreno e orientação.

A utilização de sistemas de armazenamento de energia sob a forma de calor latente para a regulação térmica no interior dos edifícios tem-se tornado uma tecnologia cada vez mais atrativa, uma vez que utiliza o calor associado à energia solar (em particular para o aquecimento durante o inverno), e do fresco associado à ventilação natural noturna (em particular para o arrefecimento durante o verão), para reduzir as variações de temperatura interior, e contribuir para o aumento do nível de conforto interior.

A Figura 15 mostra as variações de temperatura associadas a alguns PCM, por comparação de temperaturas e respetivas variações verificadas em ambientes interiores e exteriores.

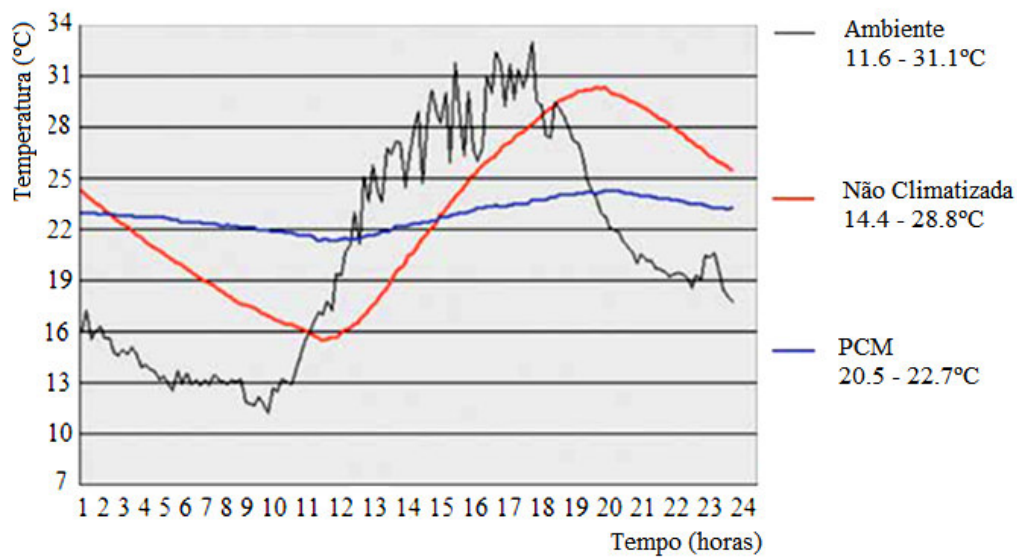


Figura 15 – Variações de temperatura verificadas com o uso de PCM em edifícios

[adaptada de 30]

O uso do PCM na construção, permite amenizar as variações de temperaturas diárias interiores mantendo ou aumentando a massa térmica do edifício, com redução da espessura dos elementos construtivos tais como paredes, pavimentos e teto. Quando a massa térmica de um edifício é baixa ele tende a registar grandes flutuações de temperatura, devido às cargas de arrefecimento ou de aquecimento externos. A utilização de PCM nessas construções pode diminuir essas flutuações de temperatura, como mostra a Figura 16.

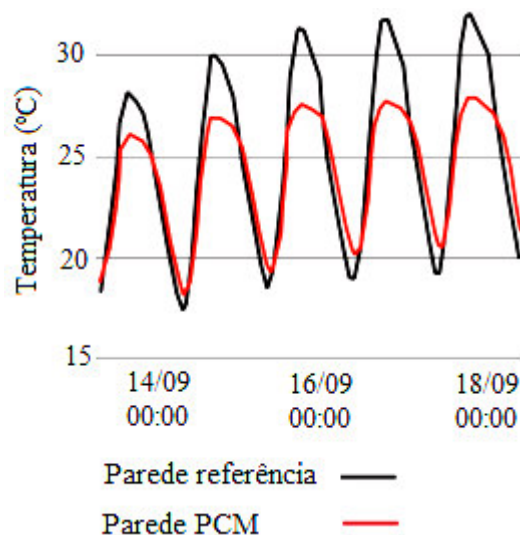


Figura 16 – Comparação das temperaturas num edifício com e sem incorporação de PCM [22]

No entanto, o desempenho térmico dos edifícios através da incorporação de PCM não é sempre igual e depende de vários fatores:

- A quantidade e o tipo de PCM a utilizar;
- As condições climáticas, principalmente da radiação solar e da temperatura ambiente;
- As propriedades físicas e térmicas dos materiais;
- Os parâmetros de projeto, tais como sombreamento, configuração e orientação do sistema.

2.7.1.2 Estudos Realizados

O uso de PCM em edifícios, tendo em conta o armazenamento térmico das várias soluções construtivas, foi uma das primeiras aplicações estudadas para utilização destes materiais.

Zalba [16] apresenta um resumo/lista de vários estudos relativos à utilização de PCM em edifícios, desde os estudos de Telkes [31] em 1975 a Lane [32], em 1986.

Os PCM são utilizados sobretudo para aquecimento e arrefecimento de edifícios. Seguiram-se muitos outros estudos como citado em [16]:

- Uso de PCM na produção de componentes estruturais para armazenamento térmico por Barkmann e Wessling [33] em 1975, e mais tarde por outros autores;
- A integração de um material de mudança de fase no diodo térmico para melhorar a eficácia do dissipador de calor em processos de refrigeração termoelétrica, foi estudado por Omer et al. [34];
- Salyer [35] realizou estudos sobre a segurança destes materiais e concluiu qual a reação deles ao fogo e quais os possíveis aditivos (compostos orgânicos) que melhoram a resposta do PCM ao fogo. Analisou ainda um importante número de aplicações no aquecimento e arrefecimento, e estabeleceu as vantagens, desvantagens, características e os nomes dos PCM aplicáveis no armazenamento térmico em edifícios. Dos PCM analisados, os que apresentaram maiores vantagens foram as parafinas, cuja origem pode estar na polimerização de etileno ou como um subproduto do petróleo;

- Ismail et al. [36] estudaram a possibilidade de utilização de uma janela com uma cortina de PCM a fim de diminuir os ganhos solares em edifícios. Esta janela é dupla, laminada com uma folga entre as folhas e uma saída de ar no topo. A solidificação do PCM da cortina impede que a temperatura do ambiente interior diminua;
- Merker et al. [37] desenvolveram um novo sistema de sombreamento com a incorporação de PCM para evitar o superaquecimento em torno da área da janela;

Muitos outros estudos têm sido feitos e são feitos na atualidade sobre o uso de PCM na construção, devido ao seu elevado potencial de termorregulação.

A título de exemplo refere-se o trabalho que está a ser desenvolvido nesta área, por uma equipa de investigação do departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho sobre Argamassas Térmicas. Esta equipa estuda e desenvolve um revestimento inovador baseado na incorporação de PCM. A tecnologia utilizada baseia-se em microcápsulas termicamente ativas (PCM), que são aplicadas na superfície das argamassas, criando assim um revestimento revolucionário para paredes e tetos que aumenta/diminui a temperatura interior das casas e escritórios, e que, segundo a equipa envolvida, deverá ser uma prática corrente dentro de dez anos [38].

2.7.1.3 Aplicação de PCM em Edifícios

Os materiais de mudança de fase podem ser usados em elementos verticais ou horizontais, e em vários locais, como espaços comerciais, industriais, escritórios, escolas, habitações novas ou reabilitadas [30].

A energia térmica é transmitida por radiação ou por convecção. Associado a cada um destes tipos de transmissão está associada a forma de aplicação de PCM na construção. Nos casos de radiação, a incorporação de PCM pode ser feita de forma passiva com a sua aplicação em paredes, tetos e pavimentos tendo em consideração a disposição ou orientação do edifício; pode também ser feita de forma ativa tendo em conta a articulação dos sistemas de ventilação natural ou a circulação de fluidos.

Quando a energia se transmite por convecção, o PCM é utilizado como meio de transferência em sistemas de ar condicionado e de ventilação, fazendo-se passar nestes uma corrente de ar quente ou fria.

Na Figura 17 apresenta-se o organograma referente aos elementos construtivos onde se incorporam PCM e as possibilidades de utilização em sistemas de climatização.

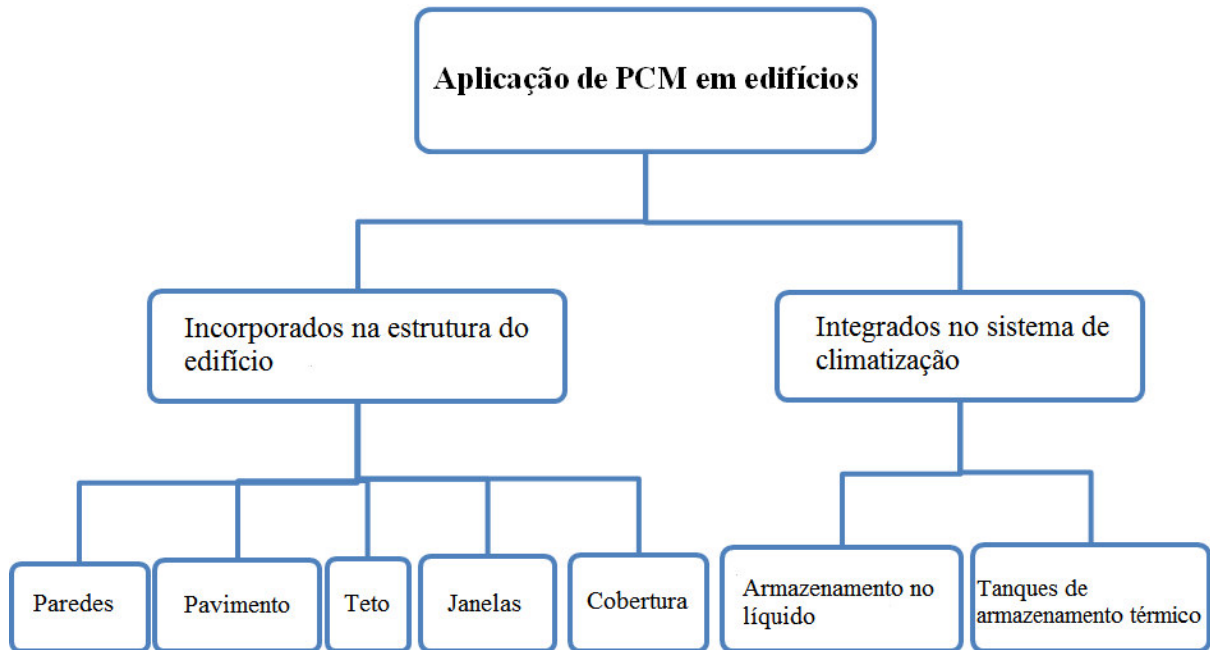


Figura 17 – Aplicação de PCM em edifícios

i. Paredes

As paredes são os elementos construtivos mais utilizados para a aplicação de PCM. A exploração de todo o potencial destes materiais tem sido realizada através da incorporação deste em placas de gesso cartonado e em revestimentos à base de gesso. Têm sido muito prometedores os resultados obtidos na aplicação destas soluções nas paredes divisórias dos edifícios com baixa massa térmica.

Kuznik *et al.* [14] investigaram o valor ótimo da espessura de um pano de parede com PCM incorporado para aumentar o desempenho térmico de uma parede interior de um edifício com baixa massa térmica. Esse pano de parede com PCM é constituída por uma base polimérica e 60% de parafina microencapsulada, com uma temperatura de fusão de 22°C. Esses estudos permitiram concluir que a espessura ideal da placa de parede de PCM é de 1 cm. Com esta

espessura, a placa de parede de PCM é capaz de armazenar cerca de 290Wh/m^2 num período de 24h e duplicar a massa térmica do edifício.

Na Figura 18 está representada uma placa de parede de PCM.

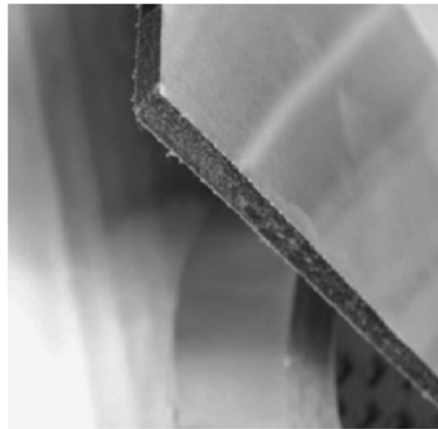


Figura 18 – Placa de parede de PCM [14]

ii. Pavimentos

Os pavimentos representam um dos principais elementos de um edifício capazes de armazenar energia, pelo que, a incorporação de PCM em pavimentos pode ser vantajosa. O PCM poderá ser incorporado de várias formas, mas é aconselhável que seja colocado em zonas sobre as quais incida radiação solar [39].

Athienitis e Chen [39] realizaram um estudo experimental e numérico e concluíram que a incorporação de PCM no pavimento para o aproveitamento da radiação solar conduz a ganhos significativos. Estes estudos mostraram que a radiação solar direta é capaz de, no local onde incide, atingir uma temperatura cerca de 15°C mais elevada do que na superfície sombreada do pavimento. O armazenamento da energia da radiação solar, permite reduzir as necessidades de aquecimento em cerca de 30%.

Lin *et al.* [40] desenvolveram um sistema de pavimento radiante, elétrico, incorporando PCM em placas de polietileno cheias de parafina cuja temperatura de fusão é de 52°C e calor latente de 150kJ/kg . Durante o período monitorizado, com temperatura média exterior de 13.6°C , a temperatura média interior foi de 20°C , tendo-se registado uma amplitude média diária de 12°C , sem utilização de aquecimento adicional. Com o aquecimento ligado, a temperatura

média interior subiu para 31°C sem que a amplitude média diária sofresse qualquer alteração. Para além disso, cerca de 3.3kWh de energia elétrica consumida foram transferidos diariamente para horas de vazio, correspondendo a um total de 54% do consumo.

Ceron *et al.* [41] desenvolveram um pavimento com incorporação de PCM, capaz de atuar como um sistema passivo de climatização, permitindo a estabilização da temperatura interior. Desta forma reduzem-se as necessidades de aquecimento noturno durante o inverno, e no verão, evita-se o sobreaquecimento na medida em que o pavimento atua como dissipador de calor evitando o sobreaquecimento.

Na Figura 19 está representada uma seção transversal de um pavimento com incorporação de PCM.

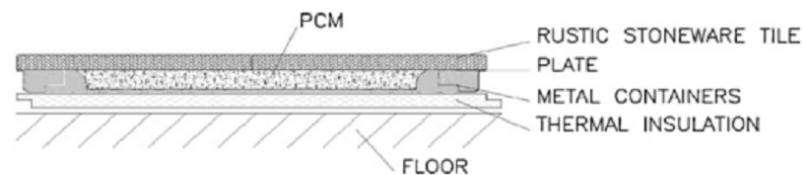


Figura 19 – Representação da seção transversal do modelo [41]

iii. Tetos

A incorporação de PCM em tetos aumenta a inércia térmica da envolvente do edifício e contribui para a diminuição das flutuações da temperatura interior, dos consumos energéticos e para o aumento do conforto térmico.

Turnpenny *et al.* [42] analisaram um sistema de ventilação com integração de PCM em tubagens instaladas no teto, em contacto com o ar interior. Neste sistema, o ar interior circula e o ar frio noturno é usado para restaurar a capacidade de armazenamento térmico do PCM. A energia absorvida por este sistema de armazenamento térmico é de 100Wh durante um período de 2 a 3 horas, o que corresponde a uma potência de cerca de 40W. A aplicação deste sistema permite a redução da energia utilizada no sistema de ar-condicionado.

Tzivanidis *et al.* [43] realizaram uma análise paramétrica para um sistema de arrefecimento por teto radiante. Neste estudo, água fria circula em tubos que estão incorporados num painel

de PCM situado entre a laje de betão da cobertura e o revestimento interior. Através do estudo paramétrico, os autores concluíram que o desempenho deste sistema depende da condutibilidade térmica do PCM e por isso deve ser selecionado um PCM com condutibilidade térmica tão elevada quanto possível. Os resultados mostraram que o PCM reduz a amplitude da temperatura interior no verão, aumentando o nível de conforto térmico.

Koschenz e Lehmann [44] desenvolveram um teto falso com incorporação de PCM e de um sistema de tubos capilares com circulação de água que permite o controlo ativo da massa térmica do PCM. Através de um estudo experimental concluíram que a energia armazenada pelo sistema é de 290Wh/m^2 , num período de liquefação de 7.5 horas, correspondendo a uma potência média de 39W, entre as temperaturas de 20 a 24°C. Este sistema permite reduzir a flutuação de temperatura em edifícios de baixa inércia.

iv. Envidraçados e Sistemas de Sombreamento

As janelas e persianas, devido à exposição solar intensa a que estão sujeitas, oferecem potencialidades que podem ser aproveitadas para explorar as capacidades dos PCM. Atualmente recorre-se muito à construção de estruturas leves, com inércia térmica reduzida e com grandes vãos envidraçados. Para além da questão estética, os vidros de um edifício controlam os ganhos solares e a iluminação do mesmo.

Os vãos envidraçados são assim elementos muito importantes a ter em conta, para o controlo de todos os ganhos solares e aquecimento de espaços interiores, e nesse sentido, foram realizados estudos sobre a incorporação de PCM nos mesmos.

Ismail [36] estudou os efeitos da incorporação de PCM na caixa-de-ar de um envidraçado duplo, comparando com o desempenho térmico de um vidro simples, ao nível da transmitância e do coeficiente global de transferência de calor, U.

A Figura 20, representa em que condições foi realizado o ensaio. O PCM, existente no tanque em estado líquido, é bombeado para o espaço entre os vidros onde solidifica. Assim, em vez de ar nesse espaço, existe PCM que impede o calor de se dissipar através da janela. Quando o espaço entre os vidros é completamente preenchido com PCM, a energia transmitida foi reduzida em 55%. No caso de vidro simples, quando a espessura aumenta de 3 mm para 6 mm o coeficiente global de transferência de calor diminui cerca de 3.2%. No caso do vidro duplo,

verifica-se uma redução de 6.4% no valor de U quando o espaçamento entre vidros passa de 3 para 6 mm.

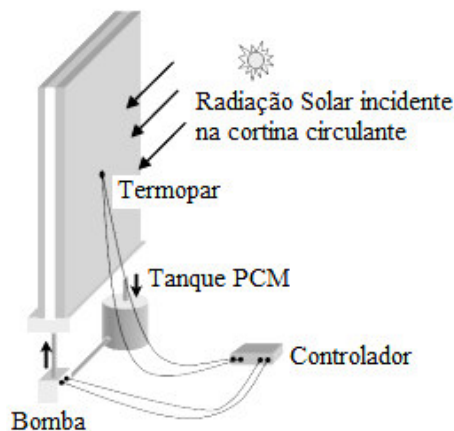


Figura 20 – Vista esquemática da janela com cortina circulante de PCM [36]

Outros ensaios foram realizados por Weinlader [45] para analisar de que forma um painel de PCM aplicado no interior de envidraçados duplos, podia influenciar a transmissão de energia térmica. Obtiveram-se transmitâncias na ordem de 40%. Com os ganhos solares a diminuir em cerca de 50%, a incorporação de PCM resultou numa redução de 30% nas perdas térmicas em fachadas orientadas a sul. A Figura 21, representa o modelo utilizado para o referido ensaio.

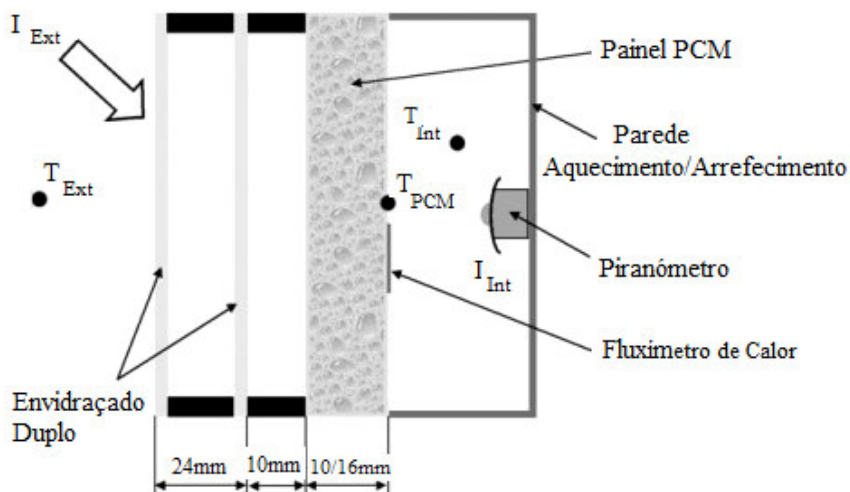


Figura 21 – PCM aplicado no interior de envidraçados duplos [45]

A empresa GlassX [46], desenvolveu um vidro com capacidades de armazenamento de calor através da incorporação de PCM. O PCM utilizado foi um sal hidratado encapsulado numa

“caixa” de policarbonato e incorporado no vidro, conferindo a este as suas características térmicas. Durante o processo de mudança de fase dá-se a cristalização do PCM, e durante este processo, o envidraçado assemelha-se a uma parede translúcida, e o ganho traduz-se num armazenamento de calor equivalente a 20cm de betão.

Outros autores investigaram a incorporação de PCM em persianas [7, 47]. O PCM é incorporado no material de que são compostas as persianas e estas são colocadas pelo exterior da janela. Durante o dia a persiana está aberta e exposta à radiação solar. Com a absorção do calor, o PCM liquidifica. Durante a noite, a persiana está fechada e a janela aberta, permitindo que o calor irradie para o interior do espaço contribuindo assim para o seu aquecimento.

v. Coberturas

A incorporação de PCM em coberturas permite utilizar o calor latente de fusão desse material para reduzir os aumentos de temperatura nos períodos de maior utilização de energia em locais de clima muito quente. Essa redução é feita durante o processo de fusão através da absorção da energia da radiação solar incidente, antes que essa energia atinja o interior do edifício.

Alawadhi e Alqallaf [48] realizaram um estudo numérico onde avaliaram o desempenho térmico de uma cobertura de betão incorporando elementos cónicos de PCM (Figura 22). Foi realizado um estudo paramétrico para analisar o efeito da geometria dos cones e do tipo de PCM usado e os resultados indicaram que é possível reduzir o fluxo de calor para o interior do telhado até 39%.

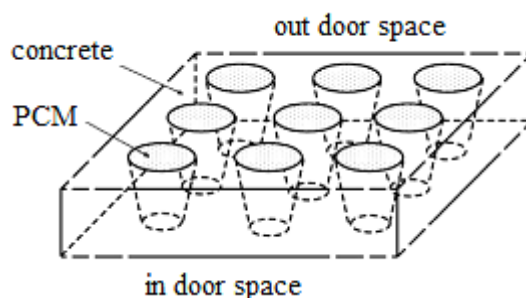


Figura 22 – Telhado de betão integrando elementos cónicos de PCM [48]

vi. Integração de PCM em sistemas de climatização, AQS e outros processos de ventilação

Diversos sistemas de aquecimento/arrefecimento possuem longas secções de tubagem para transporte dos fluidos quentes/frios utilizados.

Nos sistemas convencionais a energia térmica é transportada e transferida através do calor sensível do fluido utilizado, sendo proporcional à diferença entre a temperatura da fonte quente/fria e a temperatura da zona a climatizar. Uma vez que esta diferença é muitas vezes relativamente pequena, elevados caudais de fluido têm de ser bombeados, originando um consumo energético elevado devido à utilização das bombas.

O uso de PCM sob a forma de partículas em suspensão numa fase fluida é uma forma de obter um fluido de aquecimento ou refrigeração com uma capacidade térmica adicional, resultante do calor latente associado à mudança de fase. Além do acréscimo de capacidade térmica, uma outra vantagem desta solução é o facto de não necessitar de equipamento adicional podendo ser bombeado e transportado por sistemas convencionais.

A adaptabilidade ao uso deste tipo de suspensões de microcápsulas de PCM foi avaliada por Gschwander et al. [49]. Neste estudo, diferentes concentrações (10%, 20% e 30%) foram bombeadas a 500 l/h através de um circuito de aquecimento/arrefecimento, correspondendo a cerca de 33 ciclos de fusão/cristalização por hora. Ao fim de 12 semanas ininterruptas de ciclos (equivalente a alguns anos em aplicação real), as cápsulas não apresentaram degradação significativa e o resultado foi o esperado. Com apenas 20% de PCM, a capacidade de armazenamento deste fluido de refrigeração/aquecimento é o dobro do da água, habitualmente usada para o mesmo efeito.

A ventilação natural, quando projetada e utilizada eficientemente, pode reduzir o consumo de energia associado à utilização do ar condicionado, até cerca de 80%. Para minimizar custos, têm sido usados tanques como sistemas de armazenamento térmico em instalações de ar condicionado e AQS (águas quentes sanitárias) devido ao seu potencial para reduzir o pico de utilização de energia elétrica, tirando vantagem do seu menor custo em horas de vazio. A forma mais comum deste tipo de sistemas é o armazenamento em banco de gelo para aplicações de arrefecimento onde o material de armazenamento térmico é a água com algum tipo de agente nucleante [50].

No entanto, a utilização de PCM como fluido de arrefecimento em sistemas de ar condicionado é também já usual [51]. Este tipo de fluido pode depois ser encaminhado para o sistema de aquecimento de águas sanitárias, sendo o calor nele armazenado utilizado para o aquecimento das mesmas [51]. O princípio é o seguinte: de um modo geral a temperatura da água sanitária encontra-se nas tubagens a temperaturas entre os 15-20°C, enquanto a água utilizada no sistema de refrigeração de ar condicionado está, à saída deste, a temperaturas entre os 35 - 40°C. O contacto entre estas duas correntes permite o aquecimento das águas sanitárias, quase sem recurso a energia externa [51].

Wang e Niu [52] propuseram a combinação de um sistema de teto radiante de arrefecimento com um tanque de armazenamento térmico. Nesse estudo foi usado um fluido intermédio de transferência de calor com partículas de PCM em suspensão em vez de água. O uso de um fluido intermédio de transferência de calor com armazenamento térmico num sistema de teto radiante, permite obter um aumento na capacidade de armazenamento térmico do sistema.

Huang [53] estudou a utilização de painéis de PCM como meio de reduzir o aquecimento dos painéis fotovoltaicos, responsável em parte pela perda de eficiência dos mesmos. Nem toda a radiação incidente é convertida em energia elétrica, estimando-se nalguns casos, perdas de 0.5% por °C. Durante o ensaio, a temperatura de transição do PCM usado, foi de 32°C e a temperatura ambiente foi mantida nos 20°C. Para uma radiação incidente de 1000W/m², usando um painel com 20mm de espessura, a temperatura na superfície frontal do painel manteve-se abaixo dos 36°C durante cerca de 80 minutos, enquanto que para uma radiação incidente de 750W/m², usando um painel com 40mm de espessura, a temperatura na superfície frontal do painel manteve-se abaixo dos 33°C durante cerca de 150 minutos.

O contributo da incorporação de PCM em sistemas de ventilação mecânica foi estudado por Medved e Arkar [54]. Essa incorporação conduziu a resultados diretos no dispositivo de arrefecimento natural do sistema (Figura 23). Para uma taxa de três renovações de ar por hora durante o período noturno, observou-se que a temperatura de fusão ótima era 2°C acima da média da temperatura ambiente dos meses de Junho, Julho e Agosto, ou aproximadamente igual à temperatura ambiente média do mês mais quente. Concluíram também que a razão ótima entre a massa de PCM e o fluxo de ar que passa através do sistema, foi determinada entre 1 e 1.5kg/m³/h.

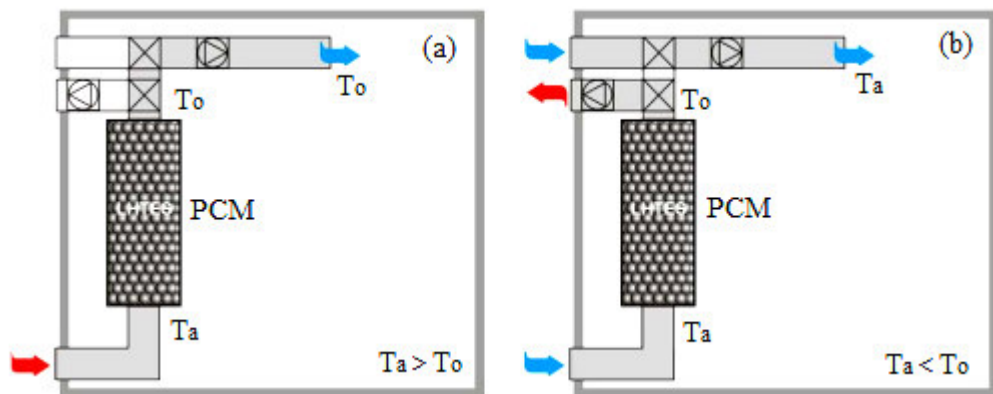


Figura 23 – Sistema de arrefecimento natural: (a) Modo Diurno; (b) Modo Noturno [54]

vii. Incorporação de PCM em materiais de construção

A incorporação de PCM também pode ser efetuada nos materiais de construção tais como o gesso, materiais cerâmicos, blocos de betão, no betão e nas argamassas. Por esta razão, o estudo dessa incorporação tem relevância.

Devido às características porosas do gesso, a incorporação de PCM nas placas de gesso cartonado é uma solução muito utilizada. Esta incorporação faz-se na fase líquida do PCM, nos poros do gesso, podendo-se também incorporar-se diretamente na fase de fabricação do gesso, quando este se apresenta em forma de pasta. Para além disso, tratando-se de um material economicamente acessível, a sua utilização é frequente [30].

A Tabela 8 mostra as principais propriedades físicas de uma placa de revestimento em gesso cartonado com incorporação de diferentes quantidades de PCM.

Tabela 8 – Propriedades do revestimento com PCM [30]

Placa de revestimento em gesso	Densidade (kg/m^3)	Calor específico (kJ/kg-K)	Condutibilidade (W/m-K)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Sem PCM	696	1.089	0.173	0
10% de PCM	720	1.215	0.187	19.3
16% de PCM	760	1.299	0.192	31
20% de PCM	800	1.341	0.204	38.9
30% de PCM	998	1.467	0.232	58.3

Os valores da Tabela 8 permitem concluir que apesar do aumento da densidade da placa de revestimento, o que a torna mais pesada, há um aumento do calor específico e da condutibilidade térmica da placa. A entalpia de fusão aumenta de 0, na placa sem PCM, para 58.3kJ/kg com a adição de 30% de PCM [30].

Da incorporação de PCM nos tijolos cerâmicos e nos blocos de betão, resultam envolventes com elevada inércia térmica sem aumento significativo das espessuras das envolventes dos edifícios [7].

Lai [55] estudou de que forma a incorporação de PCM em tijolos perfurados pode melhorar o desempenho térmico de coberturas planas. Utilizou parafina, a octadecano, em tubos acrílicos, que foram introduzidos nos tijolos cerâmicos.

Durante o verão, foram feitos registos das temperaturas máximas exteriores, comparando-as com as temperaturas dos tijolos com e sem PCM (Tabela 9).

Tabela 9 – Temperaturas exteriores dos tijolos com e sem PCM [55]

Temperaturas máximas exteriores (°C)	Tijolo com PCM	Tijolo sem PCM
26.5	29.3	31.5
32	29.8	33.2
35.5	31.7	36.6

Os resultados apresentados na Tabela 9 permitem concluir que as temperaturas registadas nos tijolos com PCM foram mais baixas que as registadas em tijolos sem PCM em cerca de 2.2°C, 3.4°C e 4.9°C.

Alawadhi [56], realizou estudos para comparar o desempenho de diferentes PCM quando incorporados em tijolos. Para tal, utilizou tubos que foram introduzidos nos tijolos cerâmicos (Figura 24), mas contendo diferentes materiais parafínicos: octadecano, eicosano e P116, cujas temperaturas de fusão são 27°C, 37°C e 47°C respetivamente. As temperaturas exteriores variaram entre 25.7°C e 55.6°C tendo-se verificado que apenas o eicosano permitiu reduzir o fluxo de energia do exterior para o interior em cerca de 24%. Devido às temperaturas de transição terem sido inadequadas, o octadecano manteve-se no estado líquido e o P116 no estado sólido.

Na Figura 24 é apresentado o modelo utilizado por Alawadhi [56] para estudar o desempenho de diferentes PCM em tijolos.

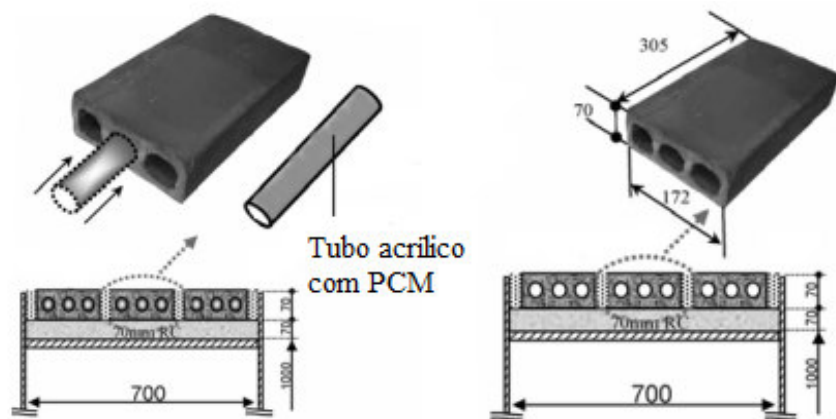


Figura 24 – Modelo experimental em tijolos [56]

Relativamente ao betão, a sua estrutura porosa e elevada capacidade de absorção facilitam a incorporação de PCM. Embora a resistência à compressão diminua nas primeiras idades com a incorporação de PCM, é possível aumentar essa resistência para idades mais avançadas.

A inclusão de PCM no betão permite a obtenção de temperaturas mais confortáveis no interior dos edifícios, mas poderá também servir para controlar a temperatura durante o processo de cura do betão, introduzindo um retardador de presa, cuja libertação controlada diminui a velocidade de hidratação e conseqüente libertação de calor. Por outro lado, a absorção da energia durante a fusão do PCM diminui a subida da temperatura associada à hidratação inicial do cimento.

Barroso de Aguiar *et al* [57], desenvolveram um tipo de argamassa de revestimento interior e exterior com ligante à base de cal, contendo microcápsulas de PCM com o objetivo de poupar energia. O PCM selecionado é constituído por microcápsulas de polimetacrilato de metilo contendo uma mistura de ceras de parafina. O produto é utilizado em pó com um diâmetro de partícula que se situa entre 2 e 20 μ m, tem uma temperatura de transição de 23°C e 110kJ/kg de calor específico. A percentagem de PCM incorporada pode variar entre 5% e 50%. Normalmente o ligante é constituído por cal aérea ou por cal aérea e cimento.

A Figura 25 permite comparar os valores das temperaturas das argamassas sem incorporação de PCM e das argamassas com percentagens de 30% e de 50% de PCM incorporado, verificando-se que a incorporação de PCM ameniza a amplitude térmica.

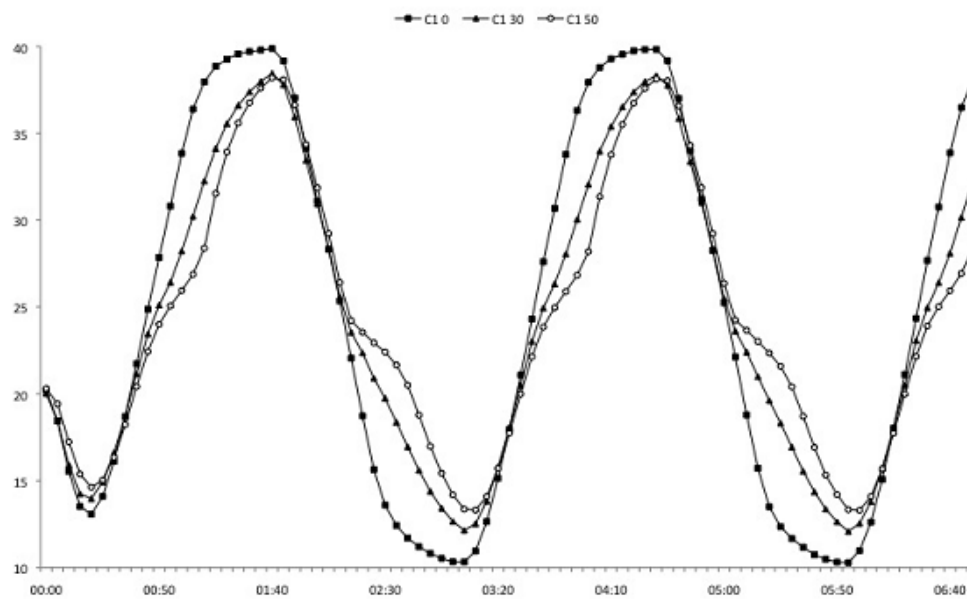


Figura 25 – Temperaturas registadas em argamassas sem e com incorporação de PCM em percentagem de 30% e 50% [57]

2.7.1.4 Comercialização de PCM

Para o uso de PCM em armazenamento de calor latente estão disponíveis no mercado vários produtos em larga escala [7]. Uma lista dos PCM comerciais, é apresentada na Tabela 10.

Como se verifica na Tabela 10, atualmente, não existem PCM comerciais com temperaturas de fusão inferiores ou da ordem do 20°C. Este facto pode limitar a escolha de um PCM adequado.

Tabela 10 – PCM comerciais [7]

Designação	Produto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)	Fabricante
RT 20	Parafina	22	172	Rubitherm GmbH
Climsel C23	Hidrato de Sal	23	148	Climator
Climsel C24	Hidrato de Sal	24	216	Climator
RT 26	Parafina	25	131	Rubitherm GmbH
RT 25	Parafina	26	232	Rubitherm GmbH
RT 30	Parafina	28	206	Rubitherm GmbH
RT 27	Parafina	28	179	Rubitherm GmbH
STL 27	Hidrato de Sal	27	213	Mitsubishi Chemical
S27	Hidrato de Sal	27	207	Cristopia
TH29	Hidrato de Sal	29	188	TEAP
Climsel C32	Hidrato de Sal	32	212	Climator
RT 32	Parafina	31	130	Rubitherm GmbH
Micronal DS 5008	Parafina	23	110	BASF
Micronal DS 5001	Parafina	26	110	BASF

2.7.2 Outras aplicações

Para além das aplicações do PCM no setor dos edifícios existem outros exemplos de utilização. Estas aplicações são o resultado de projetos de investigação a nível mundial.

As primeiras aplicações foram inicialmente desenvolvidas em colaboração com a NASA para o conforto dos astronautas. Revankar *et al.* [58] estudou o uso do PCM encapsulado para

transferências energéticas espaciais e assim o uso de PCM pode ser um marco para a tecnologia espacial.

Desde então, a utilização de PCM estendeu-se à indústria têxtil, do calçado, do vestuário, à indústria automóvel, a sistemas de armazenamento de energia térmica, de refrigeração de alimentos ou bebidas, a aplicações médicas como em transporte de sangue, mesas de operação e cadeiras de rodas; sistemas de captação solar, sistemas de bomba de calor, armazenamento passivo em edifícios, na indústria química, na regularização de picos de temperatura em reações químicas exotérmicas, na proteção térmica de dispositivos eletrónicos e no arrefecimento de computadores.

São exemplos de aplicações na indústria automóvel, o uso de um dispositivo de armazenamento de PCM implementado pela BMW, que aumenta o conforto térmico nos veículos automóveis [16]; a inclusão de PCM num sistema de secagem de pintura para recuperar o calor de escape [16]. Outra aplicação de PCM nesta área diz respeito ao potencial de arrefecimento destes materiais quando incorporados em capacetes [59].

A incorporação de PCM com temperaturas de fusão próximas de 37°C em fibras têxteis, permite que quando há exposição ao sol ou se realiza atividade física, a roupa armazene o calor em excesso. De seguida, com a deslocação para lugares mais frios, ocorre a libertação do calor armazenado, impedindo que o corpo humano arrefeça e mantenha o nível de conforto corporal [60].

As empresas, Freudenberg com o Confortemp® e a Outlast com o Smart Fabric® detêm patentes para a incorporação destes materiais em fibras, tecidos e em não tecidos. A polimerização de PCM foi também testada para materiais de isolamento para uso em roupas de cama [61].

Na Figura 26 está representado um tecido com PCM e a incorporação de microcápsulas na sua estrutura.

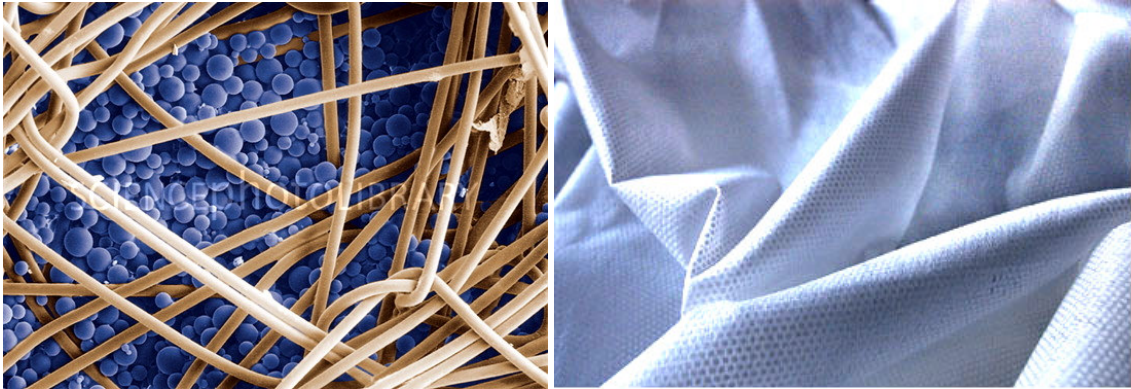


Figura 26 – Tecido com PCM incorporado [61]

Os dois campos referidos nos parágrafos anteriores (indústria automóvel e indústria têxtil) exemplificam a utilização dos materiais de mudança de fase atualmente, mas as suas potencialidades abrem novas perspectivas de utilização.

Uma equipa de pesquisa liderada por David Wright [62] utilizou materiais de mudança de fase, e mostrou que esses materiais podem armazenar e processar informações simultaneamente. Também mostrou experimentalmente que esses materiais podem executar operações computacionais de uso geral, como adição, subtração, multiplicação e divisão. Ainda mais impressionante, mostrou que materiais de mudança de fase podem ser usados para fazer neurónios e sinapses artificiais o que significa que um sistema artificial feito inteiramente com dispositivos de mudança de fase poderia aprender e processar informações da mesma forma que o próprio cérebro. Segundo David Wright [62] as descobertas da equipa, têm implicações importantes para o desenvolvimento de formas totalmente novas de computação, incluindo computadores parecidos com o cérebro.

CAPÍTULO 3.

METODOLOGIA

3.1 ENQUADRAMENTO DA METODOLOGIA

Para a realização prática deste projeto identificou-se o PCM mais adequado para uma habitação “tipo” em Portugal e determinou-se em que quantidade a sua eficiência é mais relevante.

Foi definido um edifício com uma geometria simples, cujas principais características construtivas são apresentadas no ponto 3.4. Pretendeu-se testar os efeitos da inclusão de diferentes PCM nas paredes exteriores do edifício relativamente às alterações térmicas ocorridas no interior do mesmo. Na situação em que o uso deste material se mostrou mais vantajoso simulou-se a incorporação de diferentes quantidades de PCM e avaliaram-se os ganhos inerentes.

O estudo foi efetuado para três cidades portuguesas: Bragança, Porto e Évora recorrendo ao programa de simulação *EnergyPlus*. Foram escolhidas estas três cidades atendendo às diferentes localizações geográficas e ambientais, de modo a abranger toda estas zonas, sendo que para qualquer outra cidade destas regiões, os resultados serão idênticos. Procurou-se compreender de que forma varia o desempenho dos diferentes PCM com as características climáticas de cada cidade. Desta forma procurou-se realizar uma simulação representativa para a realidade climática do território português. Este estudo permitiu avaliar de que forma este tipo de materiais de regulação térmica pode contribuir para a diminuição da fatura energética de um edifício quando implantado numa destas cidades.

Numa primeira fase, para cada uma das cidades, efetuaram-se simulações para um dia típico de inverno e um dia típico de verão. Após a análise dos resultados obtidos, procurou-se numa segunda fase estudar a influência do PCM quando se aumenta, neste caso duplica, a quantidade deste material. Numa terceira fase, estudou-se a influência dos PCM escolhidos durante todo o mês de Fevereiro como mês de inverno, e todo o mês de Julho como mês de verão. Para estas simulações efetuadas, não se considerou a instalação no edifício de qualquer sistema ou equipamento de climatização e ventilação. Assumiu-se também a influência que o tipo de parede utilizada pode ter nos resultados devido à sua fraca inércia térmica. Procurou-se deste modo analisar de forma mais rigorosa o efeito regulador térmico do PCM incorporado num dos elementos da envolvente exterior da habitação.

Numa segunda fase de simulações, determinaram-se as necessidades energéticas inerentes da inclusão do PCM e para tal, considerou-se a instalação no edifício de um sistema de climatização e ventilação (AVAC).

3.2 PROGRAMA INFORMÁTICO UTILIZADO

EnergyPlus

A preocupação crescente com processos que conduzam a consumos energéticos reduzidos, tem levado ao aparecimento e desenvolvimento de programas de simulação do comportamento térmico e energético de edifícios.

É neste âmbito da sustentabilidade energética que surge o *EnergyPlus*. Este programa surgiu da necessidade de se obter uma ferramenta integrada para simulação e previsão de temperaturas e conforto num edifício [63]. Foi desenvolvido e é disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (*U.S. Department of Energy*). A primeira versão do programa foi lançada em 2001 e a versão, 8.1, está disponível gratuitamente podendo ser descarregada no *website* da secção Eficiência Energética e Energias Renováveis do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América [64].

O *EnergyPlus* surgiu da combinação e desenvolvimento de dois programas utilizados no final dos anos 1980 e início dos anos 1990, o *BLAST* e *DOE-2*.

Na Tabela 11 comparam-se as potencialidades dos três programas: o *BLAST*, o *DOE-2* e o *EnergyPlus*, evidenciando-se as vantagens e os avanços deste relativamente aos anteriores.

Tabela 11 – Comparação das características dos programas de simulação [65]

Caraterísticas gerais	Software		
	DOE - 2	BLAST	EnergyPlus
Soluções simultâneas			
Integração de equipamentos/sistemas/plantas	Sim	Não	Sim
Solução conseguida por iterações	Não	Não	Sim
Acoplamento rígido	Não	Não	Sim
Aproximação de resultados por múltiplas medições			
Número de medições definidas pelo utilizador	Não	Não	Sim
Variação do número de medições	Não	Não	Sim
Dados de entrada (“Inputs”)			
Possibilidade de modificação pontual de dados em necessidade reformulação integral	Sim	Não	Sim
Dados de saída (“Outputs”)			
Relatórios “Standard”	Sim	Sim	Sim
Relatórios definidos pelo utilizador	Sim	Não	Sim
Dados de entrada (superfícies exteriores e áreas) visíveis (2D ou 3D)	Não	Não	Sim

O aparecimento do *EnergyPlus* utilizando a linguagem FORTRAN90, permitiu uma evolução em relação aos seus antecessores, porque possuindo materiais de apoio e programas auxiliares, torna as simulações mais fáceis. O *EnergyPlus*, também designado por “E⁺”, é um sistema primário de simulação energética, tendo como ficheiros de entrada e saída documentos de texto simples [64]. Possui a vantagem de considerar nas simulações, as cargas térmicas de um edifício e a possibilidade de efetuar várias medições de acordo com o definido pelo utilizador. É um programa de simulação dinâmica de necessidades energéticas num edifício, que permite modelar o uso de energia (controlo do processo de aquecimento, arrefecimento e ventilação) [64]. O *EnergyPlus* relaciona vários módulos de simulação que em conjunto permitem a estimativa das necessidades energéticas do edifício.

A Figura 27 apresenta a estrutura do *EnergyPlus* e os módulos utilizados na simulação do comportamento energético edifício.

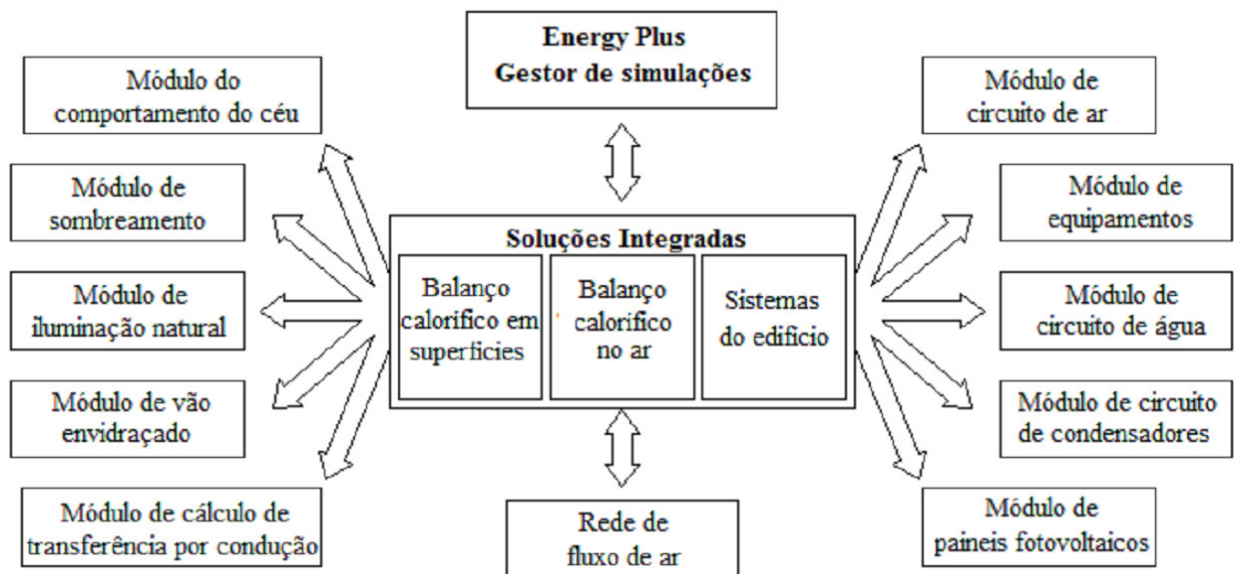


Figura 27 – Estrutura e módulos do *EnergyPlus* [66]

Esta ferramenta de simulação permite desenvolver estudos no sentido da melhoria da eficiência energética de um edifício existente, ou ainda, em fase de projeto. Ele próprio tem sido alvo de estudo e constitui a base de trabalho de muitas investigações desenvolvidas [67, 68, 69]. Este *software* permite ao utilizador um processo de simulações simples, facilitando a modelação dos edifícios, disponibilizando-lhe material de apoio e programas auxiliares, cujos ficheiros de entrada e saída são documentos de texto simples [67, 68, 69].

O *EnergyPlus* baseado na introdução de dados associados à geometria do edifício, soluções construtivas, sistemas mecânicos e outros, estima as necessidades de aquecimento e arrefecimento para manter o ambiente do edifício entre valores de temperatura definidos. É capaz também de estimar o consumo de energia de equipamentos e outros parâmetros de simulação desejados para avaliar a eficácia energética do edifício. Esta ferramenta utiliza uma abordagem do tipo dinâmica no fenómeno de transferência de energia entre o edifício e o meio exterior, na qual o interior do edifício se encontra em constante interação com o meio exterior ao longo do período de simulação.

O *EnergyPlus* utiliza ficheiros climáticos com a definição detalhada de parâmetros relacionados com o comportamento do meio ambiente local, nomeadamente a temperatura

exterior, humidade, radiação e orientação solar, entre outros. Relativamente a Portugal, existem ficheiros climáticos para Bragança, Coimbra, Évora, Faro, Lisboa e Porto, e ainda para o Funchal e para as Lajes, nas Regiões Autónomas da Madeira e Açores [70]. Os ficheiros climáticos de Lisboa e do Funchal foram sintetizados pelo LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia) com a conjugação de dados próprios e dados recolhidos ao Instituto de Meteorologia entre 1951 e 1980, realizando a sua atualização.

Após a introdução dos dados necessários relativos ao edifício em estudo, volumetria, soluções construtivas, sistemas de climatização e ventilação (AVAC), equipamentos, ocupantes ou mobiliário do edifício, este programa permite [63, 64]:

- Simular o comportamento térmico e energético de um edifício, nomeadamente, em questões de aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação e energia;
- Prever temperaturas interiores (ar e superfícies), cargas térmicas, consumos de energia, níveis de iluminação, caudais de infiltração e ventilação natural. Estas previsões, normalmente efetuadas para um ano típico, revelam-se muitas vezes fundamentais nas decisões de projeto, particularmente na fase inicial do projeto;
- A simulação diferenciada, tais como “*time-step*” de cálculo menor que uma hora, sistema modular, possibilidade de cálculo de infiltração de ar diferenciada para cada zona térmica, cálculo de índices de conforto térmico e integração com outros sistemas (fotovoltaico, solar e térmico);
- Conhecer as necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício, através do cálculo de temperaturas previstas no edifício para o intervalo temporal solicitado;
- Obter dados relativos à renovação de ar no edifício, humidade, entre outros;
- O uso de um sistema de climatização com uma eficiência de 100% (*IdealLoads Air System*), através de um mecanismo de balanço térmico, onde considera as temperaturas definidas no “*setpoint*” pelo utilizador, devolvendo como “*output*” as necessidades energéticas para o edifício de forma a manter as temperaturas definidas pelo utilizador.

O *EnergyPlus* tem características que o tornam eficiente, tais como [71]:

- Solução simultânea e integrada em que a resposta do edifício e os sistemas primário e secundário estão acoplados;
- Intervalos de tempos definidos pelo utilizador, com fração de hora, para interação entre as zonas térmicas e o ambiente, e intervalos de tempo variáveis para interação entre a zona térmica e o sistema AVAC;
- Arquivos de entrada e de saída que incluem condições ambientais horárias ou sub-horárias (até um quarto de hora) e relatórios padrões reajustáveis pelo utilizador;
- Técnica de solução baseada no balanço de energia para as cargas térmicas do edifício, que permite o cálculo simultâneo dos efeitos radiante e convectivo na superfície interior e exterior, durante cada intervalo de tempo;
- Condução de calor através dos elementos do edifício como paredes, tetos, pavimentos, etc., usando funções de transferência;
- Modelo de conforto térmico, baseado na atividade, temperatura de bolbo seco interna, humidade;
- Modelo de céu anisotrópico para cálculos mais complexos da radiação difusa sobre superfícies inclinadas;
- Cálculo de balanço de calor de envidraçados que permite o controlo eletrónico de persianas, balanço térmico camada por camada, o que permite a identificação do comprimento de onda da energia solar absorvida pelo vidro da janela;
- Possui uma biblioteca versátil com diversos modelos comerciais de janela; controlo da luz do dia, incluindo cálculos da iluminância interior, controle do brilho das luminárias e do efeito da iluminação artificial;
- Sistemas de ar-condicionado configuráveis, o que permite ao utilizador simular sistemas típicos comuns e sistemas pouco modificados, sem ter que recompilar o código fonte do programa.

Uma simulação energética feita no *EnergyPlus*, funciona com base em três fases e na seguinte metodologia:

- A criação de um modelo no programa, introduzindo os vários dados que definem o edifício, como é o caso da sua geometria, dimensões e constituição;
- A simulação, calculando o proposto pelo utilizador, tendo em conta um ficheiro de dados climáticos selecionado pelo mesmo;
- A obtenção de resultados, análise dos mesmos e conclusões, elaborando, se for o caso, análises de sensibilidade das várias variáveis inerentes ao edifício.

Funcionamento do programa

O algoritmo de cálculo do *EnergyPlus* permite a realização do processamento das variáveis envolvidas, em permanente alteração devido à mudança dos parâmetros interiores e exteriores que condicionam o comportamento térmico do edifício.

Apresentam-se de seguida as linhas principais do funcionamento do programa *EnergyPlus* e os principais campos de introdução de dados para a definição do edifício e suas necessidades energéticas.

INTERFACE DE INTRODUÇÃO DE DADOS - O *EnergyPlus* possui um grafismo semelhante aos restantes programas aplicados nos sistemas operativos comuns no meio informático. A introdução de dados e a modelação gráfica dos edifícios são facilitadas.

IDF EDITOR e EP-LAUNCH - São as duas janelas principais do programa. É através delas que se selecionam os ficheiros climáticos e ficheiros com os dados e geometria dos respetivos sistemas a simular e também obter os dados de saída. Para além destas aplicações, o *plug-in OpenStudio* permite, em conjunto com o software *Google SketchUp*, visualizar a geometria do edifício em três dimensões e confirmar a validade dos dados introduzidos no que respeita à geometria do edifício.

EP-LAUNCH - A Figura 28 apresenta a funcionalidade *EP-Launch*. Esta aplicação permite a seleção de ficheiros associados à realização da simulação, como o ficheiro climático, a edição

do ficheiro *EnergyPlus*, os resultados obtidos, a visualização do edifício projetado, entre outros.

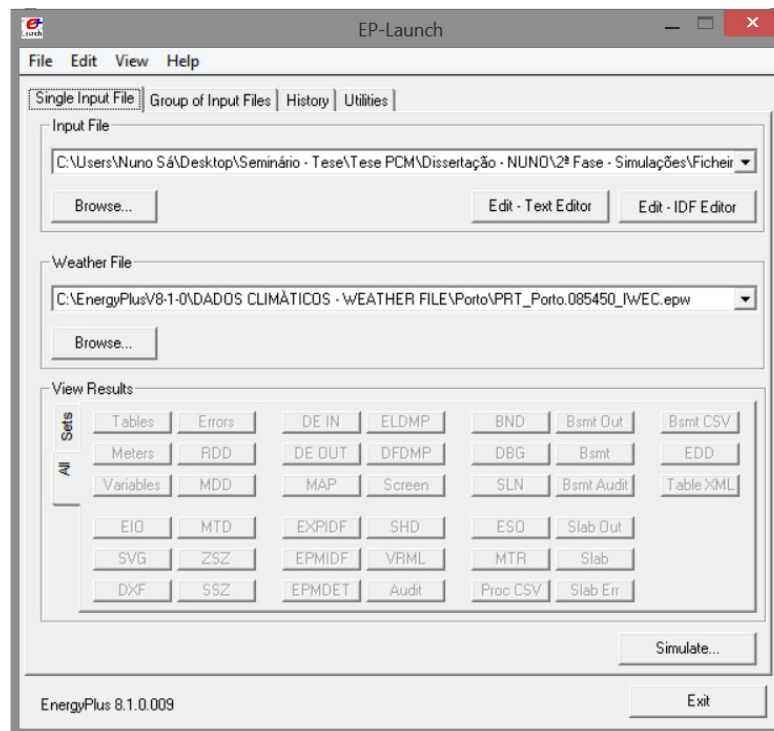


Figura 28 – Interface visual da funcionalidade *EP-Launch*

IDF Editor - É o comando principal do *EnergyPlus*. Contém os vários parâmetros de simulação dispostos em classes de objetos. As classes subdividem-se em campos, onde são introduzidos os dados necessários para a simulação do comportamento térmico do edifício. O *IDF Editor* apresenta ainda uma breve explicação dos dados a introduzir nos respetivos campos, facilitando a compreensão geral do parâmetro.

PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO - Os parâmetros de simulação servem para introduzir os parâmetros básicos na realização da simulação, como a identificação da versão do programa, os controlos da simulação, a designação do edifício, propriedades do terreno a distribuição solar, o sombreamento do edifício, os algoritmos de cálculo detalhados para transferência de calor, o fator multiplicativo do volume de zonas, e o intervalo de resultados da simulação, o *Timestep*. A Figura 29 apresenta a interface do *IDF Editor* associado ao campo do edifício na classe parâmetros de simulação.

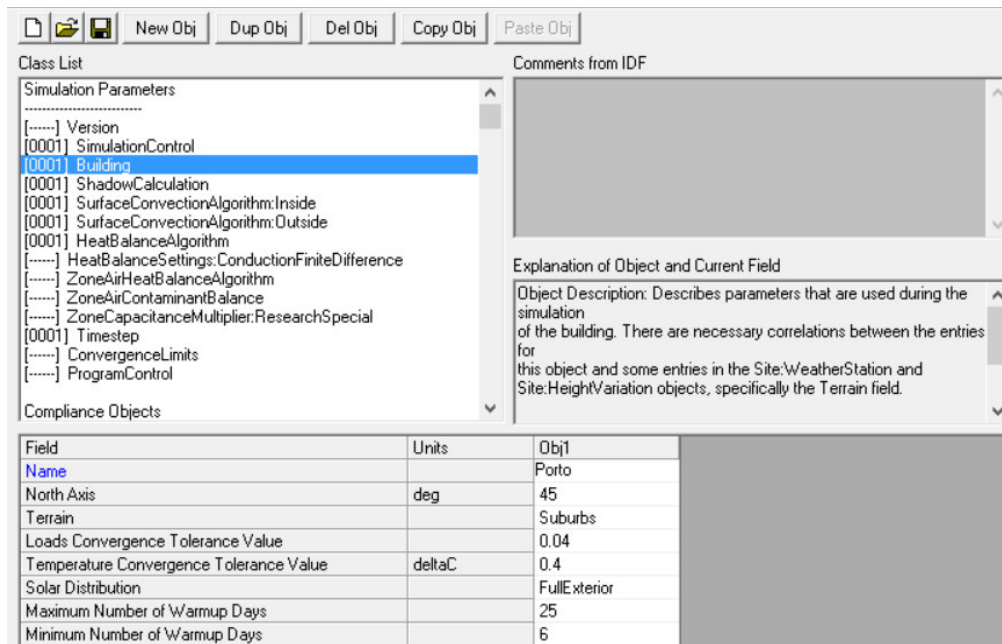


Figura 29 – Interface do *IDF Editor* relativo ao campo do edifício

LOCALIZAÇÃO E CLIMA - Em localização e clima encontram-se diversos parâmetros associados ao local de implantação de edifício e o seu meio exterior, sendo necessário o preenchimento dos campos relativos ao período de tempo de análise (*Run Period*) e a temperatura do solo.

O *EnergyPlus* apresenta um utilitário que permite obter a temperatura do solo mensal através do ficheiro climático. A sua definição é necessária para o cálculo de trocas de calor com elementos construtivos do edifício em contacto com o solo.

A Figura 30 apresenta a definição da estação de aquecimento e arrefecimento no campo *Run Period*.

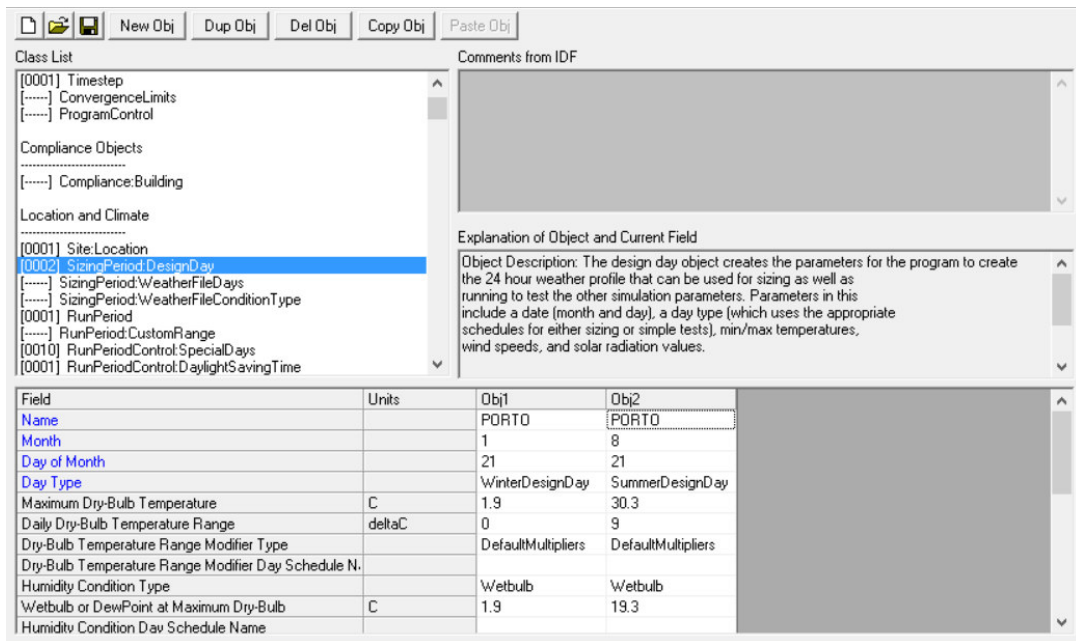


Figura 30 – Definição da estação convencional de arrefecimento e aquecimento

HORÁRIOS – O menu relativo aos horários (*Schedules*) é importante na definição dos ganhos internos do edifício. Permite a definição de horários de ocupação e atividades realizadas no edifício, horários para iluminação artificial, equipamentos e ativação de dispositivos.

SOLUÇÕES CONSTRUTIVAS – Em *Surface Construction Elements*, introduzem-se os materiais e soluções construtivas. A definição do tipo de materiais, com a sua espessura, coeficiente de condutibilidade térmica, massa volúmica e calor específico efetua-se no campo Material. Também se introduzem os dados relativos aos vãos envidraçados, como as propriedades do vidro, espaço de ar e dispositivos de oclusão noturna.

As soluções construtivas (*Construction*) do edifício são elaboradas com a ordenação dos materiais utilizados do exterior para o interior do edifício, como se verifica na Figura 31.

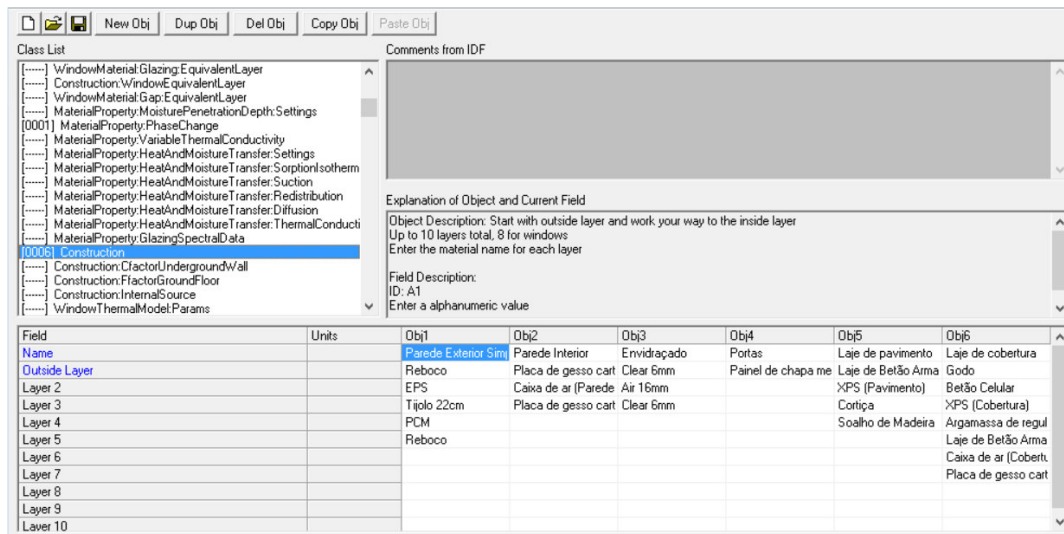


Figura 31 – Campo de introdução das soluções construtivas do edifício

ZONAS TÉRMICAS E ELEMENTOS CONSTRUTIVOS - A definição das zonas térmicas a analisar realiza-se no campo *Zone*. Para edifícios habitacionais, o conceito de zona térmica considera-se semelhante ao conceito de fração autónoma indicado no REH, sendo os espaços não aquecidos detalhados como zonas térmicas distintas (garagens ou vão de escada).

Os campos *Building Surface*, *Fenestration Surface*, *Shading Zone* e *Internal Mass* servem para introduzir os dados relativos à geometria do edifício, como elementos construtivos, vãos envidraçados, elementos de sombreamento fixos e paredes internas, respetivamente.

A definição da geometria do edifício e a sua orientação são introduzidas no campo *Global Geometry Rules*.

No campo *Building Surface: Detailed*, introduzem-se as coordenadas dos elementos construtivos do edifício sendo também necessário definir a solução construtiva do mesmo, a envolvente e a exposição à radiação solar e ao vento.

Os campos *Fenestration Surface: Detailed* e *Shading Zone: Detailed*, permitem a introdução dos dados relativos à geometria dos vãos envidraçados e dos elementos de sombreamento.

GANHOS INTERNOS - Em *Internal Gains* são introduzidos os ganhos internos de cada zona associados à ocupação, iluminação artificial e equipamentos. No campo *People* é indicado o número de ocupantes, o seu horário de ocupação, atividades realizadas e a fração de energia radiante. Os campos de iluminação e equipamentos elétricos são semelhantes,

sendo necessário introduzir o método de cálculo (nível de energia, Watts por área ou Watts por pessoa), o horário de utilização e a fração de energia radiante.

RENOVAÇÃO DO AR INTERIOR - No campo *Zone Infiltration: Design Flow Rate* são introduzidos os dados associados à renovação do ar interior de cada zona térmica devido a trocas de ar com o exterior, com a indicação do número de renovações de ar por hora. O *EnergyPlus* apresenta um sistema de cálculo de trocas de ar entre diferentes zonas térmicas.

SISTEMAS AVAC E INTERVALO DE TEMPERATURA NO INTERIOR DA HABITAÇÃO - Para o cálculo das necessidades energéticas do edifício foi utilizado um sistema de aquecimento e arrefecimento “ideal”, uma eficiência de 100%, (*IdealLoads Air System*), no campo *Zone HVAC: Ideal Loads Air System*. Na classe *Zone HVAC Equipment Connections*, definem-se as conexões do equipamento na zona.

O menu *Thermostat Setpoint: Dual Setpoint* possui um termóstato para a definição das temperaturas de conforto no interior da habitação. Os valores de temperatura de referência são respetivamente 20°C e 25°C para a estação de aquecimento e arrefecimento, permitindo a comparação com os resultados obtidos no REH.

O *EnergyPlus* possui outras potencialidades para avaliação da eficiência energética de outros sistemas instalados nos edifícios, como rede de águas, bombas de elevação, geradores elétricos, painéis fotovoltaicos e diversos métodos de arrefecimento e aquecimento.

INTERFACE DE RESULTADOS APÓS A SIMULAÇÃO - No campo *Output:Variable*, faz-se a escolha das variáveis de resultados desejadas. No entanto, é necessário a introdução precedente de relatório de variáveis avançadas no campo *Output: Diagnostics*. O manual de utilização *Input Output Reference* apresenta a definição e significado das diversas variáveis de resultados obtidos na simulação. Os resultados fornecidos são apresentados em folha de cálculo para posterior análise e tratamento.

As principais variáveis necessárias para a análise do comportamento térmico do edifício encontram-se indicadas na Figura 32, definidas em função dos resultados desejados.

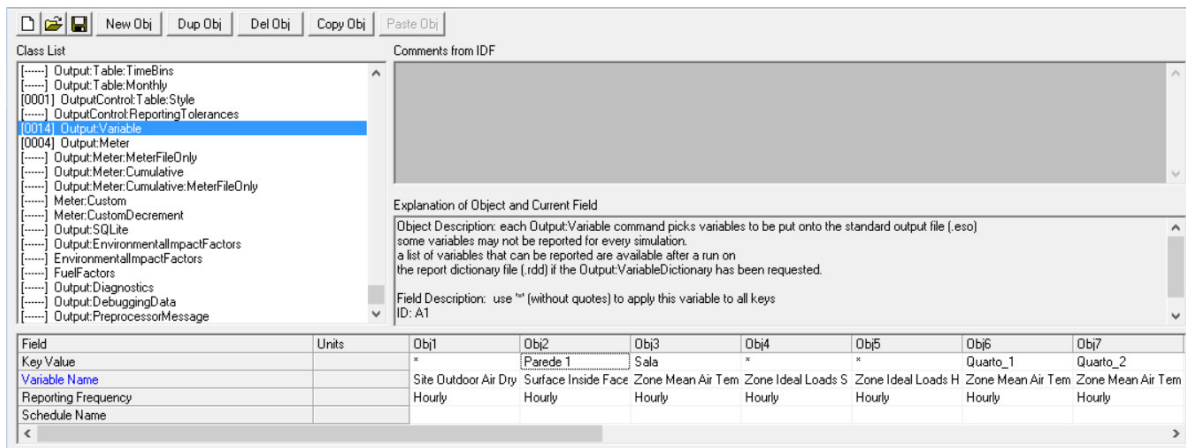


Figura 32 – Variáveis de resultados utilizados no *EnergyPlus*

3.3 PCM

No caso em estudo, pretende-se avaliar a eficiência de dois tipos de PCM na redução das necessidades energéticas do edifício projetado, de forma passiva e sustentável.

A escolha de um PCM para ser aplicado a uma situação particular, está dependente das seguintes condições: a sua temperatura de mudança de fase e a temperatura dos períodos de aquecimento/arrefecimento característicos do local; a sua comercialização, facto que nem sempre ocorre e que por vezes condiciona essa escolha; o conhecimento da ficha técnica e a forma como esse PCM existe no mercado e a possibilidade de ser ou não aplicado em obra.

Do estudo feito sobre este tipo de materiais sabe-se que os PCM com elevadas temperaturas de fusão são mais eficientes nos meses de verão pois amortecem as temperaturas reduzindo a temperatura ambiente interior dos edifícios, enquanto os de temperaturas de fusão mais baixas, são mais eficientes nas estações de aquecimento.

Tendo em conta as condicionantes já referidas para a escolha do PCM, optou-se por escolher dois tipos de PCM: Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26 e o Delta®-Cool 24.

Estes dois tipos de PCM são comercializados, existe vasta informação técnica acerca deles e têm potencial para serem aplicados à construção civil em geral e às condições construtivas do estudo a realizar em particular. As suas temperaturas de fusão são adequadas à realidade climática dos edifícios localizados nas cidades portuguesas em que é feito o estudo, sendo

certo que para a cidade de Bragança, haverá dificuldades devido às temperaturas aí verificadas em especial na época de Inverno.

O programa de simulação “E⁺”, requer para cada PCM a introdução de 16 valores da temperatura e correspondentes valores da entalpia e a partir destes valores obter a correlação entre as duas grandezas. O cálculo da entalpia é feito à custa do calor específico do PCM.

O calor específico de um material é o calor necessário para elevar em 1°C a temperatura desse material, por unidade de massa. O calor sensível é a quantidade de calor ganho ou perdido por um material, alterando apenas a sua temperatura. O calor latente é a quantidade de calor que um material deverá receber ou ceder, para haja mudança do seu estado físico.

O calor específico de um PCM é dado pela soma do calor sensível com o calor latente, equação 1.

$$C_{\text{específico}} = C_{\text{sensível}} + C_{\text{latente}} \quad (1)$$

em que:

$C_{\text{específico}}$ é o calor específico do PCM em J/kg.k

$C_{\text{sensível}}$ é o calor sensível do PCM em J/kg.k

C_{latente} é o calor latente do PCM em J/kg.k

O valor para o calor sensível é retirado diretamente da ficha técnica do PCM, adotando-se o mesmo valor ao longo de todo o intervalo de temperatura.

O valor do calor latente é obtido pela equação 2.

$$C_{\text{latente}} = A \times e^{-0.5 \times \left(\frac{T - T_m}{B} \right)^2} \quad (2)$$

em que:

A é o fator que traduz a capacidade de calor latente, em kJ/kg

T é a temperatura do PCM, em °C

T_m é a temperatura de fusão do PCM, em °C

B é o fator que traduz o intervalo de fusão e depende da pureza do PCM que varia entre 0.1 e 1, considerado igual a 0.8 em todos os cálculos.

Obtido o valor do calor específico do PCM para cada temperatura, obtém-se o valor da entalpia de fusão através da equação 3.

$$\Delta H = C_p \times \Delta T \quad (3)$$

em que:

ΔH é a entalpia de fusão para uma dada temperatura, em J/kg

C_p é o valor do calor específico, em J/kg.k

ΔT é a variação de temperatura do PCM, em °C

Através das equações (1), (2) e (3) obtêm-se os 16 valores da entalpia de fusão do PCM necessários para a simulação a ser realizada no “E⁺”.

3.3.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26

Este tipo de PCM é comercializado sob a forma de placas prontas a ser aplicadas em obra. O seu núcleo é revestido com lã de vidro. Este PCM tem boa durabilidade e como é de fácil aplicação, é utilizado na construção civil. A sua temperatura de fusão situa-se no intervalo de 23 a 26°C, devendo ser considerada a temperatura média de 24.5°C [72].

Como este material é fornecido em forma de placas, nas simulações a efetuar, será colocado na face interior da parede exterior que será posteriormente rebocada.

Na Figura 33 está representada uma placa do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26 e na Tabela 12 é apresentada a ficha técnica deste PCM e os dados necessários para a modelação do mesmo.

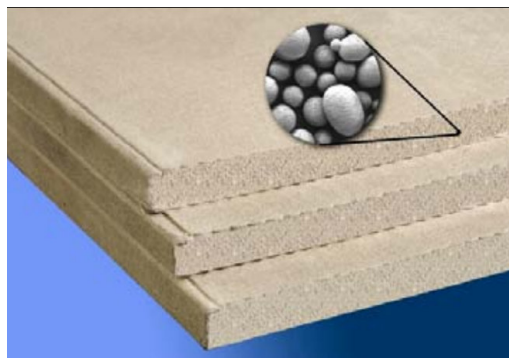


Figura 33 – Placa do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26 [72]

Tabela 12 – Propriedades do Micronal® PCM Smartboard [72]

Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26		Dados para modelação
Espessura (mm)	15	-
Peso (kg/m ²)	11.5	-
Peso (kg/m ³)	766.7	-
Temperatura de fusão (°C)	23 - 26	Temp. Fusão = 24.5 °C
Capacidade de calor latente (kJ/m ²)	330	A = 14.35 kJ/kg
Capacidade de calor latente (kJ/kg)	28.7	
Capacidade de calor específico (kJ/kg.K)	1.2	Cp = 1200 (J/kg.K)
Condutividade térmica – λ (W/m.K)	0.134	-

Utilizando os valores da ficha técnica do PCM, calculou-se o valor do calor específico. A curva que relaciona a temperatura com o calor específico é representada na Figura 34.

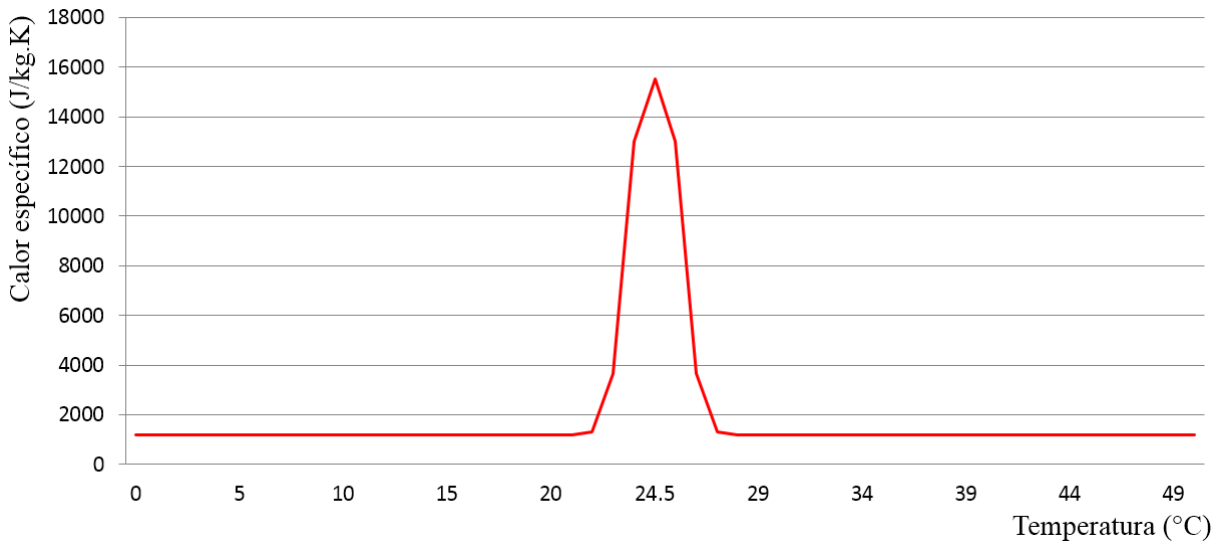


Figura 34 – Curva do calor específico do Micronal® PCM Smartboard 23/26

Calcularam-se de seguida os valores da entalpia em função da temperatura. Na Tabela 53, apresentada em anexos, apresentam-se os 16 valores de temperatura e respetiva entalpia, necessários para realizar no “E⁺” as simulações com este tipo de PCM.

A curva que relaciona estas duas grandezas é representada na Figura 35.

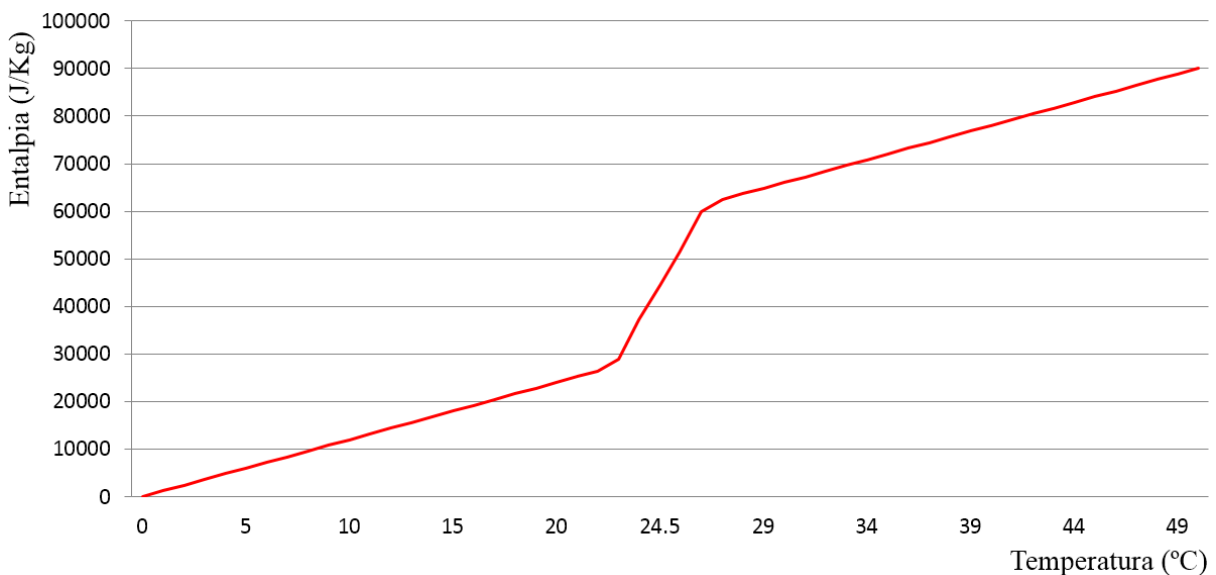


Figura 35 – Curva da entalpia de fusão do Micronal® PCM Smartboard

3.3.2 Delta®-Cool 24

O Delta®-Cool 24 é um PCM com capacidade para 10000 ciclos de fusão/solidificação, permitindo 25 anos de utilização sem perda das suas propriedades e é um material 100% reciclável. É apresentado sob várias formas de encapsulamento e tem-se mostrado com potencial para ser utilizado no setor da construção civil. A sua temperatura de fusão é de aproximadamente 25°C, e estima-se que no intervalo de 22°C a 28°C, um litro deste PCM absorva a mesma energia que 10 litros de água [73].

Nas simulações efetuadas, este PCM foi testado tal como o PCM anterior, colocando as placas de PCM na parte interior das paredes que serão posteriormente rebocadas. Pretendendo-se testar o comportamento de ambos PCM em condições semelhantes de aplicação.

Na Tabela 13 é apresentada a ficha técnica deste PCM e os dados necessários para a modelação do mesmo.

Tabela 13 – Ficha técnica do Delta®-Cool 24 [73]

Delta®-Cool 24	Dados para modelação	
Espessura (mm)	15	-
Temperatura de fusão (°C)	22 - 28	Temp. Fusão = 25 °C
Capacidade de calor latente (kJ/kg)	158	A = 79 kJ/kg
Capacidade de calor específico (kJ/kg.K)	2.7/2.2	C _p = 2700/2200 (J/kg.K)
Condutividade térmica – λ (W/m.K)	1.12/0.56	-

Utilizando os valores da ficha técnica do PCM, calculou-se o valor do calor específico. A curva que relaciona a temperatura com o calor específico é representada na Figura 36.

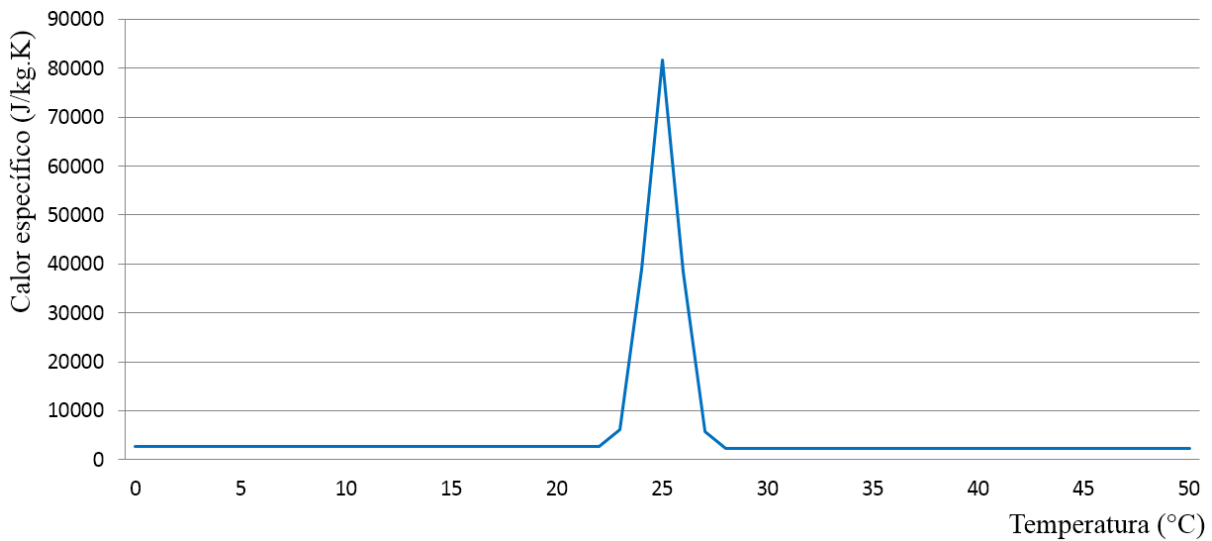


Figura 36 - Curva do calor específico do PCM Delta®-Cool 24

Calcularam-se de seguida os valores da entalpia em função da temperatura. Na Tabela 54, apresentada em anexos, estão representados os 16 valores de temperatura e respetiva entalpia, que são necessários para introduzir no “E⁺” e realizar as simulações com este tipo de PCM.

A curva que relaciona estas duas grandezas é representada na Figura 37.

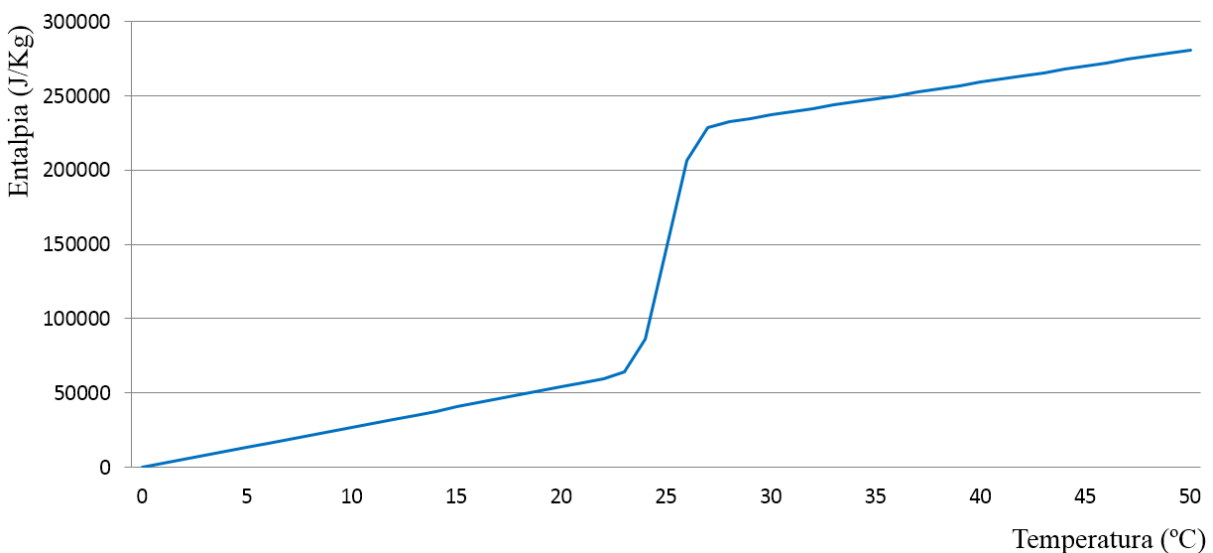


Figura 37 – Curva da entalpia de fusão do Delta®-Cool24

3.4 O EDIFÍCIO

A eficiência energética de um edifício caracteriza-se em parte, pela sua capacidade de manter estável e confortável a temperatura no seu ambiente interior. Por sua vez, a temperatura no interior dos edifícios é influenciada por vários fatores: as condições climáticas (por exemplo temperatura exterior, radiação solar), a estrutura do edifício, as características do sistema construtivo e dos materiais utilizados (espessuras das paredes, dimensão dos vãos envidraçados ou condutibilidade térmica e calor específico dos materiais), fontes de calor internas, taxa de ventilação e equipamentos auxiliares de aquecimento ou arrefecimento e outros.

Na conceção do edifício para estudo, privilegiou-se os seguintes fatores de regulação térmica: a forma simples, compacta, sem saliências e reentrâncias de modo a minimizarem-se as perdas térmicas; a orientação a sul de modo a maximizarem-se os benefícios da exposição solar; o isolamento das paredes exteriores que possibilita a manutenção das temperaturas a níveis mais adequados, reduzindo a possibilidade de ocorrência de condensações. Também foi considerada a hierarquização térmica dos espaços interiores ao localizar a sul as zonas de estar da habitação tais como os quartos e a sala.

A localização do edifício também é um fator na sua eficiência térmica e a sua integração no meio pressupõe o conhecimento das condições microclimáticas dessa região. Os dados climáticos para as três cidades escolhidas são obtidos no E⁺.

3.4.1 Descrição Geral do Edifício

A habitação unifamiliar que vai ser alvo de estudo, para as cidades de Bragança, Évora e Porto, têm uma tipologia T₂ com uma área útil de 193.85m² e um pé-direito de 2.5m.

Este edifício está dividido em 10 compartimentos. É constituído por um hall de entrada, uma cozinha, uma lavandaria, uma sala, corredor, zona de arrumos, duas instalações sanitárias, um quarto e uma suite. O edifício possui uma pala horizontal ao longo de toda a fachada exposta a sul.

A Figura 38 ilustra a planta do edifício, com a identificação de todas as divisões e as respetivas áreas.

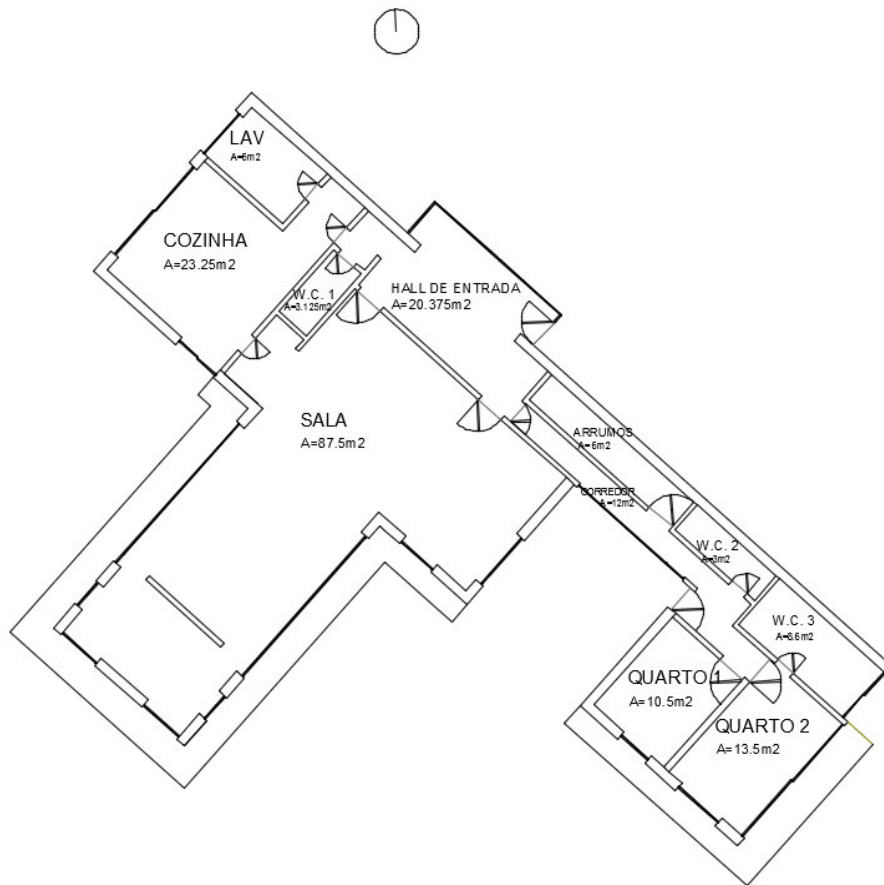


Figura 38 – Edifício em Planta

Na Figura 39 é apresentada a fachada sul do edifício por ser onde se maximizam os ganhos da exposição solar, e por esta razão será o alvo de estudo.

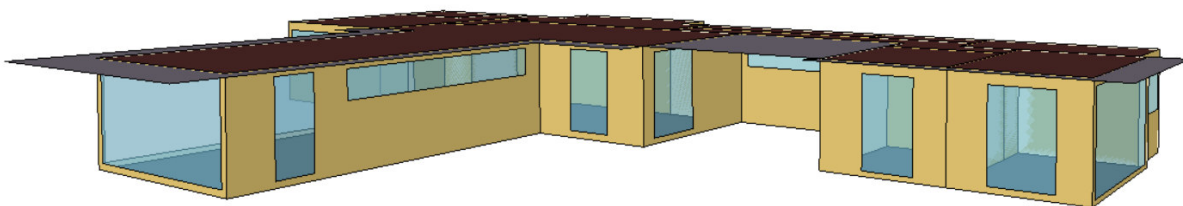


Figura 39 – Fachada sul do edifício

Considerou-se a ocupação do edifício (3 pessoas para uma tipologia T₂), a iluminação das diferentes divisões, equipamentos e respetivas cargas térmicas. De seguida, na Tabela 14 apresenta-se o perfil do edifício.

Tabela 14 –Perfil do edifício

Espaço	Área (m ²)	Pessoas	Iluminação (W)	Equipamentos (W)	Dens Ilum (W/m ²)	Dens Equip (W/m ²)	Desn Pessoas (P/m ²)
Cozinha	23.3	2	72	4860	3.1	209.0	0.086
Lavandaria	6.0	0	16	1100	2.7	183.3	0.0
IS 1	3.1	0	16	0	5.1	0.0	0.0
Sala	87.5	3	500	275	5.7	3.1	0.034
Vestíbulos	20.4	0	32	0	1.6	0.0	0.0
Corredor	12.0	0	20	0	1.7	0.0	0.0
Arrumos	6.0	0	16	0	2.7	0.0	0.0
IS 2	3.0	0	16	0	5.3	0.0	0.0
IS 3	8.6	0	64	0	7.4	0.0	0.0
Quarto 1	10.5	1	44	120	4.2	11.4	0.095
Quarto 2	13.5	2	55	120	4.1	8.9	0.148

3.4.2 Soluções Construtivas

O presente projeto de investigação foi realizado utilizando apenas o PCM nas paredes exteriores simples orientadas a sul do edifício, pois estas paredes dos compartimentos orientados a sul são as que têm maiores ganhos solares.

As soluções construtivas consideradas são constituídas por diferentes materiais, dispostos em várias camadas e espessuras diferentes. Recorrendo ao ITE-50 [74], foi possível obter o coeficiente de condutibilidade térmica (λ), o peso próprio do material (ρ), o calor específico de cada material (C_p) e foi calculada a resistência térmica (R_j).

Para as diferentes soluções construtivas foi possível obter o coeficiente de transmissão térmica, considerando-o como o inverso do somatório das resistências térmicas dos diferentes materiais. O coeficiente de transmissão térmica é dado pela equação 4.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum R_j + R_{se}} \quad (4)$$

em que:

U é o coeficiente de transmissão térmica da solução construtiva, em $W/m^2 \cdot ^\circ C$

R_{si} é a resistência térmica superficial interior, em $m^2 \cdot ^\circ C/W$

R_{se} é a resistência térmica superficial exterior, em $m^2 \cdot ^\circ C/W$

R_j é a resistência térmica da camada j , em $m^2 \cdot ^\circ C/W$

Na Tabela 15 apresentam-se os coeficientes de transmissão térmica referentes a cada solução construtiva.

Tabela 15 – Coeficientes de transmissão térmica

Solução construtiva	Coeficientes de transmissão térmica U ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
Parede Exterior Simples	0.48
Parede Exterior com Micronal® PCM Smartboard	0.46
Parede Exterior com Delta®-Cool 24	0.48
Parede Divisória Interior	1.69
Laje de pavimento térreo	0.55
Laje de cobertura horizontal	0.59

3.4.2.1 Parede Exterior

A parede exterior é constituída por um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado com 0.22m de espessura, com 0.05m de poliestireno expandido (EPS) aplicado pelo exterior (ETICS), e rebocada em ambas as faces (0.02m). Para este tipo de solução construtiva, verifica-se uma inércia térmica fraca (Figura 40).

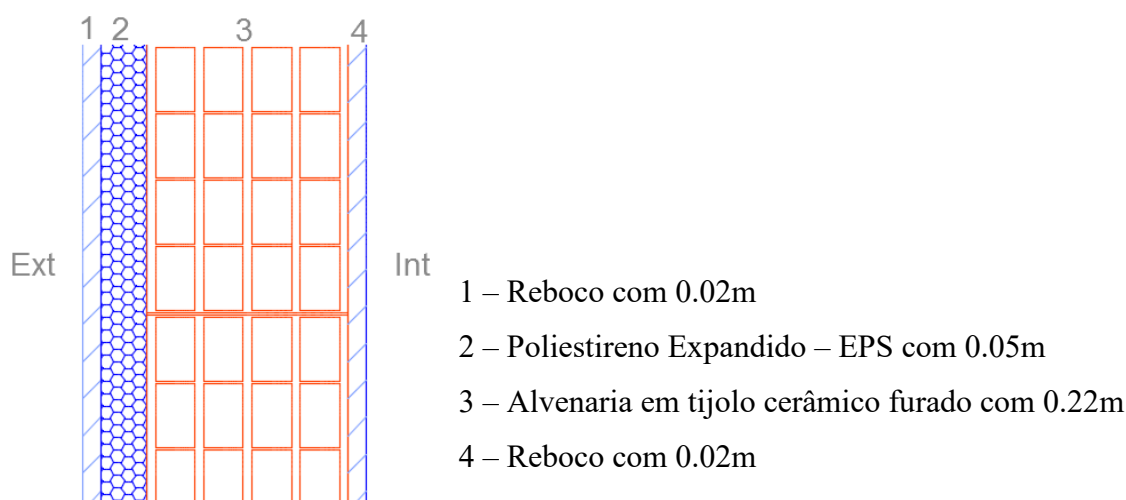


Figura 40 – Parede Exterior sem PCM

Apresenta-se na Tabela 55, em anexos, o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica da parede exterior e na Figura 41 a localização deste tipo de parede.

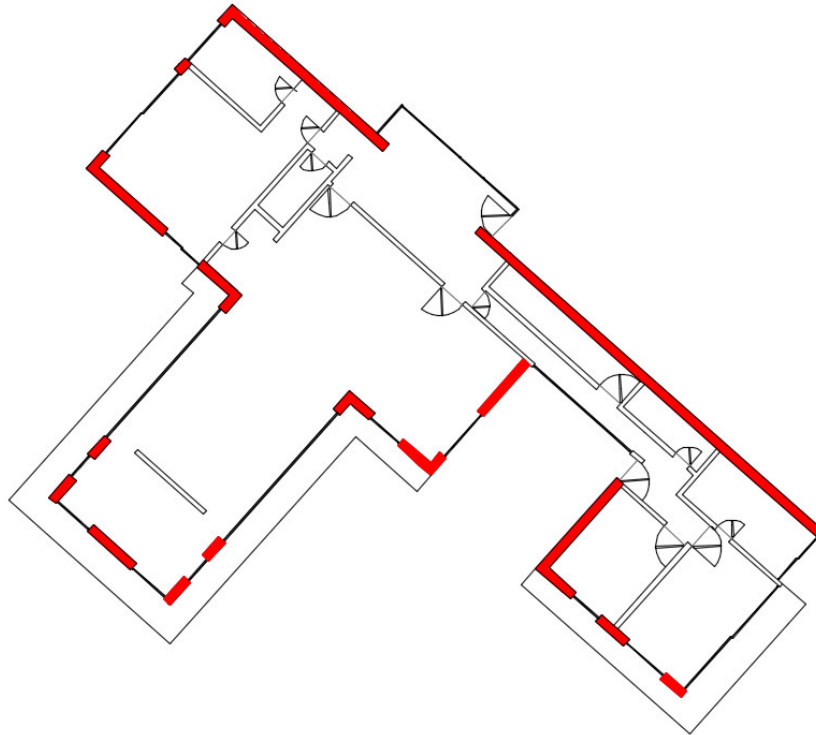


Figura 41 – Localização da parede exterior simples

3.4.2.2 Parede Exterior com PCM

A parede exterior é constituída por um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado com 0.22m de espessura, com 0.05m de poliestireno expandido EPS aplicado pelo exterior, revestida exteriormente por reboco com uma espessura de 0.02m. Pelo interior é constituída com uma camada de PCM macroencapsulado com 0.015m e revestida com reboco com uma espessura de 0.02m (Figura 42).

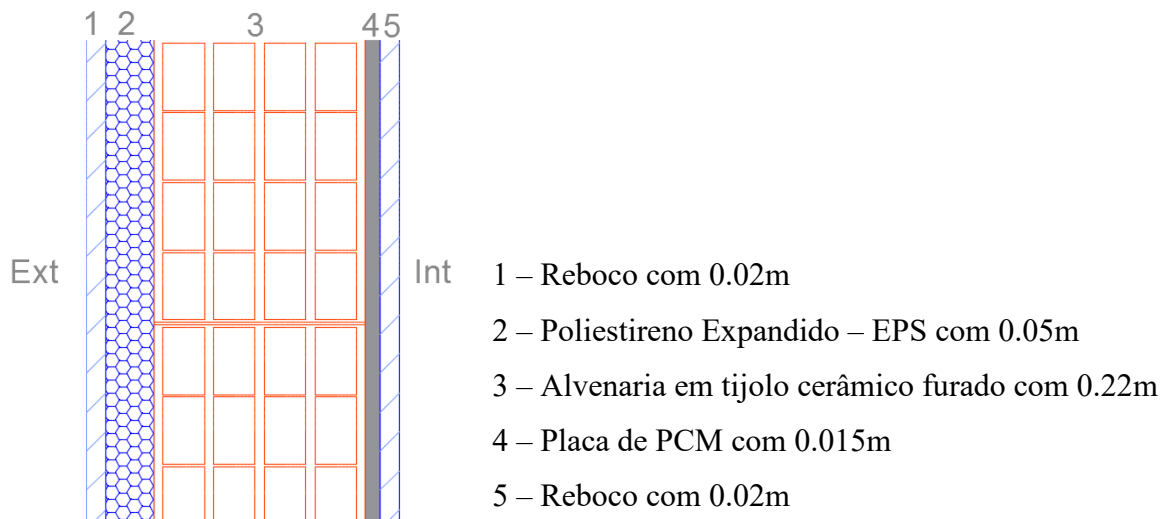


Figura 42 – Parede exterior com PCM

Apresenta-se na Tabela 56 e na Tabela 57, em anexos, o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica da parede exterior com Micronal® PCM e da parede exterior com Delta®-Cool 24 respetivamente, e na Figura 41 a localização deste tipo de parede.

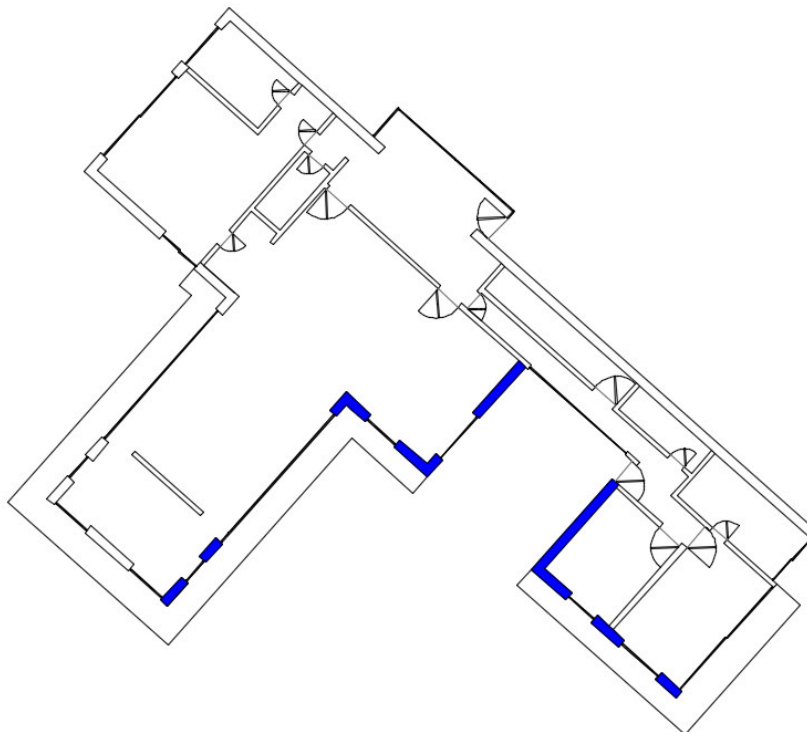


Figura 43 – Localização da parede exterior orientada a sul com PCM

3.4.2.3 Parede Divisória Interior

É um tipo de parede leve com estrutura metálica e duas placas de gesso cartonado com isolamento térmico com 0.12m de espessura, revestida em ambos os lados por uma placa de gesso cartonado com uma espessura de 0.02m (Figura 44).

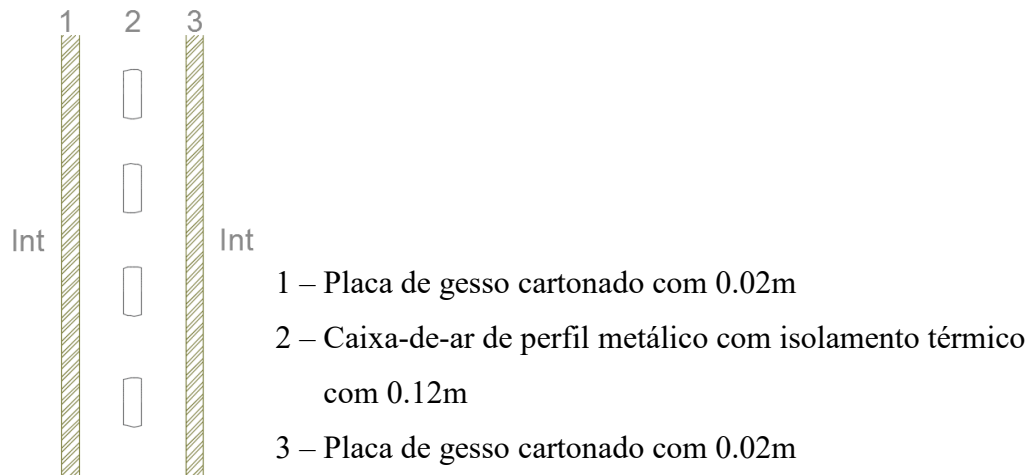


Figura 44- Parede Divisória Interior

Apresenta-se na Tabela 58, em anexos, o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica da parede divisória interior e na Figura 45 a localização deste tipo de parede.

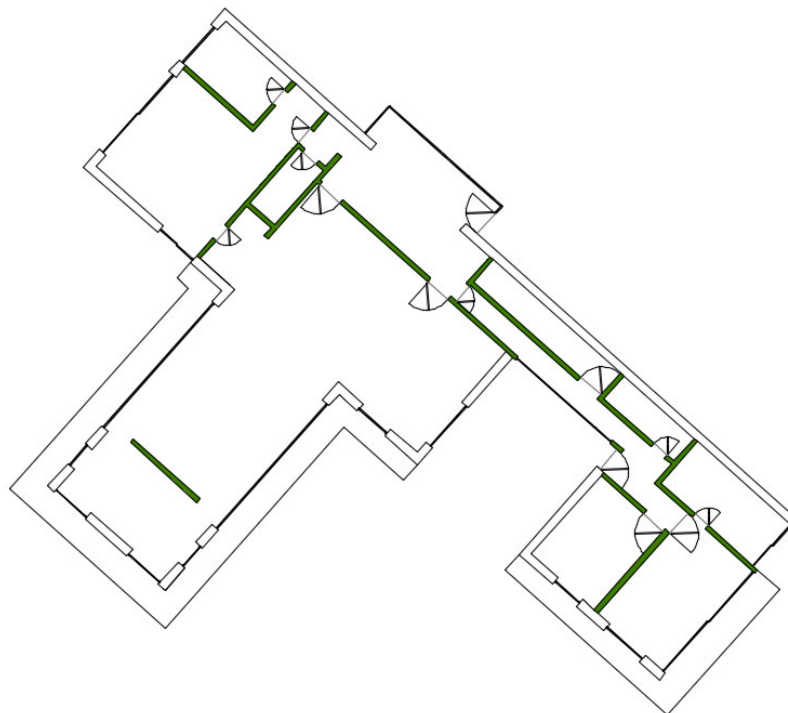


Figura 45 – Localização da parede divisória interior

3.4.2.4 Laje de pavimento térreo

O pavimento do edifício, que assenta diretamente sobre o solo, é constituído por uma laje de betão armado com 0.25m de espessura, poliestireno extrudido XPS com 0.04m e uma camada de aglomerado de cortiça com 0.02m. Pelo interior é revestida com soalho em madeira de 0.02m de espessura (Figura 46).

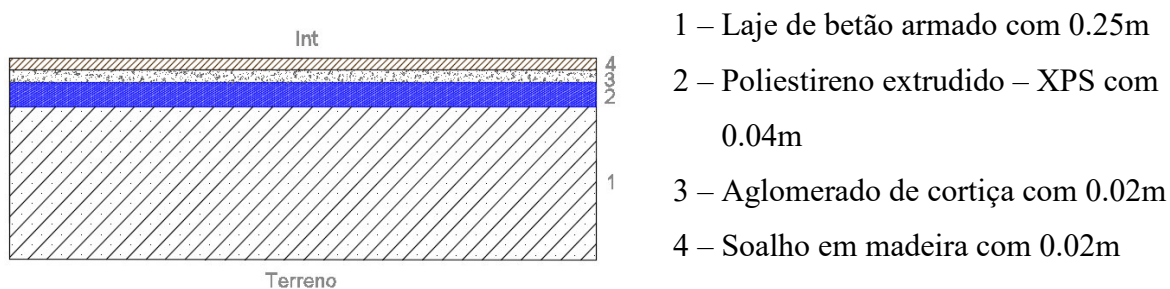


Figura 46 – Laje de pavimento térreo

Apresenta-se na Tabela 59, em anexos, o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica da laje de pavimento térreo.

3.4.2.5 Laje de cobertura horizontal

A laje de cobertura será em laje de betão armado com 0.27m de espessura, argamassa de regularização com 0.12m, poliestireno extrudido XPS com 0.03m, uma camada de betão celular com 0.02m de espessura e godo com uma espessura de 0.19m. Pelo interior, teto falso com placas de gesso cartonado com uma espessura de 0.02m (Figura 47).

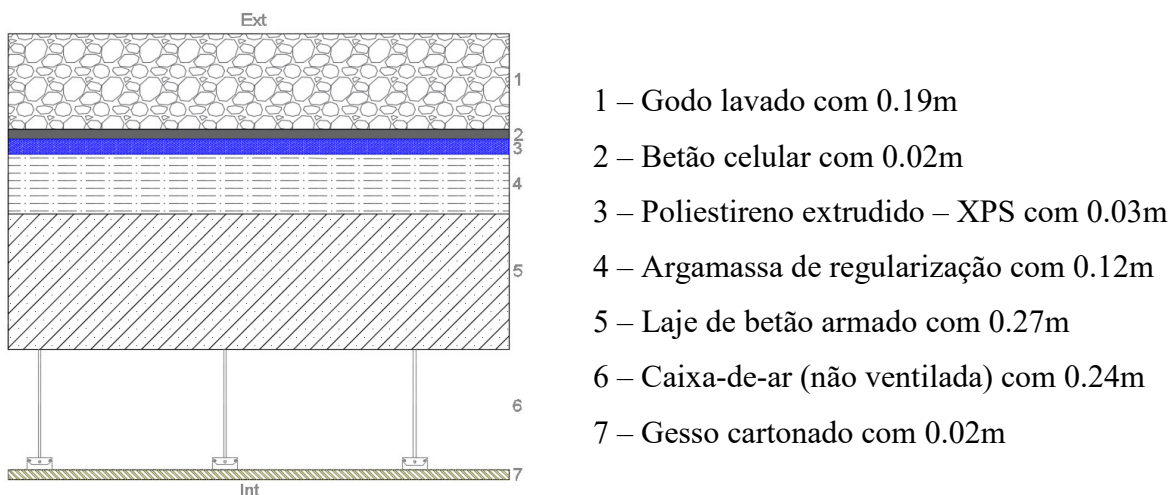


Figura 47 – Laje de cobertura

Apresenta-se na Tabela 60, em anexos, o cálculo dos coeficientes de transmissão térmica da laje de cobertura.

3.4.2.6 Portas

As portas interiores serão constituídas por um painel de madeira maciça com 0.04m de espessura e as portas exteriores por um painel de chapa metálica de 0.03m (Figura 48).

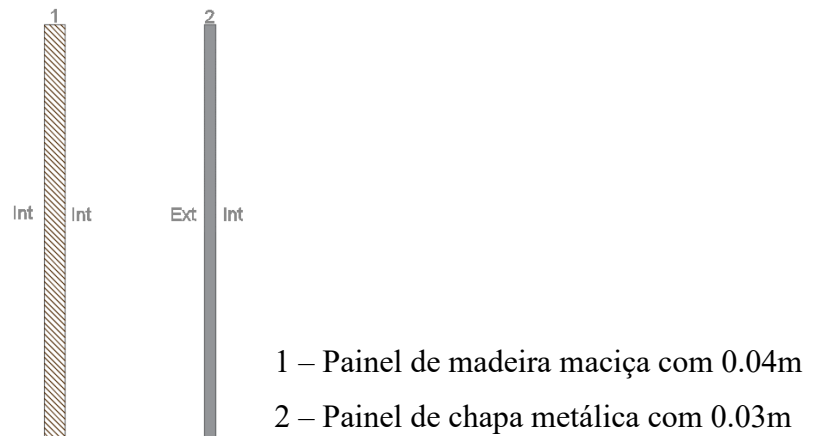


Figura 48 – Portas interiores e portas exteriores

3.4.2.7 Envidraçados

Os envidraçados serão constituídas por um vidro com 0.006m de espessura, uma caixa-de-ar com 0.016m de espessura e um vidro com 0.006m de espessura (Figura 49).

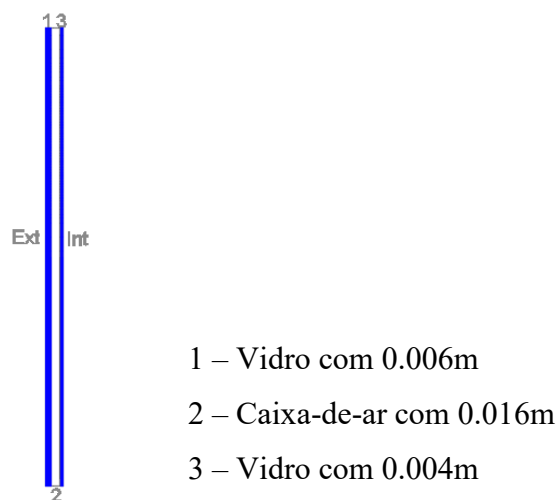


Figura 49 - Envidraçados

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS

4.1 ENQUADRAMENTO DOS RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nas diferentes simulações efetuadas.

O *EnergyPlus* possibilita a análise da eficiência dos PCM no contributo que podem dar para o controlo das temperaturas interiores, quando aplicados em conjunto com outros sistemas e materiais com funções termorreguladores de temperatura tais como o sistema AVAC e aplicação de materiais de sombreamento. Na presente investigação privilegia-se a utilização de PCM, não se considerando a existência de outras técnicas de aquecimento e de arrefecimento, avaliando-se o grau de eficácia destes materiais quando aplicados em exclusividade. Os resultados obtidos confirmam a incapacidade de se obterem ganhos significativos quando estes materiais são utilizados nas condições descritas.

Na fase 1 apresenta-se os resultados relativos a cada uma das cidades onde foram realizadas as simulações, para um dia com temperaturas típicas de inverno e para um dia com temperaturas típicas de verão. Os gráficos apresentados relacionam as temperaturas exteriores e interiores das diferentes zonas da habitação, sem aplicação de PCM e com aplicação de PCM. As zonas estudadas são o quarto 2 (Q2), o quarto 1 (Q1) e a sala, porque são as zonas mais ocupadas e com exposição solar que pode significar ganhos térmicos consideráveis.

Na fase 2 apresentam-se os resultados da simulação realizada com a inclusão de duas camadas de PCM na parede exterior da habitação. Esta simulação é realizada apenas para a cidade do Porto e com o PCM Delta®-Cool 24 que se revelou o mais eficiente na fase 1.

Na fase 3 são apresentados os resultados relativos ao mês de Fevereiro, como mês de inverno, em que se registam temperaturas exteriores baixas, e ao mês de Julho como mês de verão por apresentar temperaturas exteriores elevadas. Desta forma pretendeu-se estudar a ação dos PCM utilizados ao longo de um período de tempo mais alargado, com alterações térmicas diferenciadas.

Para facilitar as conclusões acerca da utilização do PCM, para cada gráfico é anexada uma tabela na qual se registam as temperaturas interiores máximas e mínimas diárias. É calculado o valor da amplitude térmica (ΔT), como a diferença entre os valores da temperatura interior máxima e mínima com e sem PCM. Define-se ξ (°C), como a diferença entre a amplitude

térmica da temperatura interior sem PCM e a amplitude térmica da temperatura interior com PCM.

4.2 FASE 1

4.2.1 Bragança - Dia típico de Inverno

4.2.1.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26

Nas Figura 50, Figura 51, Figura 52, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, nas três zonas consideradas, relativas a Bragança num dia típico de inverno.

Verifica-se para as três zonas que o gráfico das temperaturas interiores com PCM e o das temperaturas interiores sem PCM são muito semelhantes entre as zero e as oito horas, e a partir das oito horas regista-se um ligeiro aumento na temperatura ambiente interior do edifício com PCM. Essa diferença relativamente à temperatura ambiente do edifício sem PCM atinge o valor máximo 0.6°C no período entre as 14 horas e as dezassete horas, o que significa ganho térmico em período de aquecimento. No entanto este ganho térmico não se deve ao funcionamento do PCM baseado nas suas propriedades de fusão, porque as temperaturas ambientais interiores são muito menores que as temperaturas de fusão do PCM, o que faz com que este não seja acionado.

Neste caso, o aumento da temperatura interior fica-se a dever ao aumento verificado nas temperaturas exteriores e à fraca resistência térmica das paredes que facilita a transmissão da energia.

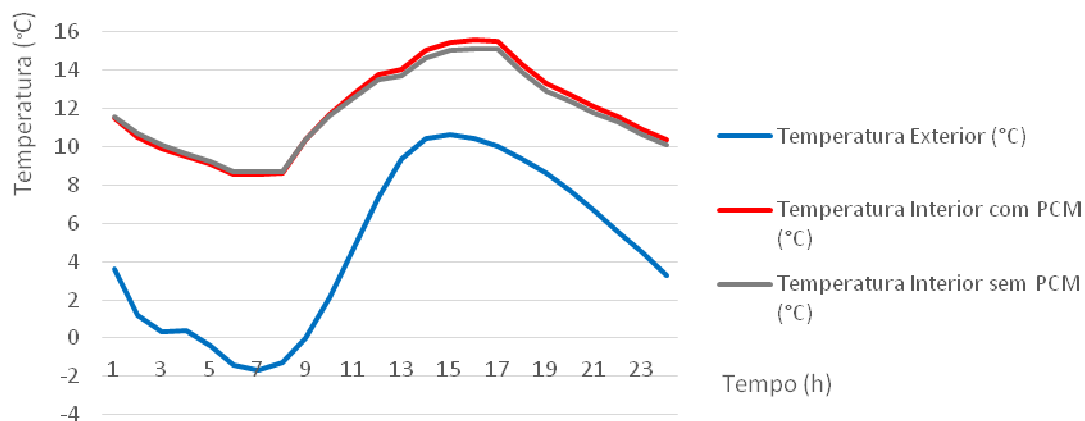


Figura 50 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas a Bragança num dia de inverno, no Quarto 2

Tabela 16 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, no Quarto 2

	Temperatura Interior com PCM (°C)	Temperatura Interior sem PCM (°C)
MAX	15.57	15.12
MIN	8.56	8.66
ΔT	7.01	6.46
ξ	0.55	

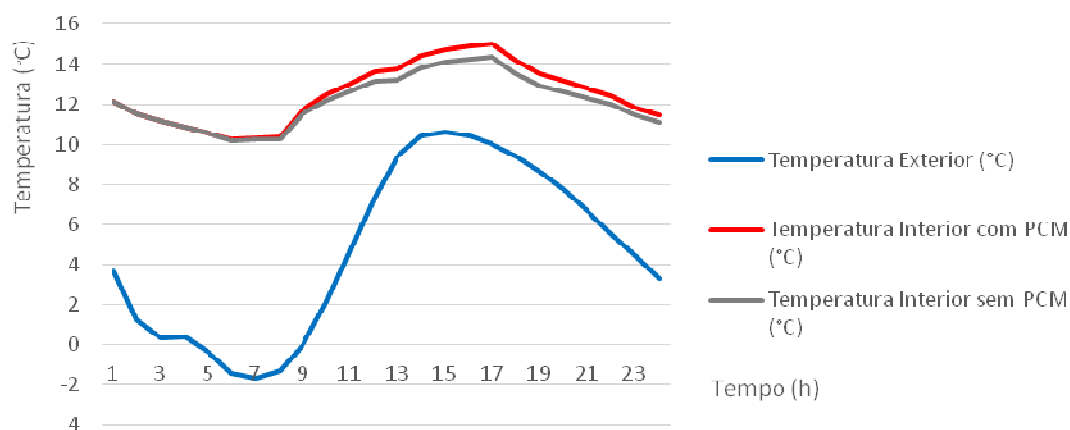


Figura 51 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas a Bragança num dia de inverno, no Quarto 1

Tabela 17 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, no Quarto 1

	Temperatura Interior com PCM (°C)	Temperatura Interior sem PCM (°C)
MAX	15.01	14.35
MIN	10.23	10.19
ΔT	4.77	4.16
ξ		0.61

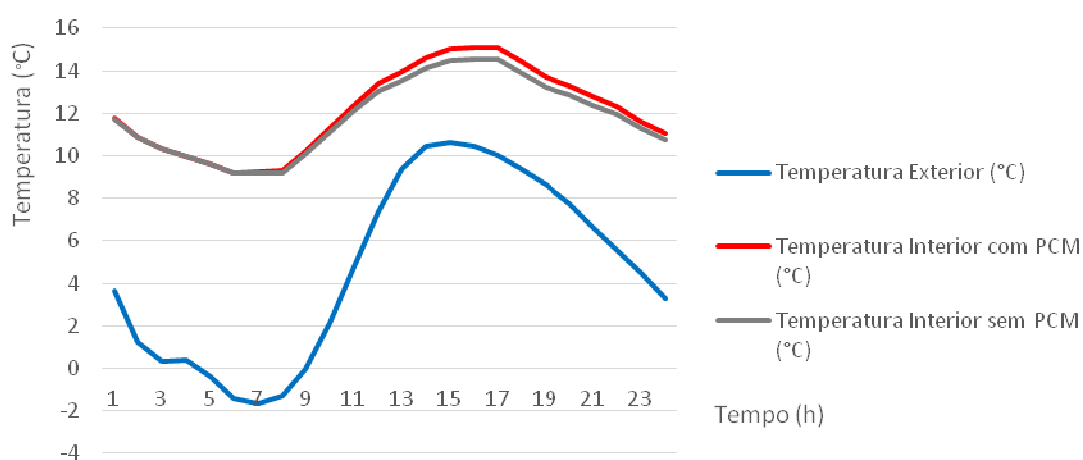


Figura 52 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, relativas a Bragança num dia de inverno, na Sala

Tabela 18 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, na Sala

	Temperatura Interior com PCM (°C)	Temperatura Interior sem PCM (°C)
MAX	15.10	14.56
MIN	9.20	9.16
ΔT	5.90	5.40
ξ		0.50

4.2.1.2 Delta®-Cool 24

Nas Figura 53, Figura 54, Figura 55, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, nas três zonas consideradas relativas a Bragança num dia típico de inverno.

Verifica-se nas três situações que os gráficos das temperaturas interiores com e sem PCM são praticamente “paralelos” ao longo de todo o dia, e como a curva das temperaturas com PCM corresponde a valores inferiores, significa que durante as 24 horas houve diminuição das temperaturas. As temperaturas interiores sem PCM, variam entre os 9°C e os 15°C aproximadamente e com PCM verifica-se uma diminuição da temperatura mínima para 8°C e máxima de 12°C o que contradiz o funcionamento do PCM pois agrava as condições de conforto térmico em época com necessidades de aquecimento.

As temperaturas registadas não se situam no intervalo de fusão deste PCM (22°C a 28°C), pelo que o PCM não absorve energia. Por este motivo, os resultados das temperaturas com e sem PCM deveriam ser aproximadamente iguais (como em 4.1.1.1 para o Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26) já que o PCM não é acionado.

Conclui-se então que a utilização deste material nestas condições é prejudicial para as condições de conforto.

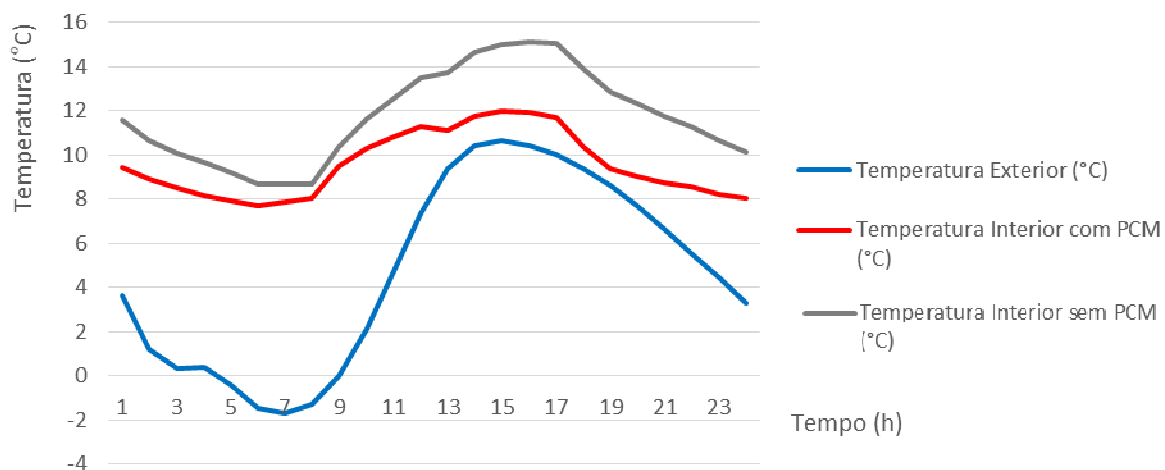


Figura 53 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Bragança num dia de inverno, no Quarto 2

Tabela 19 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto2

	Temperatura Interior com PCM (°C)	Temperatura Interior sem PCM (°C)
MAX	11.99	15.12
MIN	7.69	8.66
ΔT	4.30	6.46
ξ	2.16	

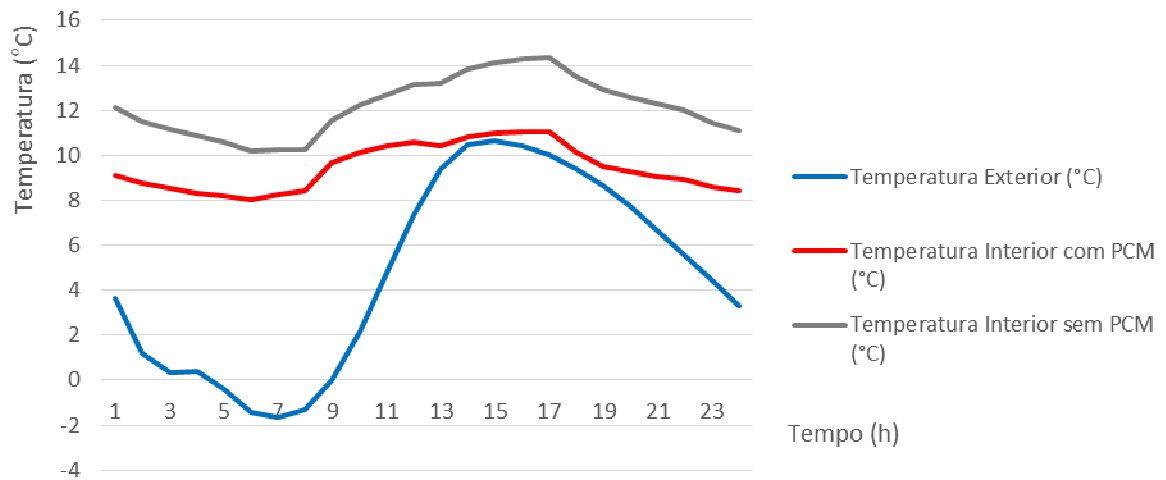


Figura 54 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Bragança num dia de inverno, no Quarto 1

Tabela 20 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto1

	Temperatura Interior com PCM (°C)	Temperatura Interior sem PCM (°C)
MAX	11.04	14.35
MIN	8.04	10.19
ΔT	3.00	4.16
ξ	1.16	

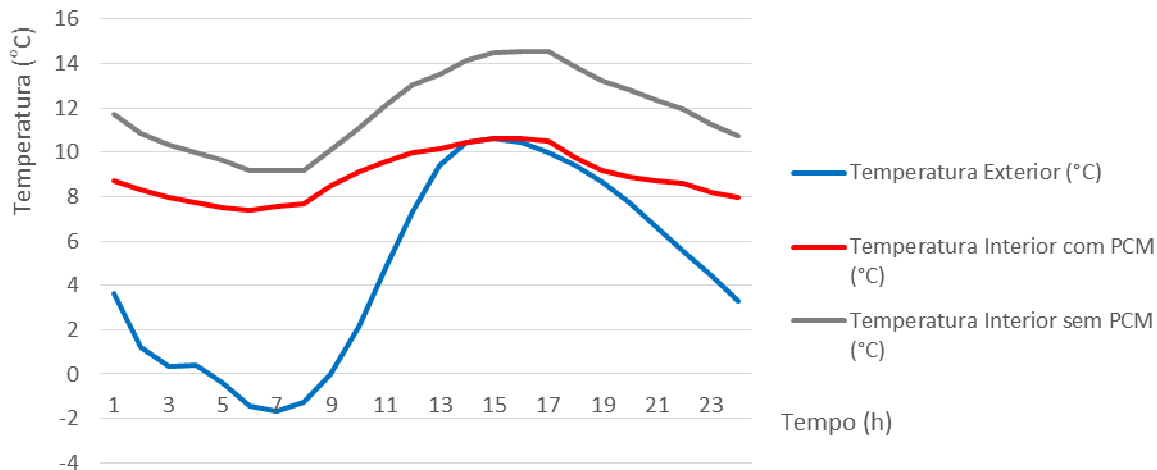


Figura 55 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Bragança num dia de inverno, na Sala

Tabela 21 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, na Sala

	Temperatura Interior com PCM (°C)	Temperatura Interior sem PCM (°C)
MAX	10.65	14.56
MIN	7.37	9.16
ΔT	3.28	5.40
ξ		2.12

4.2.2 Bragança - Dia típico de Verão

4.2.2.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26

Nas Figura 56, Figura 57, Figura 58, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, nas três zonas consideradas, relativas a Bragança num dia típico de verão.

Verifica-se nas três situações que os gráficos das temperaturas interiores com PCM e o das temperaturas interiores sem PCM são praticamente iguais ao longo de todo o dia. Como as temperaturas interiores se situam quase sempre acima dos 25°C ao longo de todo o dia, o PCM absorve a energia mas não a consegue libertar porque não solidifica totalmente, e por

isso, deixa de poder harmonizar a temperatura. Neste caso seria necessário utilizar a ventilação noturna para que o PCM pudesse solidificar.

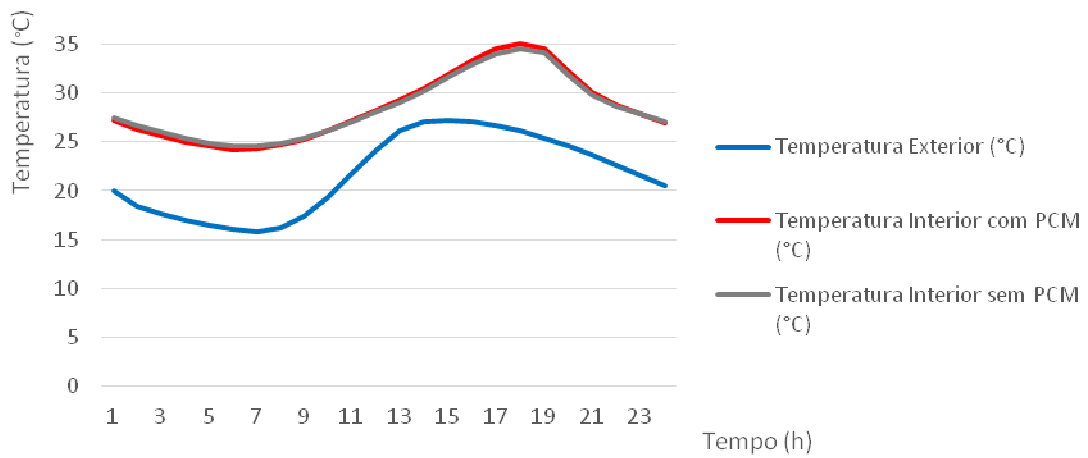


Figura 56 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas a Bragança num dia de verão, no Quarto 2

Tabela 22 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, no Quarto 2

	Temperatura Interior com PCM (°C)	Temperatura Interior sem PCM (°C)
MAX	35.00	34.56
MIN	24.24	24.54
ΔT	10.76	10.02
ξ	0.74	

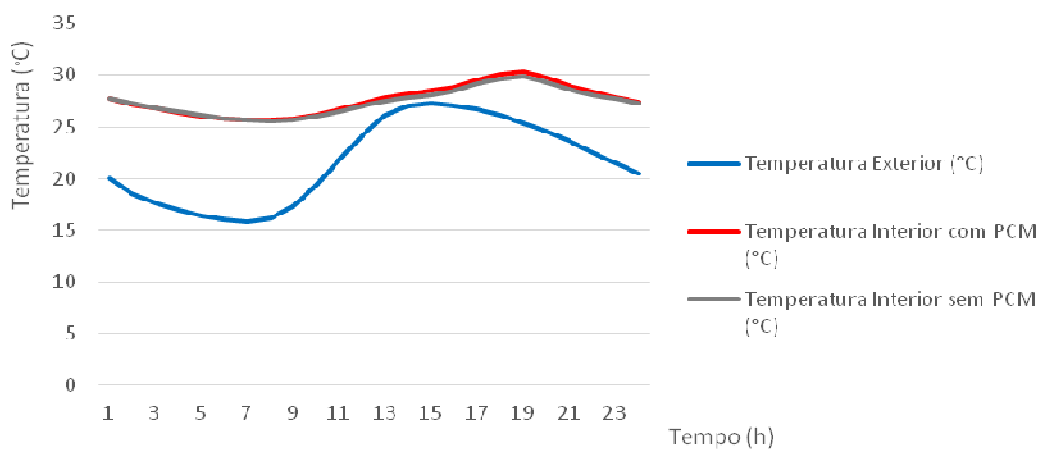


Figura 57 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas a Bragança num dia de verão, no Quarto 1

Tabela 23 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, no Quarto 1

	Temperatura Interior com PCM (°C)	Temperatura Interior sem PCM (°C)
MAX	30.29	29.91
MIN	25.65	25.60
ΔT	4.64	4.30
ξ		0.34

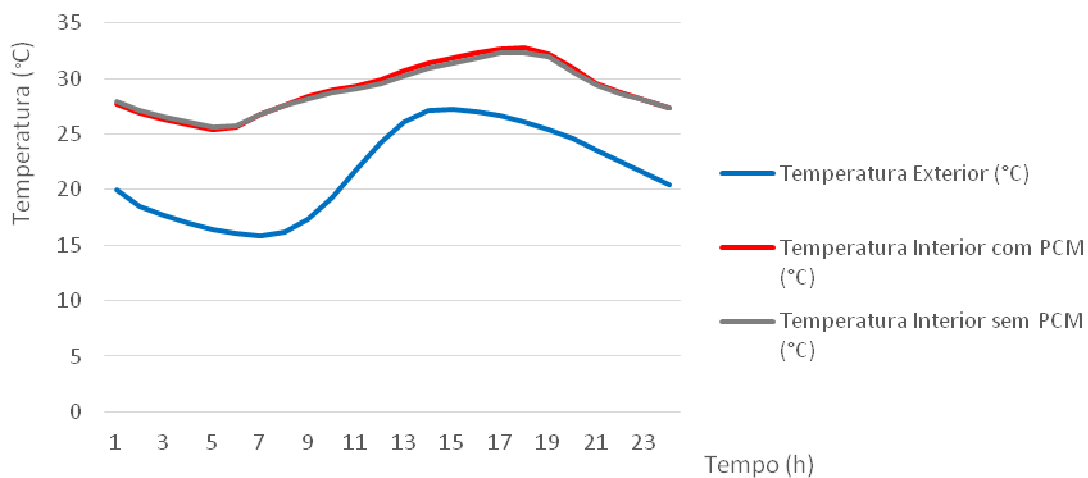


Figura 58 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, relativas a Bragança num dia de verão, na Sala

Tabela 24 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, na Sala

	Temperatura Interior com PCM (°C)	Temperatura Interior sem PCM (°C)
MAX	32.74	32.39
MIN	25.45	25.61
ΔT	7.29	6.78
ξ		0.51

4.2.2.2 Delta®-Cool 24

Nas Figura 59, Figura 60, Figura 61, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, nas três zonas consideradas relativas a Bragança num dia típico de verão.

Verifica-se nas três situações que os gráficos das temperaturas interiores com PCM e o das temperaturas interiores sem PCM são praticamente “paralelos” ao longo de todo o dia. As temperaturas interiores sem PCM, variam entre os 24.5°C e os 34.5°C aproximadamente e com PCM verifica-se um aumento da temperatura mínima para 27°C e máxima de 39.5°C. Como a temperatura interior é superior a 25°C durante todo o dia, o PCM só solidifica parcialmente pelo que seria necessária a ventilação noturna para que o PCM pudesse solidificar totalmente.

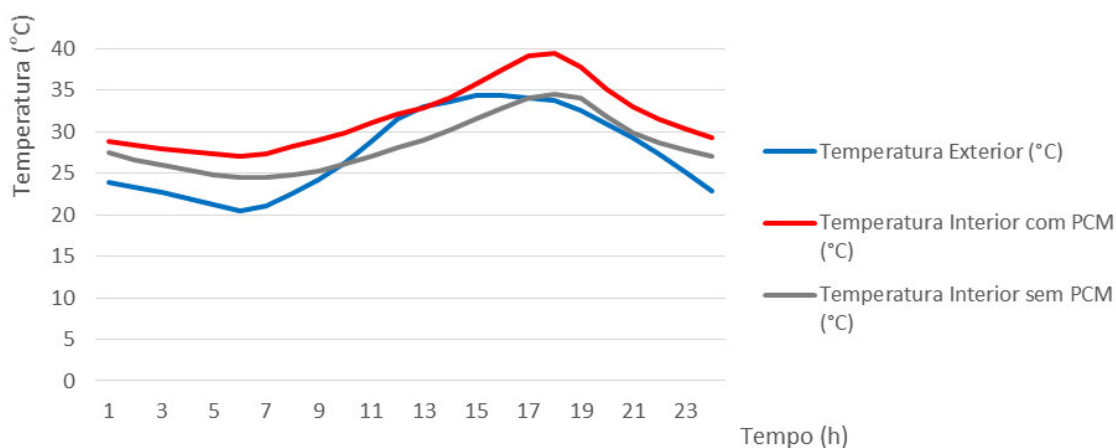


Figura 59 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Bragança num dia de verão, no Quarto 2

Tabela 25 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto2

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	39.41	34.56
MIN	27.08	24.54
ΔT	12.33	10.02
ϵ	2.31	

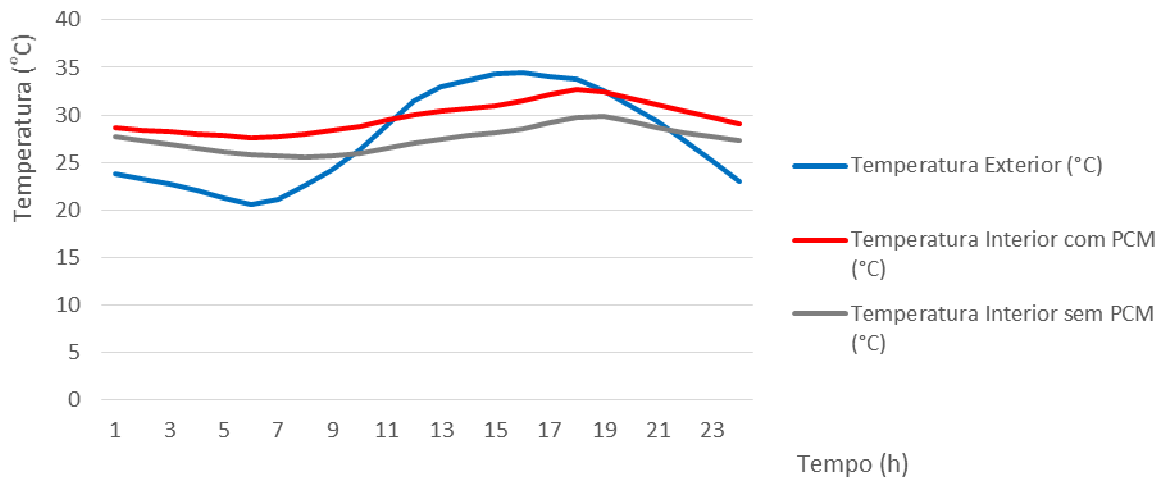


Figura 60 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Bragança num dia de verão, no Quarto 1

Tabela 26 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto 1

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	32.68	29.91
MIN	27.62	25.6
ΔT	5.07	4.3
ξ	0.76	

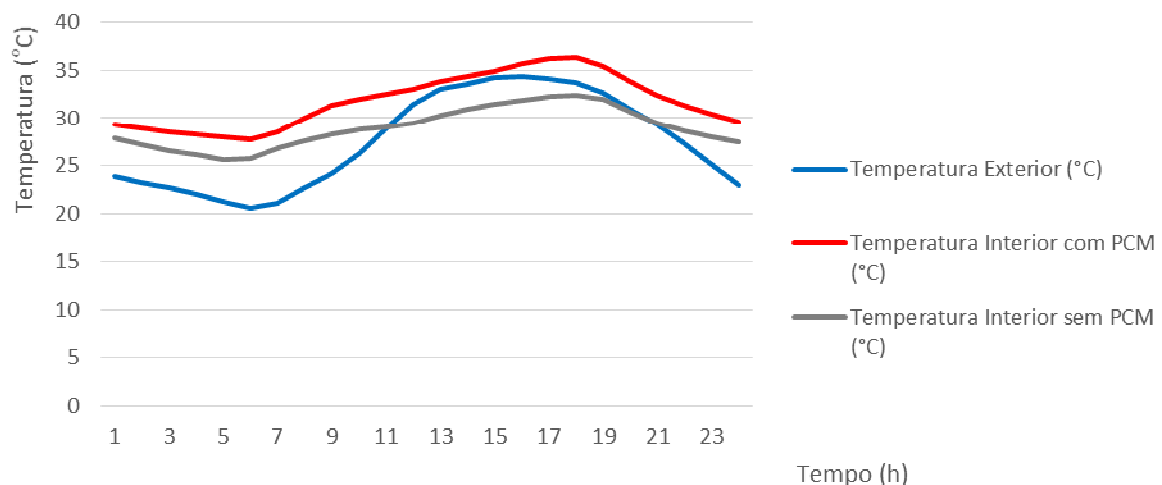


Figura 61 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Bragança num dia de verão, na Sala

Tabela 27 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, na Sala

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	36.38	32.39
MIN	27.79	25.61
ΔT	8.59	6.78
ξ		1.81

4.2.3 Porto - Dia típico de Inverno

4.2.3.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26

Nas Figura 62, Figura 63, Figura 64, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, nas três zonas consideradas, relativas à cidade do Porto num dia típico de inverno.

Verifica-se para as três zonas que o gráfico das temperaturas interiores com PCM e o das temperaturas interiores sem PCM são muito semelhantes entre as zero e as oito horas, e a partir das oito horas regista-se um ligeiro aumento na temperatura ambiente interior do edifício com PCM. Essa diferença relativamente à temperatura ambiente do edifício sem PCM atinge o valor máximo 0.5°C no período entre as 14 horas e as dezoito horas, o que significa ganho térmico em período de aquecimento. No entanto este ganho térmico não se deve ao funcionamento do PCM baseado nas suas propriedades de fusão, porque as temperaturas ambientais interiores são menores que as temperaturas de fusão do PCM, o que faz com que este não seja acionado.

Neste caso, o aumento da temperatura interior fica-se a dever ao aumento verificado nas temperaturas exteriores e à fraca resistência térmica das paredes que facilita a transmissão da energia.

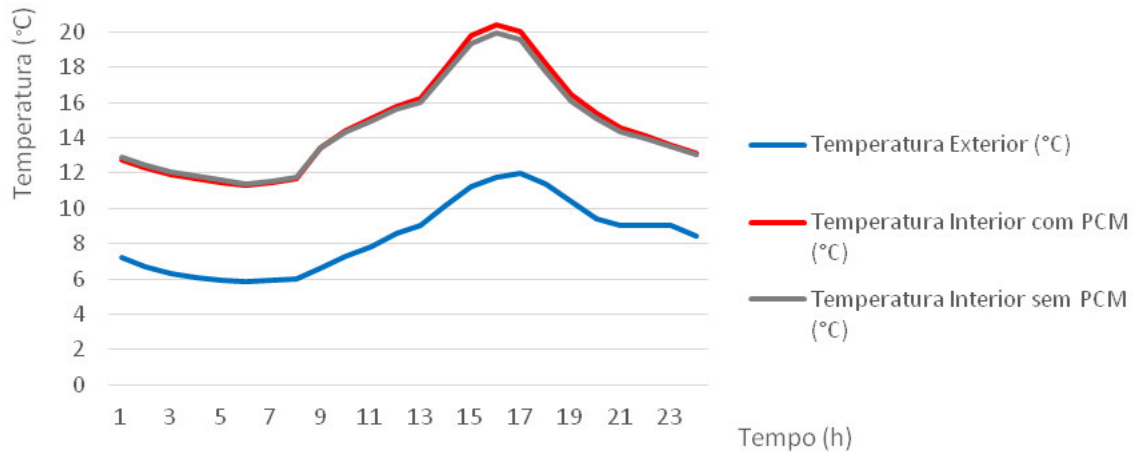


Figura 62 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas ao Porto num dia de inverno, no Quarto 2

Tabela 28 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, no Quarto 2

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	20.38	19.91
MIN	11.31	11.41
ΔT	9.08	8.50
$\frac{\Delta T}{T_{ext}}$	0.57	

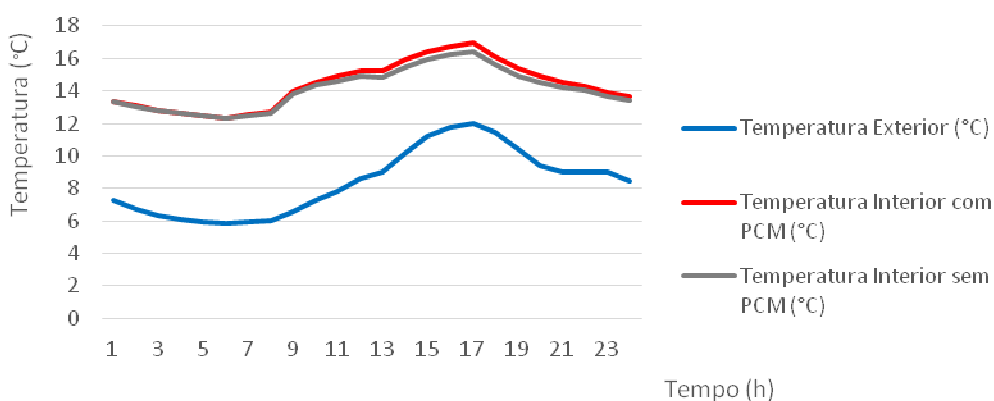


Figura 63 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas ao Porto num dia de inverno, no Quarto 1

Tabela 29 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, no Quarto 1

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	16.96	16.45
MIN	12.33	12.30
ΔT	4.63	4.15
ξ	0.48	

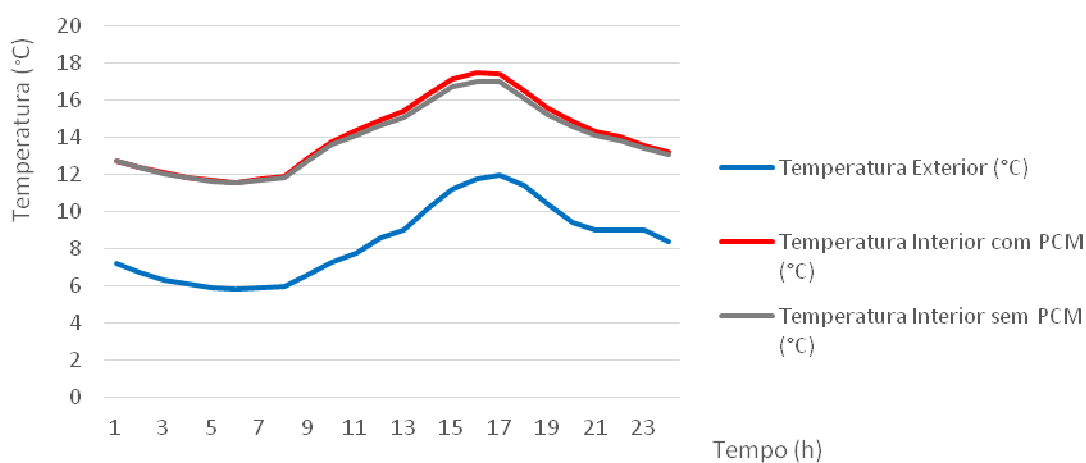


Figura 64 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, relativas ao Porto num dia de inverno, na Sala

Tabela 30 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, na Sala

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	17.49	17.05
MIN	11.59	11.55
ΔT	5.91	5.50
ξ	0.41	

4.2.3.2 Delta®-Cool 24

Nas Figura 65, Figura 66, Figura 67, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, nas três zonas consideradas, relativas à cidade do Porto num dia típico de inverno.

Verifica-se para as três zonas que o gráfico das temperaturas interiores com PCM e o das temperaturas interiores sem PCM são muito semelhantes entre as zero e as oito horas, e a partir das oito horas regista-se um ligeiro aumento na temperatura ambiente interior do edifício com PCM. Este ganho térmico é muito reduzido porque as temperaturas ambientais interiores são menores que as temperaturas de fusão do PCM, o que faz com que este não seja acionado.

Neste caso, o aumento da temperatura interior fica-se a dever ao aumento verificado nas temperaturas exteriores e à fraca resistência térmica das paredes que facilita a transmissão da energia.

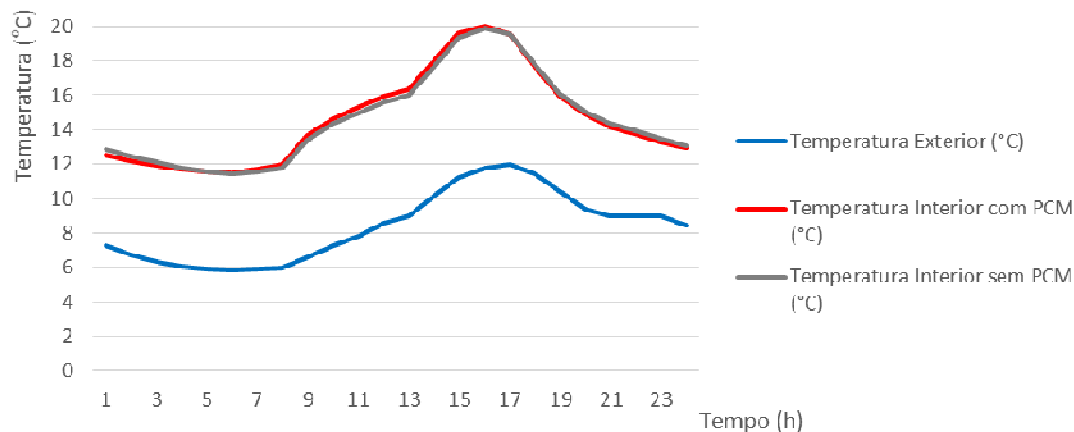


Figura 65 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas ao Porto num dia de inverno, no Quarto 2

Tabela 31 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto2

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	20.01	19.91
MIN	11.49	11.41
ΔT	8.52	8.50
ξ		0.02

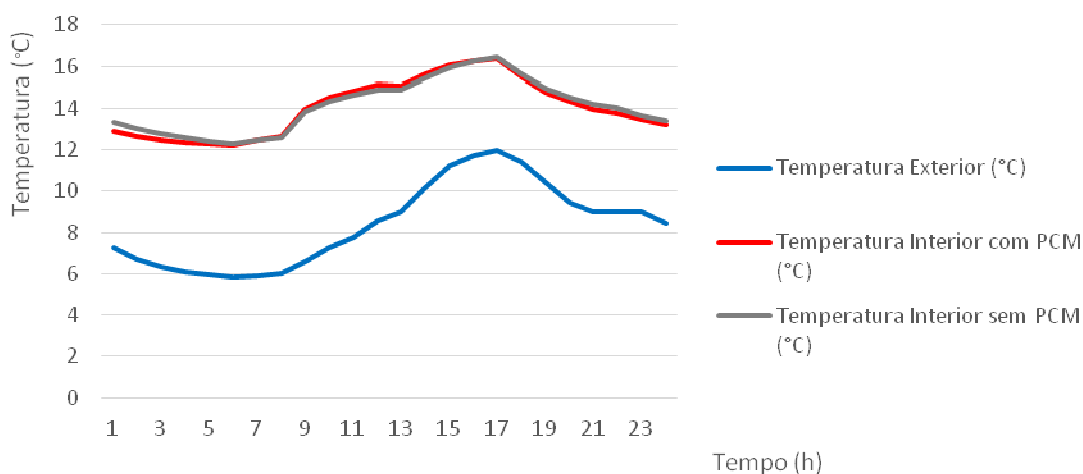


Figura 66 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas ao Porto num dia de inverno, no Quarto 1

Tabela 32 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto1

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	14.40	16.45
MIN	12.23	12.3
ΔT	4.17	4.15
ξ		0.02

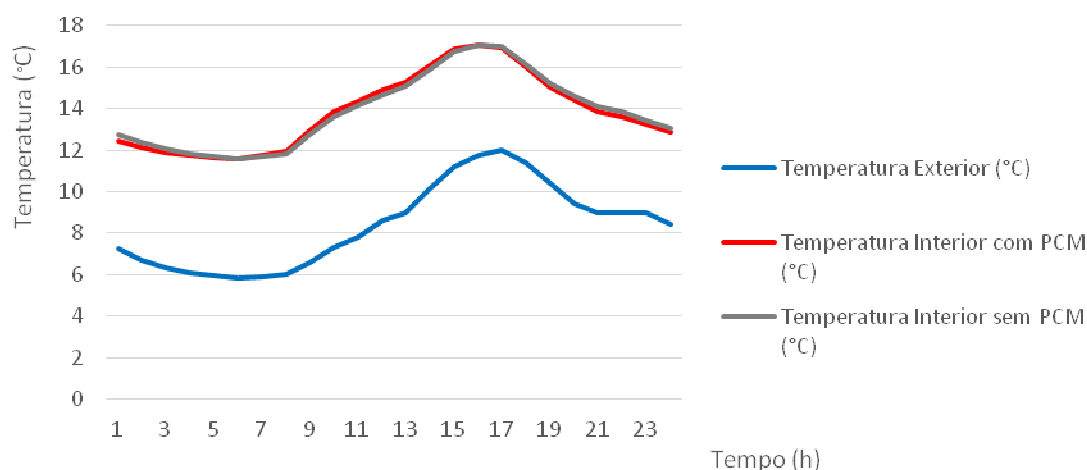


Figura 67 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas ao Porto num dia de inverno, na Sala

Tabela 33 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, na Sala

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	17.08	17.05
MIN	11.57	11.55
ΔT	5.51	5.50
ξ	0.01	

4.2.4 Porto - Dia típico de Verão

4.2.4.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26

Nas Figura 68, Figura 69, Figura 70, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, nas três zonas consideradas, relativas à cidade do Porto num dia típico de verão.

Verifica-se nas três situações que os gráficos das temperaturas interiores com PCM e o das temperaturas interiores sem PCM são praticamente iguais ao longo de todo o dia. Como as temperaturas interiores se situam quase sempre acima dos 25°C ao longo de todo o dia, o PCM absorve a energia mas não a consegue libertar porque não solidifica totalmente, e por isso, deixa de poder harmonizar a temperatura. Neste caso seria necessário utilizar a ventilação noturna para que o PCM pudesse solidificar.

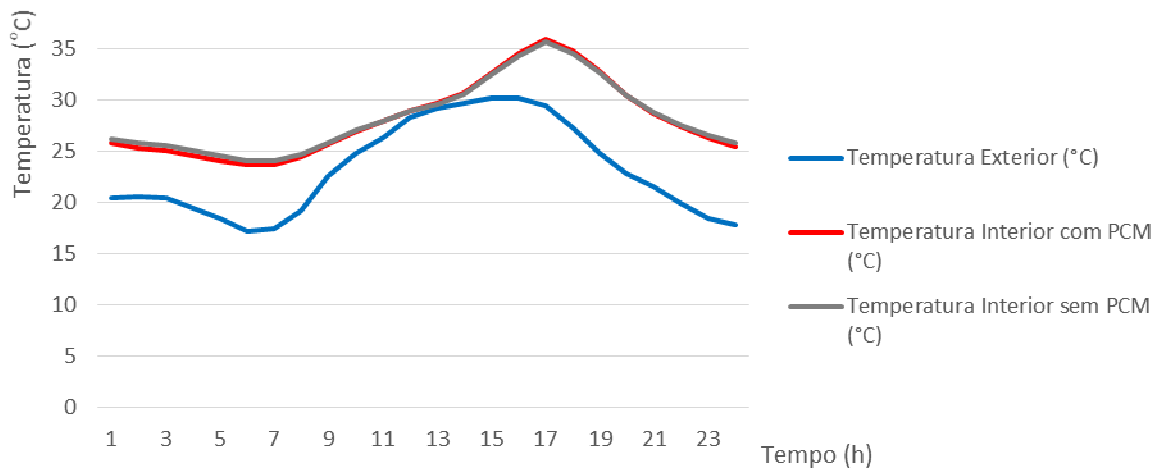


Figura 68 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas ao Porto num dia de verão, no Quarto 2

Tabela 34 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, no Quarto 2

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	35.89	35.60
MIN	23.62	23.98
ΔT	12.27	11.62
ξ	0.65	

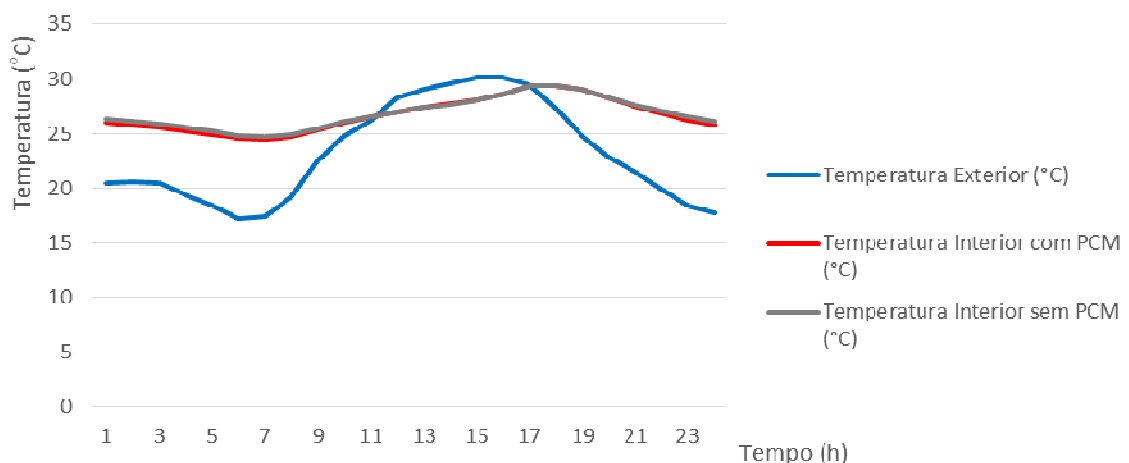


Figura 69 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas ao Porto num dia de verão, no Quarto 1

Tabela 35 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM

SmartBoard™ 23/26, no Quarto 1

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	29.40	29.39
MIN	24.48	24.72
ΔT	4.92	4.66
ξ	0.26	

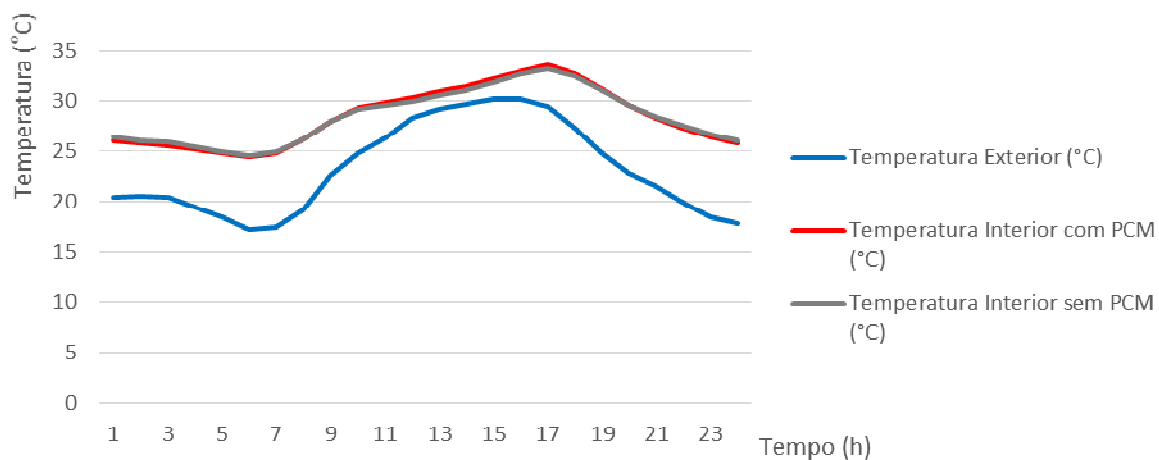


Figura 70 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM

SmartBoard™ 23/26, relativas ao Porto num dia de verão, na Sala

Tabela 36 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM

SmartBoard™ 23/26, na Sala

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	33.46	33.19
MIN	24.40	24.55
ΔT	9.06	8.64
ξ	0.42	

4.2.4.2 Delta®-Cool 24

Nas Figura 71, Figura 72, Figura 73, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, nas três zonas consideradas, relativas à cidade do Porto num dia típico de verão.

As temperaturas interiores situam-se próximo dos valores de fusão nos períodos entre as 9 e as 12 horas e entre as 18 e as 20 horas. Nestes períodos de tempo, verifica-se uma diminuição das temperaturas interiores. As temperaturas máximas diminuem nas três zonas verificando-se na sala uma descida de 32.8°C para 30.4°C. As amplitudes térmicas descem nas três zonas: 0.49°C no quarto 2, 1.15°C no quarto 1 e 2.22°C na sala. Verifica-se um amortecimento nas temperaturas interiores com o uso do PCM. A utilização deste PCM nestas condições é útil e relevante.

A temperatura interior está durante todo o dia acima dos 25°C e por isso, o PCM não solidifica de modo a libertar a energia térmica para o ambiente que justifique as diferenças de temperatura referidas. Por esta razão estes resultados não são os esperados.

Atendendo à natureza destes resultados, a simulação foi repetida e os resultados confirmaram-se de novo podendo ficar a dever-se à introdução incorreta de algum dado.

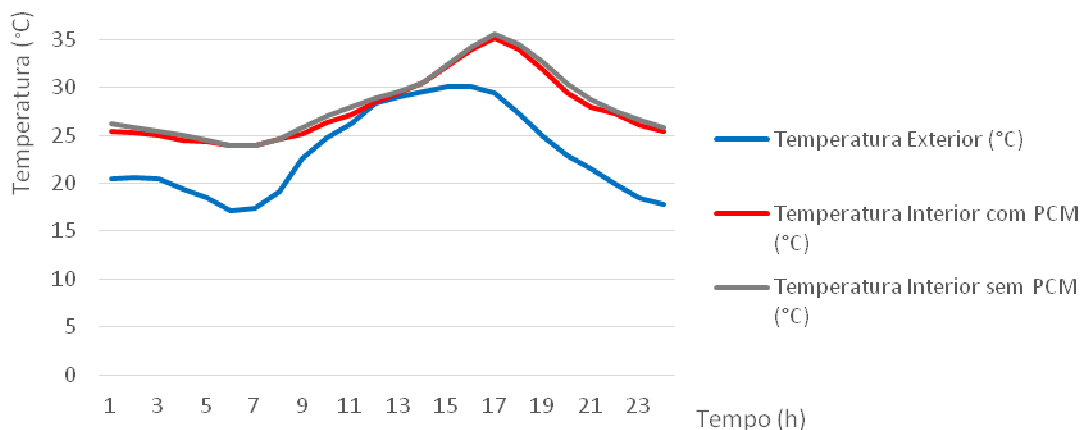



Figura 71 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas ao Porto num dia de verão, no Quarto 2

Tabela 37 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto2

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	35.13	35.60
MIN	24.00	23.98
ΔT	11.13	11.62
	0.49	

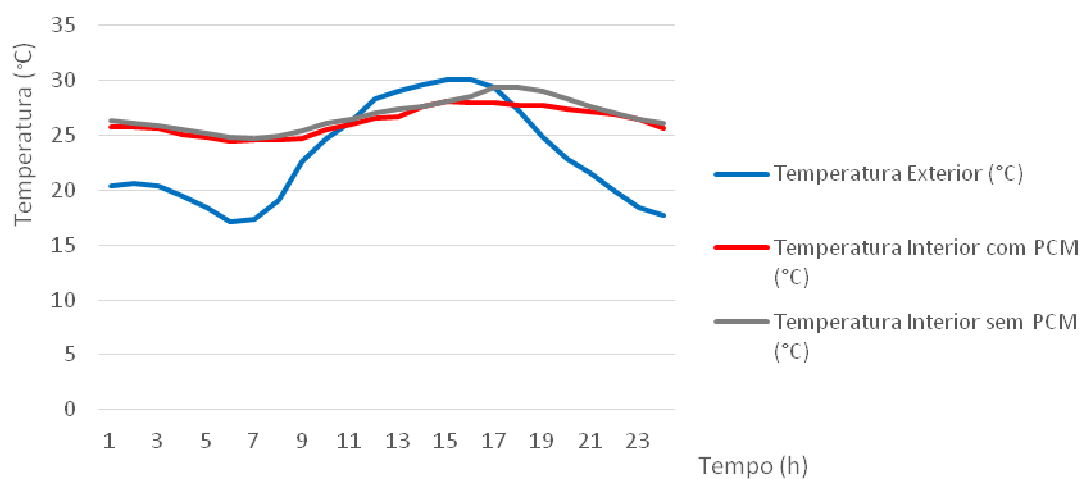



Figura 72 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas ao Porto num dia de verão, no Quarto 1

Tabela 38 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto1

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	28.07	29.39
MIN	24.56	24.72
ΔT	3.51	4.66
	1.15	

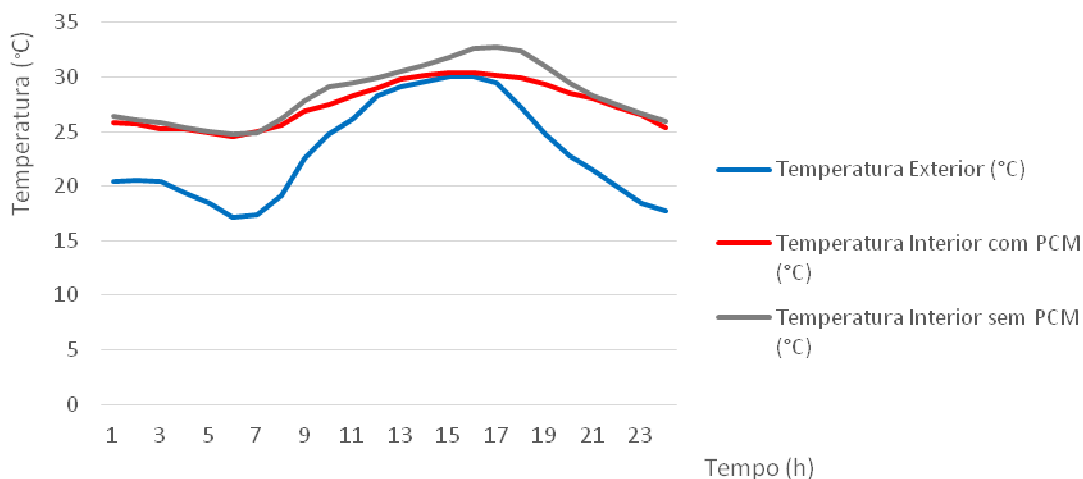


Figura 73 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas ao Porto num dia de verão, na Sala

Tabela 39 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, na Sala

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	30.4	32.80
MIN	24.59	24.77
ΔT	5.81	8.03
ξ		2.22

4.2.5 Évora - Dia típico de Inverno

4.2.5.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26

Nas Figura 74, Figura 75, Figura 76, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, nas três zonas consideradas, relativas a Évora num dia típico de inverno.

No quarto 2 e no período entre as 14 e as dezassete horas, a temperatura interior do edifício com PCM é muita próxima de 25°C. Durante esse período o PCM absorve alguma energia que liberta no período entre as 21 e as cinco horas, porque as temperaturas ambiente interiores neste período são consideravelmente mais baixas que as temperaturas de fusão, o que permite a solidificação parcial do PCM.

Atendendo a que as temperaturas interiores no quarto 1 e na sala não atingem valores próximos da temperatura de fusão do PCM, este não é acionado e por isso não é relevante a sua utilização neste caso.

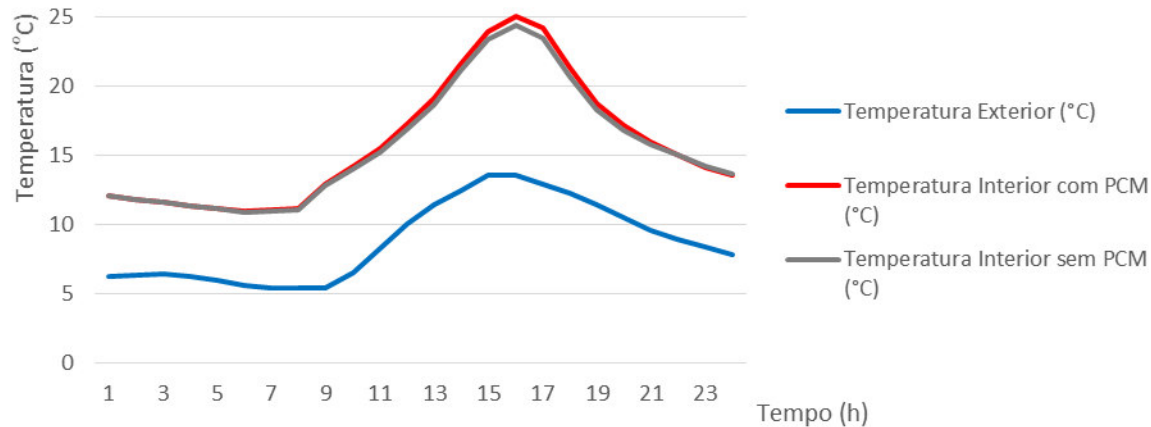



Figura 74 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas a Évora num dia de inverno, no Quarto 2

Tabela 40 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, no Quarto 2

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	25.12	24.44
MIN	10.93	10.90
ΔT	14.19	13.54
	0.65	

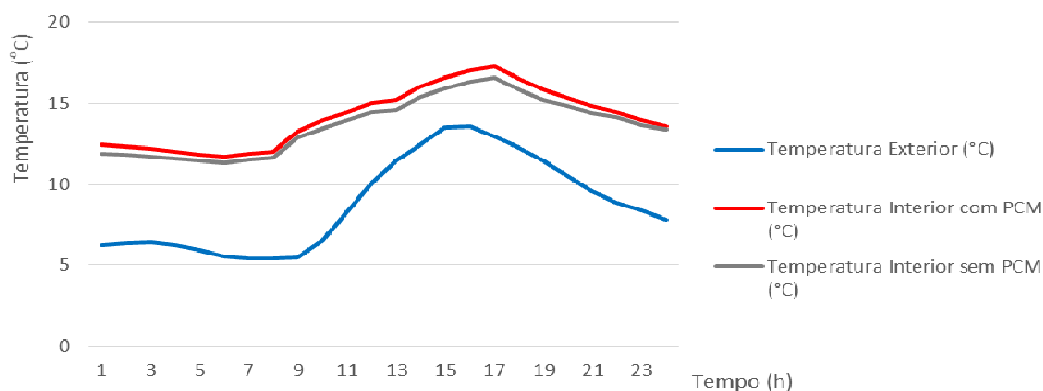


Figura 75 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas a Évora num dia de inverno, no Quarto 1

Tabela 41 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, no Quarto 2

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	17.28	16.61
MIN	11.71	11.30
ΔT	5.57	5.31
ξ		0.26

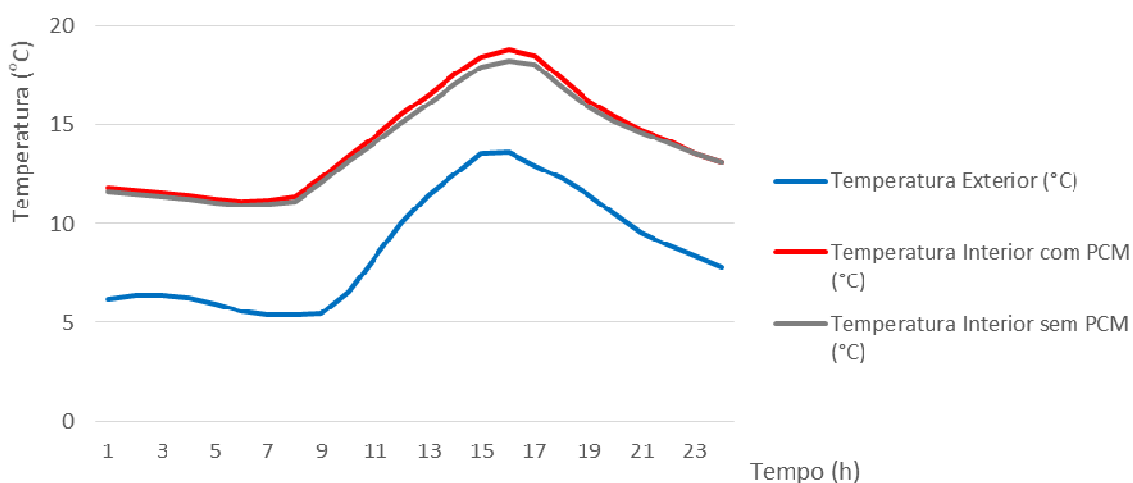


Figura 76 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, relativas a Évora num dia de inverno, na Sala

Tabela 42 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, na Sala

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	18.78	18.26
MIN	11.11	10.92
ΔT	7.67	7.34
ξ		0.33

4.2.5.2 Delta®-Cool 24

Nas Figura 77, Figura 78, Figura 79, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, nas três zonas consideradas, relativas a Évora num dia típico de inverno.

Verifica-se nas três situações que o gráfico das temperaturas interiores com PCM e o das temperaturas interiores sem PCM são coincidentes ao longo de todo o dia. As temperaturas interiores situam-se abaixo da temperatura de fusão deste PCM, o que faz com que este PCM não seja acionado e a sua ação seja nula nestas condições.

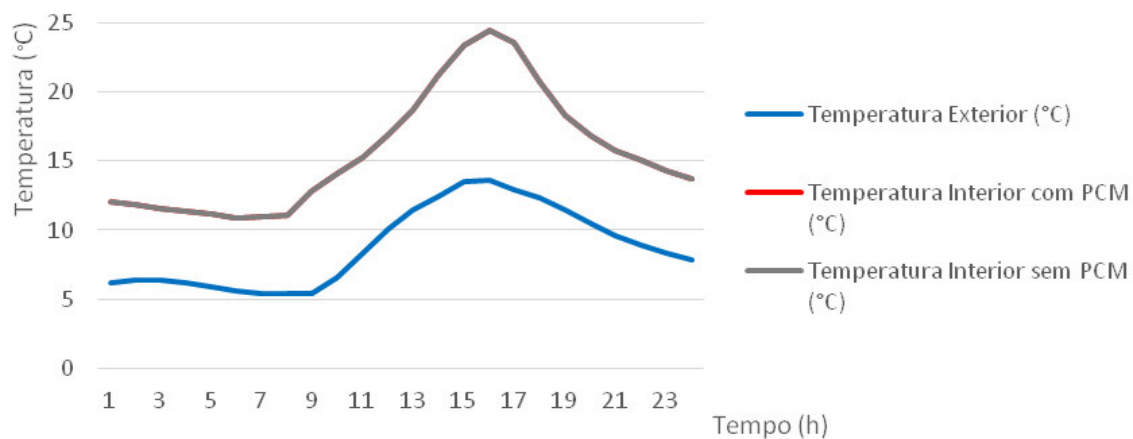


Figura 77 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Évora num dia de inverno, no Quarto 2

Tabela 43 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto2

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	24.44	24.44
MIN	10.90	10.90
ΔT	13.54	13.54
ξ	0.00	

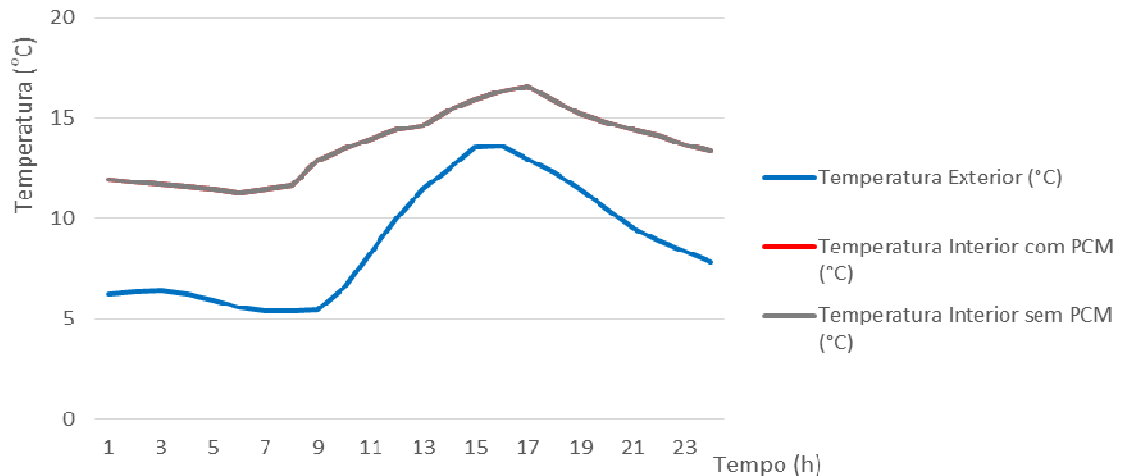


Figura 78 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Évora num dia de inverno, no Quarto 1

Tabela 44 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto 1

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	16.61	16.61
MIN	11.30	11.30
ΔT	5.31	5.31
δ		0.00

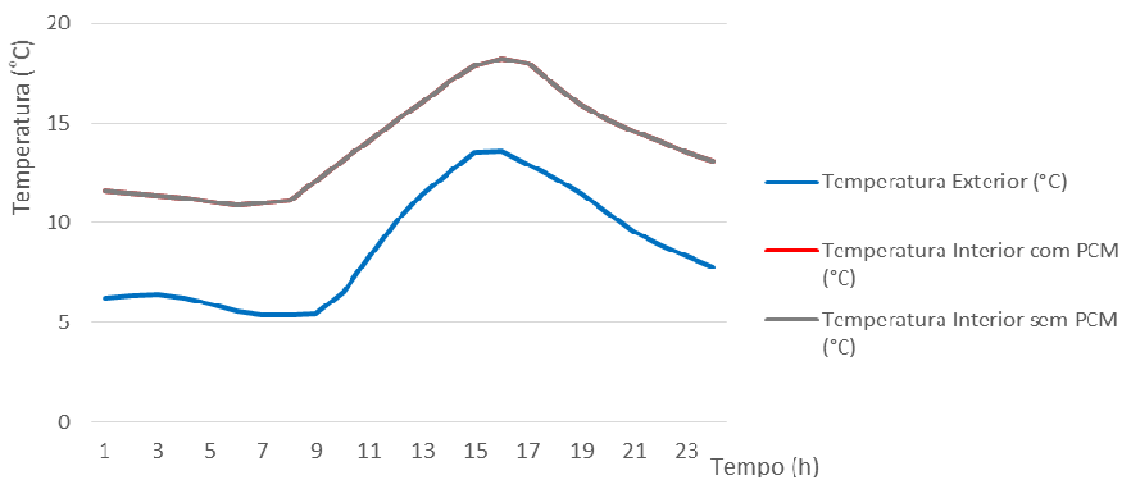



Figura 79 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Évora num dia de inverno, na Sala

Tabela 45 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, na Sala

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	18.26	18.26
MIN	10.92	10.92
ΔT	7.34	7.34
		0.00

4.2.6 Évora - Dia típico de Verão

4.2.6.1 Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26

Nas Figura 80, Figura 81, Figura 82, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, nas três zonas consideradas, relativas a Évora num dia típico de verão.

Como as temperaturas interiores se situam durante todo o dia acima do intervalo de fusão do PCM, este não solidifica e por isso não liberta energia. Como as temperaturas se mantêm mesmo durante a noite, com valores superiores a 25°C, o recurso à ventilação noturna pode mesmo assim não permitir a solidificação do PCM.

Desta forma o PCM não é acionado pelo que a sua utilização neste caso é desprezível.

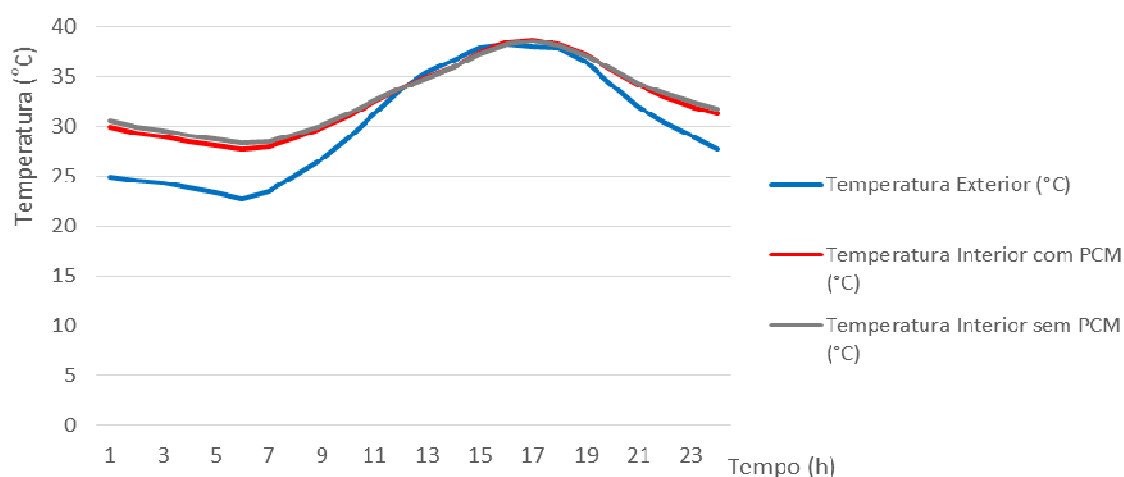


Figura 80 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas a Évora num dia de verão, no Quarto 2

Tabela 46 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, no Quarto 2

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	38.79	38.62
MIN	27.84	28.36
ΔT	10.95	10.27
ξ		0.69

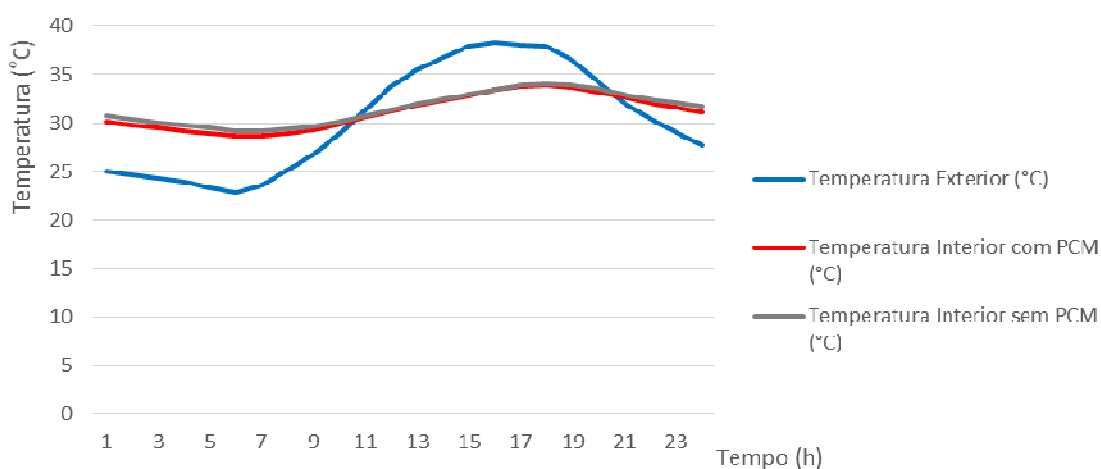


Figura 81 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, relativas a Évora num dia de verão, no Quarto 1

Tabela 47 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM
SmartBoard™ 23/26, no Quarto 1

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	33.86	34.00
MIN	28.67	29.13
ΔT	5.19	4.87
ξ		0.31

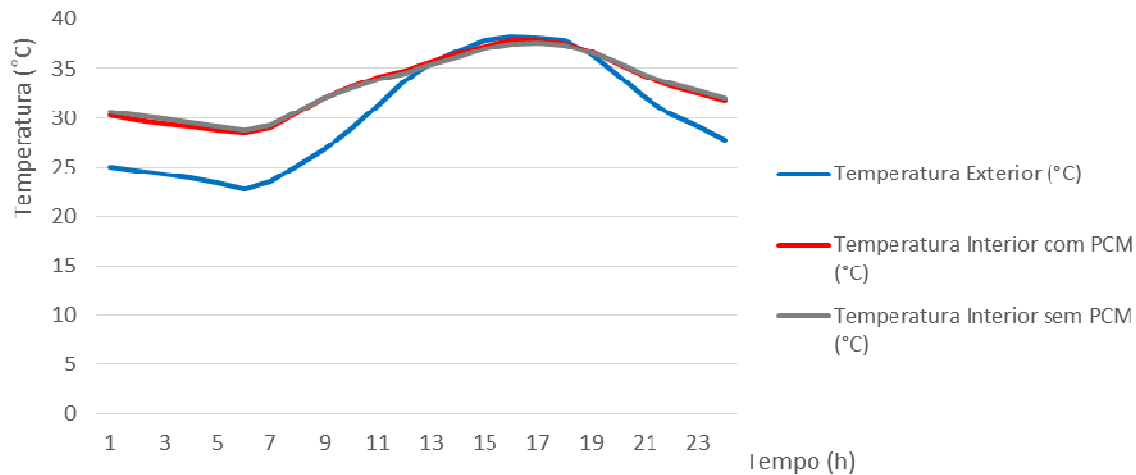


Figura 82 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, relativas a Évora num dia de verão, na Sala

Tabela 48 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26, na Sala

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	37.91	37.66
MIN	28.53	28.80
ΔT	9.38	8.86
ξ	0.52	

4.2.6.2 Delta®-Cool 24

Nas Figura 83, Figura 84, Figura 85, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, nas três zonas consideradas, relativas a Évora num dia típico de verão.

Como as temperaturas interiores se situam durante todo o dia acima do intervalo de fusão do PCM, este não solidifica e por isso não liberta energia. Como as temperaturas se mantêm mesmo durante a noite, com valores superiores a 25°C, o recurso à ventilação noturna pode mesmo assim não permitir a solidificação do PCM.

Desta forma o PCM não é acionado pelo que a sua utilização neste caso é desprezível.

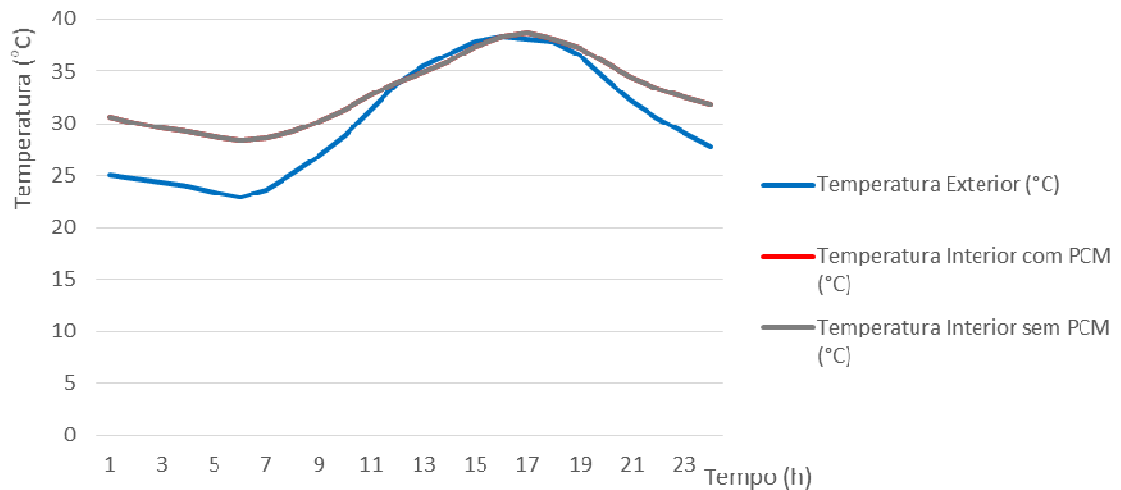


Figura 83 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Évora num dia de verão, no Quarto 2

Tabela 49 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto2

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	38.62	38.62
MIN	28.36	28.36
ΔT	10.27	10.27
δ	0.00	

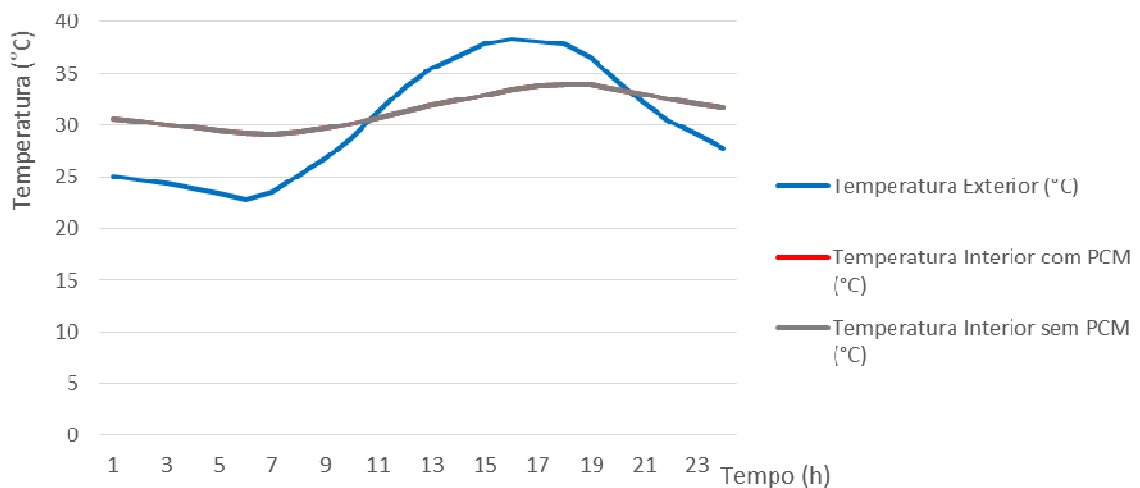


Figura 84 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Évora num dia de verão, no Quarto 1

Tabela 50 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, no Quarto1

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	34.00	34.00
MIN	29.13	29.13
ΔT	4.87	4.87
ξ	0.00	

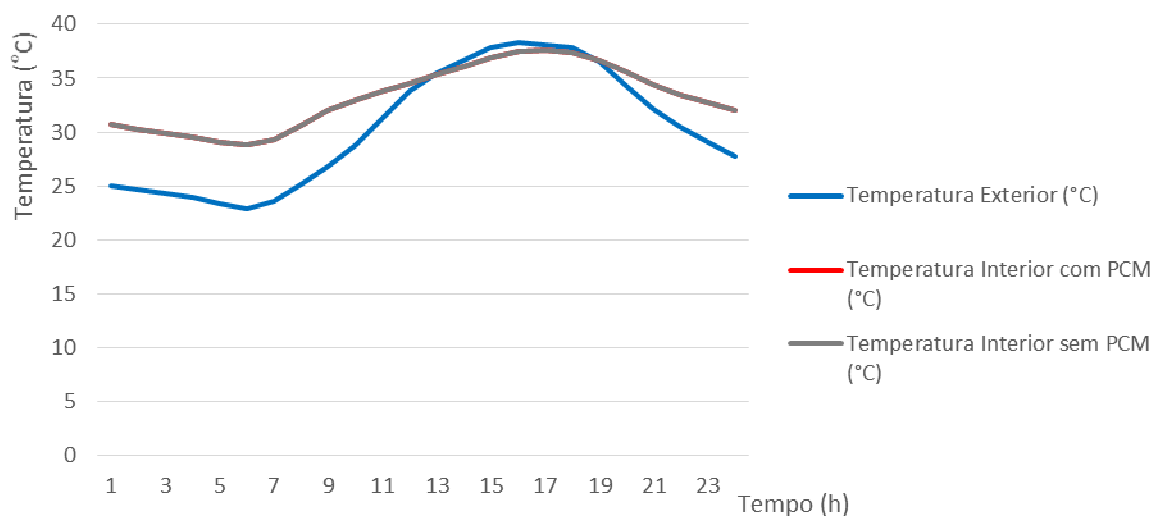


Figura 85 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, relativas a Évora num dia de verão, na Sala

Tabela 51 - Temperaturas interiores com e sem a incorporação do Delta®-Cool 24, na Sala

	Temperatura interior com PCM (°C)	Temperatura interior sem PCM (°C)
MAX	37.66	37.66
MIN	28.80	28.80
ΔT	8.86	8.86
ξ	0.00	

4.2.7 Conclusão da análise dos resultados

Perante os resultados apresentados e da análise realizada, é possível concluir que a inclusão dos PCM escolhidos nas condições de construção estabelecidas não se revela útil. Para períodos em que as temperaturas interiores são baixas, é necessário a utilização de PCM com

baixos pontos de fusão. No entanto verifica-se que os PCM escolhidos (com elevadas temperaturas de fusão), também não conduziram a resultados satisfatórios.

Nos casos em que as temperaturas ambientais interiores do edifício, se situam abaixo da temperatura de fusão do PCM durante todo o dia, este não é acionado. Nos casos em que essa temperatura se situa muito próxima do ponto de fusão durante períodos pequenos de tempo, o PCM não solidifica e por isso não liberta energia.

Nos casos em que as temperaturas ambientais interiores do edifício, se situam acima da temperatura de fusão do PCM durante todo o dia, este também não é acionado. Nos casos em que essa temperatura se situa muito próximo do ponto de fusão durante períodos pequenos de tempo, o PCM absorve alguma energia. No entanto essa energia não é libertada porque as temperaturas não são inferiores ao ponto de fusão.

De todos os resultados obtidos, o resultado registado na cidade do Porto num dia típico de verão, foi aquele onde o amortecimento registado nas temperaturas de arrefecimento para as zonas de conforto térmico foi mais significativo. No entanto, como já foi referido em 4.1.4.2 este resultado, apesar de confirmado com uma segunda simulação, não era expectável. Contudo, simulou-se para este caso a inclusão de duas camadas de PCM.

4.3 - FASE 2

A segunda fase de resultados refere-se à simulação efetuada com a inclusão de duas camadas de PCM Delta-Cool® 24. Optou-se por simular apenas na cidade do Porto, num dia de Verão e com este tipo de material, dado ter sido a situação que ofereceu melhores resultados com uma camada de PCM.

Nas Figura 86, Figura 87, Figura 88, apresenta-se a evolução das temperaturas exteriores e interiores com uma e com duas camadas de Delta®-Cool 24 e sem a incorporação do PCM. Os resultados mostram que há uma ligeira melhoria do desempenho térmico da habitação e confirmam os resultados de 4.1.4.2. No entanto, como se observa, apesar de haver um amortecimento nas temperaturas interiores com a consequente diminuição das amplitudes térmicas, essa melhoria revela-se pouco acentuada.

No período entre as 2 e as 8 horas a temperatura interior situa-se abaixo da temperatura de fusão do PCM. Este funde absorvendo energia e durante o resto do dia as temperaturas interiores mantêm-se acima dos valores de fusão não permitindo que o PCM solidifique e que ocorra a libertação de energia. O recurso a processos de ventilação poderiam potenciar a solidificação do PCM.

De acordo com estes resultados conclui-se que o investimento em duas camadas de material não se revela rentável em termos de ganhos térmicos.

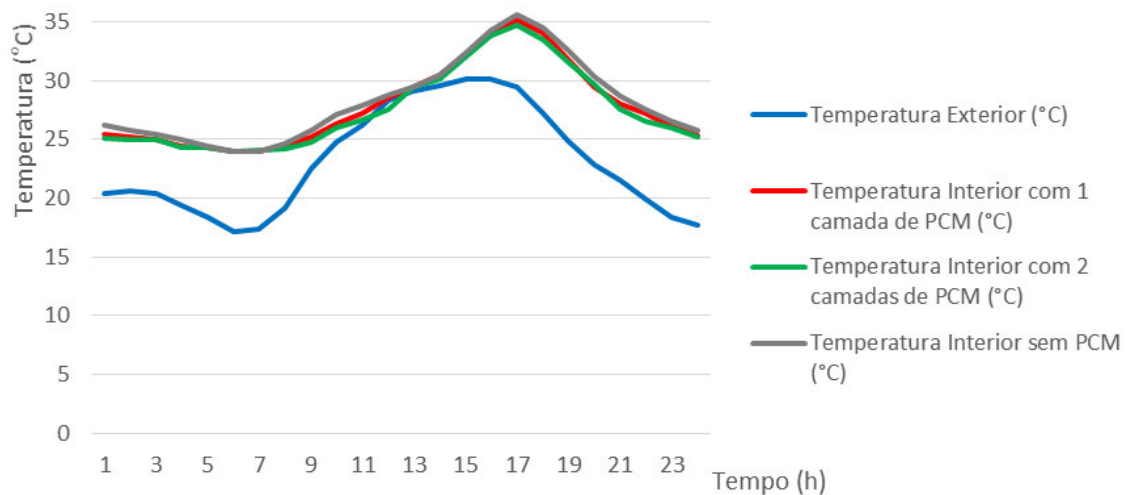


Figura 86 – Temperaturas interiores com uma e com duas camadas de Delta®-Cool 24 e sem a incorporação do PCM, relativas ao Porto num dia de verão, no Quarto 2

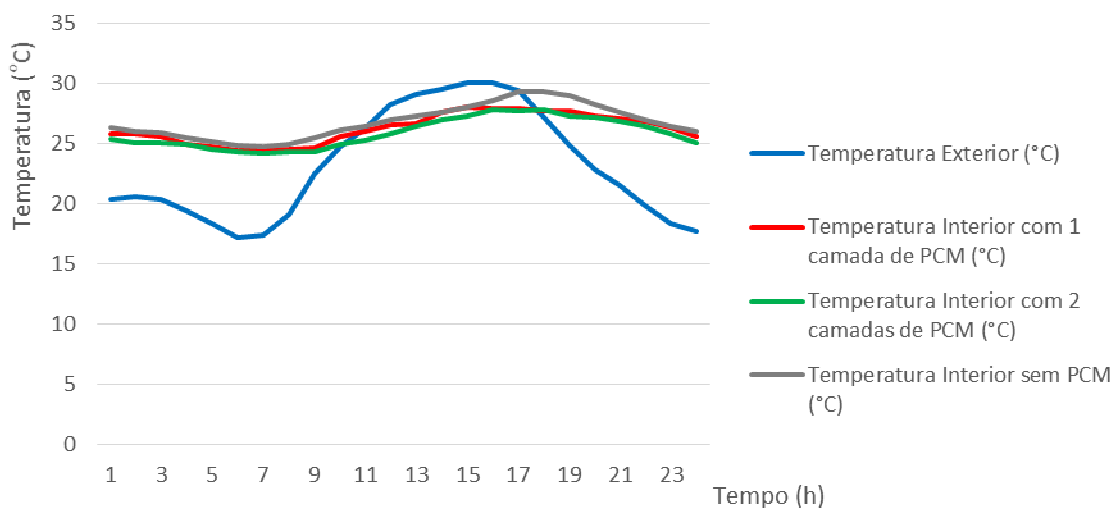


Figura 87 - Temperaturas interiores com uma e com duas camadas de Delta®-Cool 24 e sem a incorporação do PCM, relativas ao Porto num dia de verão, no Quarto 1

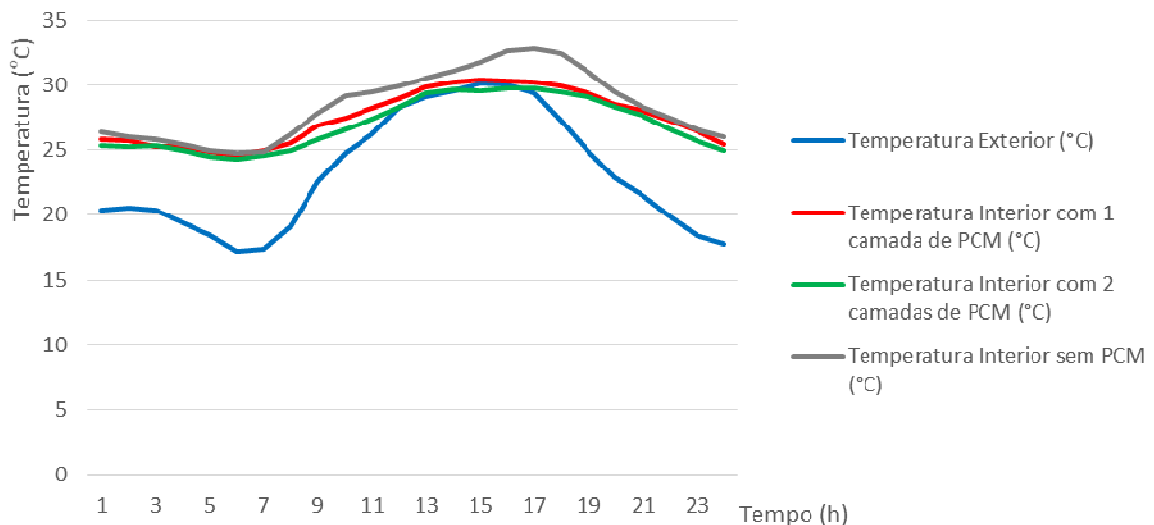


Figura 88 - Temperaturas interiores com uma e com duas camadas de Delta®-Cool 24 e sem a incorporação do PCM, relativas ao Porto num dia de verão, na Sala

4.4 - FASE 3

Nesta fase, testou-se ao longo do mês de Fevereiro (mês de Inverno) e do mês de Julho (mês de Verão) o comportamento térmico dos dois PCM seleccionados. Procurou-se ampliar a amostra e investigar se ao longo de um mês, haverá dias em que o funcionamento do PCM é mais significativo do que nos dias em que se realizou o estudo na Fase 1.

Para tal registou-se as temperaturas hora a hora para todos os dias de cada um dos meses. As temperaturas interiores foram consideradas como a média das temperaturas, registadas nos quartos e sala.

Os resultados obtidos são apresentados de seguida.

4.4.1 - Bragança

Nas Figura 89, Figura 90, apresenta-se a evolução ao longo dos meses de Fevereiro e de Julho em Bragança, das temperaturas exteriores, das temperaturas interiores com uma camada de Delta®-Cool 24, das temperaturas interiores com uma camada de Micronal® SmartBoard 23/26 e das temperaturas interiores sem a incorporação do PCM.

Atendendo ao facto das temperaturas interiores serem inferiores às de fusão dos dois PCM, conclui-se que os PCM não são acionados pelo que se pode concluir que a incorporação de qualquer um dos tipos de PCM não é vantajosa relativamente a ganhos térmicos e os resultados obtidos são semelhantes aos registos diários obtidos na 1ª Fase.

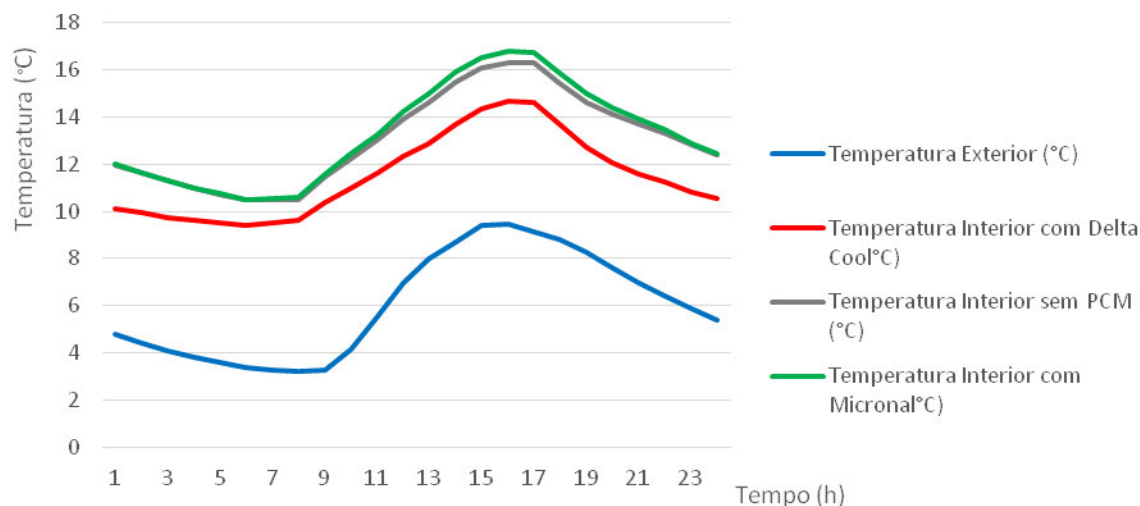


Figura 89 - Temperaturas interiores com uma camada de Delta®-Cool 24 e Micronal® SmartBoard 23/26 e sem a incorporação de PCM, relativas ao mês de Fevereiro em Bragança

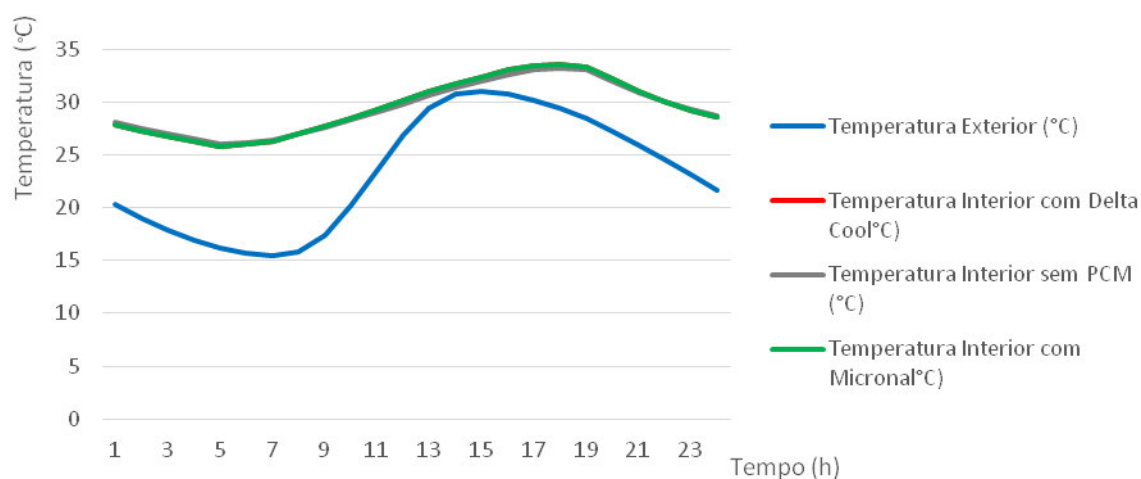


Figura 90 - Temperaturas interiores com uma camada de Delta®-Cool 24 e Micronal® SmartBoard 23/26 e sem a incorporação de PCM, relativas ao mês de Julho em Bragança

4.4.2 - Évora

Nas Figura 91, Figura 92, apresenta-se a evolução ao longo dos meses de Fevereiro e de Julho em Évora, das temperaturas exteriores, temperaturas interiores com uma camada de Delta®-Cool 24, temperaturas interiores com uma camada de Micronal® SmartBoard 23/26 e temperaturas interiores sem a incorporação do PCM.

No mês de Fevereiro, os PCM utilizados não fundem porque as temperaturas interiores são inferiores às temperaturas de fusão. No mês de Julho como as temperaturas são sempre superiores aos valores de fusão os PCM não solidificam.

Pode-se concluir então que a incorporação de qualquer um dos tipos de PCM não é vantajosa relativamente a ganhos térmicos e os resultados obtidos não são muito diferentes dos registos diários obtidos na 1ª fase.

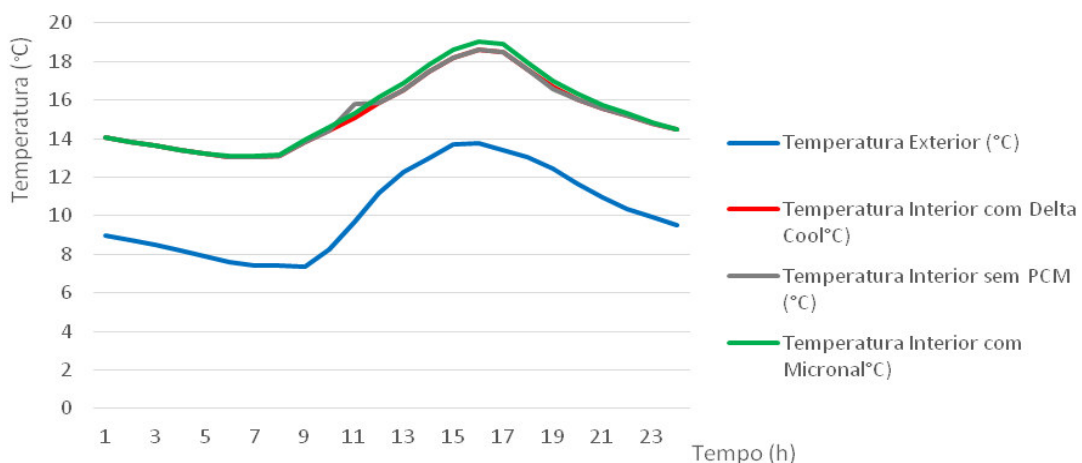


Figura 91 - Temperaturas interiores com uma camada de Delta®-Cool 24 e Micronal® SmartBoard 23/26 e sem a incorporação de PCM, relativas ao mês de Fevereiro em Évora

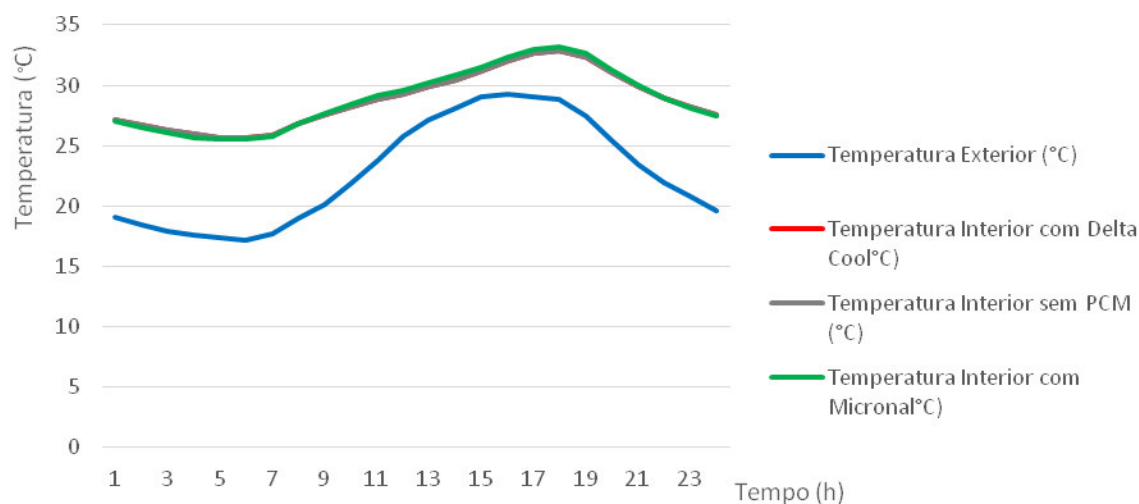


Figura 92 - Temperaturas interiores com uma camada de Delta®-Cool 24 e Micronal® SmartBoard 23/26 e sem a incorporação de PCM, relativas ao mês de Julho em Évora

4.4.3 - Porto

Nas Figura 93, Figura 94, apresenta-se a evolução ao longo dos meses de Fevereiro e de Julho na cidade do Porto, das temperaturas exteriores, temperaturas interiores com uma camada de Delta®-Cool 24, temperaturas interiores com uma camada de Micronal® SmartBoard 23/26 e temperaturas interiores sem a incorporação do PCM.

A incorporação de qualquer um dos tipos de PCM não altera significativamente as temperaturas interiores e o comportamento dos PCM são semelhantes, pelo que não é vantajosa a utilização de qualquer um deles.

Os resultados obtidos para o mês de Fevereiro estão de acordo com o esperado relativamente aos obtidos na Fase 1.

Os resultados obtidos para o mês de Julho contrariam os ganhos previstos na Fase 1 para a cidade do Porto relativos a um dia típico de verão.

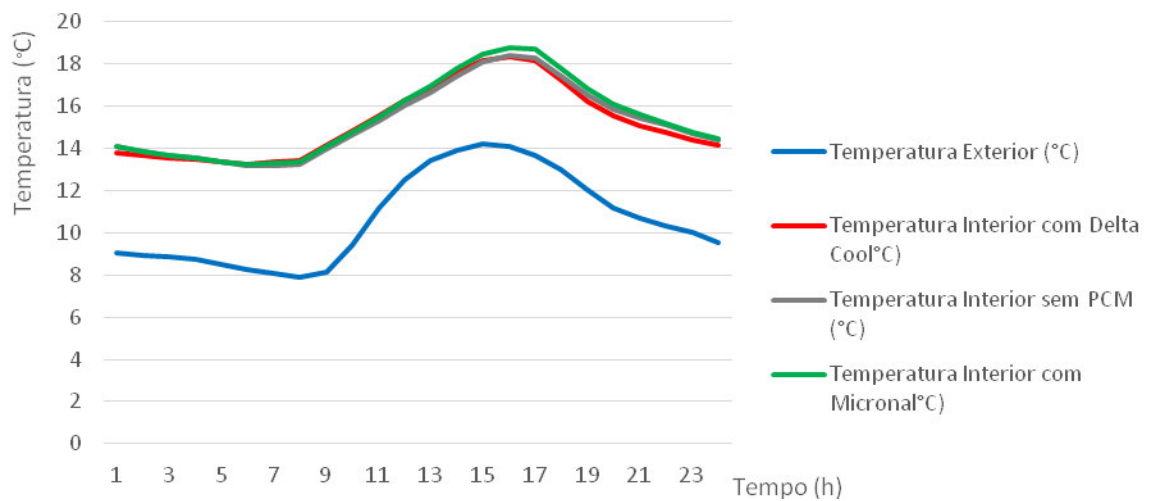


Figura 93 - Temperaturas interiores com uma camada de Delta®-Cool 24 e Micronal® SmartBoard 23/26 e sem a incorporação de PCM, relativas ao mês de Fevereiro no Porto

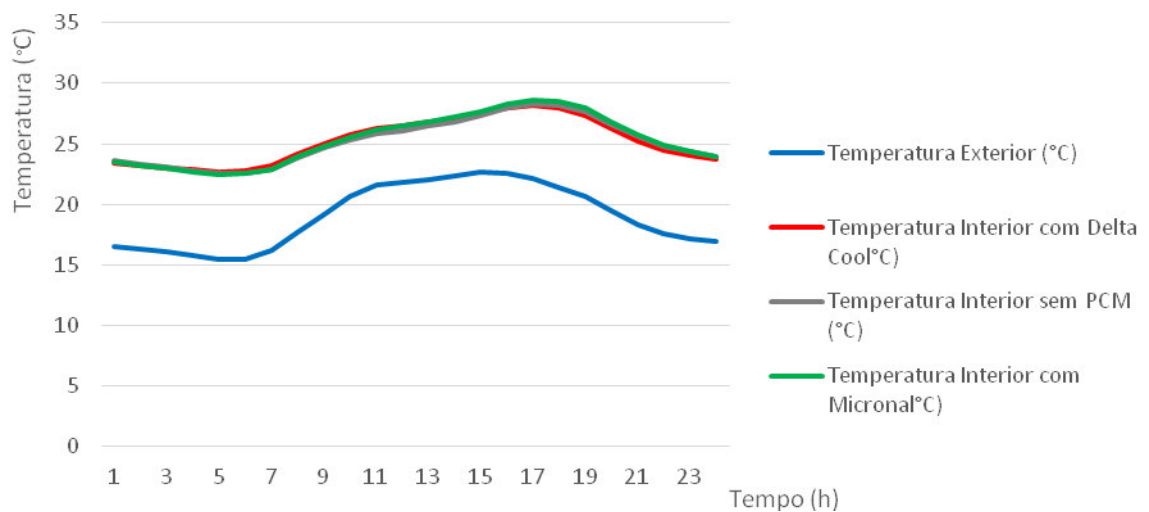


Figura 94 - Temperaturas interiores com uma camada de Delta®-Cool 24 e Micronal® SmartBoard 23/26 e sem a incorporação de PCM, relativas ao mês de Julho no Porto

4.4.4 Conclusões da análise dos resultados

Os registos mensais analisados permitem confirmar as conclusões para os resultados obtidos para um dia de Inverno e um dia de Verão. Contudo, o resultado obtido na Fase 1 para a cidade do Porto e relativo ao dia típico de verão não é confirmado.

Ao trabalhar com base nas temperaturas médias por hora, esbateram-se variações de temperatura que podem regular o funcionamento adequado do PCM. Ao considerar-se uma zona só, como sendo a zona formada pelos quartos e a sala, pode-se ter nivelado diferenças de temperaturas ocorridas em cada compartimento.

4.5 – FASE 4

4.5.1 – Necessidades energéticas anuais e custos inerentes

Tendo em conta que na cidade do Porto utilizando o Delta®-Cool 24, se verificou alguma vantagem na utilização do PCM, estudou-se, através de simulação, as necessidades energéticas do edifício considerando-o com o sistema de climatização. O sistema de climatização foi considerado para garantir as condições de conforto interior nas zonas estudadas do edifício proposto. As temperaturas consideradas ideais para tal, variam entre os 20°C e os 25°C.

Na Figura 95, apresentam-se as necessidades energéticas do edifício estudado com e sem PCM.

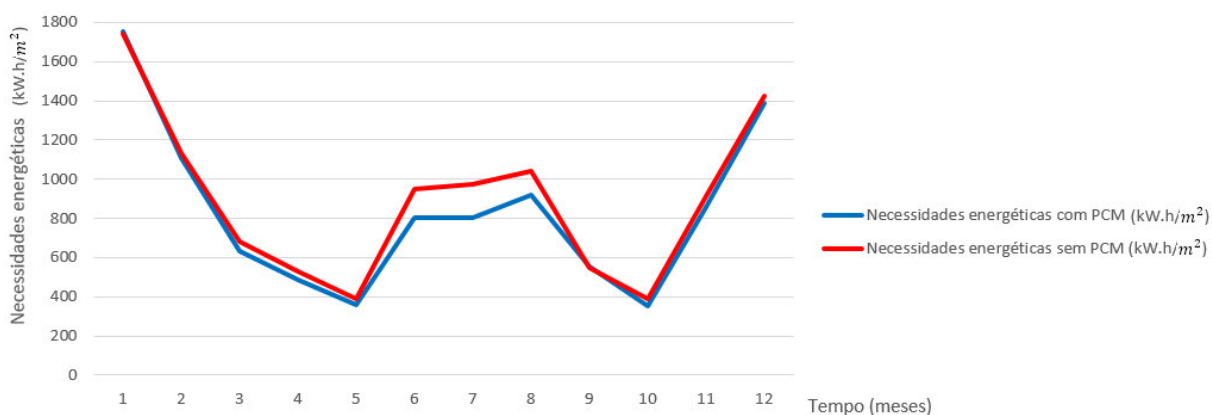


Figura 95 – Necessidades energéticas anuais do edifício

A leitura do gráfico da Figura 95 permite verificar que:

Sem a aplicação de PCM nas paredes as necessidades energéticas são sempre superiores às necessidades com a aplicação de PCM; nos meses de Inverno essas necessidades variam entre 1400kW.h/m^2 e 1800kW.h/m^2 ; nos meses primaveris essas necessidades diminuem e nos meses de verão verifica-se um aumento das necessidades energéticas para valores próximos de 1000kW.h/m^2 a que corresponde as necessidades de arrefecimento.

Com a aplicação do PCM macroencapsulado com temperaturas de fusão de 25°C nas paredes, as necessidades energéticas mantêm-se sensivelmente iguais em estação de aquecimento mas nos meses de verão diminuem aproximadamente 200kW.h/m^2 relativamente aos valores sem PCM.

Esta diferença das necessidades energéticas é explicada pela introdução do sistema de climatização e pelos resultados obtidos na cidade do Porto com este PCM num dia típico de Verão (4.1.4.2).

Na Tabela 52 apresentam-se os custos inerentes às necessidades energéticas mensais e anuais, com a tarifa de 0.1617€/kWh .

Tabela 52 – Gastos energéticos do edifício com e sem PCM

Meses	Necessidades energéticas com PCM (€/kW.h.m²)	Necessidades energéticas sem PCM (€/kW.h.m²)
Janeiro	283.73	281.73
Fevereiro	179.19	183.26
Março	102.59	110.35
Abril	78.60	85.18
Maio	58.24	63.07
Junho	130.01	153.89
Julho	130.39	157.18
Agosto	148.89	167.97
Setembro	89.50	88.14
Outubro	56.60	63.48
Novembro	138.81	147.88
Dezembro	224.22	230.46
Total €	1620.73	1732.60
Diferença		111.86

Com a incorporação do PCM Delta®-Cool 24 nas paredes, há um consumo anual de 1620.73€ enquanto que o custo energético sem a utilização do PCM é de 1732.60€, verificando-se uma diferença anual de 111.86€ o que representa um contributo muito significativo na redução do consumo energético.

CAPÍTULO 5.

CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES FINAIS

As conclusões que se apresentam de seguida permitem avaliar a ação dos PCM utilizados nas simulações realizadas neste trabalho.

Com base nos resultados obtidos nas simulações efetuadas pode-se concluir que economicamente não é viável o uso dos PCM utilizados nas condições em que foram aplicados.

Os resultados obtidos permitem concluir que estes PCM não são eficazes de inverno porque as temperaturas ambientais interiores são menores que as temperaturas de fusão; nos meses de verão, quando as temperaturas ambientais interiores são maiores que as temperaturas de fusão, é necessário recorrer a ventilação noturna para que essas temperaturas sejam menores que as temperaturas de fusão, de modo a que os PCM solidifiquem e libertem energia térmica para o ambiente.

Através destes resultados pode-se concluir que o PCM quando aplicado nos elementos construtivos em pequenas quantidades, não favorece o seu correto funcionamento.

Também se pode concluir que a geometria da casa teve influência nos resultados, porque as suas áreas de envidraçados permitem ganhos solares mas em contrapartida, também conduzem a perdas significativas de energia.

Estes resultados obtidos corroboram o que em teoria era admitido – a utilização de um PCM em exclusividade, sem ser como complemento a outros meios de regulação térmica, é insuficiente.

As simulações efetuadas na Fase 2 permitem concluir que a inclusão de duas camadas deste tipo de material, em condições como as que foram utilizadas, não conduziram a uma melhoria significativa do seu desempenho energético.

Refere-se como constrangimento à obtenção de resultados em sintonia com a parte teórica, a dificuldade em encontrar um PCM comercializável com ponto de fusão abaixo dos 20°C e que fosse capaz de se adaptar melhor às condições climáticas em Portugal.

Os objetivos iniciais desta investigação foram alcançados apesar de não se ter obtido resultados que confirmassem as expectativas teóricas.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Há necessidade de se prosseguir com novos estudos sobre a aplicação destes materiais na construção civil, contribuindo para otimizar o seu potencial e a sua utilização.

Apontam-se de seguida algumas possibilidades de investigação futura que podem dar um contributo assinalável para a obtenção de boas soluções passivas com vista ao melhoramento das condições de conforto térmico.

Avaliar nas mesmas condições, o desempenho destes PCM utilizando sistemas de climatização. Deve intensificar-se a procura de novas soluções construtivas com a inclusão de novos PCM. Deve ser avaliada a possibilidade de utilização de PCM na construção civil, cujos desempenhos térmicos estejam já comprovados em outros setores. Devem ser realizados estudos sobre a utilização de PCM em vários elementos construtivos. Deve ser investigado o impacto que terá a inclusão de PCM em outros tipos de materiais como as argamassas, os envidraçados e as caixas-de-ar. Deve ser testado o comportamento destes materiais em conjunto com outros sistemas de regulação térmica consoante as necessidades de aquecimento ou de arrefecimento.

CAPÍTULO

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Melo, João Joanaz, Ambiente ou morte na Natureza mal amada, In Melo, João Joanaz, *Notícias do Milénio*, ed. Lisboa: Grupo Lusomundo, 1999, ISBN 139902/99, p. 100-103
- [2] Parlamento Europeu e Conselho, Diretiva 2010/31/EU do parlamento europeu e do conselho, *relativa ao desempenho energético de edifícios*. 19 de Maio de 2010.
- [3] Marques, P. A., *EU vai investir 38 mil milhões para reduzir emissões de carbono*, Diário do Minho, Braga, Janeiro de 2014.
- [4] DGEG, “Inquérito ao Consumo de Energia no Setor Doméstico,” 2010. Informação disponível online em: <http://www.dgeg.pt?cr=12563>.
- [5] Pinto, R., *Relatório do Ministério da Economia de Portugal*. Abril 2012. Informação disponível online em: <http://wikienergia.com/>.
- [6] Silva, T., Vicente, R., Soares, N. and Ferreira, V., *Experimental testing and numerical modeling of masonry Wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution*, *Energy Buildings*, vol. 49, pp. 235-245, 2012.
- [7] Tyagi, V. V., and Buddhi D., *PCM thermal storage in buildings: A state of art*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, pp. 1146-1166, 2007
- [8] Gonçalves, M.M., *Estudo de novos materiais de mudança de fase*, Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do grau de Mestre em Materiais Derivados de Recursos Naturais. Aveiro, 2009.
- [9] EDP – Energias de Portugal, S.A., *Guia prático da eficiência energética*. Portugal, Junho de 2006.
- [10] Hasnain, S.M., *Review on sustainable thermal energy storage Technologies, part I: Heat storage materials and techniques*, *Energy Conversion and Management*, vol. 39, pp. 1127-1138, 1998.

- [11] Zhu, N., Ma, Z., and Wang, S., *Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: a review*, *Energy Conversion and Management* 50 (12) (2009) 3169–3181.
- [12] “Microtek Labs.” Informação disponível online em: <http://www.microteklabs.com/how-do-pcms-work.html>
- [13] Regin, A.F., Solanki, S.C., and Saini, J.S., Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, no. 5, pp. 2022-2032, May 2010.
- [14] Kuznik, F., Virgone, J., Noel, J., *Optimization of a phase change material wallboard for building use*, *Applied Thermal Engineering* 28 (11–12) (2008) 1291–1298.
- [15] Eckert, E.R.G., et al., *Heat transfer—review of 1994 literature*, *Int. J. Heat Transfer* 40 (1997) 3729–3804.
- [16] Zalba, B., Marin, J. M., Cabeza L.F. and Mehling, H., *Review on thermal storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications*, *Applied Thermal Engineering*, vol. 23, pp. 251-283, 2003.
- [17] Monteiro, J.M., Aguiar, J.B., Bragança, L.M., Gomes, J.R., Micrópolis, P.S., *Argamassas com desempenho térmico melhorado*, Informação disponível online em: https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/.../Monteiro_CN_2005.pd.
- [18] Hale, D. V., Hoover, M. J. and O'Neill, M. J., *NASA Report*, NASA-CR-61363, 1971.
- [19] EPS – Environmental Process Systems Ltd, *Improving cooling & heating technologies by offering alternative energy saving & environmentally friendly products & solutions*. Informação disponível online em: <http://www.epsltd.co.uk/pcm.htm>
- [20] Gibbs, B.M. and Hasnain, S.M., *DSC study of technical grade phase change heat storage materials for solar heating applications*, Proceedings of the 1995 ASME/JSME/JSEJ International Solar Energy Conference. Part 2, 1995.

- [21] Yinping, Z., Yi, J. and Yi, J., *A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials*, *Measurement Sci. Technol.* 10 (1999) 201–205.
- [22] Cunha, R.S., Alves, V. H., Aguiar, J. B. and Ferreira, V. M., *Argamassas Térmicas Sustentáveis: O Contributo dos Materiais de Mudança de Fase*, disponível online: http://www.apfac.pt/congresso2012/comunicacoes/d2/014_PP%20Sandra%20Cunha.
- [23] Cabeza, L.F., *Next Generation cost effective phase change materials for increased energy efficiency in renewable energy systems in buildings*, University of Lleida, Spain.
- [24] Zhang, X. et al., *Crystallization and Prevention of Supercooling of Microencapsulated n-alkanes*, *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 281, pp. 299-306 , 2005.
- [25] Su, J. et al., *Fabrication and Thermal Properties of MicroPCMs: Used Melamine-Formaldehyde Resin as Shell Material*, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 101, pp. 1522-1528, 2006.
- [26] Schmidt, M., *Phase Change Materials – latent heat storage for interior climate control*, BASF, Germany.
- [27] Sun, G. and Zhang, Z., *Mechanical Properties of Melamine-Formaldehyde Microcapsules*, *Journal of Microencapsulation*, vol. 18, pp. 593-602, 2001.
- [28] Dincer, I. and Rosen, M.A., *Thermal energy storage, Systems and Applications*, John Wiley & Sons, Chichester (England), 2002.
- [29] Mehling, H. and Cabeza, L., *Heat and Cold Storage with PCM* Springer, 2008.
- [30] Fabral Architectural Systems, *Phase Change, a high-performance energy saving material*. IK, 2010.
- [31] Telkes, M., *Thermal storage for solar heating and cooling, Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings*, Charlottesville (Virginia, USA), 1975.

- [32] Lane, G.A., *Solar Heat Storage: Latent Heat Material*, vol. II, Technology, CRC Press, Florida, 1986.
- [33] Barkmann, H.G. and Wessling, F.C., *Use of buildings structural components for thermal storage, Proceedings of the Workshop on Solar Energy Storage Subsystems for the Heating and Cooling of Buildings*, Charlottesville (Virginia, USA), 1975.
- [34] Omer, S.A., Riffat, S.B. and Ma, X., *Experimental investigation of a thermoelectric refrigeration system employing a phase change material integrated with thermal diode (thermosyphons)*, *Appl. Thermal Eng.* 21 (2001) 1265–1271.
- Riffat, S.B., Omer, S.A. and Ma, X., *A novel thermoelectric refrigeration system employing heat pipes and a phase change material: an experimental investigation*, *Renew. Energy* 23 (2001) 313–323.
- [35] Salyer, I.O. and Sircar, A.K., *Phase change materials for heating and cooling of residential buildings and other applications*, *Proceedings of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference—IECEC'90*, 1990.
- [36] Ismail, K.A.R. and Henriquez, J.R., *Thermally effective windows with moving phase change material curtains*, *Appl. Thermal*, vol. 21, pp. 1909–1923, 2001.
- [37] Merker, O., Hepp, V., Beck, A. and Fricke, J., *A new PCM-shading system: a study of the thermal charging and discharging process*, *Proceedings of Eurosun 2002*, Bologna (Italy), 2002.
- [38] Passos, N., *Revestimento inovador aquece casa*, Informação disponível online em: http://www.uminho.pt/Newsletters/HTMLExt/21/website/conteudo_186.html
- [39] Athienitis, A. K. and Chen, Y., *The effect of solar radiation on dynamic thermal performance of floor heating systems*, *Solar Energy*, vol. 69, no. 3, pp. 229-237, 2000.
- [40] Lin, K. et al, *Experimental Study of Under-Floor Electric Heating System with ShapeStabilized PCM Plates*, *Energy and Buildings*, 37, (2005) 215-220.

- [41] Cerón, I., Neila, J. and Khayet, M., *Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use*, *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 8, pp. 1869-1874, Aug. 2011.
- [42] Turnpenny, J. R., Etheridge, D. W. and Reay, D. A., *Novel ventilation cooling system for reducing air conditioning in buildings, Part I: testing and theoretical modeling*, *Applied Thermal Engineering*, vol. 20, no. 11, pp. 1019-1037, 2000.
- [43] Tzivanidis, C., Antonopoulos, K. A. and Kravvaritis, E. D., *Parametric analysis of space cooling systems based on night ceiling cooling with PCM-embedded piping*, *International Journal of Energy Research*, vol. 36, no. 1, pp. 18-35, Jan.2012
- [44] Koschenz, M. and Lehmann, B., *Development of a thermally activated ceiling panel with PCM for application in lightweight and retrofitted buildings*, *Energy and Buildings*, vol. 36, no. 6, pp. 567-578, Jun. 2004.
- [45] Weinlader, H. et al., *PCM-Facade-Panel for Day Lighting and Room Heating*, *Solar Energy*, vol. 78, pp. 177-186, 2005.
- [46] GLASSX – *Storage, Heating and Cooling*. Informação disponível online em: <http://www.glassx.ch>
- [47] Scalat, S., Banu, D., Hawes, D., Parish, J., Haghghata, F. and Feldman, D., *Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 44, no. 1, pp. 49–61, Oct. 1996.
- [48] Alawadhi, E. M. and Alqallaf, H. J., *Building roof with conical holes containing PCM to reduce the cooling load: Numerical study*, *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 8–9, pp. 2958–2964, Aug. 2011.
- [49] Gschwander, S. et al., *Microencapsulated Paraffin in Phase Change Slurries*, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, vol. 89, pp. 307-315, 2005.

- [50] Neto, J.H.M., Maldonado, E., Borges, M. and Lima, M., *Elaboration and Experimental Validation of a Simplified Model for Encapsulated Ice Tanks Using a Bench Simulation Test Facility*, *HVAC&R Research*, vol. 10, no. 3, pp. 367–388, Jul. 2004.
- [51] Gu, Z. et al, *Thermal Energy Recover from Air Conditioning System – Heat Recovery System Calculation and Phase Change Materials Development*, *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, pp. 2511-2526, 2004.
- [52] Wang, X. and Niu, J., *Performance of cooled-ceiling operating with MPCM slurry*, *Energy Conversion and Management*, vol. 50, no. 3, pp. 583–591, 2009.
- [53] Huang, M. J. et al., *Thermal Regulation of Building-Integrated Photovoltaics Using Phase Change Materials*, *International Journal of Heat & Mass Transfer*, vol. 47, pp. 2715-2733, 2004.
- [54] Medved, S. and Arkar, C., *Correlation Between the Local Climate and the Free Cooling Potential of Latent Heat Storage*, *Energy and Buildings*, 2007.
- [55] Lai, C. and Chiang, C., *How Phase Change Materials Affect Thermal Performance: Hollow Bricks*, *Building Research & Information*, pp. 118-130, 2006.
- [56] Alawadhi, E.M., *Thermal Analisis of a Building Brick Containing Phase Change Materials*, *Energy and Buildings*, 2007.
- [57] Aguiar, J. B., Lucas, S. M. S., Ferreira, V. M. and Batista, J. A., *Argamassas contendo microcápsulas de materiais de mudança de fase, Processo para a sua preparação e sua utilização*, Fascículo de patente de invenção da Universidade de Aveiro, Junho 2011.
- [58] Revankar, S.T., Croy, T. and George, P.J., *Void distribution in phase-change material capsule of solar latent heat energy storage system*, *Proceedings of the 35th National Heat Transfer Conference*, Anaheim (California, USA), 2001.
- [59] Rossi, R.M. and Bolli, W.P., *Phase Change Materials for Improvement of Heat Protection*, *Advanced Engineering Materials*, vol. 7, no. 5, pp. 368-373, 2005.

- [60] Coutinho, J. A., *Materiais de mudança de fase para isolamento térmico e armazenamento de energia*. Informação disponível online em: <http://path.web.ua.pt/file/coluna-eq2%20v2.pdf>
- [61] *Incorporação de PCM em tecidos*. Informação disponível online em: <http://moondial.typepad.com/fashionabletechnology/materialstextiles/page/2/>
- [62] *Computador feito com material de mudança de fase pode imitar nosso cérebro*, Universidade de Exeter no Reino Unido, revista *Advanced Materials*, 2011. Informação disponível online em: <http://ciencia.estadao.com.br/blogs/ciencia-diaria/computador-feito-com-material-de-mudanca-de-fase-pode-imitar-nosso-cerebro/>
- [63] Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M. and Griffith, B. T., *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*, US Department of Energy, Energy Systems Research Unit, University of Wisconsin-Madison, National Renewable Energy Laboratory. USA, July 2005.
- [64] U.S. Department of Energy. Informação disponível online em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildingS/energyplus>
- [65] Muruganantham, K., *Application of Phase Change Material in Buildings: Field Data vs. EnergyPlus Simulation*, A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. Arizona, December 2010.
- [66] Crawley, D.B. et al., *EnergyPlus: Creating a New-Generation Building Energy Simulation Program*. *Energy and Buildings*, vol. 33, pp. 443-457, 2001.
- [67] Melo, A. P. and Lamberts, R., *Análise da Influência do Desempenho Térmico dos Fechamentos Opacos através do Balanço Térmico*. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Civil – LabEEE. Brasil, 2008.
- [68] EnergyPlus Development Team, *EnergyPlus Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-200*, 2009.

- [69] Scarduelli, F. A., Westphal, F. S. and Lamberts, R. *Aplicação do Método Bestest no EnergyPlus para Treinamento em Simulação do Desempenho Térmico de Edificações*. Universidade Federal de Santa Catarina. Departamento de Engenharia civil – LabEEE. Brasil, 2005.
- [70] Ficheiros climáticos em Portugal. Informação disponível online em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=6_europe_wmo_region_6/country=PRT/cname=Portugal
- [71] Melo, A. P., Westphal, F. S. and Matos, M., *Apostila do curso básico do programa EnergyPlus*, Florianópolis, Set. 2009.
- [72] *Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26*, BASF Aktiengesellschaft, 67056 Ludwigshafen, Germany, August 2006.
- [73] *Delta®-Cool 24*, Dörken, Phase Change Material – Thermal Storage Mass for a Comfortable Interior Climate, Germany.
- [74] Santos, C. and Matías, L., *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios - ITE-50*, Lisboa, 2006.

CAPÍTULO

ANEXOS

ANEXO AO CAPÍTULO 3 – METODOLOGIATabela 53 - Valores da Temperatura e Entalpia de fusão a introduzir no *EnergyPlus* do Micronal® PCM Smartboard 23/26 (Anexo à Figura 35)

Temperatura (°C)	Entalpia de fusão (J/kg.K)
0	0
5	6000.0
10	12000.0
15	18000.0
20	24000.0
23	28946.8
24	37286.0
24.5	44424.5
25	51563.0
26	59902.1
28	63648.4
30	66048.9
35	72048.9
40	78048.9
45	84048.9
50	90048.9

Tabela 54 - Valores da Temperatura e Entalpia de fusão a introduzir no *EnergyPlus* do Delta®-Cool 24 (Anexo à Figura 37)

Temperatura (°C)	Entalpia de fusão (J/kg.K)
0	0
5	13500.0
10	27000.0
15	40500.0
20	54000.0
22	59435.2
23	63905.6
24	86425.6
25	146709.9
26	206744.4
27	228764.3
28	232734.7
30	237169.9
35	248169.9
40	259169.9
45	270169.9

Tabela 55 - Coeficiente de transmissão térmica para a parede exterior simples

Parede Exterior Simples							
Constituição	e (m)	λ (W/m.°C)	R_j (m².°C/W)	ρ (kg/m³)	C_p (J/(kg.K))	Rugosidade	Referência - ITE 50
Reboco tradicional	0.02	1.30	0.02	1900	900	Mediamente Liso	Quadro I.2 - pág. I.7
Poliestireno Expandido - EPS	0.05	0.04	1.35			Mediamente Liso	Quadro I.1 - pág. I.3
Parede de tijolo cerâmico furado 22 cm	0.22		0.52	633	790	Rugoso	Quadro I.5 - pág. I.12
Reboco tradicional	0.02	1.30	0.02	1900	900	Mediamente Liso	Quadro I.2 - pág. I.7
Sentido do Fluxo de Calor	Horizontal						
Resistência Térmica Superficial (m ² .°C/W)	Interior - R _{si}		0.13				Quadro I.3 - pág. I.11
	Exterior - R _{se}		0.04				Quadro I.3 - pág. I.11
Coeficiente de Transmissão Térmica	U - (W/m².°C)						
	0.48						

Tabela 56 - Coeficiente de transmissão térmica para a parede exterior simples com PCM
Micronal® PCM Smartboard

Parede Exterior Simples com PCM Micronal® PCM Smartboard							
Constituição	e (m)	λ (W/m.°C)	R_j (m².°C/W)	ρ (kg/m³)	C_p (J/(kg.K))	Rugosidade	Referência - ITE 50
Reboco tradicional	0.02	1.30	0.02	1900	900	Mediamente Liso	Quadro I.2 - pág. I.7
Poliestireno Expandido - EPS	0.05	0.04	1.35			Mediamente Liso	Quadro I.1 - pág. I.3
Parede de tijolo cerâmico furado 22 cm	0.22		0.52	633	790	Rugoso	Quadro I.5 - pág. I.12
PCM Micronal® PCM Smartboard	0.015	0.13	0.11	767	1200		
Reboco tradicional	0.02	1.30	0.02	1900	900	Mediamente Liso	Quadro I.2 - pág. I.7
Sentido do Fluxo de Calor	Horizontal						
Resistência Térmica Superficial (m ² .°C/W)	Interior - R _{si}		0.13				Quadro I.3 - pág. I.11
	Exterior - R _{se}		0.04				Quadro I.3 - pág. I.11
Coeficiente de Transmissão Térmica	U - (W/m².°C)						
	0.46						

Tabela 57 - Coeficiente de transmissão térmica para a parede exterior simples com PCM
 Delta®-Cool 24

Parede Exterior Simples com PCM Delta®-Cool 24							
Constituição	e (m)	λ (W/m.°C)	Rj (m².°C/W)	p (kg/m³)	Cp (J/(kg.K))	Rugosidade	Referência - ITE 50
Reboco tradicional	0.02	1.30	0.02	1900	900	Mediamente Liso	Quadro I.2 - pág. I.7
Poliestireno Expandido - EPS	0.05	0.04	1.35			Mediamente Liso	Quadro I.1 - pág. I.3
Parede de tijolo cerâmico furado 22 cm	0.22		0.52	633	790	Rugoso	Quadro I.5 - pág. I.12
PCM Delta®-Cool 24	0.015	1.12	0.01		1200		
Reboco tradicional	0.02	1.30	0.02	1900	900	Mediamente Liso	Quadro I.2 - pág. I.7
Sentido do Fluxo de Calor	Horizontal						
Resistência Térmica Superficial (m².°C/W)	Interior - Rsi		0.13				Quadro I.3 - pág. I.11
	Exterior - Rse		0.04				Quadro I.3 - pág. I.11
Coeficiente de Transmissão Térmica	U - (W/m².°C)						
	0.48						

Tabela 58 - Coeficiente de transmissão térmica para a parede divisória interior

Paredes Divisórias Interiores							
Constituição	e (m)	λ (W/m.°C)	Rj (m².°C/W)	p (kg/m³)	Cp (J/(kg.K))	Rugosidade	Referência - ITE 50
Placa de gesso cartonado	0.02	0.25	0.08	1150	840	Mediamente Liso	Quadro I.2 - pág. I.7
Caixa-de-ar (perfil metálico) com isolamento térmico	0.12		0.17				Quadro I.4 - pág. I.11
Placa de gesso cartonado	0.02	0.25	0.08	1150	840	Mediamente Liso	Quadro I.2 - pág. I.7
Sentido do Fluxo de Calor	Horizontal						
Resistência Térmica Superficial (m².°C/W)	Interior - Rsi		0.13				Quadro I.3 - pág. I.11
	Interior - Rsi		0.13				Quadro I.3 - pág. I.11
Coeficiente de Transmissão Térmica	U - (W/m².°C)						
	1.69						

Tabela 59 - Coeficiente de transmissão térmica para a laje de pavimento térreo

Laje de pavimento térreo							
Constituição	e (m)	λ (W/m.°C)	R _j (m ² .°C/W)	ρ (kg/m ³)	C _p (J/(kg.K))	Rugosidade	Referência - ITE 50
Acabamento em Soalho de Madeira	0.02	0.23	0.09	810	1200	Mediamente Liso	Quadro I.2 - pág. I.8
Aglomerado de cortiça	0.02	0.07	0.31	500	170	Mediamente Rugoso	Quadro I.2 - pág. I.10
Poliestireno extrudido – XPS	0.04	0.04	1.08			Liso	Quadro I.1 – pág. I.3
Laje de Betão armado	0.25	2.00	0.13	2450	750	Mediamente Rugoso	Quadro I.2 - pág. I.5
Sentido do Fluxo de Calor	Vertical Descendente						
Resistência Térmica Superficial (m ² .°C/W)	Interior - R _{si}		0.17				Quadro I.3 - pág. I.11
	Exterior - R _{se}		0.04				Quadro I.3 - pág. I.11
Coeficiente de Transmissão Térmica	U - (W/m².°C)						
	0.55						

Tabela 60 - Coeficiente de transmissão térmica para a laje de cobertura

Laje de Cobertura horizontal exterior							
Constituição	e (m)	λ (W/m.°C)	R _j (m ² .°C/W)	ρ (kg/m ³)	C _p (J/(kg.K))	Rugosidade	Referência - ITE 50
Godo lavado	0.19	0.70	0.27	1950	810	Mediamente Rugoso	Quadro I.2 - pág. I.9
Betão celular	0.02	0.46	0.04	1050	960	Mediamente Rugoso	Quadro I.2 - pág. I.6
Poliestireno extrudido - XPS	0.03	0.04	0.81			Liso	Quadro I.1 - pag I.3
Argamassa de regularização	0.12	1.30	0.09	1900	900	Mediamente Liso	Quadro I.2 - pag I.7
Laje de Betão armado	0.27	2.00	0.14	2450	750	Mediamente Rugoso	Quadro I.2 - pág. I.5
Caixa-de-ar (não ventilada)	0.24		0.16				Quadro I.4 - pág. I.11
Gesso cartonado	0.02	0.25	0.08	1150	840	Mediamente Liso	Quadro I.2 - pág. I.7
Sentido do Fluxo de Calor	Vertical Ascendente						
Resistência Térmica Superficial (m ² .°C/W)	Interior - R _{si}		0.1				Quadro I.3 - pág. I.11
	Exterior - R _{se}		0.04				Quadro I.3 - pág. I.11
Coeficiente de Transmissão Térmica	U - (W/m².°C)						
	0.59						

