

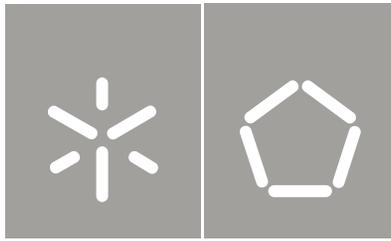


Identificação do tipo e quantidade de
PCM adequado ao clima Português

Daniel da Silva Oliveira

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Daniel da Silva Oliveira

Identificação do tipo e quantidade de
PCM adequado ao clima Português

Tese de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professora Doutora Sandra Monteiro da Silva
Professora Doutora Maria Manuela de Oliveira Guedes
de Almeida

Outubro de 2012

Agradecimentos

Gostaria, sobretudo de agradecer à Professora Sandra Monteiro da Silva que me auxiliou no desenvolvimento desta dissertação, orientando-me de forma irrepreensível de modo a obter o melhor resultado final possível.

Aos meus pais e irmãos que sempre estiveram do meu lado e sempre me apoiaram e ajudaram a percorrer este caminho.

Por fim, à minha namorada, sem ela nada disto seria possível.

Resumo

Tanto a nível europeu como nacional os edifícios destinados à habitação e serviços consomem uma grande parte de toda a energia consumida, apresentando uma tendência crescente, no sentido em que neste momento se caminha para um crescimento acentuado do consumo energético, aumentando desta forma a emissão de gases de efeito de estufa.

É atribuída grande importância à redução dos consumos energéticos nos edifícios e consequentes emissões de dióxido de carbono, tendo-se verificado, nos últimos anos, que esta é cada vez mais uma preocupação nacional e internacional, devendo-se criar medidas no sentido da conservação e armazenamento da energia. A incorporação de materiais de mudança de fase (PCM, do inglês *Phase Change Materials*) nos edifícios torna-se, por isso, numa medida essencial no combate aos elevados níveis de consumo energéticos verificados.

Esta dissertação apresenta um estudo no sentido de incorporar PCM nas soluções construtivas mais usuais em Portugal, adequando-se o uso destes materiais ao clima nacional e o conseguindo-se prever a quais as poupanças energéticas daí inerentes.

Para que então se consiga atingir estes objetivos, numa primeira fase recorreu-se à simulação dinâmica de várias soluções construtivas correntes com inclusão de alguns tipos de PCMs comercializados, concluindo-se qual a solução construtiva e o PCM que melhor se comporta perante o clima da cidade do Porto. Numa segunda fase de simulação usa-se então a solução construtiva em que se verificaram os melhores resultados e aplicando-a a um edifício unifamiliar com sistema de climatização com uma eficiência de 100%, retirando-se daqui as necessidades energéticas para aquecimento (no inverno) e arrefecimento (no verão) do edifício com e sem PCM. Feita uma análise comparativa entre os dois casos conclui-se que o uso de PCM resulta numa poupança energética significativa no inverno e, nas condições testadas, a um acréscimo adicional de energia no verão.

Palavras – Chave: Material de mudança de fase; clima português; *EnergyPlus*; aquecimento; arrefecimento.

Abstract

Both at European and national levels, buildings destined to housing and services consume a great fraction of all the energy consumed, with that consumption presenting a tendency to grow, meaning that at this moment it's going towards a sharp increase in the energetic consumption, leading to an increased emission of greenhouse gases.

It is considered very important to reduce the energy consumption in buildings and its carbon dioxide emissions associated, having been observed in the last years that this is becoming more and more a national and international concern, showing that measures should be taken towards energy conservation and storage. In this sense, the incorporation of phase changing materials (PCM) in buildings turns out to be an essential measure, with a lot of potential regarding the reduction of the high energy consumption currently observed.

This dissertation presents a study that aims to the incorporation of PCM in the construction elements most used in Portugal, adapting the use of these materials to the Portuguese climate, making it possible to predict the resulting savings in energy consumption.

In order to accomplish these goals, in the first phase, a dynamic simulation was performed with the various types of construction elements currently used, with the inclusion of some kinds of commercialized PCMs, thus finding the construction solution with the best behavior when facing the climate found in Porto. In the second phase of simulation, it is used the construction solution with the best results applied to a single-family building with HVAC system with an efficiency of 100%, collecting this way the energy requirements for heating (during winter) and cooling (during summer) the building, with and without PCM. A comparative analysis between the two cases brings us to the conclusion that the use of PCM results in a significant energy saving during the winter, and under the tested conditions, it results in an additional increase of energy during the summer.

Keywords: Phase Change Material (PCM); Portuguese climate; EnergyPlus; heating; cooling.

Índice

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	2
1.2. Objetivos	7
1.3. Estrutura da dissertação	8
2. ESTADO DE ARTE	9
2.1. Caracterização do PCM	10
2.2. Propriedades do PCM	14
2.3. Classificação do PCM	16
2.3.1. PCMs Orgânicos	18
2.3.2. PCMs Inorgânicos	20
2.3.3. Misturas eutéticas	21
2.4. Aplicações em edifícios	22
2.4.1. Sistemas passivos	25
2.4.1.1. Paredes de Trombe	25
2.4.1.2. Placas para paredes e tetos	27
2.4.1.3. Envidraçados	28
2.4.1.4. Persianas ou estores	30
2.4.1.5. Tijolos ou blocos	31
2.4.1.6. Betão	31
2.4.1.7. Pavimentos	32
2.4.2. Sistemas ativos	32
2.5. Encapsulamento de PCM	34
2.5.1. Macroencapsulamento	35
2.5.2. Microencapsulamento	37

2.6. Comercialização de PCM	38
2.7. Casos de estudo	42
3. METODOLOGIA	45
3.1. Simulação	46
3.1.1. Software	46
3.1.2. Procedimento	49
3.2. Edifícios analisados	50
3.2.1. 1ª Fase de simulação	50
3.2.2. 2ª Fase de simulação	52
3.3. Soluções construtivas	55
3.4. PCMs	66
3.4.1. Delta®-Cool 24	68
3.4.2. Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26	71
4. RESULTADOS	75
4.1. 1ª Fase	76
4.1.1. Sem PCM	76
4.1.2. Delta-Cool 24®	80
4.1.2.1. Parede exterior em betão armado	80
4.1.2.2. Parede exterior dupla em tijolo cerâmico	84
4.1.2.3. Parede exterior simples em tijolo cerâmico	87
4.1.3. Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26	90
4.1.3.1. Parede exterior em betão armado	90
4.1.3.2. Parede exterior dupla em tijolo cerâmico	94
4.1.3.3. Parede exterior simples em tijolo cerâmico	98
4.1.4. Melhor solução	101

4.2. 2ª Fase	104
4.2.1.Arrefecimento	104
4.2.2.Aquecimento	106
4.2.3.Necessidades energéticas anuais e custos associados	107
5. CONCLUSÕES	109
5.1. Conclusões gerais	110
5.2. Perspetivas futuras	111
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

Índice de Figuras

Figura 1 - Ciclo da Energia [3].	3
Figura 2 - Capacidade de armazenamento de calor dos diferentes materiais [12].	12
Figura 3 - Variações de temperatura verificadas no uso de PCM em edifícios [13].	13
Figura 4 - Esquema de classificação de PCM [14].	17
Figura 5 - Estrutura de uma parafina [16].	19
Figura 6 - Formas de apresentação do PCM [21].	24
Figura 7 - Funcionamento da parede de Trombe [23].	26
Figura 8 - Aspeto do vidro durante solidificação do PCM [25].	30
Figura 9 - Incorporação de PCM em blocos ou tijolos [17].	31
Figura 10 - Encapsulamento de PCM através de nódulos [14].	36
Figura 11 - PCM comercializado [14].	36
Figura 12 - Microencapsulamento de PCM pela empresa BASF [30].	37
Figura 13 - Imagem microscópica de PCM microencapsulado [30].	38
Figura 14 - PCMs comercializados pela empresa Rubitherm GmbH [40].	40
Figura 15 - PCM colocado em tetos interiores [41].	40
Figura 16 - Elementos construtivos com PCM integrado [40].	42
Figura 17 - Edifícios com inclusão de Micronal® PCM SmartBoard [16].	42
Figura 18 - Aplicação de GLASSXcrystal® em vidros da fachada sul [40].	43
Figura 19 - Geometria do edifício a simular na primeira fase [46].	51
Figura 20 - Edifício simulado na segunda fase, visto em planta.	53
Figura 21 - Fachadas sul e este do edifício.	54
Figura 22 - Fachadas norte e oeste do edifício.	54
Figura 23 - Parede exterior simples de tijolo cerâmico, com sistema de isolamento térmico pelo exterior.	57
Figura 24 - Parede exterior dupla, com isolamento térmico no interior da caixa de ar.	57
Figura 25 - Parede exterior em betão armado, com sistema de isolamento térmico pelo exterior.	58
Figura 26 - Laje em betão armado.	58
Figura 27 - Vão envidraçado com caixa de ar e estore.	59
Figura 28 - Pavimento, em betão armado e soalho.	59

Figura 29 - Paredes divisórias interiores.	59
Figura 30 - Solução para portas interiores e exteriores.	60
Figura 31 - Curva do calor específico do PCM Delta®-Cool 24.	69
Figura 32 - Curva da entalpia de fusão do Delta®-Cool 24.	70
Figura 33 - Curva do calor específico do Micronal® PCM SmartBoard 23/26.	72
Figura 34 - Curva da entalpia de fusão do Micronal® PCM SmartBoard 23/26.	72
Figura 35 - Temperaturas no interior do edifício para as três soluções construtivas, no dia mais quente.	76
Figura 36 - Temperaturas no interior do edifício para as três soluções construtivas, no dia mais frio.	77
Figura 37 - Temperaturas interiores para as três soluções construtivas com elementos de sombreamento, no dia mais quente.	78
Figura 38 - Temperaturas, para as três soluções construtivas, com estores e para o dia mais frio.	79
Figura 39 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24® no edifício em betão, para o dia mais quente.	81
Figura 40 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24® no edifício em betão, para o dia mais frio.	82
Figura 41 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24® em 2 camadas, no edifício em betão, para o dia mais quente.	83
Figura 42 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24® em 2 camadas, no edifício em betão, para o dia mais frio.	83
Figura 43 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24®, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.	84
Figura 44 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24®, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.	85
Figura 45 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24®, em 2 camadas, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.	86
Figura 46 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24®, em 2 camadas, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.	87
Figura 47 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24®, no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.	87

Figura 48 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24 [®] , no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.....	88
Figura 49 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24 [®] em 2 camadas, no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.....	89
Figura 50 - Temperaturas interiores com Delta-Cool 24 [®] em 2 camadas, no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.....	90
Figura 51 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] no edifício de betão, para o dia mais quente.	91
Figura 52 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] no edifício de betão, para o dia mais frio.	92
Figura 53 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] em 2 camadas, no edifício de betão, para o dia mais quente.....	93
Figura 54 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] em 2 camadas, no edifício de betão, para o dia mais frio.....	94
Figura 55 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.....	95
Figura 56 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.....	95
Figura 57 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] em 2 camadas, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.	96
Figura 58 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] em 2 camadas, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.	97
Figura 59 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.....	98
Figura 60 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] no edifício de parede simples com tijolo cerâmico, para o dia mais frio.....	99
Figura 61 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] em 2 camadas, no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.	100
Figura 62 - Temperaturas interiores com Micronal [®] SmartBoard [™] em 2 camadas, no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.	101
Figura 63 - Necessidades energéticas para o edifício sem e com PCM, no dia mais quente.	105
Figura 64 - Necessidades energéticas para o edifício com e sem PCM, no dia mais frio.	106

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Temperaturas de fusão e entalpia de fusão de PCMs comercializados [15].	17
Tabela 2 - Compostos orgânicos de PCM [9].	19
Tabela 3 - Compostos inorgânicos de PCM [9].	21
Tabela 4 - Compostos orgânicos e inorgânicos em misturas eutéticas de PCM [9].	22
Tabela 5 - Propriedades do revestimento com PCM [24].	28
Tabela 6 - PCM comercializado [32].	39
Tabela 7 - Propriedades de PCMs da marca Micronal® [10].	41
Tabela 8 - Comparação das características dos programas de simulação [46].	47
Tabela 9 - Cálculo de coeficiente de transmissão térmica das soluções.	56
Tabela 10 - Propriedades do sistema de isolamento térmico pelo exterior (4cm) [51].	61
Tabela 11 - Propriedades do tijolo cerâmico (22cm) [52].	61
Tabela 12 - Propriedades da caixa de ar em paredes [53].	61
Tabela 13 - Propriedades do gesso cartonado [53].	61
Tabela 14 - Propriedades do tijolo cerâmico (15cm) [52].	62
Tabela 15 - Propriedades do isolamento térmico no interior da caixa de ar [54].	62
Tabela 16 - Propriedades do tijolo cerâmico (11cm) [52].	62
Tabela 17 - Propriedades do isolamento térmico pelo exterior (6cm) [51].	63
Tabela 18 - Propriedades da parede de betão [53].	63
Tabela 19 - Propriedades da caixa de ar em tetos [53].	63
Tabela 20 - Propriedades do vidro (6mm) [53].	64
Tabela 21 - Propriedades da caixa de ar no vão envidraçado [53].	64
Tabela 22 - Propriedades do estore [53].	64
Tabela 23 - Propriedades do soalho (13mm) [53].	65
Tabela 24 - Propriedades da porta em madeira maciça (4cm) [53].	65
Tabela 25 - Propriedades da superfície metálica das portas exteriores [53, 55].	65
Tabela 26 - Propriedades do preenchimento das portas exteriores [53, 55].	66
Tabela 27 - Ficha técnica do Delta®-Cool 24 [41].	69
Tabela 28 - Temperatura e entalpia de fusão a inserir no <i>EnergyPlus</i> (Delta®-Cool 24).	70
Tabela 29 - Propriedades do Micronal® PCM SmartBoard [57].	71

Tabela 30 - Temperatura e entalpia de fusão a introduzir no <i>EnergyPlus</i> (Micronal® PCM SmartBoard 23/26).....	73
Tabela 31 - Temperaturas ambientes interiores resultantes, com e sem PCM.....	102
Tabela 32 - Custos das soluções construtivas [58, 59]......	103
Tabela 33 - Gastos energéticos verificados nos edifícios com e sem PCM.....	107

Abreviaturas e símbolos

PCM	Material de mudança de fase (Phase Change Materials)
RCCTE	Regulamento características de comportamento térmico
RSECE	Regulamento dos sistemas energéticos de climatização de edifícios
SCE	Sistema de certificação energética
ADENE	Agência para a energia
UE-15	União europeia a 15
°C	Grau centígrado
°F	Grau Fahrenheit
°K	Grau Kelvin
CO ₂	Dióxido de carbono
kg	Quilograma
m	Metro
mm	Milímetro
cm	Centímetro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
W	Watt
kWh	Quilowatt-hora
J	Joule
kJ	Quilojoule
€	Euro (moeda)
μm	Micrometro

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento

Os edifícios que constituem o setor residencial e de serviços na União Europeia, consomem mais de 40% do consumo final de energia da União Europeia, encontrando-se em crescimento. Esta tendência deverá acentuar o consumo de energia e, por conseguinte, as correspondentes emissões de gases de efeito de estufa para a atmosfera. As medidas destinadas à otimização do desempenho energético dos edifícios deverão ter em conta as condições climáticas dos respetivos locais em estudo, bem como o ambiente interior e a rentabilidade económica [1].

Em Portugal, cada vez mais há que ter em conta a crescente escassez de fontes de energia no país, sendo grande parte dessa energia importada. Portugal produz apenas 15% da energia que consome, tornando-o num dos países mais dependentes da utilização de energias fósseis importadas (nomeadamente carvão, petróleo e gás natural) [2]. Associada a esta escassez de energia crescente no país deve ter-se em consideração os aspetos económicos e o impacto ambiental associado à produção de energias não renováveis ou convencionais [3].

Em termos sociais, as pessoas passam 80% do seu tempo em edifícios. Os edifícios de serviços e habitacionais representam 22% do consumo global de energia em Portugal, um valor que tem aumentado 4% ao ano [2]. Grande parte dessa energia é usada para aquecimento e arrefecimento dos edifícios e estas situações têm consequências diretas na economia uma vez que o custo dos combustíveis fósseis importados encarece a produção de bens e serviços em território nacional [3].

Antes do seu resultado final, a energia sofre um longo percurso de transformação, sendo uma parte desperdiçada e outra, que chega ao consumidor, nem sempre é devidamente aproveitada. A Figura 1 esquematiza todo o processo de produção de energia, englobando as fontes de energia renováveis e não renováveis mais usadas [3].

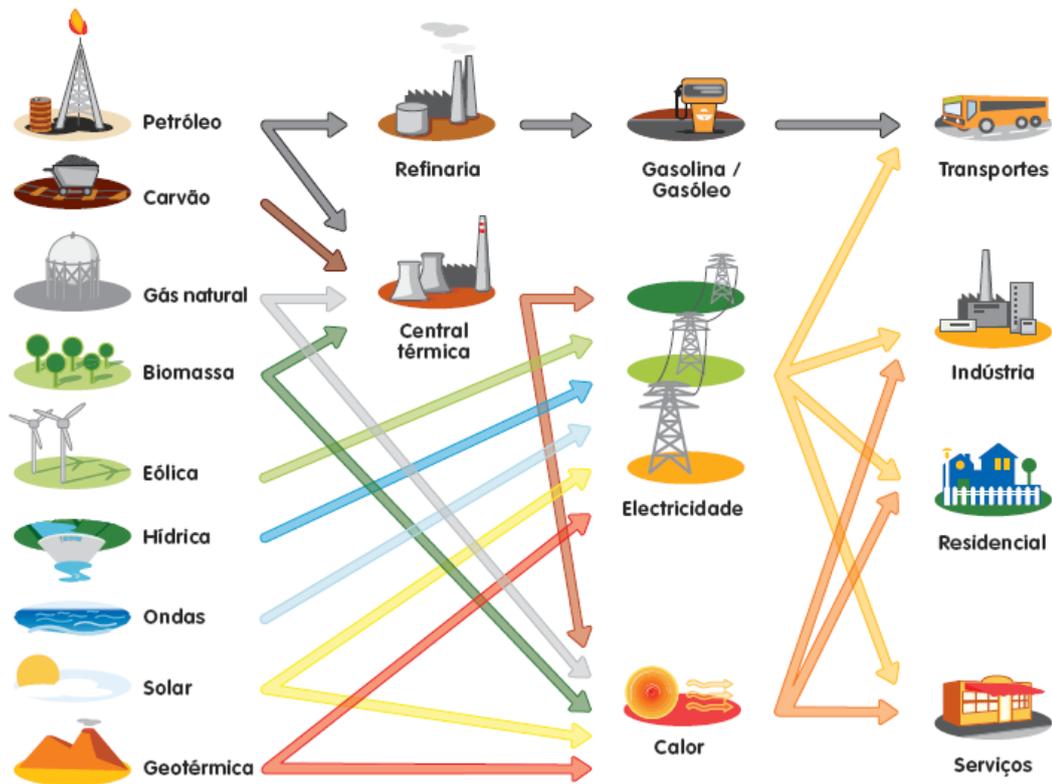


Figura 1 – Ciclo da Energia [3].

No país existem dois regulamentos principais para certificação energética de edifícios, desde 2006 (entrou em vigor em 1991, sendo revisto em 2006) está em vigor o novo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE, decreto de lei nº 80/2006, destinado a edifícios residenciais) que após um arranque gradual ao longo dos anos, com otimização do mesmo, neste momento constitui uma excelente base de trabalho. Em 2006 (entrou em vigor em 1998, revisto em 2006) foi publicado o Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE, decreto de lei nº 79/2006, destinado sobretudo a edifícios de serviços) tratando-se de uma ferramenta que visa melhorar a eficiência energética dos edifícios com sistemas de climatização. A partir de 1 de janeiro de 2009 todos os edifícios (quer se trate de novos edifícios, grandes, pequenos, ou até mesmo reabilitações) necessitam de possuir um Sistema de Certificação Energética (SCE, decreto de lei nº 78/2006) que os classifique dentro de 9 classes (classes A+, A, B, B-, C, D, E, F e G), sendo esta gestão feita pela entidade gestora ADENE (Agência para a energia). É neste enquadramento, que o Ministério da Economia toma a iniciativa de lançar o Programa Nacional para a Eficiência Energética nos Edifícios (P3E) [4, 5].

Entre 1997 e 2007 a evolução da intensidade energética em Portugal divergiu significativamente da média europeia. A economia portuguesa caracteriza-se por possuir uma intensidade energética e carbónica elevadas e uma dependência muito elevada da importação no que concerne ao consumo de energia primária (cerca de 85% da energia total necessária, com forte predominância no petróleo). Na economia portuguesa, com baixa eficiência energética e fortemente dependente da importação de energia primária (em especial do petróleo e gás natural) o equilíbrio externo é fortemente condicionada pela variação do preço do petróleo. Por isso, nos últimos anos, com a subida do preço do petróleo verifica-se uma perda de competitividade das empresas portuguesas [6].

A nível ambiental, a emissão excessiva de dióxido de carbono (CO₂) e de outros gases com efeito de estufa é uma das principais consequências da falta de eficiência no consumo de energia obtida da queima de combustíveis fósseis. De acordo com o Protocolo de Quioto, os países da união europeia (UE-15) comprometeram-se a reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 8% por comparação com os níveis de 1990. Caso as metas propostas não sejam atingidas, estes países poderão pagar coimas pesadas e o seu prestígio ambiental será diminuído [6].

A ameaça de esgotamento das reservas de combustíveis fósseis, a pressão dos resultados económicos e as preocupações ambientais levam a sociedade a encarar a eficiência energética como uma das soluções para equilibrar o modelo de consumo energético existente. Utilizar de forma responsável a energia trata-se de uma forma eficaz de garantir um melhor futuro para as gerações vindouras [7].

Todas as questões relacionadas com a eficiência energética dos edifícios ganham cada vez mais uma acentuada importância para a sociedade, uma vez que isso se reflete diretamente sobre a fatura energética a pagar pelo consumidor, tornando-se necessário obter o máximo de reduções no consumo energético possível.

No setor de construção existe uma diversidade de aspetos que contribuem para desempenho energético dos edifícios e que quando tidos em conta, pode-se obter significativas poupanças energéticas. Entre estes aspetos podem-se identificar [7]:

- Isolamento: no interior da caixa de ar ou no exterior, deverá ser dimensionado de modo a obter o máximo de poupança energética;
- Climatização: a temperatura interior dos edifícios deverá ser mantida entre os 18°C no inverno e 25°C no verão (20°C no inverno e 25°C no verão, de acordo com o RCCTE de 2006);
- Iluminação: responsável por 10 a 15% do consumo elétrico;
- Eletrodomésticos: têm grande influência nos consumos de energia de um edifício;
- Localização e orientação do edifício: importante tendo em conta os ganhos solares;
- Janelas e sombreamento: elementos críticos para o conforto e desempenho térmico do edifício, intrinsecamente ligado aos ganhos solares;
- Qualidade: a qualidade da construção possui igualmente um papel preponderante na fatura energética;
- Energias renováveis: enorme importância nos consumos energéticos de um edifício, principalmente nos sistemas de Águas Quentes Sanitárias presentes no mesmo.

É por isso de elevada importância ter-se em conta as possibilidades de redução dos consumos energéticos necessários para garantir o conforto e bem-estar dos ocupantes de um edifício. Este deverá ser o princípio base para o estudo da aplicação de materiais de mudança de fase ou *Phase Change Materials* (PCM) nos edifícios em Portugal, atendendo-se, para isso, à elevada capacidade de armazenamento de calor destes materiais, assim como a libertação do mesmo quando inseridos em ambientes com temperaturas mais baixas.

A incorporação de materiais de mudança de fase nos edifícios tem como principais finalidades a redução do seu consumo energético, alterando o período de consumo (à noite o custo da energia é mais baixo), assim como garantir o conforto térmico do edifício, reduzindo a sua amplitude térmica interior. Estes objetivos podem ser alcançados através do aumento da inércia térmica interior dos edifícios.

A inércia térmica interior caracteriza a resistência dos sistemas térmicos implementados à alteração do seu estado termodinâmico. Tendo em conta o caráter periódico das tentativas de alteração do estado termodinâmico a que o sistema térmico está sujeito, a resistência do mesmo à alteração do seu estado traduz-se por um amortecimento das ondas de calor e um desfasamento entre solicitações e consequente resposta do edifício. A uma elevada capacidade de armazenamento de calor de um material (como o PCM, por exemplo), associa-se uma maior facilidade de absorção das solicitações sem alteração significativa do seu estado termodinâmico [8].

Assim, conclui-se que um edifício com uma inércia térmica forte tem maior capacidade a armazenar a energia recolhida por períodos mais longos e amenizar os efeitos das variações climáticas na região em que o material em causa se insere [8].

Os PCMs garantem uma elevada inércia térmica do edifício em que se inserem devido à sua elevada capacidade de armazenamento de calor, e à facilidade com que estes libertam o calor armazenado na presença de temperaturas inferiores. Os PCMs têm a capacidade de contribuir para o conforto térmico dos edifícios sem que para isso seja necessário o aumento dos consumos energéticos inerentes ou gastos adicionais de energia em climatização do espaço. Permitem ainda a redução da amplitude térmica, sem um grande aumento do peso próprio das soluções construtivas ou alterações consideráveis na geometria e resistência da superestrutura do edifício.

A melhoria do desempenho energético de um edifício de habitação terá como consequência uma poupança de energia necessária para climatização, garantindo as mesmas condições de conforto no interior do edifício. Para se garantir uma inércia térmica forte, assegurando o conforto térmico do edifício e tendo em consideração todas as vantagens associadas ao uso de PCMs, o objetivo deste trabalho é estudar a incorporação de PCMs em elementos construtivos mais comuns em Portugal, estudando a aplicação destes elementos na região do Porto.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é contribuir para o conhecimento do desempenho térmico das soluções construtivas mais comuns em Portugal, com a incorporação de PCM nestas, e quando aplicadas em edifícios integrados no clima Português.

Será acima de tudo importante obter-se, através de simulações, a identificação do tipo e quantidade de PCM que se deverá usar em Portugal. Para este estudo foram adotados os dados climáticos já existentes da região do Porto.

Apesar de existirem vários trabalhos que se debruçam sobre o uso de PCM em edifícios, nenhum se refere às características do PCM a usar em território Português.

Com este trabalho pretende-se conhecer as quantidades e tipo de PCM mais adequado a Portugal, tendo em conta o melhoramento do desempenho térmico dos edifícios nacionais. De forma a obter-se os resultados finais desejados realizou-se o estudo de várias hipóteses de colocação de PCMs num edifício (com uma geometria simples para ser possível analisar os resultados mais rigorosamente), comparando os resultados obtidos para os PCMs estudados. Numa fase posterior, usando a melhor solução construtiva com PCM, conseguida a partir das simulações efetuadas, pretende-se perceber quais as poupanças energéticas que se pode obter num edifício com a inclusão de PCM.

O estudo foi realizado através da previsão do desempenho térmico do edifício por simulação dinâmica usando o *EnergyPlus*, para a cidade do Porto, sendo estudadas as soluções construtivas mais comuns em Portugal.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos.

Capítulo 1 – Introdução: Apresenta-se o enquadramento do trabalho face aos consumos energéticos dos edifícios em Portugal, e o porquê da necessidade de se conseguir poupanças energéticas nos edifícios. Neste capítulo são ainda apresentados os objetivos do trabalho e a estrutura da dissertação.

Capítulo 2 – Estado de Arte: É apresentado o desenvolvimento teórico do conceito de PCM (caracterização, classificação e encapsulamento), quais os principais PCMs comercializados e os seus métodos de aplicação nos edifícios.

Capítulo 3 – Metodologia: É apresentado o *software* de simulação dinâmica utilizado neste estudo e suas características. São também apresentados neste capítulo os materiais, suas propriedades e procedimentos a ter em conta para a simulação realizada.

Capítulo 4 – Resultados: Corresponde à apresentação, interpretação e análise comparativa dos resultados obtidos no processo de simulação.

Capítulo 5 – Conclusões: Corresponde à apresentação das conclusões do estudo realizado relativas ao uso de PCM nos edifícios e todos os aspetos daí inerentes.

São ainda apresentadas as respetivas referências bibliográficas.

2. ESTADO DE ARTE

2.1. Caracterização do PCM

O armazenamento de calor é feito, nos edifícios, por meios naturais apenas. No entanto, o seu aquecimento e arrefecimento poderá ser feito por meios naturais ou mecânicos recorrendo, por exemplo, a sistemas de climatização que podem servir para aquecimento ou arrefecimento do edifício.

As paredes, pavimentos ou tetos interiores são os principais intervenientes no processo de armazenamento de calor (através de ganhos diretos ou indiretos) e distribuição da energia térmica acumulada. Os principais responsáveis por estes processos são os vários materiais constituintes das soluções construtivas, assim como o clima do local em questão. Em relação ao transporte, armazenamento e distribuição de energia térmica de elementos construtivos e acumulação de energia por parte dos mesmos, importa referir o uso de PCM como constituinte das paredes exteriores, pavimentos e tetos, uma vez que o PCM tem a capacidade de armazenar muito mais calor por unidade de volume que qualquer outro material (com o armazenamento de calor e sua libertação a ocorrer isotermicamente) [9].

Os PCMs são materiais de mudança de fase com armazenamento de calor latente, não se manifestando exteriormente, estando associados a estes materiais, principalmente, processos de transição do estado sólido para o estado líquido, uma vez que esta é a principal transição usada pelos PCMs nos processos de armazenamento de calor devido às pequenas alterações de volume associadas, denominando-se o processo por fusão, assim como o inverso, denominando-se por solidificação. A cada um destes processos está associada uma quantidade de energia, geralmente denominada por entalpia ou simplesmente calor latente associado ao processo [10].

O PCM pode ser definido como um material com grande capacidade de alteração do seu estado físico para um dado intervalo de temperatura, absorvendo ou libertando energia para o meio envolvente. Durante o processo de mudança de fase a temperatura do material mantém-se praticamente constante, sendo que uma vez completa o aquecimento contínuo resulta no aumento da temperatura, tal como o arrefecimento resulta na diminuição da

temperatura verificada, sendo esta propriedade do material denominada por calor sensível [10].

Estes materiais usam ligações químicas para armazenamento e libertação de calor, verificando-se que a transferência de energia térmica ocorre quando o PCM sofre uma mudança de sólido para líquido ou de líquido para sólido. A isto chama-se a mudança de fase do PCM. Os PCMs têm uma temperatura de fusão que poderá variar (na maior parte dos PCMs, podendo divergir) entre os 20 e os 32°C. Prevê-se que a temperatura mais usual, dependendo, no entanto, do tipo de PCM, perante a qual se verifica a mudança de fase do material situa-se próximo do valor de 26°C [11].

Um grande número de PCMs são conhecidos por terem a capacidade de fundir perante uma temperatura ambiente ou calor de fusão que consta no intervalo previsto (entre 20°C a 32°C, dependendo de cada PCM), contudo, para colocação deste material como componente de armazenamento latente de calor, de uma dada solução construtiva, o PCM deve exibir certas propriedades termodinâmicas, cinéticas ou químicas [9].

O PCM pode ser usado em edifícios, em situações de armazenamento ativo ou passivo de calor, para arrefecimento ou aquecimento dos mesmos. O armazenamento ativo de energia está associado ao uso de elementos separados termicamente do edifício, não funcionando passivamente, como é o caso dos coletores solares térmicos, por exemplo [9].

Contudo, o PCM a colocar nas respetivas soluções deverá possuir algumas propriedades (termodinâmicas, cinéticas ou químicas) que contribuam para aspetos necessários ao bom funcionamento do PCM, tais como [2]:

- Temperatura de mudança de fase adequada;
- Elevado calor latente;
- Boa transferência de calor;
- Equilíbrio de fases favorável;
- Elevada densidade;
- Pequena variação de volume;

- Baixa pressão de vapor;
- Não possuir sub arrefecimento.

Em comparação com materiais convencionais que possuem igualmente capacidades de armazenamento de calor (nestes casos apenas armazenamento por calor sensível) os materiais de mudança de fase têm a capacidade de absorver e libertar energia a uma temperatura constante, armazenando cerca de 5 a 14 vezes mais calor por unidade de volume do que materiais de armazenamento por calor sensível tradicionais como o caso da pedra ou água, por exemplo [2].

Através da análise do gráfico apresentado na Figura 2, pode verificar-se que o PCM tem uma maior capacidade de armazenamento de calor em comparação com os materiais tradicionalmente presentes na construção civil.

A Figura 2 mostra que o PCM terá uma capacidade de armazenamento de calor de cerca de 55 kWh/m³. Este valor é bastante superior aos valores verificados para outros materiais mais comuns como a água, pedra ou madeira, com capacidades de armazenamento de calor de 20, 10 ou 8 kWh/m³, respetivamente.

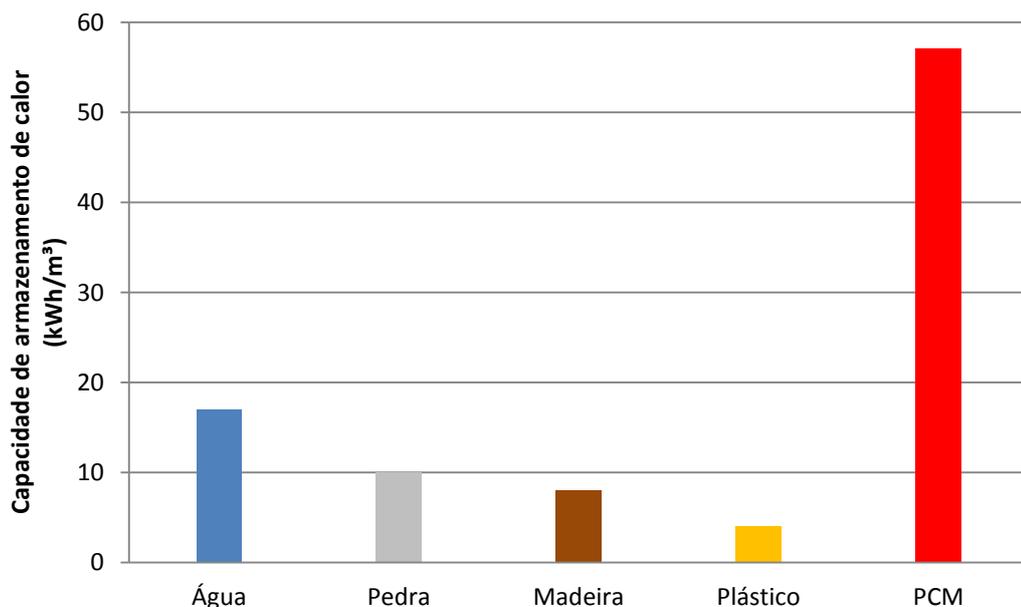


Figura 2 - Capacidade de armazenamento de calor de alguns materiais [adaptada de 12].

Com o uso de PCMs em edifícios, nomeadamente nas soluções construtivas interiores dos mesmos, prevê-se que tal possa resultar numa considerável poupança energética, traduzindo-se, possivelmente, em alguns benefícios económicos.

O uso de materiais de mudança de fase nestas condições leva à necessidade de um uso menos intensivo ou durante um menor período de tempo de sistemas mecânicos de aquecimento ou arrefecimento, tornando mais eficientes as unidades instaladas. Em alguns casos poderá mesmo eliminar-se o uso de algumas unidades dos respetivos sistemas de climatização [12].

Prevê-se que seja possível poupar cerca de 30% de toda a energia consumida através do uso de materiais de mudança de fase nos edifícios [13]. A Figura 3 mostra as variações de temperatura associadas a alguns PCMs, por comparação de temperaturas e respetivas variações verificadas em ambientes interiores e exteriores.

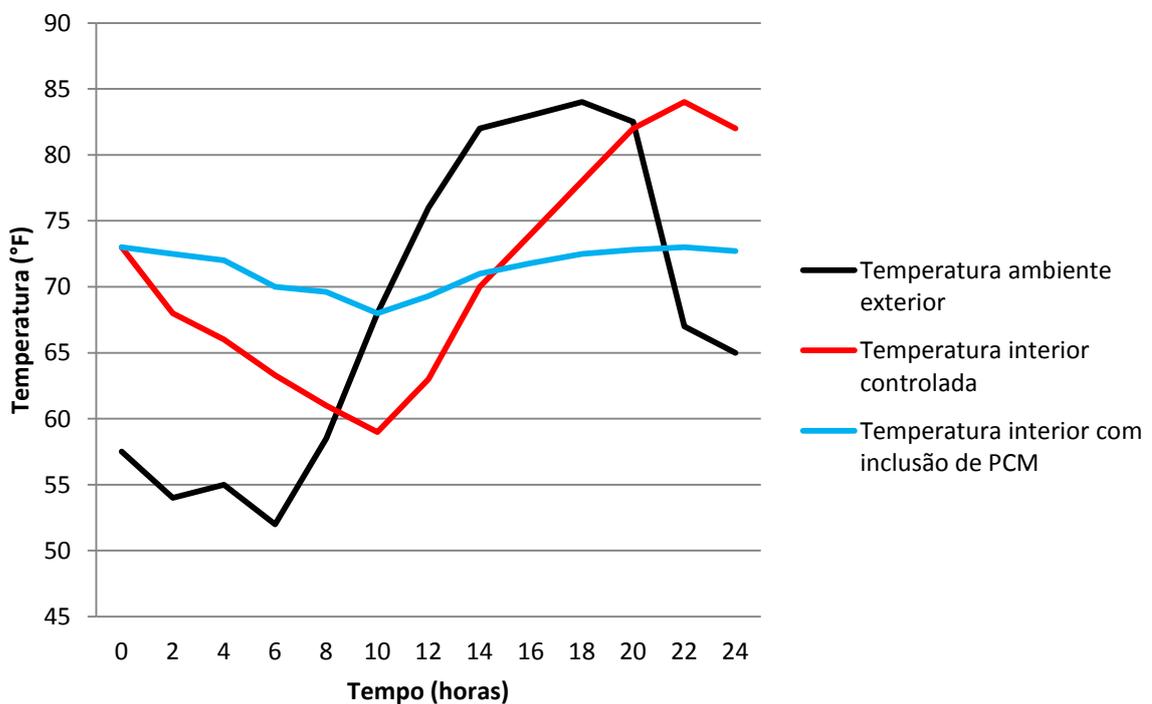


Figura 3 - Variações de temperatura verificadas em edifícios com PCM [adaptado de 13].

Pode-se então averiguar que a temperatura ambiente registada varia entre os 53 a 88°F, o que correspondente a um intervalo entre 11,6 a 31,1°C, verificando-se uma variação de temperatura de 19,5°C no tempo de 24 horas estudado (Figura 3).

A temperatura controlada, verificada no edifício, varia entre 58 e 84°F, correspondendo a um intervalo compreendido entre 14,4 e 28,8°C, obtendo-se assim temperaturas mais moderadas e uma amplitude térmica menor, de 14,4°C.

No estudo da aplicação de PCM verifica-se uma amplitude térmica no interior do edifício inferior em comparação com a gama de temperaturas anteriores, cerca de 2,2°C, para um intervalo de temperaturas entre 20,5 e 22,7°C, mostrando todo o potencial de armazenamento, libertação e consequente estabilização da temperatura interior, traduzindo-se em um maior conforto térmico interior do edifício [13].

2.2. Propriedades do PCM

Como principais propriedades dos materiais de mudança de fase, no geral, podem-se definir algumas características importantes como [18]:

- Elevado calor latente de fusão, por unidade de massa;
- Elevado poder de armazenamento de calor, evitando sub aquecimento;
- Alta condutibilidade térmica, sendo por isso o gradiente de temperatura necessário para armazenamento de calor pequeno;
- Alta densidade;
- Ponto de fusão num intervalo de temperaturas desejado;
- Não associada a decomposição química, sendo por isso assegurado um elevado tempo de vida;
- São materiais não corrosivos para a construção.

Em relação às suas principais vantagens e desvantagens dos PCMs, no geral, conseguem-se identificar as que se apresentam a seguir [14]:

- Vantagens:
 - Compostos não corrosivos;
 - Baixo, ou sem sub arrefecimento;
 - Elevada estabilidade química e física.
- Desvantagens:
 - Baixa entalpia de fusão;
 - Baixa condutibilidade térmica;
 - São inflamáveis (aplica-se a PCMs orgânicos).

Os PCMs possuem propriedades químicas, termofísicas e cinéticas. Identificam-se nos materiais de mudança de fase em geral as seguintes propriedades termofísicas [9]:

- i. Temperatura de fusão num intervalo de tempo desejado;
- ii. 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;
- iii. Elevado calor específico para fornecer armazenamento de calor adicional significativo;
- iv. Alta condutibilidade térmica das fases sólidas e líquidas auxiliando o armazenamento e libertação de energia nos sistemas de armazenamento de calor;
- v. Pequena alteração de volume na mudança de fase, e pequena pressão de vapor na temperatura de operação;
- vi. Fusão congruente na mudança de fase para uma capacidade de armazenamento constante.

Para estes materiais de mudança de fase pode-se identificar as seguintes propriedades cinéticas [9]:

- i. Alta taxa de nucleação para evitar sub arrefecimento na fase líquida;
- ii. 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.

Identificam-se, nos PCMs, as seguintes características químicas [9]:

- i. Ciclo reversível de solidificação-fusão;
- ii. Sem degradação após um elevado número de ciclos;
- iii. Não corrói os materiais de construção em que está presente;
- iv. Não são, em geral, um material tóxico, inflamável (apenas PCMs inorgânicos) ou explosivo.

Os materiais de mudança de fase caracterizam-se por terem a capacidade de serem aplicados em revestimentos interiores de edifícios, conferindo propriedades térmicas às argamassas de revestimento ou regularização em que se incorporam.

No entanto, quando se trata de incorporação de PCMs microencapsulados em argamassas de revestimento, deve-se ter em conta que uma pequena quantidade de PCM pode não ser suficiente para conferir à argamassa onde é incorporado as características térmicas desejadas. Uma grande quantidade poderá levar a uma significativa perda de resistência mecânica da argamassa [12].

2.3. Classificação do PCM

Em geral, os PCMs podem ser classificados em três tipos principais: como orgânicos, inorgânicos ou misturas eutéticas. Destes tipos de materiais dividem-se ainda como parafínicos e não parafínicos os compostos orgânicos. Os compostos inorgânicos dividem-se em sais hidratados e metálicos [10].

A Figura 4 esquematiza a classificação dos materiais de mudança de fase, com todas as divisões e sub divisões ou sub classificações associadas aos PCMs orgânicos e inorgânicos.



Figura 4 - Esquema de classificação de PCM [adaptado de 14].

Na Tabela 1, apresentam-se as temperaturas de fusão e entalpia de fusão (energia necessária para o processo de fusão) de alguns materiais de mudança de fase comercializados, considerando a classificações descritas nos parágrafos anteriores, divididos por ceras, parafinas, sais hidratados e misturas entre sais.

Tabela 1 - Temperaturas de fusão e entalpia de fusão de PCMs comercializados [15].

Nome do PCM	Tipo de produto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Astorstat HA17	Parafinas e ceras	21,7-22,8	-
Astorstat HA18	Parafinas e ceras	27,2-28,3	-
RT26	Parafina	24,0-26,0	232,0
RT27	Sal hidratado	28,0	206,0
Climsel C23	Sal hidratado	23,0	148,0
Climsel C24	Sal hidratado	24,0	108,0
STL27	Sal hidratado	27,0	213,0
S27	Sal hidratado	29,0	207,0
TH29	Sal hidratado	22,0-25,0	188,0
E23	Mistura de solução eutética não-tóxica	23,0	155,0

Por análise da Tabela 1 verifica-se que os compostos orgânicos são os que possuem menores temperaturas de fusão, nomeadamente para o caso das ceras ou parafinas, tendo estas uma temperatura de fusão situada num intervalo compreendido entre os 21,7 e 22,8°C.

São também as parafinas que possuem as maiores capacidades de armazenamento térmico, absorvendo valores de 206 ou 232 kJ/kg de energia durante o processo de fusão, apresentando-se por isso como o material mais vantajoso devido à sua maior capacidade de absorção em comparação com outros PCMs.

2.3.1. PCMs Orgânicos

Os PCMs orgânicos são, normalmente, baseados em parafinas ou ácidos gordos. Estes têm uma temperatura de fusão diretamente relacionada com o tamanho da cadeia, aumentando à medida que aumenta o número de átomos de carbono (e hidrogénio, caso possua) [10].

O PCM orgânico é quimicamente mais estável que os PCMs inorgânicos e têm por isso mais aplicações bem sucedidas. No entanto possuem desvantagens como é o fato de poderem ser inflamáveis, ou de produzirem fumos perigosos durante o processo de combustão. Pode ainda acontecer, sendo apesar de tudo pouco provável, uma oxidação térmica ao longo do tempo e um aumento de volume apreciável [10].

Em geral são usados PCMs orgânicos tendo em vista o melhoramento do conforto térmico dos edifícios, estando o seu ponto de fusão no intervalo compreendido entre 19 e 32°C. Juntamente com a comparação do ponto de fusão das substâncias orgânicas usadas em PCM, na Tabela 2 compara-se ainda a entalpia de fusão ou capacidade de armazenamento térmico dos vários PCMs orgânicos [9].

Tabela 2 - Compostos orgânicos de PCM [9].

Composto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Estearato de butila	19,0	140,0
Parafina C ₁₆ - C ₁₈	20,0-22,0	152,0
Ácido cáprico-láurico	21,0	143,0
Sabacate de dimetil	21,0	120,0
Poliglicol E 600	22,0	127,2
Parafina C ₁₃ - C ₂₄	22,0-24,0	189,0
(34% de ácido mirístico + 66% de ácido cáprico)	24,0	147,7
1 - Dodecanol	26,0	200,0
Parafina C ₁₈ (45 a 55%)	28,0	244,0
Estearato de vinil	27,0-29,0	122,0
Ácido cáprico	32,0	152,7

Os PCMs mais comuns são as ceras e parafínicas, tratando-se de materiais orgânicos obtidos por refinação do crude ou obtidos sinteticamente. A fórmula química geral é C_nH_{2n+2}. A Figura 5 exemplifica a ligação atômica deste tipo de material.

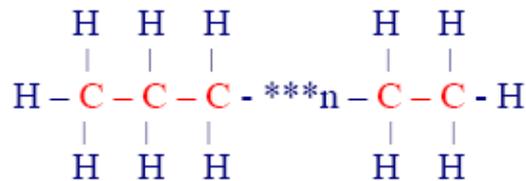


Figura 5 - Estrutura de uma parafina [16].

A temperatura de fusão das parafinas varia de acordo com o número de átomos de carbono que possui, obtendo diferentes designações, podendo ser designados por hexadecano, heptadecano, octadecano, nonadecano, eicosano e heneicosano, para uma composição composta por 16, 17, 18, 19, 20 ou 21 átomos de carbono, respetivamente [10].

As parafinas puras contêm geralmente um número de átomos de carbono que varia entre 14 a 40 átomos, enquanto que as ceras parafínicas possuem geralmente entre 8 a 15 átomos de carbono. Para além dos átomos de carbono, estes compostos orgânicos possuem por vezes, também, átomos de hidrogénio [10].

Os PCMs orgânicos, nomeadamente as parafinas, são os materiais que possuem as maiores capacidades de armazenamento de calor e mais baixas temperaturas de fusão, tal como consta na Tabela 1. Este tipo de PCM será o mais vantajoso para aplicação em habitações ou edifícios [10].

Os Ácidos gordos são PCMs orgânicos caracterizados pela fórmula química $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$, têm propriedades bastante idênticas às das parafinas. Nestes materiais distingue-se a vantagem de possuírem mudanças de fase mais nítidas, mudando de fase com maior facilidade e perante temperaturas de fusão inferiores. Em contrapartida, como desvantagem, têm um custo duas ou três vezes superiores ao das parafinas e são materiais ligeiramente corrosivos [17].

Alguns ácidos gordos possuem temperaturas de fusão baixas, sendo que o fato de serem um material desenvolvido a partir de uma combinação de ácidos gordo poderá conduzir a um intervalo de temperaturas de fusão baixo entre os 20 e 30°C, podendo, contudo haver uma variação de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ em relação a estes dados. Este material apresenta ainda um comportamento térmico estável após 1500 ciclos de fusão (solidificação/fusão) [17].

2.3.2. PCMs Inorgânicos

Os PCMs inorgânicos dividem-se em sais metálicos ou hidratados, incluindo o sal de Glauber (sulfato de sódio decahidratado), sendo este um dos tipos de PCM mais estudados. Em relação aos PCMs orgânicos, os inorgânicos apresentam algumas vantagens, nomeadamente são não inflamáveis, são mais baratos e com maior facilidade de aquisição [9].

Contudo são os mais suscetíveis à decomposição, sendo corrosivos e podendo ainda apresentar sub arrefecimento, afetando assim as suas propriedades [10].

As substâncias inorgânicas presentes no PCM variam, no que respeita à sua temperatura de fusão, numa gama de valores compreendidos entre 18,5 e 32,0°C, sendo apresentadas na Tabela 3 as temperaturas de fusão e entalpia de fusão associadas aos principais PCMs inorgânicos.

Tabela 3 - Compostos inorgânicos de PCM [9].

Composto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
KF · 4H ₂ O	18,5	231,0
Mn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	25,8	125,9
CaCl ₂ · 6H ₂ O	29,0	190,8
LiNO ₃ · 3H ₂ O	30,0	296,0
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	32,0	251,0

Relativamente aos PCMs inorgânicos pode-se identificar ainda algumas das suas principais vantagens e desvantagens, nomeadamente [14]:

- Vantagens:
 - Elevada entalpia de fusão;
 - Não são inflamáveis.
- Desvantagens:
 - Sub arrefecimento;
 - Corrosivo;
 - Separação de fases;
 - Falta de estabilidade térmica.

2.3.3. Misturas eutéticas

As misturas eutéticas resultam da combinação de um ou mais compostos orgânicos, inorgânicos ou ambos [10]. As misturas eutéticas são misturas de dois ou mais componentes, que se fundem e cristalizam congruentemente. Entre eles estão as misturas de hidrocarbonetos alquílicos lineares que possibilitam o ajuste das propriedades térmicas do PCM [2].

Através desta combinação de compostos estes materiais adquirem temperaturas de fusão mais aproximadas às necessidades dos edifícios do que os compostos orgânicos ou inorgânicos originais. O comportamento deste material normalmente assemelha-se bastante ao de um sal hidratado [10].

Como principal desvantagem associada a este tipo de PCM está o fato de se tratarem de materiais com elevado custo, cerca de duas ou três vezes superior ao de um PCM orgânico ou inorgânico [10].

As principais vantagens deste tipo de PCM associam-se ao fato de se tratarem de misturas com elevado calor latente (ou entalpia de fusão) por unidade de massa, possuindo uma boa estabilidade química e uma baixa pressão de vapor à temperatura ambiente [2]. Não são materiais corrosivos, tóxicos ou perigosos para a saúde [2].

Pode-se verificar que para as várias misturas eutéicas com compostos orgânicos e inorgânicos apresentados na Tabela 4, as temperaturas de fusão variam entre 25 e 30°C, verificando que para este tipo de PCM existe uma gama mais estreita de temperaturas de fusão.

Tabela 4 - Compostos orgânicos e inorgânicos em misturas eutéicas de PCM [9].

Composto	Temperatura de fusão (°C)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
66,6% $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ + 33,3% $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	25,0	127,0
48% CaCl_2 + 4,3% NaCl + 0,4% KCl + 47,3% H_2O	26,8	188,0
47% $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ + 53% $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	30,0	136,0
60% $\text{Na}(\text{CH}_3\text{COO}) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ + 40% $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	30,0	200,5

2.4. Aplicações em edifícios

O uso de PCM em edifícios, tendo em conta o armazenamento térmico das várias soluções contrutivas, foi uma das primeiras aplicações estudadas para uso deste material.

O primeiro edifício onde foi incorporado PCM, em 1949 localizava-se em Boston. Foram usados para o estudo 21 toneladas de Glaubersalt (sulfato de sódio hidratado e incolor) em coletores solares térmicos. Nos dois primeiros invernos o uso de PCM no edifício foi bem sucedido, correspondendo às expectativas. No terceiro ano o PCM falhou, sobretudo devido à falta de estabilidade térmica, a problemas relativos ao encapsulamento, condutibilidade térmica do material e subarrefecimento [19, 20].

O estudo do PCM no ano em que foi testado em edifícios (ano de 1949) ainda apresentava grandes desenvolvimentos uma vez que a primeira publicação sobre o tema surgiu em 1948, pela Dra Maria Telkes, intitulado “Sun Queen” (Dover, Massachusetts) [21].

A utilização de PCM ao longo dos últimos anos tem sido cada vez mais intensa e comum, tendo merecido a atenção de vários autores que têm vindo a estudar as várias características dos PCMs e as melhores aplicações destes edifícios, no sentido de aperfeiçoar um sistema promissor. Várias empresas têm desenvolvido ao longo dos anos e cada vez mais intensamente vários modelos de PCM, quer sejam macroencapsulados, microencapsulados, em forma de spray, entre várias outras maneiras, tendo em vista a sua aplicação na construção [19, 20, 21].

O PCM pode ser instalado na construção em elementos verticais ou horizontais, em elementos novos ou em reabilitações. A capacidade de armazenamento de calor garante à solução construtiva em que é aplicado um alto desempenho térmico, reduzindo ainda a emissão de gases de efeito de estufa e a necessidade de uso de energias não renováveis. Para além disso trata-se de um produto natural, biodegradável e 100% reciclável. Desta forma o PCM contribui para um desempenho sustentável do edifício, tornando-o mais funcional, económico e contribuindo, sobretudo para o seu desempenho ambiental. Este material pode ser usado em vários locais, desde espaços comerciais/industriais, escritórios, escolas, habitações novas ou reabilitadas [13]. A Figura 6 mostra algumas formas de apresentação do PCM, encapsulados ou incorporados diretamente em placas.



Figura 6 – Formas de apresentação do PCM [21].

Ao conceito de acumulação de energia ou isolamento térmico estão normalmente associados os materiais de mudança de fase que funcionam de uma forma passiva, acumulando energia sob a forma de calor sensível, através das suas capacidades caloríficas ou de massas elevadas e minimizando a transferência de calor com baixas condutividades térmicas [22].

Estes materiais poderão funcionar ainda de forma ativa, normalmente associados a sistemas de climatização ou coletores solares térmicos. Existem duas formas principais de explorar as potencialidades do PCM na construção, nomeadamente de acordo com a forma como a energia térmica é transmitida, por radiação e convecção [10].

O fenómeno de radiação é explorado pela incorporação de PCM em paredes, pavimentos ou tetos, quer na forma passiva, tendo por base o conceito de arquitetura solar passiva e a disposição ou orientação do edifício, quer na forma ativa, neste caso tendo em conta o sistema híbrido, pela articulação deste com sistemas de ventilação natural ou circulação de fluídos [10].

O fenómeno de convecção é explorado através da utilização dos PCM como meio de transferência em sistemas de ventilação e ar condicionado, nos quais se faz passar uma corrente quente ou fria [10].

Torna-se relevante referir ainda que os elementos construtivos mais comuns para aplicação de PCM serão as paredes, nomeadamente através da incorporação de PCM em materiais porosos como o gesso, também em tetos (pelo mesmo processo), pavimentos, envidraçados ou até mesmo nas persianas e estores presentes nas janelas. A incorporação de PCM abrange ainda o betão e tijolos (ou blocos) constituintes das alvenarias do edifício.

Existem ainda os sistemas ativos onde o PCM pode ser colocado (como coletores solares térmicos ou fotovoltaicos, ou sistemas de climatização), sendo estes, sistemas termicamente separados do edifício e que não funcionam de forma passiva.

2.4.1. Sistemas passivos

Neste sub capítulo são apresentadas algumas hipóteses de colocação de PCM nos edifícios, apresentando-se algumas das soluções construtivas em que o PCM pode ser integrado e onde funciona de forma passiva.

2.4.1.1. Paredes de Trombe

A "Parede de Trombe" foi desenvolvida em França por Félix Trombe nos anos 60 do século XX. Esta parede, que é basicamente uma pequena "estufa", é constituída por um vidro ou plástico exterior orientado a sul, uma caixa de ar e uma parede de grande densidade e espessura (normalmente em betão, pedra, ou tijolo maciço) que lhe garante uma forte inércia térmica. O calor resultante da radiação solar é recolhido entre a fachada e o vidro, devendo, para uma maior eficiência e capacidade de absorção de calor, a parede ser pintada de uma cor muito escura [23].

Trata-se assim de um sistema capaz de absorver a energia do sol, armazená-la (no interior da parede, devido à inércia térmica da mesma) e irradiar calor para dentro da divisão adjacente durante a noite, ou quando for mais necessário [23].

O calor absorvido é irradiado para o interior durante várias horas, quando a temperatura interna cai para valores inferiores aos registados na superfície da parede de Trombe [9].

O sistema evoluiu da parede espessa com vidro na frente, em que a maior parte do calor era perdido e não chegava ao interior do edifício, para a versão moderna que possui ventilações no topo e na base da caixa de ar, que permitem o arrefecimento rápido do coletor térmico (muro de grande densidade e espessura) maximizando os ganhos obtidos [23]. A Figura 7 mostra esquematicamente o funcionamento, na sua essência, da parede de Trombe ou também designada parede de armazenamento térmico.

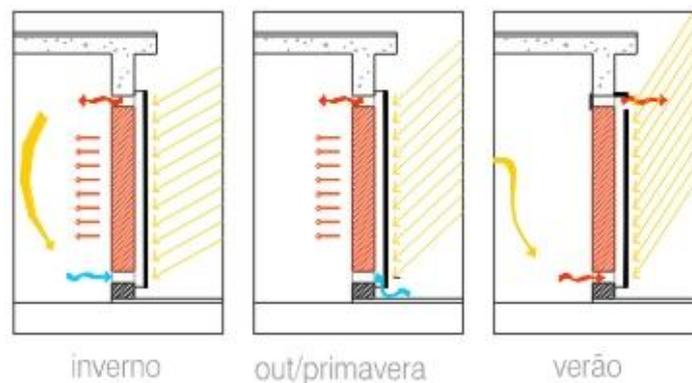


Figura 7 - Funcionamento da parede de Trombe [23].

Desta forma, uma vez que uma parede de Trombe possui grande capacidade de armazenamento de calor, torna-se um conceito atraente a aplicação de PCM neste tipo de solução construtiva.

Tratando-se de um conjunto de materiais com uma grande capacidade de armazenamento de calor, já vários estudos foram efetuados no sentido de propor uma implementação adequada de PCM em paredes de Trombe, sendo sobretudo testadas as aplicações de sais e hidratos de hidrocarbonetos [9].

Os PCMs para estes elementos construtivos têm sido usados como parte integrante do muro constituinte da parede de Trombe, observando-se que o PCM usado nestas circunstâncias aumenta a capacidade de armazenamento de calor da parede, conferindo-lhe características térmicas superiores [9].

Resultados experimentais demonstram que usando cloreto de cálcio como material de mudança de fase, com apenas 8,1cm pode-se obter resultados com melhor desempenho térmico, que uma parede de alvenaria com 40cm de espessura [9].

Conclui-se que o uso deste material poderá ser então benéfico quando aplicado numa parede de Trombe, sendo que este elemento apresenta de origem características de armazenamento de calor bastante boas, através do uso de um material de mudança de fase obtêm-se ainda melhores resultados ou características térmicas.

2.4.1.2. Placas para paredes e tetos

As paredes, tetos ou pavimentos são os elementos construtivos preferenciais para a exploração das potencialidades do PCM, em particular na incorporação do material em placas de revestimento de paredes divisórias de edifícios, tetos interiores, ou como revestimento interior de paredes pertencentes a uma envolvente. Em particular a implementação de PCM em placas de gesso cartonado, ou à base de gesso, é o método mais estudado, devido às características porosas do gesso, permitindo contribuir para um adequado armazenamento de calor da parede [10]. O fato de este método ser economicamente mais viável para aplicação em edifícios torna-o também mais atrativo para estudos mais aprofundados [9].

O PCM poderá ser adicionado a estas placas para revestimento de paredes e tetos através da sua fácil incorporação, na fase líquida do PCM, nos poros do gesso, sendo a partir daí parte integrante do gesso ou placa de gesso cartonado [9].

Poderá ainda o material de mudança de fase (orgânico, inorgânico ou mistura eutética) incorporar-se diretamente na fase de fabricação do gesso (microencapsulado ou facilmente

impregnado diretamente durante o processo de fabrico), quando este se apresenta em forma de pasta, incorporando assim o PCM no material de revestimento. Durante a década de 1980, várias formas de PCMs encapsulados foram comercializadas para sistemas de armazenamento de calor ativos e passivos, através de ganho direto ou indireto. Pelas suas grandes áreas e pelo fato de se encontrarem no interior dos edifícios, estes são os elementos mais estudados nesta área e de onde se obtiveram os melhores resultados [9].

A Tabela 5 mostra as principais propriedades físicas de uma placa de revestimento (em gesso cartonado) quando incorporadas diferentes quantidades de PCM.

Tabela 5 - Propriedades do revestimento com PCM [24].

Placa de revestimento	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (kJ/kg.K)	Condutibilidade (W/m.K)	Entalpia de fusão (kJ/kg)
Convencional	696	1,089	0,173	0,00
10% de PCM	720	1,215	0,187	19,30
16% de PCM	760	1,299	0,192	31,00
20% de PCM	800	1,341	0,204	38,90
30% de PCM	998	1,467	0,232	58,30

Através da análise da Tabela 5 é possível concluir que apesar do aumento da densidade da placa de revestimento, ficando o mesmo material mais pesado por cada metro cúbico, haverá um aumento de calor específico e condutibilidade térmica da placa. Torna-se importante realçar o aumento de 0 (convencional) para 58,3 kJ/kg (com adição de 30% de PCM) em termos de armazenamento de calor da placa, verificando-se através destes números que a adição de PCM a placas de revestimento de paredes e tetos interiores será bastante vantajosa tendo em vista uma melhor qualidade térmica interior do edifício e conforto dos seus ocupantes [24].

2.4.1.3. Envidraçados

Nos dias que correm cada vez mais se recorre a estruturas leves, sem grande inércia térmica, com grandes vãos envidraçados e esteticamente mais agradáveis. Torna-se por isso

importante estudar estes elementos. Para além disso são os vidros de um edifício que controlam os ganhos solares e a iluminação do mesmo [10].

Quando a radiação solar incide no envidraçado, dependendo da cor, espessura do vidro e caixa de ar, este absorve parte dessa radiação, sendo parte dela refletida. A radiação solar absorvida pelo envidraçado é transmitida para o interior do edifício, dependendo a transmissão solar, do fator de transmissão e fator solar do vidro (ou vidros, caso se trate de vidro duplo) em causa, sendo que estes caracterizam tal transmissão do envidraçado [10].

A energia solar transmitida pelo vidro é absorvida pelos elementos no interior do espaço que se pretende aquecer. Pode-se usar ainda vidros que controlam a radiação solar, designados “vidros de controlo solar”, que evitam o sobreaquecimento dos espaços. Também o uso de proteções solares pelo interior (como é o caso de cortinas transparentes ou elementos semelhantes) garante uma diminuição de ganhos solares para o interior do edifício [10].

Tendo em conta todos estes pressupostos, os vãos envidraçados tornam-se assim elementos importantes de estudo para uma possível incorporação de PCM, uma vez que estes controlam os ganhos solares e aquecimento de espaços interiores [10].

A empresa GLASSX, com sede na Suíça, desenvolveu um vidro com boas capacidades de armazenamento de calor, incorporando nos PCM nos envidraçados, obtendo uma capacidade de armazenamento de calor equivalente a 20cm de betão [25]. O calor é armazenado por meio de um sal hidratado incorporado no vidro, e que confere a este as suas características térmicas [25].

O PCM é encapsulado numa “caixa” de policarbonato e incorporado no envidraçado. Durante o processo de mudança de fase dá-se a cristalização do PCM, assemelhando-se, o envidraçado, a uma parede translúcida, nesta fase [25].

A Figura 8 apresenta o aspeto dos vidros durante o processo fusão do material de mudança de fase incorporado (sal hidratado).



Figura 8 - Aspeto do vidro durante solidificação do PCM [25].

2.4.1.4. Persianas ou estores

Com o desenvolvimento de novos sistemas de implantação de PCM em fachadas, janelas e seus elementos (persianas ou estores), surgem edifícios com um consumo energético mais baixo, elevados níveis de conforto visual e térmico, isto devido à capacidade, já conhecida, de armazenamento de calor do PCM [26].

Existe o conceito inovador de aplicação de materiais de mudança de fase em estores de lâminas, onde o PCM é aplicado pelo lado exterior das janelas. Durante o dia os estores de lâminas encontram-se abertos, estando o seu lado exterior exposto à radiação solar direta, sendo por isso o calor absorvido pelo PCM lá colocado, derretendo [9].

À noite, baixando as lâminas e fechando as próprias janelas, o calor absorvido pelo PCM é libertado na presença de temperaturas inferiores, sendo o calor irradiado para o interior do edifício melhorando assim a sua qualidade interior [9].

2.4.1.5. Tijolos ou blocos

Com o objetivo de melhorar o desempenho térmico de coberturas planas foram estudadas situações de incorporação de PCM em tijolos perfurados usados nas coberturas dos edifícios, assim como a sua incorporação em tijolos ou blocos usados para construção de paredes [10].

Este tipo de solução, com incorporação de PCM em blocos ou tijolos para coberturas ou paredes, resulta numa estrutura da envolvente do edifício com uma elevada inércia térmica sem um aumento significativo da massa dessas soluções na envolvente dos edifícios [9].

Como exemplo a Figura 9 mostra esquematicamente a composição final de blocos para lajes de cobertura ou paredes, com incorporação de PCM.

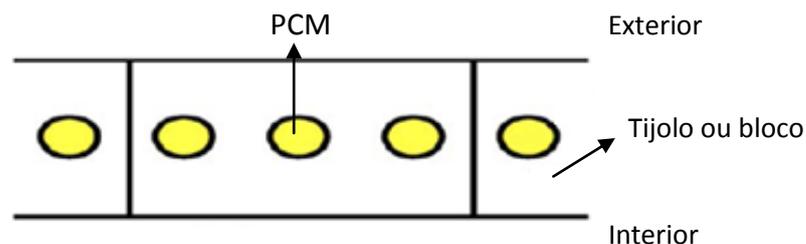


Figura 9 - Incorporação de PCM em blocos ou tijolos (em planta) [adaptada de 17].

2.4.1.6. Betão

Devido à sua estrutura porosa e elevada capacidade de absorção, o betão torna-se como elemento atrativo para incorporação de PCM. Esta incorporação de PCM no betão tem como principal objetivo o aumento da capacidade de armazenamento de energia do betão para o uso dos mesmos mais eficazmente em edifícios [10].

Podem-se aplicar materiais de mudança de fase no betão, com diferentes objetivos, além de apenas o aumento da qualidade do ambiente interior do edifício. Poderá por exemplo controlar-se a temperatura durante o processo de cura do betão, através da utilização de PCM incorporando um retardador de presa [10].

Também a subida de temperatura associada à hidratação inicial do cimento pode ser diminuída através da absorção de energia durante a fusão do PCM incorporado, enquanto a libertação controlada do retardador de presa diminui a velocidade de hidratação e consequente libertação de calor. Embora a resistência à compressão diminua nos primeiros tempos, para uma idade mais avançada é possível obter resistências mais elevadas do betão [10].

Uma outra aplicação relaciona-se com a diminuição do número ou intensidade dos ciclos gelo-degelo a que está sujeito o betão durante o inverno, através da utilização de um PCM com temperatura de transição em torno dos 5°C, conduzindo assim a um aumento da durabilidade [10].

2.4.1.7. Pavimentos

Devido à grande área que normalmente os pavimentos interiores apresentam, existe associada uma elevada transferência de calor, permitindo o uso eficaz dessa mesma massa, distribuída termicamente [28].

Tal como já descrito para tetos e paredes, nas subsecções 2.4.1.1 e 2.4.1.2, o pavimento representa um dos principais elementos de um edifício capaz de armazenar energia, daí ser viável a incorporação de PCM nestes elementos.

O PCM poderá ser incorporado de várias formas, sendo que deverá pertencer a soluções de revestimento de pavimentos interiores, sobre os quais poderá incidir radiação solar, cabendo então a estes armazenar tal energia [9].

2.4.2. Sistemas ativos

O PCM pode ainda ser usado em sistemas ativos de absorção de energia, tratando-se, em concreto, de sistemas de armazenamento de energia termicamente separados do edifício, não funcionando automaticamente como é o caso de sistemas com PCM incorporado que

funcionam automaticamente ou passivamente, absorvendo e armazenando a energia perante altas temperaturas, libertando-a de forma passiva perante temperaturas mais baixas.

Sendo quase impossível eliminar a estratificação das temperaturas em ambientes interiores, a utilização de piso radiante em pavimentos interiores é uma das formas mais eficazes de aquecimento de espaços interiores onde tais elementos estão presentes [10].

Desta forma, a incorporação de PCM em sistemas de aquecimento (piso radiante) colocados em pavimentos é visto como um contributo importante para o aumento da eficiência, devido à grande área destes elementos e conseqüente capacidade de armazenamento de energia, tendo ainda como vantagem, pela incorporação de PCM nestes elementos, uma diminuição do número de horas que o sistema de climatização se encontra ligado, ou estando ligado apenas à noite (energia com menor custo), dando lugar a uma forte poupança energética [10].

Através destes métodos, a estratificação das temperaturas torna-se menor, diminuindo a condensação nas paredes interiores. Por outro lado, a aplicação de PCM no piso radiante para aquecimento de pavimentos apresenta-se como um método mais saudável, comparativamente a outros sistemas de aquecimento mais comuns [10].

Para um aquecimento eficaz do pavimento pode-se ainda usar este material enterrado no solo (ou sob o pavimento), funcionando associado a uma bomba de calor e um banco de gelo. Desta forma o PCM aquece nos períodos com custos mais baixos de energia (à noite), libertando o calor em períodos com temperaturas inferiores, contribuindo no processo o banco de gelo presente no sistema [29].

O uso de PCM em sistemas ativos para pavimentos faz-se pela sua incorporação nos seus sistemas de aquecimento, garantindo uma acumulação de calor transmitido pelo sistema de aquecimento, diminuindo o número de horas em que o sistema se encontra em funcionamento [10].

Tal como para pavimentos, as aplicações desenvolvidas para tetos consistem em sistemas ativos que exploram a capacidade de armazenamento de energia dos PCM, incorporando este em painéis através dos quais se fazem passar tubos capilares por onde circula um fluido quente ou frio [10].

O PCM poderá também ser incorporado em sistemas de transformação de radiação solar em energia elétrica, tendo em vista sempre otimizar o sistema de climatização do edifício [26].

Os painéis fotovoltaicos têm associados a si uma certa perda de energia durante a transformação da energia solar em elétrica. Nem toda a radiação solar incidente é convertida em energia elétrica, estimando-se em alguns casos as perdas de 0,5% por cada °C de temperatura absorvida. O uso de PCM permite assim diminuir tais perdas e moderar o aquecimento por via deste sistema [10]. Ainda nos tanques associados aos painéis solares térmicos pode ser usado PCM, moderando a temperatura a que a água está armazenada nestes elementos [10].

2.5. Encapsulamento de PCM

O PCM poderá ser incorporado nos materiais de construção constituintes de edifícios através de várias formas. O mais comum é a sua incorporação no gesso, tal como explicado na sub secção 2.4.1.2., para tetos ou paredes interiores. A incorporação de PCMs na construção depende muito do modo de encapsulamento destes, sendo aplicados nos vários elementos construtivos através de cápsulas (micro cápsulas ou macro cápsulas), conforme o necessário [28].

Os materiais compósitos, constituídos por materiais de mudança de fase e um outro material, são também materiais passíveis de ser encapsulados. O material incorporado juntamente com PCM atribui propriedades que este último não possui originalmente. Para o uso em edifícios, o PCM é adicionado a uma matriz insaturada de poliéster, ou integrado com materiais de construção sem encapsulamento [14].

Os materiais de mudança de fase (e compósitos) devem ser encapsulados para um uso mais eficaz em elementos presentes nos edifícios. Existem duas formas principais de armazenamento de PCM, microencapsulamento e macroencapsulamento [14].

2.5.1. Macroencapsulamento

Macroencapsulamento, que é o encapsulamento de PCM em cápsulas geralmente maiores que 1cm de diâmetro, é a forma mais comum de encapsulamento destes materiais [14].

Para além de reter o PCM quando este se apresenta no seu estado líquido, o macroencapsulamento apresenta outras vantagens como [14]:

- Melhora a compatibilidade do material com os elementos em contacto, devido à barreira imposta;
- 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.

O macroencapsulamento resulta simplesmente da incorporação de PCM em cápsulas, em forma de tubos, esferas, painéis ou outras. Estes elementos podem ser aplicados diretamente em elementos construtivos, como revestimento, por exemplo, ou incorporados em materiais de construção [14].

O uso de PCM por meio de macroencapsulamento é um pouco restrito devido aos custos associados. No entanto, várias empresas têm desenvolvido formas diferentes de encapsular os materiais de mudança de fase [14].

São usados, para macroencapsulamento de PCM, nódulos esféricos moldados a partir de uma mistura de poliolefinas e cheios com PCM (Figura 10). Outra forma de encapsulamento passa por um sistema de macroencapsulamento de PCM em forma de grânulos, sendo estes preenchidos com PCM no seu interior (Figura 11) [14].

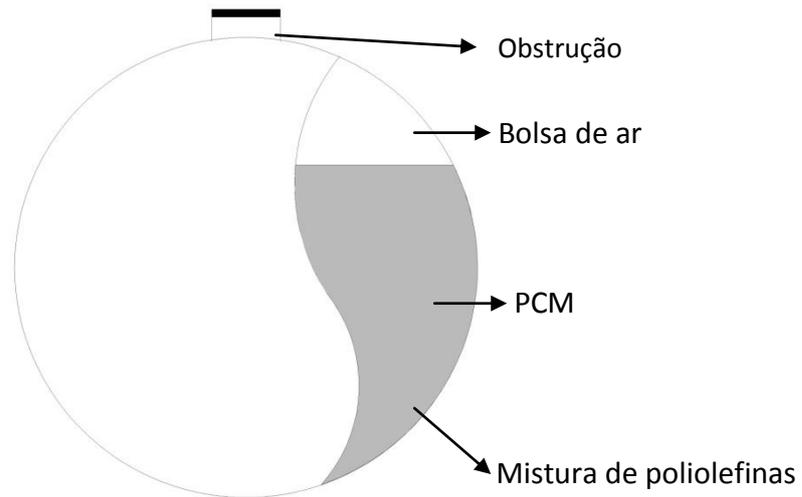


Figura 10 - Encapsulamento de PCM através de nódulos [adaptada de 14].



Figura 11 - PCM comercializado [14].

2.5.2. Microencapsulamento

O Microencapsulamento trata do encapsulamento de PCM em cápsulas menores que 1mm de diâmetro, com o seu diâmetro a variar normalmente entre 1 a 1000 μ m, mas com uma distribuição situada preferencialmente entre 1 e 60 μ m [10, 14].

O microencapsulamento terá as mesmas aplicações que o macroencapsulamento, sendo de referir as vantagens adicionais:

- 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.

Os métodos de microencapsulamento são basicamente divididos em processos químicos, físico-químicos ou mecânicos [10].

Na Figura 12 apresenta-se esquematicamente o processo (químico) desenvolvido pela empresa BASF na produção de PCM microencapsulado da marca Micronal.

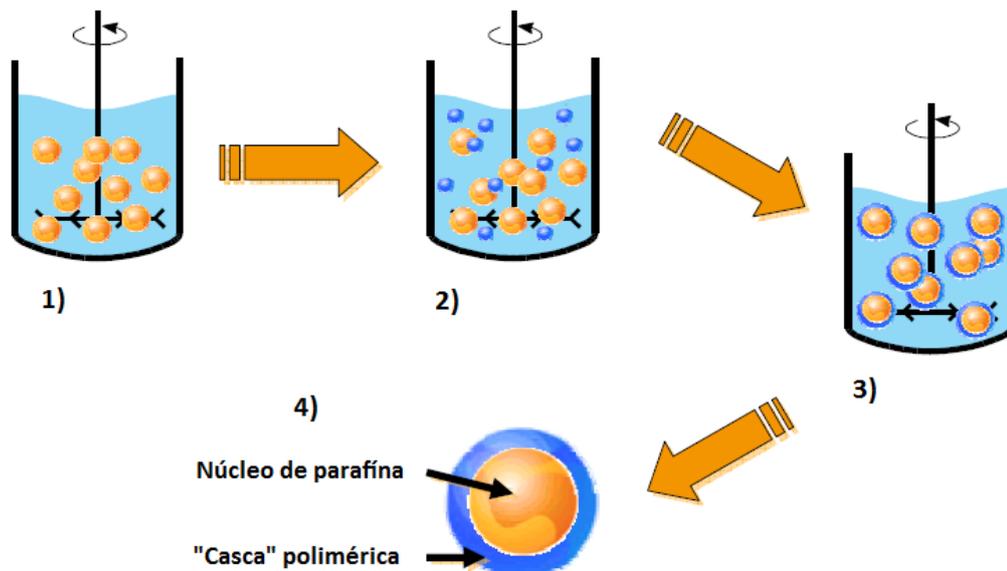


Figura 12 - Microencapsulamento de PCM pela empresa BASF [30].

A produção de micro cápsulas de PCM segue os quatro passos demonstrados na Figura 12 que consistem em [30]:

1. Emulsão de cera parafínica em água quente, com adição de detergentes, e mistura por meio de um misturador;
2. Adição de monómeros, iniciando o microencapsulamento;
3. Dá-se a formação do revestimento, uma “casca”, à superfície da cera parafínica;
4. Obtem-se o produto final, um polímero altamente reticulado revestindo cada gota de cera parafínica.

Na Figura 13 pode-se ver numa imagem microscópica o PCM microencapsulado, podendo-se ainda verificar a “casca” que é formada à superfície deste, revestindo o material.

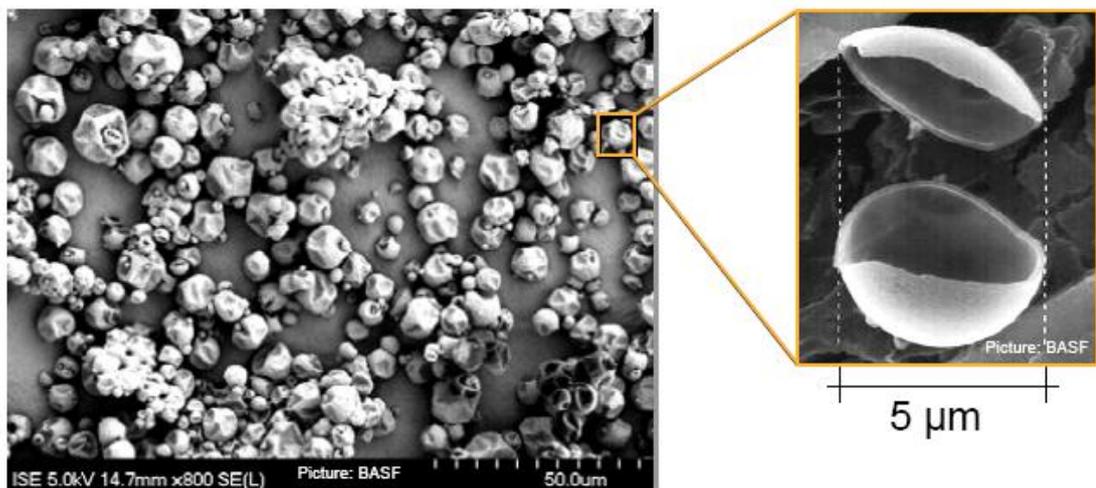


Figura 13 - Imagem microscópica de PCM microencapsulado [30].

2.6. Comercialização de PCM

Diferentes substâncias como materiais orgânicos, inorgânicos ou misturas eutéticas foram estudadas e apenas algumas posteriormente comercializadas pelas diversas empresas [31].

Na Tabela 6 apresentam-se alguns fabricantes de materiais de mudança de fase, o seu respetivo nome comercial, assim como a apresentação de algumas das suas propriedades [32].

Tabela 6 - PCMs comercializados [32].

Fabricante	Gama de Temperaturas (°C)	Número de PCMs listados
Rubitherm [33]	-3,0 a 100,0	29
Cristopia [34]	-33,0 a 27,0	12
TEAP [35]	-50,0 a 78,0	22
Doerken [36]	-22,0 a 28,0	2
Mitsubishi Chemical [37]	-9,5 a 118,0	6
Climator [38]	-18,0 a 70,0	9
EPS, Lda [39]	-114,0 a 164,0	61

Entre os vários PCMs fabricados apresentados na Tabela 6 poderá destaca-se o fabricante Rubitherm GmbH que comercializa PCMs em nas formas principais: pó, granulado e composto. O primeiro PCM é apresentado em forma de um fino pó, com grande capacidade de armazenamento de calor, resultante de uma mistura entre um material com capacidade de armazenamento de calor latente e sílica ecológica [40].

O PCM granulado é, comercializado no interior de uma pequena película que permite que não haja perda de conteúdo no momento em que o PCM se encontra na sua fase líquida. Desta forma o PCM é apresentado em forma de grãos com grande capacidade de armazenamento de calor latente [40].

O material composto comercializado possui um elevado teor de PCM, com grande capacidade de armazenamento de calor e concebido para se usar em sistemas com contacto com água ou que possuam grandes áreas, permitindo uma rápida transferência de calor [40].

Na Figura 14 são apresentadas as formas de comercialização de PCM, em pó, granulado ou em forma de composto, respetivamente [40].



Figura 14 – PCMs comercializados pela empresa Rubitherm GmbH [40].

Para além de PCMs microencapsulados existe ainda empresas que fabricam e comercializam PCMs macroencapsulados, sendo este tipo de PCM colocado sobretudo no interior da caixa de ar das soluções construtivas. A empresa alemã Doercken comercializa o PCM Delta-Cool® 24, sendo comercializado em formas macroencapsuladas (bolsas, bolas ou painéis) pronto a ser colocado nas respetivas caixas de ar para melhoramento do desempenho térmico do edifício. Na Figura 15 apresenta-se uma ilustração deste PCM (encapsulado em bolsas de alumínio) colocado na caixa de ar de tetos interiores [41].



Figura 15 – PCM colocado em tetos interiores [41].

Há ainda a salientar a empresa BASF que se tem destacado nos últimos anos no campo do fabrico e comercialização de PCMs, nomeadamente PCMs microencapsulados, da marca Micronal® [32]. Na Tabela 7 apresenta-se algumas propriedades que dizem respeito a PCMs produzidos pela empresa BASF, da marca Micronal.

Tabela 7 - Propriedades de PCMs da marca Micronal® [10].

PCM Micronal	DS 5008 X	DS 5001 X
Conteúdo de sólidos (%)	99 ± 1	99 ± 1
pH	7,5 - 8,5 (400 g/l, 20 °C)	7,5 - 8,5 (100 g/l, 20 °C)
Massa Volúmica (kg/m ³)	250 - 350	250 - 350
Temperatura de fusão (°C)	23	26
Calor latente (kJ/kg)	110	110
Temperatura de ignição (°C)	230	500

O intervalo de temperatura em que estes PCMs agem foi devidamente estudado para a sua aplicação em edifícios, destacando-se que a temperatura de transição dos produtos da Micronal® encontra-se no intervalo aconselhado para conforto humano, nomeadamente entre 23 e 26 °C, para inverno e verão, respetivamente [32].

Através do uso do PCM microencapsulado da marca Micronal® (sobretudo Micronal® DS 5001 X) desenvolveram-se outras formas de comercialização de PCMs, nomeadamente já integrados em elementos construtivos prontos a aplicar nos edifícios, sem a necessidade de misturas do PCM microencapsulado em argamassas de reboco ou gesso, por exemplo [40].

Em parceria com a empresa de fabrico de gesso cartonado KNAUF desenvolveu-se o Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26 (versão 23 com Micronal® DS 5008 X e versão 26 com Micronal® DS 5001 X) [40].

A empresa alemã H+H Deutschland GmbH desenvolveu o CelBlock Plus®, tratando-se de blocos de alvenaria com Micronal® PCM já integrado. Existe ainda no mercado a argamassa de revestimento pronta, para qual é apenas necessário misturar água e aplicar em paredes

ou tetos (comercializada em sacos de 20kg), com Micronal® PCM integrado, designada Weber.mur Clima 26® [40].

Na Figura 16 apresenta-se uma ilustração dos elementos com integração de PCM da Micronal® [40].

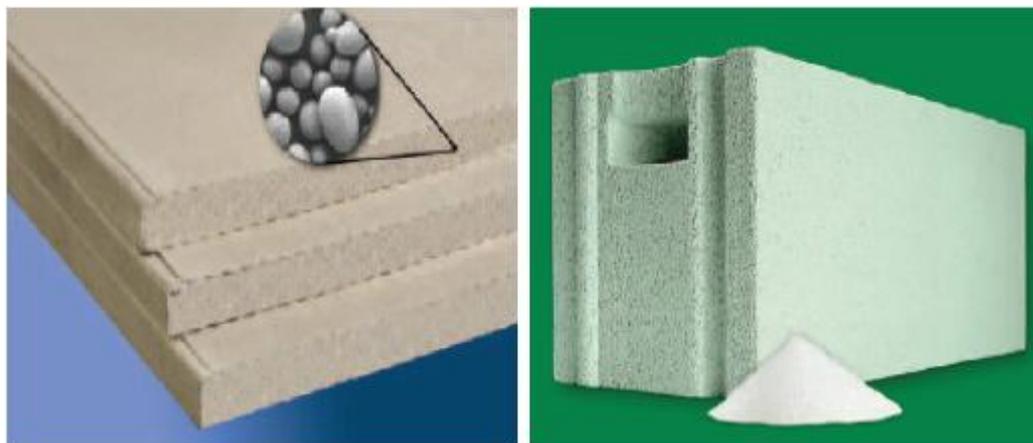


Figura 16 – Elementos construtivos com PCM integrado [40].

2.7. Casos de estudo

Na Figura 17 apresentam-se dois edifícios onde o PCM da Micronal® foi aplicado. À esquerda é apresentado o edifício da Universidade Técnica de Darmstadt onde foram, em 2007, aplicadas placas Micronal® PCM SmartBoard™. À direita apresenta-se um edifício de escritórios em Freiburg (Sonnenschiff Passivhaus Bürokomplex) onde em 2006 foi então aplicado o mesmo PCM [42, 21].



Figura 17 – Edifícios com inclusão de Micronal® PCM SmartBoard [16].

Na Figura 18 apresenta-se um edifício com aplicação de GLASSXcrystal® (PCM nos vidros) na fachada sul deste lar de idosos, na Suíça [40].



Figura 18 – Aplicação de GLASSXcrystal® em vidros da fachada sul [40].

3. METODOLOGIA

3.1. Simulação

Através da simulação de um edifício de geometria simples situado na cidade do Porto (considerando os dados geométricos definidos na norma ASHRAE 140), testando-se várias soluções construtivas com a inclusão de vários PCMs, pretende-se estudar qual o tipo e quantidade de PCM que melhor se adequa ao clima Português (neste caso, que melhor se adequa ao clima da cidade do Porto) na tentativa de, com o seu uso, numa fase posterior, reduzir os consumos energéticos de um edifício unifamiliar exposto às temperaturas desta região.

3.1.1. Software

Para estudar o tipo de PCM e a quantidade adequada ao clima Português foi utilizado o *software* de simulação *EnergyPlus*, disponibilizado pelo departamento de energia do governo dos Estados Unidos da América.

Consideraram-se dois *softwares* principais com capacidade para efetuar tal simulação, tratam-se dos *softwares* *EnergyPlus* e *ESP-r*. O *EnergyPlus* é um *software* baseado em programas de simulação existentes reconhecidos (*BLAST* e *DOE-2.1*) e que permite ao utilizador um processo de simulação simples, possuindo bastante material de apoio e programas auxiliares que permitem modelar mais facilmente os edifícios a simular-se. O *EnergyPlus* possui a vantagem de considerar na simulação as cargas térmicas de um edifício, com a possibilidade de efetuar várias medições, de acordo com o definido pelo utilizador. O *software* *ESP-r* possui igualmente programas auxiliares para modelação dos edifícios, contudo trata-se de um programa com um grau de complexidade superior em relação ao *EnergyPlus* e com menos material de apoio para auxílio do processo de simulação [43].

O *EnergyPlus* (designado em muitos documentos pela sigla *E+*) é um programa de simulação dinâmica de necessidades energéticas num edifício, usado por profissionais para modelar o uso de energia (controlo do processo de aquecimento, arrefecimento e ventilação de uma habitação) e água em edifícios, utilizando assim os projetos envolvidos, permitindo ao edifício obter uma maior eficiência energética [44].

Este software apresenta um sistema modular, sendo uma ferramenta cujas características e capacidades são baseadas em softwares já existentes anteriormente e conhecidos como *BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics)* e *DOE-2.1* [36]. O “E+” é um sistema primário de simulação energética, tendo como ficheiros de entrada e saída documentos de texto simples. Surgiu da necessidade de se obter uma ferramenta integrada (com simultâneas capacidades e sistemas) para simulação e previsão de temperaturas e conforto num edifício [45].

Na Tabela 8 compara-se as potencialidades dos dois programas de simulação que serviram de base à criação do *EnergyPlus*, com este mesmo software.

Tabela 8 – Comparação das características dos programas de simulação [46].

Características Gerais	Software		
	DOE - 2	BLAST	EnergyPlus
Soluções simultâneas:			
- Integração de equipamentos/sistemas/plantas	Não	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 sem 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 programa *EnergyPlus* funciona através de três requisitos base, nomeadamente, um gestor para o processo de simulação, um mecanismo que tem em conta o balanço de massa e calor no edifício e um mecanismo que contempla a simulação de sistemas presentes no edifício. O

cálculo do balanço ou oscilações térmicas no edifício é feito com base no *IBLAST*, tratando-se este de uma versão do *software BLAST* que contabiliza a integração de sistemas de ventilação e equipamentos no edifício [46].

Introduzidos todos os dados necessários relativos ao edifício em estudo, assim como vários outros constituintes (incluindo informação acerca da volumetria, soluções construtivas, sistemas de ventilação (AVAC), equipamentos, ocupantes ou mobiliário do edifício) obteve-se, para o espaço de tempo requerido, as necessidades de aquecimento e arrefecimento do edifício, pelo cálculo de temperaturas previstas no edifício para o espaço temporal solicitado. Permite ainda obter dados relativos à renovação de ar no edifício, humidade, entre outros [45].

O *software EnergyPlus* permite 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 [45].

Esta ferramenta apresenta-se sob a forma de duas janelas principais, através de dois aplicativos: *IDF Editor* e *EP-Launch*. Estes aplicativos simplificam a criação e introdução de ficheiros climáticos e ficheiros com os dados e geometria dos respetivos sistemas a simular, assim como simplifica a obtenção dos dados de saída respetivos [45]. Para além destes aplicativos, pode recorrer-se ao auxílio do *plug-in* designado *OpenStudio* que permite, em conjunto com o *software Google SketchUp*, visualizar a geometria do edifício em três dimensões e até mesmo, a partir desta visualização, confirmar a validade dos dados introduzidos no que respeita à geometria do edifício [47].

Para simplificação do sistema e uma mais fácil análise de dados considerou-se o edifício a simular como um paralelepípedo, com a sua geometria simples definida de acordo a norma *ASHRAE 140:2007* [48]. Torna-se importante referir que o *EnergyPlus* trata-se de um *software* acreditado por esta norma. Em pormenor deve acrescentar-se que para o caso a simular (case 610 – *South Shading Test for Low Mass Building*) serão introduzidos os dados

geométricos definidos na norma *ASHRAE 140:2007* (secção 5.2), pois trata-se de um edifício com pala horizontal e de geometria simples, permitindo otimizar os ganhos solares no interior do edifício e então simular-se com mais rigor as hipóteses de inclusão de PCM nas soluções construtivas [49].

3.1.2. Procedimento

O estudo do desempenho térmico do paralelepípedo a estudar foi realizado usando o programa *EnergyPlus*, simulando-se a aplicação de vários tipos (macro e microencapsulados), de PCMs e em diferentes quantidades, recorrendo à inclusão dos PCMs em diferentes soluções construtivas. A simulação foi feita em duas fases distintas.

1ª Fase de simulação:

Para a cidade do Porto foram testados dois tipos de PCMs comercializados, o Delta-Cool® 24 e Micronal® SmartBoard 23/26, aplicados em várias soluções construtivas diferentes, nomeadamente em paredes exteriores (paredes em betão e alvenaria de tijolo cerâmico, ambas com sistema ETICS, e parede dupla com isolamento térmico no interior da caixa de ar). Todas as soluções construtivas possuem um coeficiente de transmissão térmico idêntico, de modo a facilitar a comparação entre as soluções e analisar mais facilmente o efeito da inclusão de PCM nos edifícios.

Através da inclusão dos PCMs comercializados, macroencapsulados, nas diferentes soluções construtivas e em diferentes quantidades, gera-se um conjunto de combinações a simular para um edifício. Foi considerado nesta fase o mesmo edifício para as diferentes combinações, sendo a sua geometria definida de acordo com a norma *ASHRAE 140:2007* (Case 610, com pala horizontal). Nesta fase não foi considerada a inclusão no edifício de qualquer equipamento de climatização ou ventilação.

2ª Fase de simulação:

Concluída a 1ª fase de simulação foi obtida uma solução construtiva (com o tipo e quantidade de PCM adequado) que melhor se adequa ao clima da cidade do Porto. A solução com melhor desempenho térmico foi colocada num edifício unifamiliar, testando-se o edifício com e sem PCM, contabilizando-se neste caso a inclusão de equipamento de climatização para avaliação das diferentes necessidades energéticas.

Simulou-se um edifício de habitação unifamiliar (tipologia T2) com e sem PCM, considerando-se um sistema de climatização com 100% de eficiência para aquecimento (no inverno) e arrefecimento (no verão) do edifício. Para o sistema “*Ideal Loads*” deverão ser definidas as temperaturas para as quais o sistema é ativado, devendo estas estar num intervalo de conforto, entre os 20 e 25°C, tratando-se das temperaturas mínima para inverno e máxima para o verão, respetivamente.

Através dos resultados obtidos nesta 2ª fase do processo de simulação foi possível prever os consumos energéticos de um edifício real localizado na cidade do Porto, com a inclusão do PCM com o melhor comportamento térmico, concluindo-se se é benéfico, ou não, a inclusão do PCM no edifício, para o clima Português, e qual a poupança energética daí resultante.

3.2. Edifícios analisados

3.2.1. 1ª Fase de simulação

De acordo com o estabelecido na norma *ASHRAE 140:2007* foi simulado um edifício cujos dados geométricos estão definidos neste mesmo documento, nomeadamente o Caso 610 – *South Shading Test for Low Mass Building*. Este edifício será usado na primeira fase de simulação, para o qual serão simuladas várias combinações de soluções construtivas, com e sem inclusão de PCM, comparando-se os resultados obtidos.

A utilização de um edifício de geometria simples permite efetuar uma análise comparativa mais rigorosa, conseguindo-se perceber exatamente qual o efeito da inclusão do PCM nos vários edifícios simulados, uma vez que, para além da simples geometria, para a primeira fase não foi considerada a inclusão de qualquer ocupação, equipamentos, iluminação, cargas térmicas ou sistemas de climatização.

O edifício a simular é representado na Figura 19, possuindo uma área de 48m^2 e uma volumetria de $129,6\text{m}^3$. Este tem um comprimento de 8m, largura de 6m e com um pé direito de 2,7m. Os vãos envidraçados com um total de 12m^2 (6m^2 cada envidraçado), estão situados na fachada sul do edifício, com 3m de comprimento e 2m de altura, centrados na mesma fachada, separados entre eles 1m. Acima dos vãos envidraçados, ao nível da cobertura, existe uma pala horizontal com 1m de largura e em todo o comprimento da fachada (8m) [46].

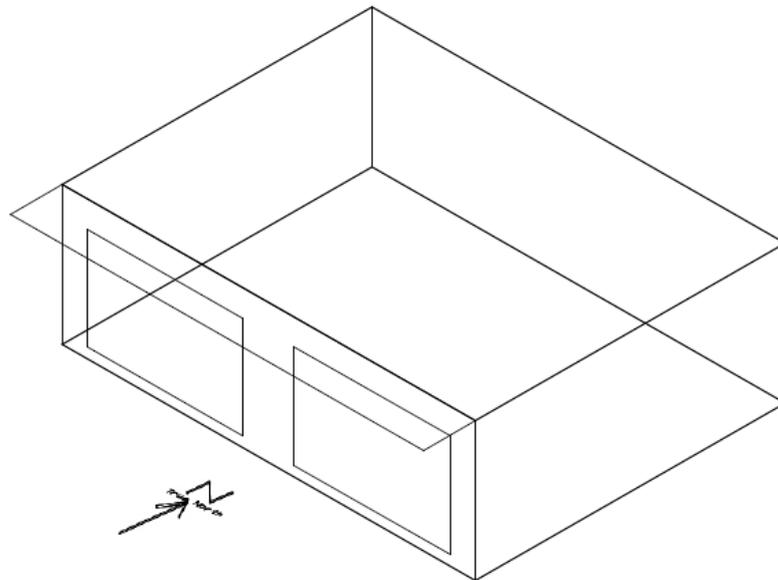


Figura 19 – Geometria do edifício a simular na primeira fase [46].

3.2.2. 2ª Fase de simulação

Na segunda fase do processo de simulação foi estudado um edifício de habitação, de tipologia T2, com oito divisões interiores. O edifício possui uma área total de 115m² e uma volumetria de 345m³, com um pé direito de 3m.

A oeste existe um vão envidraçado com as dimensões de 0,5x0,5m (no WC 1) e a norte um outro vão envidraçado, este com as dimensões de 0,8x0,5m (na zona de circulação). A área dos vãos envidraçados corresponde a 5% da área do pavimento das respetivas divisões, de forma a garantir uma ventilação cruzada no edifício.

Na lavandaria e WC 2 encontram-se dois vãos envidraçados, ambos com as dimensões de 1x1m. Nos quartos 1 e 2 existem dois vãos envidraçados, cada um com uma dimensão de 2x2m. Na sala, o vão envidraçado existente possui as dimensões de 3x2m, sendo este o maior do edifício.

Existem duas portas exteriores, uma primeira na garagem com as dimensões de 3x2m e uma segunda na sala/cozinha com as dimensões de 2x2m. Todas as portas interiores presentes no edifício possuem as mesmas medidas, sendo que cada porta possui as dimensões de 0,8x2m.

A Figura 20 mostra a planta do edifício, com a identificação de todas as divisões e representação dos respetivos vãos envidraçados e portas (interiores e exteriores).

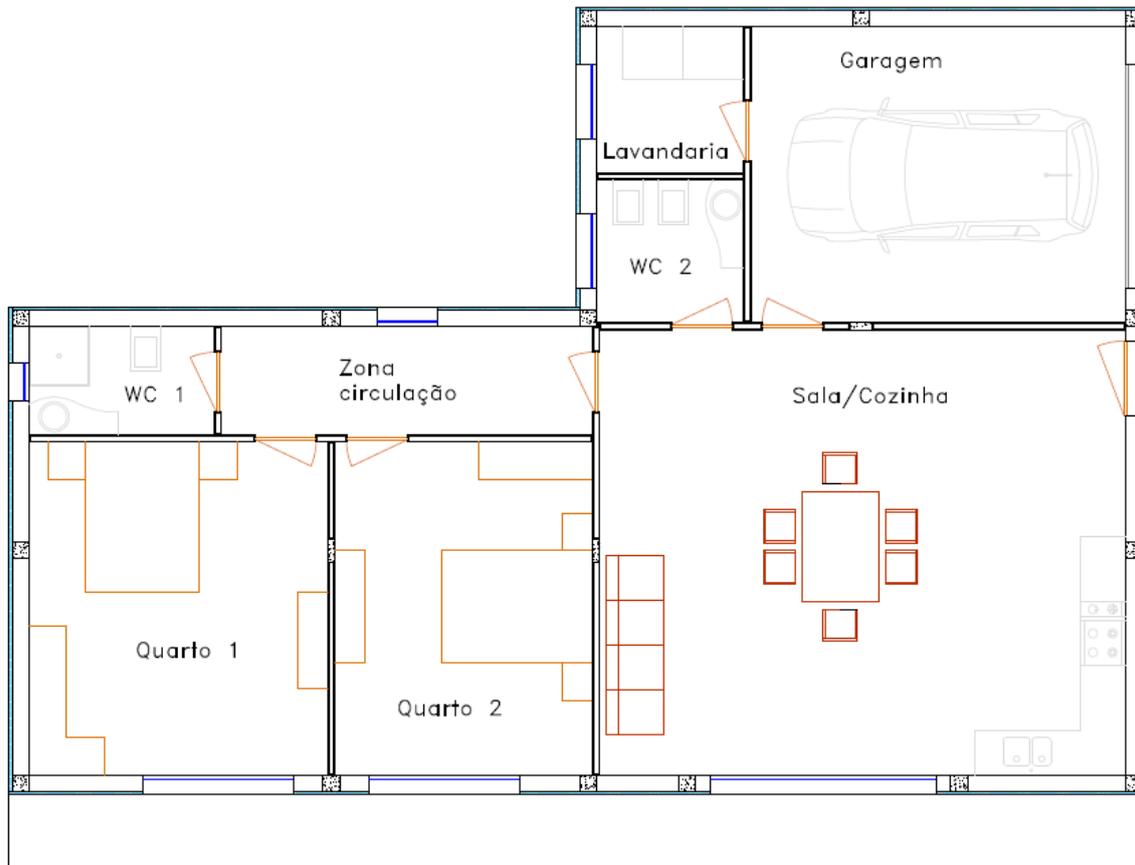


Figura 20 – Edifício simulado na segunda fase, visto em planta.

O edifício representado na Figura 20 possui uma pala horizontal na fachada sul (em todo o seu comprimento, de 14,5m) com uma largura de 1m. As divisões desta habitação unifamiliar possuem as dimensões seguintes:

- WC 1 - 2,5x1,5m;
- WC 2 e Lavandaria – 2x2m;
- Garagem – 5x4m;
- Sala/Cozinha – 7x6m;
- Quarto 1 – 4,5x4m;
- Quarto 2 – 4,5x3,5m.

Neste edifício foi considerado um sistema de climatização com uma eficiência de 100%, mantendo as temperaturas num intervalo de conforto para os ocupantes (temperatura mínima de 20°C no inverno e máxima de 25 no verão). Para além deste sistema foi também

considerado a ocupação do edifício (3 pessoas para uma tipologia T2), a iluminação das divisões, equipamentos e respetivas cargas térmicas. Nas Figuras 21 e 22 são mostradas as fachadas sul e este (Figura 21) e as fachadas norte e oeste (Figura 22) numa representação em 3 dimensões.

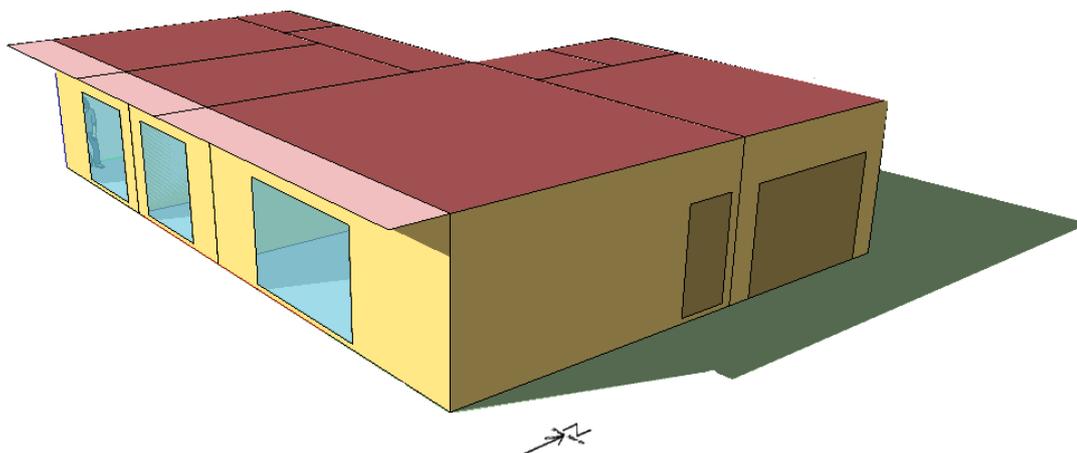


Figura 21 – Fachadas sul e este do edifício.

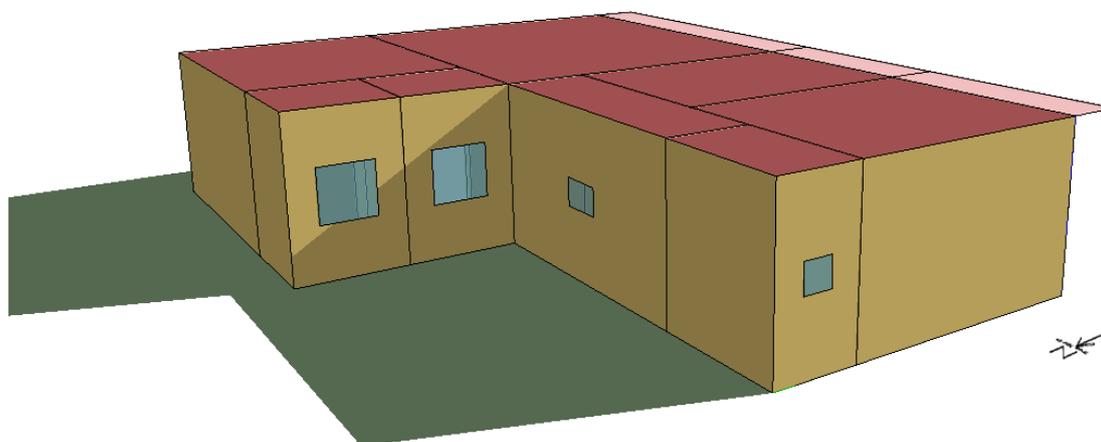


Figura 22 – Fachadas norte e oeste do edifício.

3.3. Soluções construtivas

Consideraram-se três soluções construtivas para paredes exteriores, uma solução para a laje do edifício, outra para o pavimento e ainda uma solução para os vãos envidraçados, considerando para esta última solução a possibilidade de inclusão elementos de sombreamento para se recriar, de uma forma mais realista, os ganhos solares do edifício.

Na segunda fase de simulação consideraram-se ainda uma solução para as portas (interiores e exteriores) e uma solução para as respetivas paredes divisórias que não foram consideradas na primeira fase da simulação. As soluções foram escolhidas de acordo com os métodos mais usuais de construção em Portugal.

As soluções construtivas consideradas são constituídas por vários elementos, com materiais diferentes, dispostos em várias camadas e espessuras. Escolheram-se os materiais e as respetivas espessuras de modo a que seja obtido, para todas as soluções, mesmo valor do coeficiente de transmissão térmica ('U' em $W/m^2.K$) para que, deste modo, se analise as variações e efeitos da inclusão de PCM nas soluções construtivas consideradas.

Com a obtenção do mesmo valor do coeficiente de transmissão térmica para as três diferentes soluções construtivas, consegue-se um comportamento térmico muito idêntico entre as soluções consideradas e para os edifícios compostos por estas soluções, podendo apenas, esse comportamento, ser alterado pelas diferentes massas dos vários materiais que constituem as três soluções (materiais com diferentes massas proporcionam diferentes inércias térmicas no edifício). Com um comportamento semelhante das soluções consideradas, a avaliação das variações térmicas conseguidas pela introdução de PCMs torna-se mais simples e rigorosa, concluindo-se com mais rigor qual a melhor solução para o edifício.

O coeficiente de transmissão térmica de uma solução construtiva pode ser considerado como o inverso do somatório das resistências térmicas dos diferentes materiais. O coeficiente de transmissão térmica é dado pela equação 1 a seguir [50]:

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

Em que: 'U' é o coeficiente de transmissão térmica da solução, em W/m²·K

'R_{si}' é a resistência térmica superficial interior, em m²·K/W

'R_{se}' é a resistência térmica superficial exterior, em m²·K/W

'∑ R_j' é a resistência térmica da camada 'j', em m²·K/W

Tendo em conta os diversos materiais que usualmente compõem as soluções construtivas em Portugal, na Tabela 9 são apresentados todos os dados e cálculos efetuados.

Tabela 9 – Cálculo de coeficiente de transmissão térmica das soluções.

Solução	Elementos (Ext. -> Int.)	Esp. [m]	λ [W/(m·°C)]	Rj [(m ² ·°C)/W]	Rse	Rsi	U [W/(m ² ·°C)]
Parede Simples	Sist. Isolamento Térmico Exterior	0,04	0,036	1,13	0,04	0,13	0,46
	Tijolo Cerâmico Furado (22cm)	0,22	0,38	0,58			
	Caixa-de-Ar (Não Ventilada)	0,03	-	0,18			
	Gesso Cartonado	0,0159	0,16	0,10			
Parede Dupla	Tijolo Cerâmico Furado (15cm)	0,15	0,36	0,42	0,04	0,13	0,46
	Caixa-de-Ar (Não Ventilada)	0,01	-	0,15			
	Placa XPS	0,03	0,035	0,86			
	Tijolo Cerâmico Furado (11cm)	0,11	0,38	0,29			
	Caixa-de-Ar (Não Ventilada)	0,03	-	0,18			
	Gesso Cartonado	0,0159	0,16	0,10			
Parede Betão	Sist. Isolamento Térmico Exterior	0,06	0,04	1,69	0,04	0,13	0,46
	Betão Armado (15cm)	0,15	2,15	0,07			
	Caixa-de-Ar (Não Ventilada)	0,02	-	0,17			
	Gesso Cartonado	0,0159	0,16	0,10			

Nas Figuras 23 a 30 apresentam-se as soluções construtivas a considerar, com os elementos que as compõem identificados e numerados, sem repetição de materiais, para uma maior facilidade de atribuição de todas as propriedades necessárias para simulação, de acordo com as tabelas 10 a 26.

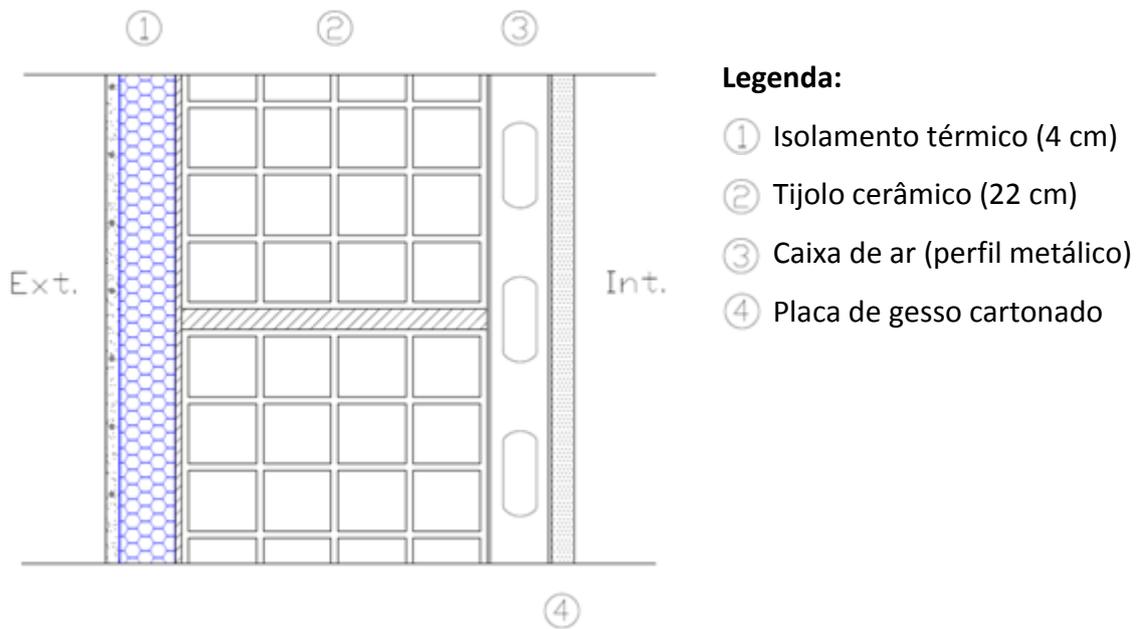


Figura 23 – Parede exterior simples de tijolo cerâmico, com sistema de isolamento térmico pelo exterior.

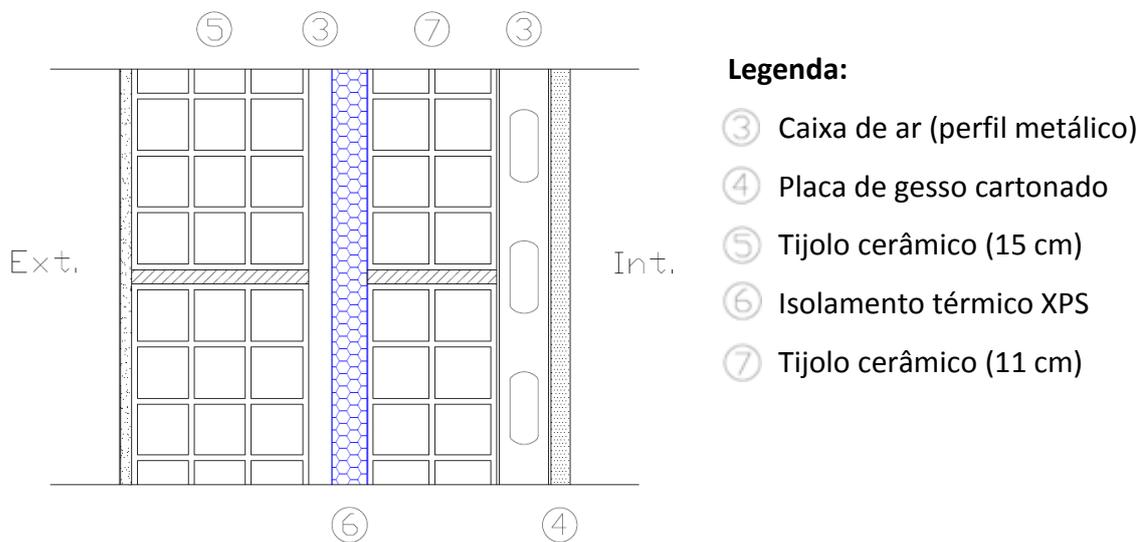


Figura 24 – Parede exterior dupla, com isolamento térmico no interior da caixa de ar.



Figura 25 – Parede exterior em betão armado, com sistema de isolamento térmico pelo exterior.

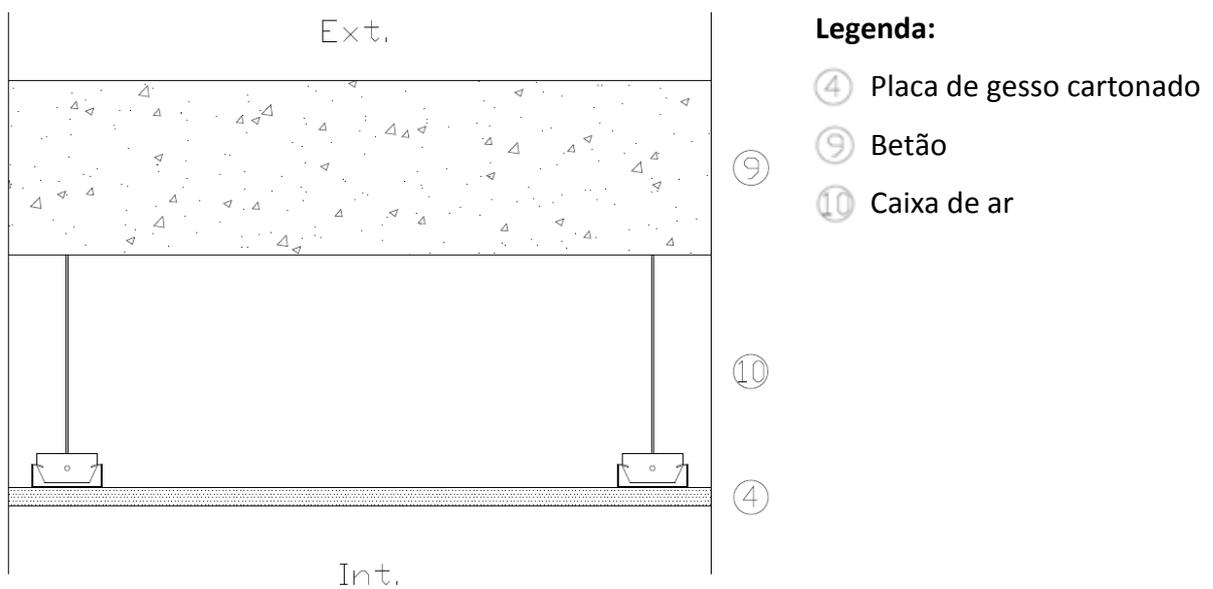


Figura 26 – Laje em betão armado.

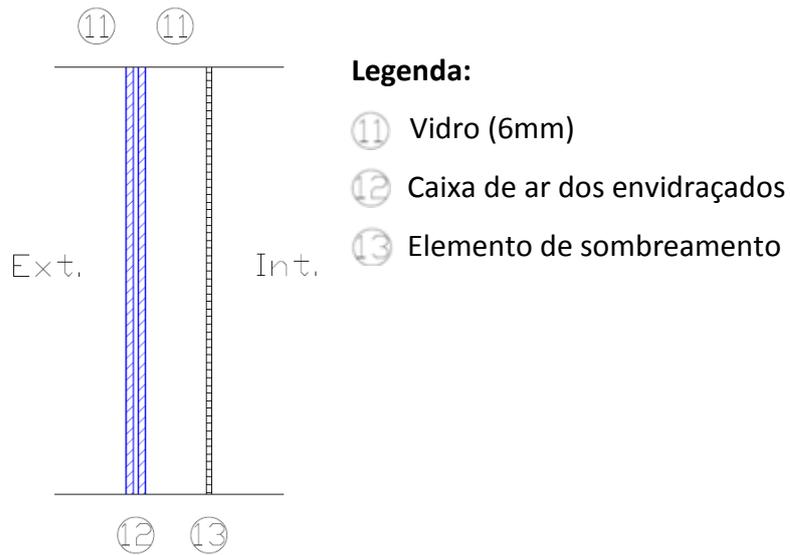


Figura 27 – Vão envidraçado com caixa de ar e estore.

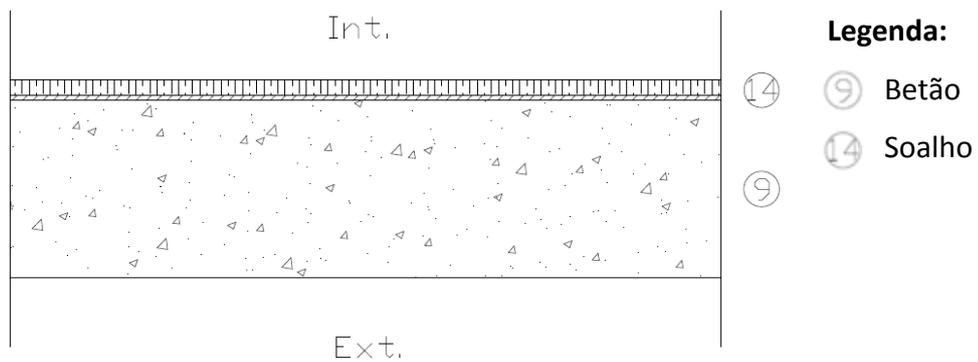


Figura 28 – Pavimento, em betão armado e soalho.

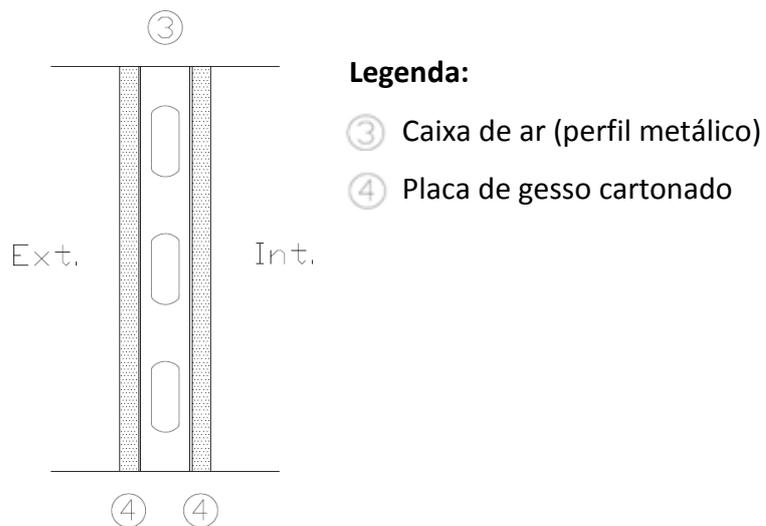


Figura 29 – Paredes divisórias interiores.

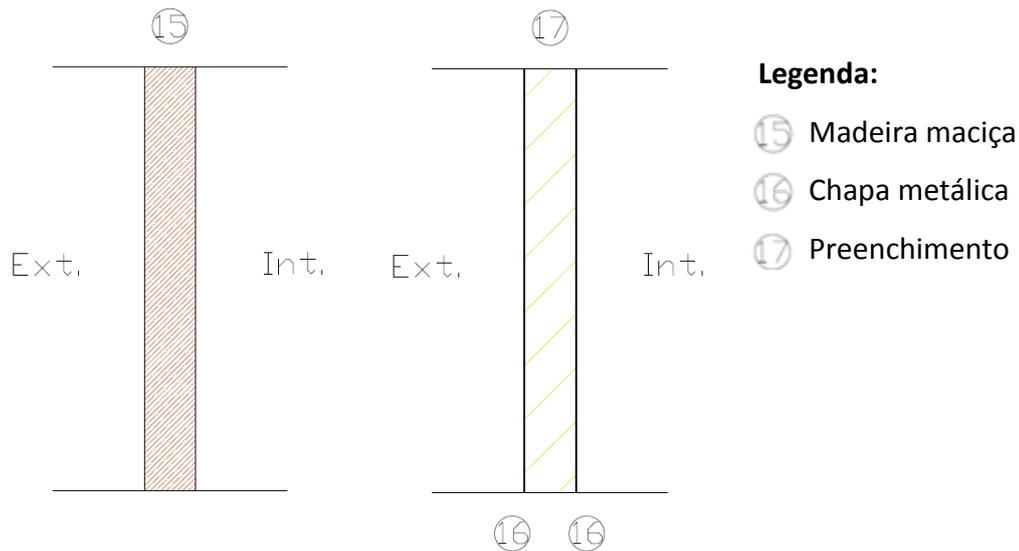


Figura 30 – Solução para portas interiores e exteriores.

Nas Tabelas 10 a 26 apresentam-se as propriedades requeridas pelo software de simulação, dos materiais numerados nas Figuras 23 a 30. Cada algarismo, nestas figuras, corresponde a um dado material.

O sistema de isolamento térmico pelo exterior possui várias camadas, desde a argamassa de colagem, o poliestireno expandido, a argamassa de revestimento e o seu revestimento final. Para a introdução no *software* das propriedades deste sistema considerou-se o mesmo como um elemento só, sendo que as suas propriedades são calculadas separadamente, por camada, com a obtenção de um valor único para uma dada propriedade.

Definindo-se os elementos de uma solução construtiva, a resistência térmica de um elemento é calculada através da expressão 2 a seguir:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (2)$$

Em que: 'R' é a resistência térmica da camada, em m²·K/W
 'e' é a espessura da camada, em m
 'λ' é a condutividade térmica da camada, em W/m·K

Tabela 10 – Propriedades do sistema de isolamento térmico pelo exterior (4cm) [51].

1	Sistema de isolamento térmico no exterior (4cm)
----------	---

Rugosidade	Mediamente Liso
Espessura - e (m)	0,04
Condutividade térmica do isolante térmico - λ (W/m·K)	0,036
Resistência térmica do isolante térmico - R (m ² ·K/W)	1,11
Resistência térmica dos revestimentos - R (m ² ·K/W)	0,02
Resistência térmica total - R (m ² ·K/W)	1,13

Tabela 11 – Propriedades do tijolo cerâmico (22cm) [52].

2	Tijolo Cerâmico (22cm)
----------	------------------------

Rugosidade	Rugoso
Espessura - e (m)	0,22
Resistência térmica - R (m ² ·K/W)	0,58
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	0,38
Densidade (kg/m ³)	633
Calor específico (J/kg·K)	790

Tabela 12 – Propriedades da caixa de ar em paredes [53].

3	caixa-de-ar / Perfil metálico (parede) de 3cm
----------	---

Resistência térmica - R (m ² ·K/W)	0,15
---	-------------

Tabela 13 – Propriedades do gesso cartonado [53].

4	Placa de gesso cartonado (16mm)
----------	---------------------------------

Rugosidade	Mediamente Liso
Espessura - e (m)	0,0159
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	0,16
Densidade (kg/m ³)	800
Calor específico (J/kg·K)	1090

Tabela 14 – Propriedades do tijolo cerâmico (15cm) [52].

5 Tijolo Cerâmico (15cm)

Rugosidade	Rugoso
Espessura - e (m)	0,15
Resistência térmica - R ($m^2 \cdot K/W$)	0,42
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	0,36
Densidade (kg/m^3)	650
Calor específico (J/kg·K)	790

Tabela 15 – Propriedades do isolamento térmico no interior da caixa de ar [54].

6 Placa de Isolamento Térmico XPS (3cm)

Rugosidade	Liso
Espessura - e (m)	0,03
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	0,035
Resistência térmica - R ($m^2 \cdot K/W$)	0,86

Tabela 16 – Propriedades do tijolo cerâmico (11cm) [52].

7 Tijolo Cerâmico (11cm)

Rugosidade	Rugoso
Espessura - e (m)	0,11
Resistência térmica - R ($m^2 \cdot K/W$)	0,29
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	0,38
Densidade (kg/m^3)	670
Calor específico (J/kg·K)	790

Tabela 17 – Propriedades do isolamento térmico pelo exterior (6cm) [51].

8	Sistema de isolamento térmico no exterior (6cm)
----------	---

Rugosidade	Mediamente Liso
Espessura - e (m)	0,06
Condutividade térmica do isolante térmico - λ (W/m·K)	0,036
Resistência térmica do isolante térmico - R (m ² ·K/W)	1,67
Resistência térmica dos revestimentos - R (m ² ·K/W)	0,02
Resistência térmica total - R (m ² ·K/W)	1,69

Tabela 18 – Propriedades da parede de betão [53].

9	Betão (15cm)
----------	--------------

Rugosidade	Mediamente Rugoso
Espessura - e (m)	0,15
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	2,15
Densidade (kg/m ³)	2400
Calor específico (J/kg·K)	900

Tabela 19 – Propriedades da caixa de ar em tetos [53].

10	Caixa-de-ar / Perfil metálico (teto)
-----------	--------------------------------------

Resistência térmica - R (m ² ·K/W)	0,18
---	-------------

Tabela 20 – Propriedades do vidro (6mm) [53].

11 Vidro (6mm)

Dados ópticos	Espectro médio
Espessura - e (m)	0,006
Transmitância solar	0,775
Transmitância solar à frente	0,071
Transmitância solar atrás	0,071
Transmitância visível	0,881
Transmitância visível à frente	0,08
Transmitância visível atrás	0,08
Transmitância por infravermelhos	0
Transmitância por infravermelhos à frente	0,84
Transmitância por infravermelhos atrás	0,84
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	0,9

Tabela 21 – Propriedades da caixa de ar no vão envidraçado [53].

12 Caixa-de-ar do envidraçado (3mm)
--

Tipo de gás no interior	Ar
Espessura - e (m)	0,0032

Tabela 22 – Propriedades do estore [53].

13 Elemento de sombreamento (refletância de média)

Transmitância solar	0,4
Refletância solar	0,5
Transmitância visível	0,4
Refletância visível	0,5
Emissão térmica hemisférica	0,9
Transmitância térmica (W/K)	0
Espessura - e (m)	0,005
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	0,1
Distância ao vidro (m)	0,05

Tabela 23 – Propriedades do soalho (13mm) [53].

14 Soalho (13mm)

Rugosidade	Mediamente Liso
Espessura - e (m)	0,0127
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	0,15
Densidade (kg/m ³)	608
Calor específico (J/kg·K)	1630

Tabela 24 – Propriedades da porta em madeira maciça (4cm) [53].

15 Madeira Maciça (4cm)

Rugosidade	Lisa
Espessura - e (m)	0,04
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	0,12
Densidade (kg/m ³)	544
Calor específico (J/kg·K)	1210

Tabela 25 – Propriedades da superfície metálica das portas exteriores [53, 55].

16 Chapa metálica (1mm)

Rugosidade	Lisa
Espessura - e (m)	0,001
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	45,28
Densidade (kg/m ³)	7824
Calor específico (J/kg·K)	500

Tabela 26 – Propriedades do preenchimento das portas exteriores [53, 55].

17	Placa de isolamento (preenchimento)
Rugosidade	Mediamente Rugosa
Espessura - e (m)	0,04
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	0,03
Densidade (kg/m ³)	43
Calor específico (J/kg·K)	1210

Para pala horizontal presente na geometria dos edifícios a simular, considera-se que são constituídas unicamente por betão armado, uma vez que se trata de uma consola exterior, com uma espessura de 15cm.

3.4. PCMs

Em relação aos materiais de mudança de fase utilizados no processo de simulação optou-se pelo uso de PCMs macroencapsulados, pois tratam-se do tipo de PCM que melhor se adequa às soluções construtivas em estudo ou até mesmo à construção civil em geral, havendo PCMs desenvolvidos, propositadamente, para aplicação direta em soluções construtivas correntes.

Existem vários avanços científicos no sentido de incorporar PCM microencapsulado em argamassas de reboco, de modo a maximizar-se as potencialidades deste material. Contudo, neste estudo optou-se então pelo uso de dois tipos de PCM comercializado e macroencapsulado.

Nas Tabelas 27 e 29 apresentam-se as fichas técnicas dos PCMs macroencapsulados utilizados. Os dois tipos de PCM escolhidos destacam-se entre os vários comercializados pela vasta informação que possuem, podendo ser obtidos os dados ou informações necessárias para o processo de simulação.

Para um correto processo de simulação tornou-se necessário, para cada PCM, obter o gráfico que correlaciona a temperatura com a entalpia de fusão do respetivo material.

O *software* de simulação exige a introdução de 16 valores para a temperatura e correspondentes valores de entalpia de fusão.

Para obtenção da entalpia de fusão de um PCM foi necessário primeiro obter os valores, para cada temperatura, do respetivo calor específico (trata-se do calor necessário para elevar em 1°C a temperatura do material, por unidade de massa). O calor específico de um PCM é dado pela soma do calor sensível (quantidade de calor ganho ou perdido por um material, alterando apenas a sua temperatura) e calor latente (quantidade de calor que um material deverá receber ou ceder, para haja mudança do seu estado físico). Na equação 3 é apresentada a expressão para o cálculo do calor específico do PCM [56].

$$C_{\text{especifico}} = C_{\text{sensível}} + C_{\text{latente}} \quad (3)$$

Em que: ' $C_{\text{especifico}}$ ' 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 calor sensível é retirado diretamente da ficha técnica, adotando o mesmo valor ao longo de todo o intervalo de temperatura. O valor do calor latente é dado pela equação 4 [56].

$$C_{\text{latente}} = A \times e^{-0,5 \times \left(\frac{T-T_m}{B}\right)^2} \quad (4)$$

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 (varia entre 0,1 e 1), considerado igual a 0,8 em todos os cálculos. Adimensional.

Uma vez obtido o valor do calor específico do PCM, para cada temperatura, o valor da entalpia de fusão poderá ser obtido pela equação 5 [20]:

$$\Delta H = Cp \times \Delta T \quad (5)$$

Em que: ‘ ΔH ’ é a entalpia de fusão, para uma dada temperatura, em J/kg
 ‘ Cp ’ é o valor do calor específico, em J/kg·K
 ‘ ΔT ’ é a variação de temperatura do PCM, em °C

Através das equações 3 a 5 consegue-se obter os valores de entalpia de fusão do PCM, necessários (16 valores de temperatura e correspondente entalpia de fusão) para simulação pelo *EnergyPlus*.

3.4.1. Delta®-Cool 24

O Delta®-Cool 24 é um PCM macroencapsulado, desenvolvido na Alemanha, apresentando-se em várias formas de encapsulamento. A escolha deste PCM tem por base algumas das suas principais vantagens como: baixa temperatura de fusão (aproximadamente 25°C), sendo que no seu intervalo de fusão (22°C - 28°C) um litro de Delta®-Cool 24 absorve a mesma energia que dez litros de água.

Este PCM foi testado no Instituto Alemão de Tecnologia na Construção, tendo capacidade para 10.000 ciclos (derretimento/solidificação), permitindo 25 anos de utilização sem perda de propriedades, tratando-se ainda de um material 100% reciclável [41].

Este PCM foi introduzido, na sua forma macroencapsulada, na caixa de ar interior das soluções construtivas (nas paredes, entre a placa de gesso cartonado e o tijolo cerâmico ou betão e nos tetos entre o betão e a placa de gesso cartonado). As suas propriedades apresentam-se na Tabela 27.

Tabela 27 – Ficha técnica do Delta[®]-Cool 24 [41].

DELTA [®] - COOL 24		Dados para Modelação
Material Base	Sal hidratado	-
Temperatura de fusão (°C)	22 - 28	T. fusão = 25°C
Temperatura de cristalização (°C)	22	-
Capacidade de arrefecimento (W/m ²)	25 - 40	-
Energia de fusão (kJ/kg)	158	A = 79 kJ/kg
Densidade (sólido/liquido) (kg/L)	1,6/1,5	-
Capacidade térmica (sólido/liquido) (kJ/kg·K)	2,7/2,2	cp (J/kg·K) = 2700/2200
Condutividade térmica (sólido/liquido) - λ (W/m·K)	1,12/0,56	-
Temperatura máxima de serviço (°C)	60	-
Dimensões (mm)	300 x 600	-

Através dos valores da ficha técnica deste PCM, obtêm-se curvas representadas nas Figuras 31 e 32, correspondentes ao calor específico e entalpia de fusão, respetivamente, para um intervalo de temperatura entre 0 e 50°C.

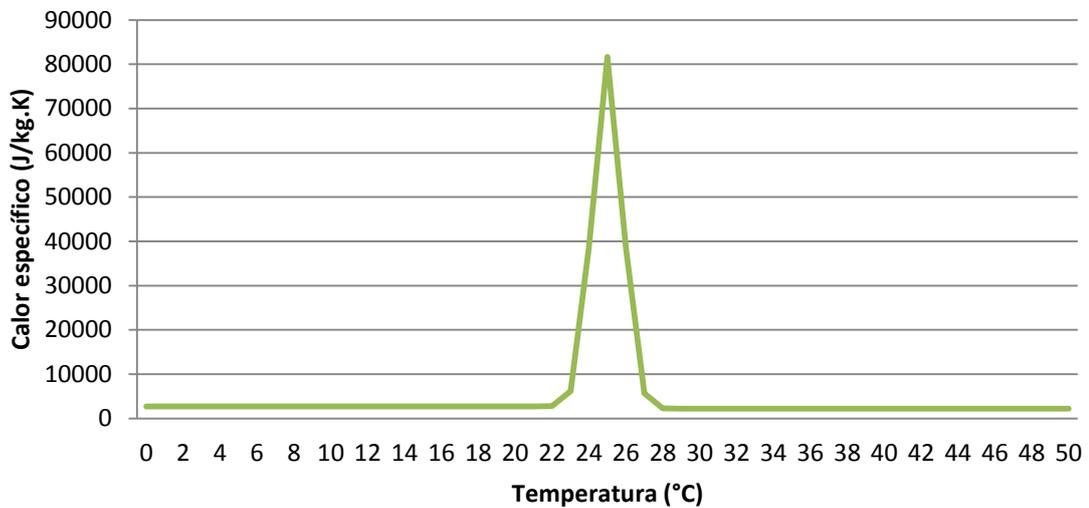


Figura 31 – Curva do calor específico do PCM Delta[®]-Cool 24.

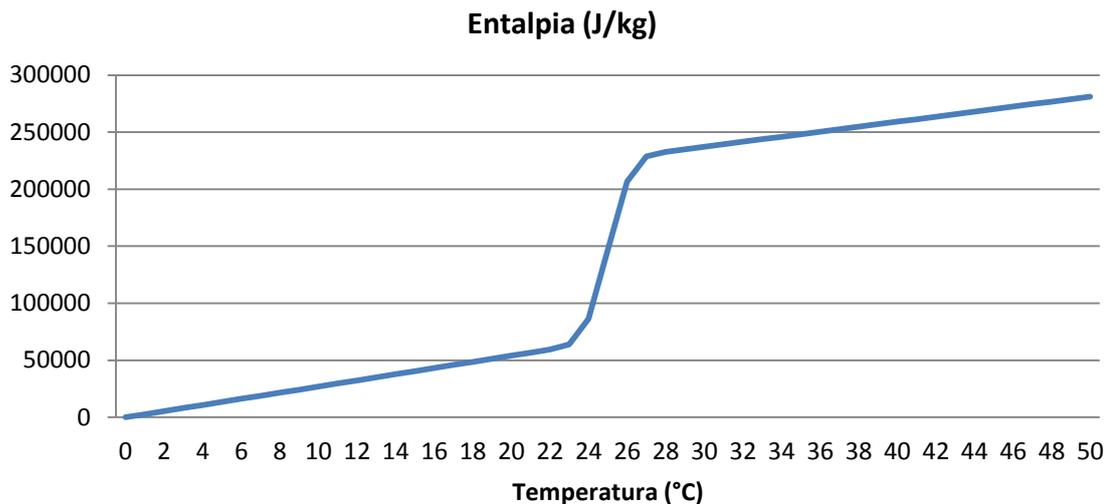


Figura 32 – Curva da entalpia de fusão do Delta®-Cool 24.

Na Tabela 28 apresentam-se os dados introduzidos no programa de simulação, para o PCM Delta-Cool 24®.

Tabela 28 – Temperatura e entalpia de fusão a inserir no *EnergyPlus* (Delta®-Cool 24).

Dados EnergyPlus	
T (°C)	Entalpia (J/kg)
0	0,0
7	18900,0
14	37800,0
20	54000,0
22	59435,2
23	63905,6
24	86425,6
25	146710,0
26	206744,4
27	228764,3
28	232734,7
30	237169,9
35	248169,9
40	259169,9
45	270169,9
50	281169,9

3.4.2. Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26

O Micronal® PCM SmartBoard™ foi também estudado pois trata-se de um tipo de PCM macroencapsulado com boas características comparativamente a outros PCMs comercializados. Este material apresenta uma temperatura de fusão situada num intervalo de 23 a 26°C (devendo ser considerada a temperatura média de 24,5°C). Trata-se um material apresentado em forma de placas, composto por um núcleo em gesso modificado (com integração de PCM microencapsulado) e com um revestimento final em lâ de vidro, formando uma fina forra para o gesso. Tem uma boa durabilidade e facilidade de aplicação, uma vez que é fabricado diretamente em forma de placas, prontas a ser colocadas em obra, sendo por isso um tipo de PCM adequado à aplicação em edifícios [57].

Uma vez que este material é fornecido em forma de placas, no processo de simulação será considerado como revestimento final interior do edifício, substituindo as placas de gesso cartonado consideradas inicialmente (ver soluções construtivas). Na Tabela 29 é apresentada a ficha técnica deste PCM, e os dados necessários para a modelação do mesmo.

Tabela 29 – Propriedades do Micronal® PCM SmartBoard [57].

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	T. 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 (J/kg·K) = 1200
Condutividade térmica - λ (W/m·K)	0,134	-

Através dos valores da ficha técnica do PCM calculou-se qual o calor específico e a entalpia de fusão para um intervalo de temperatura entre os 0 e 50°C. Nas Figuras 33 e 34 apresentam-se as curvas correspondentes.

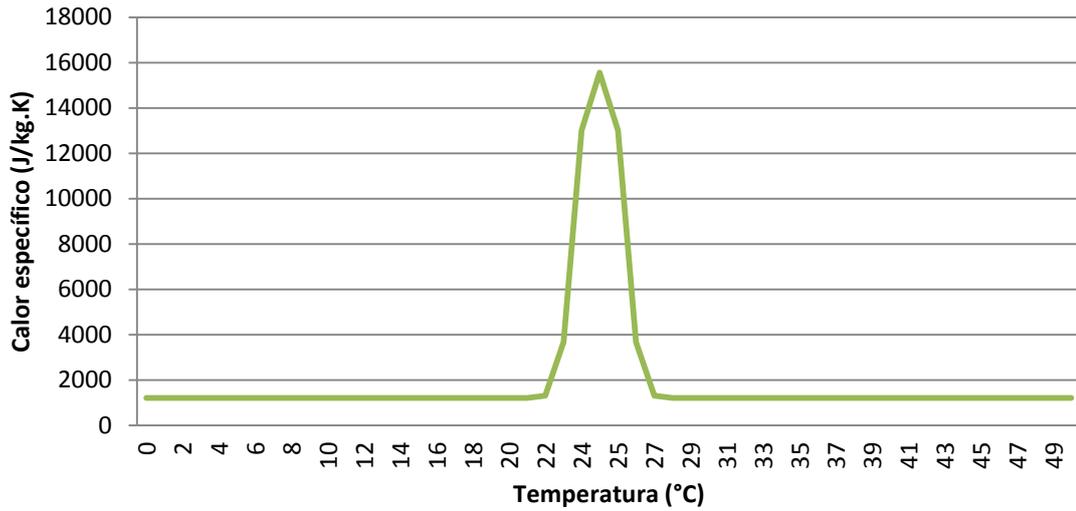


Figura 33 – Curva do calor específico do Micronal® PCM SmartBoard 23/26.

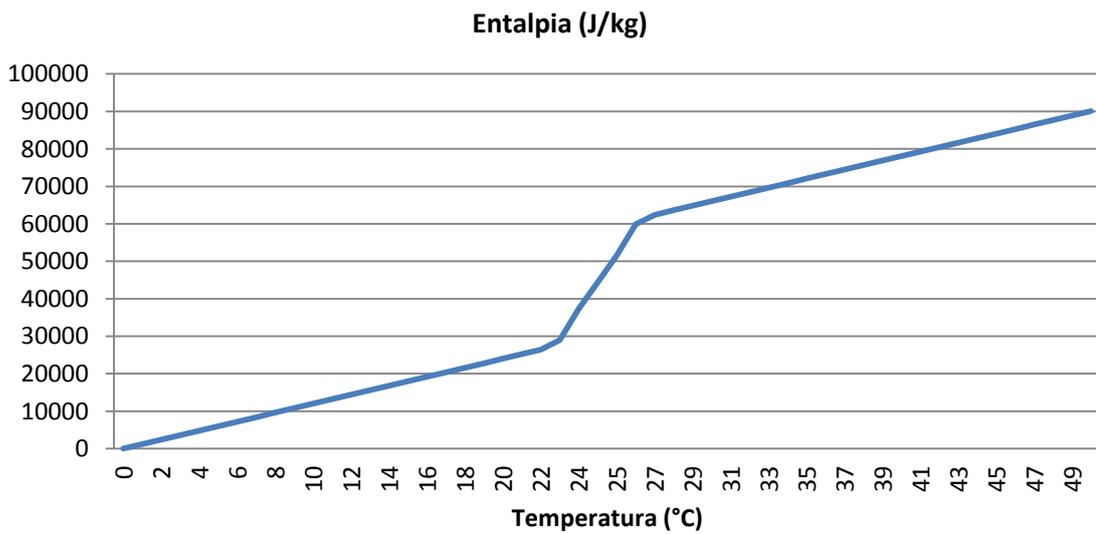


Figura 34 - Curva da entalpia de fusão do Micronal® PCM SmartBoard 23/26.

Verifica-se à partida que este PCM possui valores mais baixos de entalpia de fusão e calor específico, em relação a outros PCMs comercializados. Na Tabela 30 são apresentados os valores de temperaturas e entalpia de fusão a introduzir no *EnergyPlus*.

Tabela 30 – Temperatura e entalpia de fusão a introduzir no *EnergyPlus* (Micronal® PCM SmartBoard 23/26).

Dados EnergyPlus	
T (°C)	Entalpia (j/kg)
0	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

4. RESULTADOS

4.1. 1ª Fase

No presente capítulo apresentam-se os resultados conseguidos na primeira fase de simulação onde, para o mesmo edifício de geometria simples, simularam-se várias hipóteses de colocação de PCM, sendo testados vários PCMs comercializados em diferentes quantidades e zonas.

4.1.1. Sem PCM

Nas Figuras 35 e 36 apresentam-se os resultados da primeira fase de simulação, quando simuladas as três soluções construtivas consideradas, sem PCM, analisando-se o comportamento das mesmas em relação à temperatura exterior verificada no dia mais quente e mais frio do ano. Nas Figuras 35 e 36 são apresentadas as variações de temperatura verificadas para o dia mais quente (Figura 35) e dia mais frio (Figura 36), com o decorrer das horas desses mesmos dias.

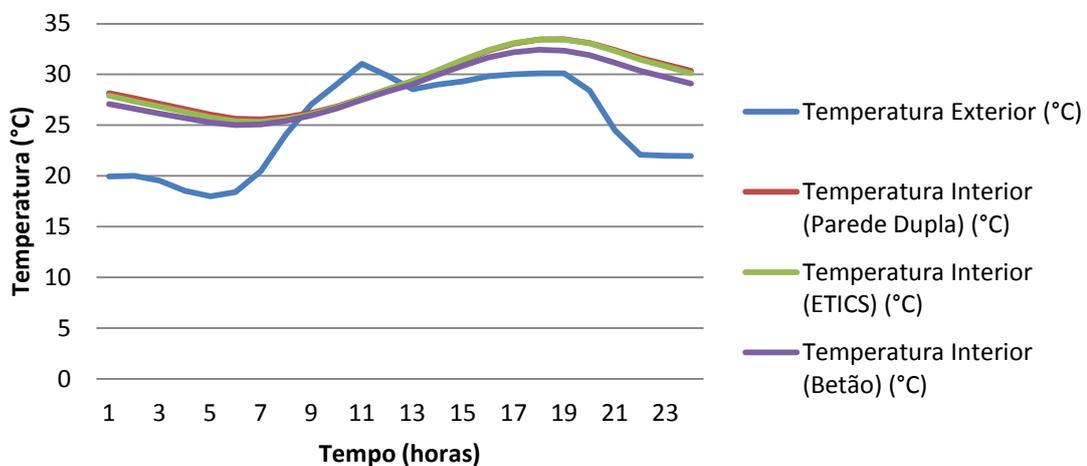


Figura 35 – Temperaturas no interior do edifício para as três soluções construtivas, no dia mais quente.

Verifica-se, através da análise do gráfico representado na Figura 35, que o edifício com o melhor desempenho para o dia mais frio é o que possui a parede de betão armado, com 15cm de espessura. A parede em betão armado irá proporcionar uma inércia térmica mais

forte, devido à sua massa, destacando-se a solução por este fator uma vez que o coeficiente de transmissão térmica é o mesmo valor para todas as soluções ($0,46 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$).

O edifício com betão apresenta temperaturas ambientes interiores mais baixas em relação às restantes duas soluções (a solução de parede dupla e parede simples com isolamento térmico pelo exterior apresentam desempenhos muito semelhantes), verificando-se uma variação de temperatura de $0,8^\circ\text{C}$ na 1ª hora do dia e uma diferença de $1,2^\circ\text{C}$ às 20 horas. Estes resultados conseguem-se devido à inércia térmica mais forte do edifício com betão, devido à massa dos constituintes desta solução.

Na Figura 36 encontra-se representado o gráfico com as temperaturas verificadas no edifício para o dia mais frio (interior e exterior).

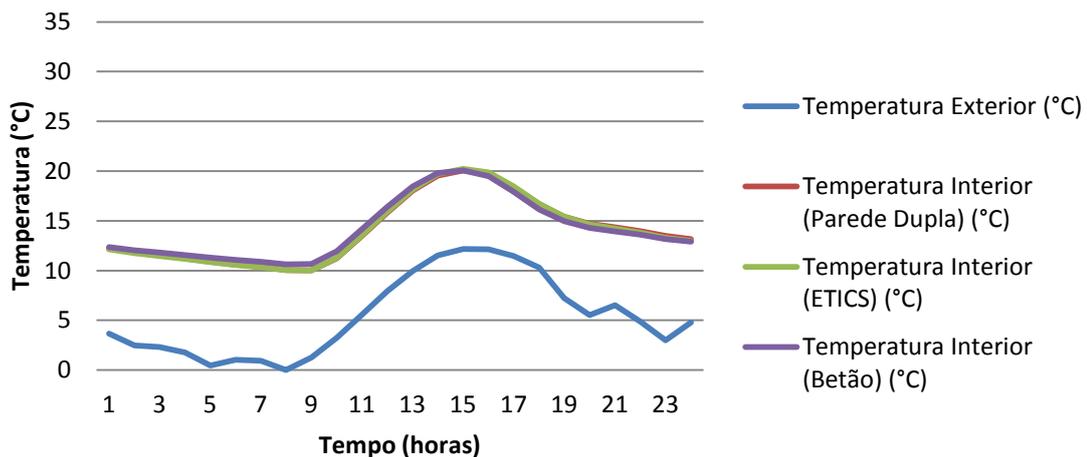


Figura 36 – Temperaturas no interior do edifício para as três soluções construtivas, no dia mais frio.

Através do gráfico da Figura 36 verifica-se que todas as soluções apresentam desempenhos térmicos muito semelhantes, mas ao contrário do dia mais quente a parede de betão não se apresenta como a melhor solução durante todas as horas do dia, havendo um intervalo de tempo em que os edifícios em tijolo cerâmico (parede simples e parede dupla) possuem melhores desempenhos térmicos, com temperaturas mais elevadas.

Até às 15 horas o edifício com paredes exteriores em betão tem um melhor comportamento que as restantes, apresentando temperaturas ambientes interiores superiores (com uma variação de 0,65°C) o que se torna benéfico, estando o edifício com betão mais próximo de uma temperatura de conforto quando se verificam temperaturas exteriores muito baixas. No entanto, a partir das 15 horas do dia mais frio o edifício com paredes exteriores duplas em tijolo cerâmico apresenta-se como a melhor opção, verificando-se temperaturas interiores mais elevadas em relação às restantes soluções construtivas, com uma variação de 0,6°C.

Nas Figuras 37 e 38 apresentam-se os resultados das temperaturas ambientes interiores verificadas quando, juntamente com as soluções construtivas se usa um elemento de sombreamento colocado pelo interior, programados para estarem fechados quando se verificam temperaturas exteriores superiores a 25°C, permitindo assim controlar os ganhos solares tornando-os benéficos nos dias mais frios (aquecendo o edifício) e impedindo que sobre aqueçam o edifício nos dias mais quentes, estando ativos.

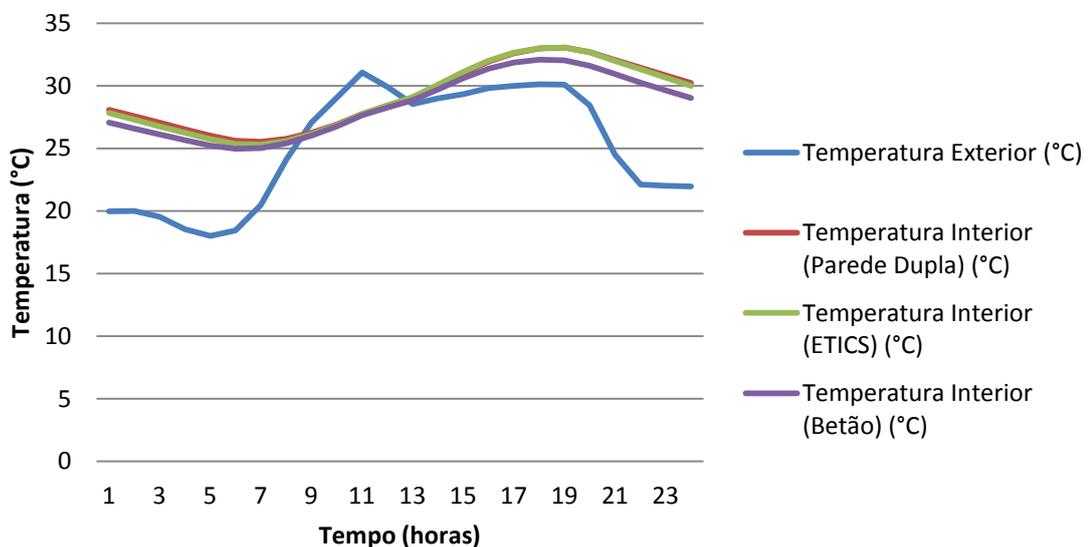


Figura 37 – Temperaturas interiores para as três soluções construtivas com elementos de sombreamento, no dia mais quente.

Para o dia mais quente do ano e em comparação com as soluções construtivas sem elementos de sombreamento, observa-se uma redução de temperatura ambiente interior

nos três edifícios obtendo-se uma variação de temperatura de 0,35°C para o edifício em betão, uma redução de 0,45°C no edifício com paredes exteriores simples em tijolo cerâmico e uma variação mais acentuada de 0,46°C no edifício com paredes duplas em tijolo. No entanto, apesar de se verificar uma menor variação de temperatura a solução de paredes exteriores em betão armado apresenta-se como a com melhor desempenho térmico (temperaturas mais baixas).

Através do gráfico apresentado na Figura 38 verifica-se que o uso de elementos de sombreamento no dia mais frio não altera o desempenho térmico das soluções construtivas, obtendo-se as mesmas temperaturas ambientes interiores. Tal é verificado devido às condições de ativação dos elementos de sombreamento (ativam para temperaturas superiores a 25°C) fazendo com que não sejam ativados estes elementos nos dias mais frios, beneficiado por isso o edifício dos ganhos solares diurnos, contribuindo para o seu aquecimento.

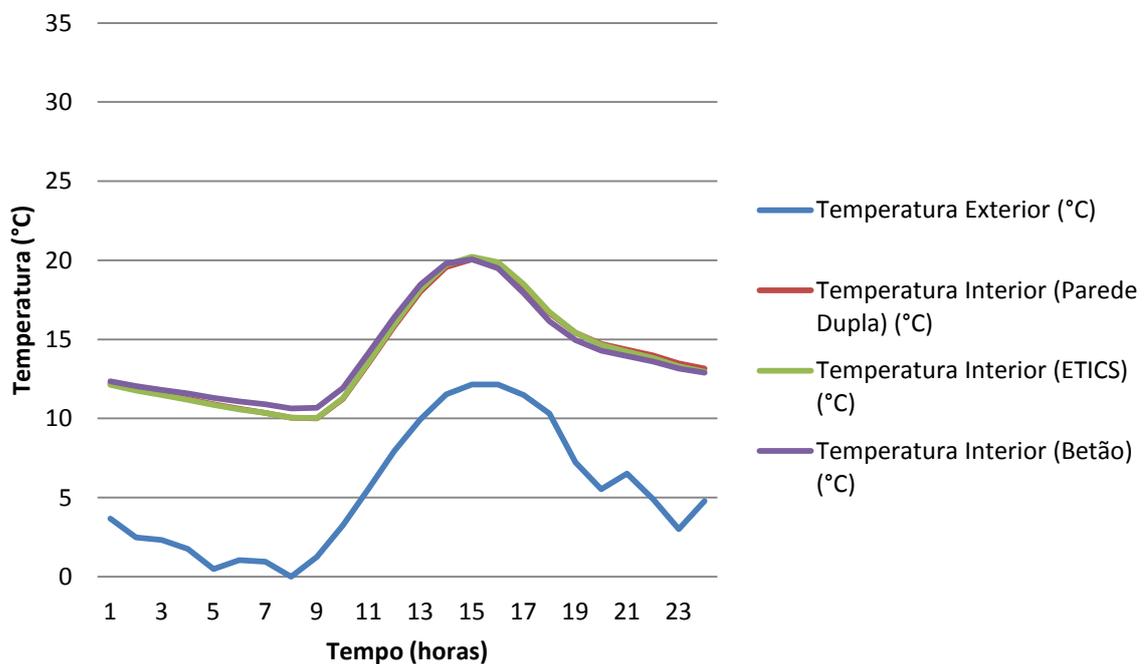


Figura 38 – Temperaturas, para as três soluções construtivas, com estores e para o dia mais frio.

4.1.2. Delta-Cool 24®

4.1.2.1. Parede exterior em betão armado

Simulando a colocação do PCM macroencapsulado, Delta-Cool 24® em paredes exteriores verifica-se um melhoramento das condições de conforto térmico e todos os edifícios. Nas Figuras 39 e 40 são apresentados os resultados para a colocação deste PCM na solução construtiva de paredes exteriores em betão armado com 15cm de espessura para o dia mais quente e mais frio, respetivamente.

As temperaturas apresentadas na Figura 39 resultam da colocação do PCM na caixa de ar de paredes exteriores em betão armado (entre o betão e as placas interiores em gesso cartonado), colocado apenas no teto, apenas em paredes e por fim com a conjugação de teto e paredes do edifício. A colocação de PCM em paredes e teto é a situação que apresenta o melhor desempenho térmico, diminuindo as temperaturas interiores, obtendo-se uma menor amplitude térmica.

Existe apenas uma exceção, até à 10ª hora do dia mais quente verifica-se que a colocação de PCM em paredes e teto é a solução menos vantajosa (juntamente com a colocação no teto apenas), proporcionando temperaturas superiores, com um máximo de 0,6°C às 8 horas, em relação à solução que contempla a colocação de PCM apenas em paredes e a solução sem PCM.

Contudo é de fato mais vantajoso colocar-se PCM conjuntamente em paredes e teto uma vez que neste caso é possível reduzir a temperatura ambiente interior em 3,1°C às 17 horas, resultando da absorção de calor do PCM (este com uma temperatura de fusão de 24°C), situando a temperatura interior em 29,1°C, mantendo-se em valores de temperatura mais ao menos constantes durante as restantes horas do dia, diminuindo a amplitude térmica interior do edifício.

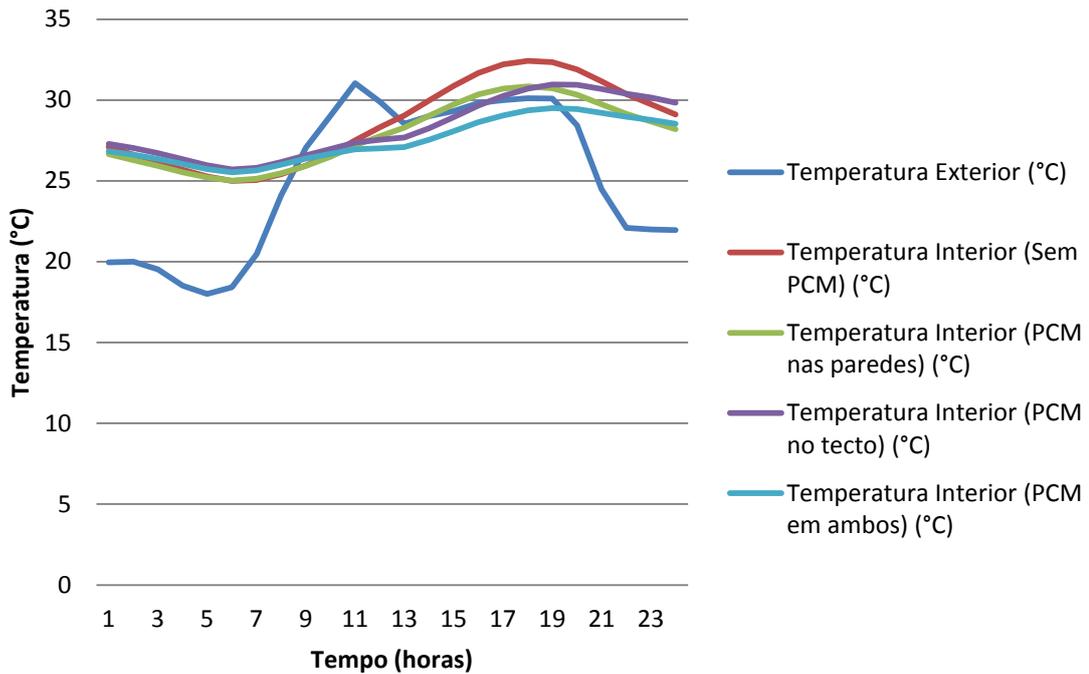


Figura 39 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24® no edifício em betão, para o dia mais quente.

Na Figura 40 apresentam-se os resultados da colocação do PCM na mesma solução construtiva, verificando-se que este método para o dia mais frio do ano não possui resultados tão satisfatórios em comparação com os resultados obtidos para o dia mais quente. A solução que contempla a colocação de PCM em paredes e teto em conjunto é a que apresenta a menor amplitude térmica, contudo, uma vez que se está perante o dia mais frio pretende-se as temperaturas mais altas para um maior conforto dos ocupantes.

Com a colocação de PCM nas paredes e teto consegue-se obter temperaturas superiores, em relação aos restantes métodos, mas apenas em certos intervalos de tempo. O uso de PCM nestas circunstâncias apenas é vantajoso no período noturno (das 24h às 11 horas e desde as 20 às 24 horas, período em que existe uma ocupação efetiva do edifício), correspondendo aos períodos de tempo de libertação de calor por parte do PCM. Neste intervalo de tempo o uso de PCM proporciona um aumento de temperatura interior, chegando a um aumento máximo de 1°C às 8 horas. Entre as 12 e 19 horas verifica-se que o uso de PCM não traz vantagens ao edifício, diminuindo a temperatura, atingindo um valor de 1,6°C às 15 horas.

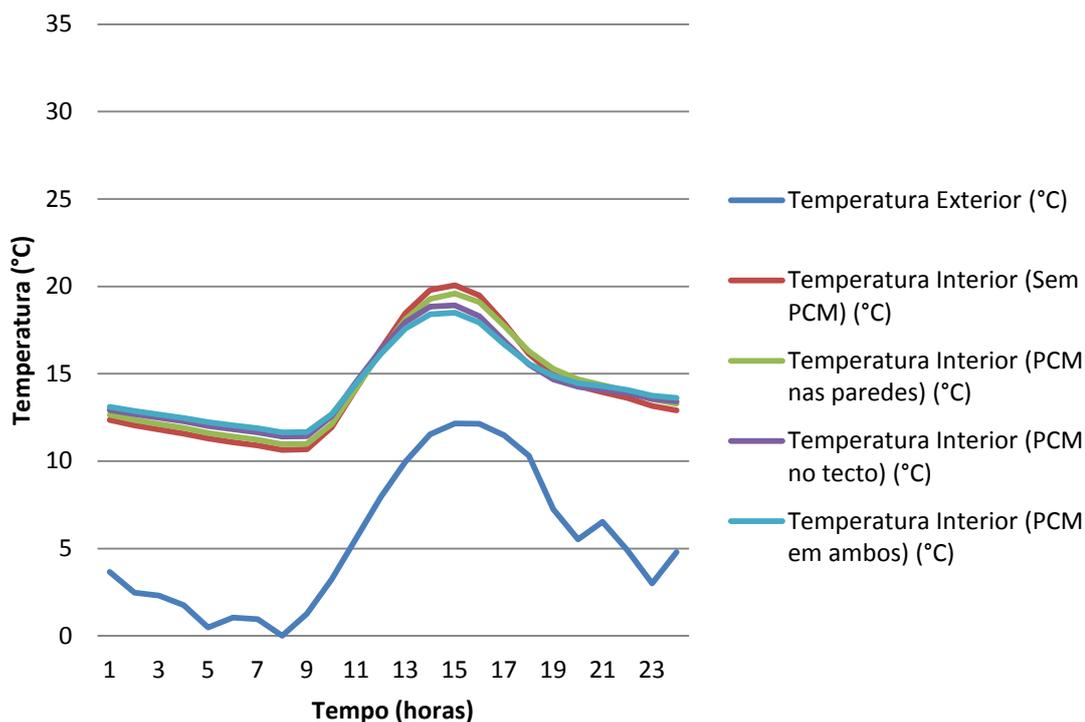


Figura 40 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24® no edifício em betão, para o dia mais frio.

Nas Figuras 41 e 42 apresentam-se os resultados da simulação do PCM colocado na solução construtiva em betão armado, para o melhor método verificado (colocação de PCM em paredes e teto), mas com duas camadas de PCM.

Analisando os gráficos das Figuras 41 e 42 verifica-se que a colocação de duas camadas de PCM na solução construtiva não é compensatória no sentido em que não levará a uma notável diminuição da amplitude térmica em comparação os resultados obtidos para apenas uma camada de PCM.

Para o dia mais quente (Figura 41) a colocação de PCM em duas camadas levará a uma diminuição máxima (em relação à colocação de PCM em uma camada) de 1,2°C. Para o dia mais frio (Figura 42), em relação à mesma solução construtiva sem PCM, verifica-se um aumento máximo de 0,6°C. Perante estes resultados verifica-se que a colocação de PCM em duas camadas é de fato benéfica para o verão e inverno (diminuindo e aumentando as

temperaturas ambientes interiores, respetivamente), mas para tal é exigido o dobro do investimento, não se verificando resultados que o justifique.

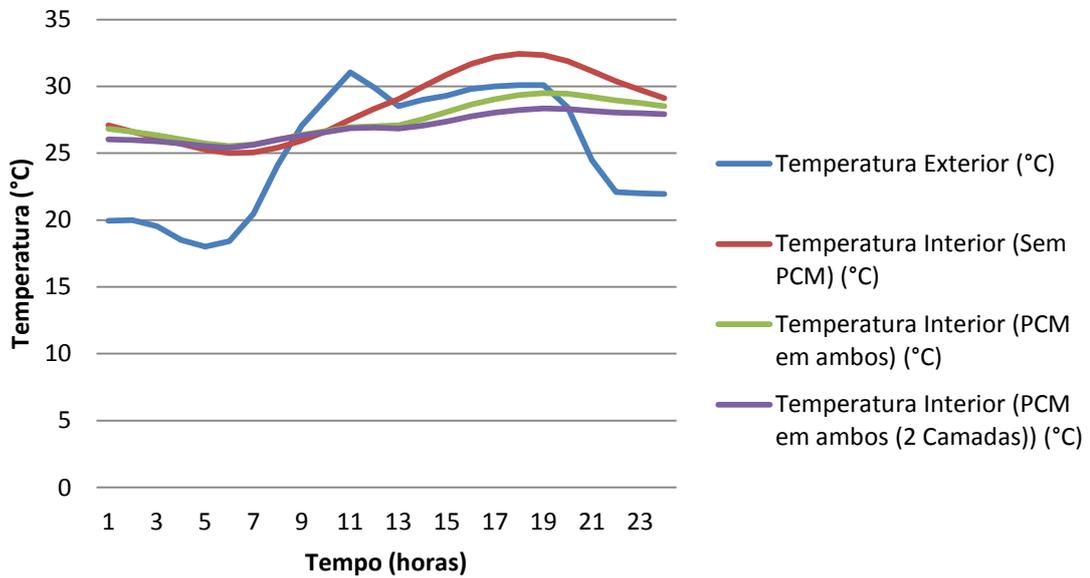


Figura 41 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24® em 2 camadas, no edifício em betão, para o dia mais quente.

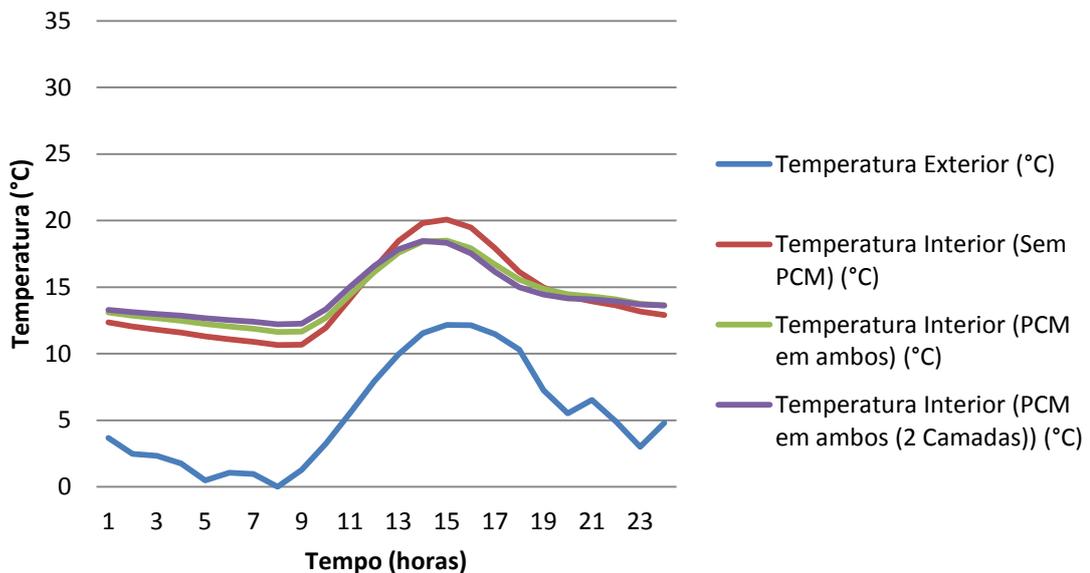


Figura 42 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24® em 2 camadas, no edifício em betão, para o dia mais frio.

4.1.2.2. Parede exterior dupla em tijolo cerâmico

Nas Figuras 43 e 44 apresentam-se as temperaturas ambientes interiores obtidas com a colocação de Delta-Cool 24® em todas as quatro paredes exteriores e teto.

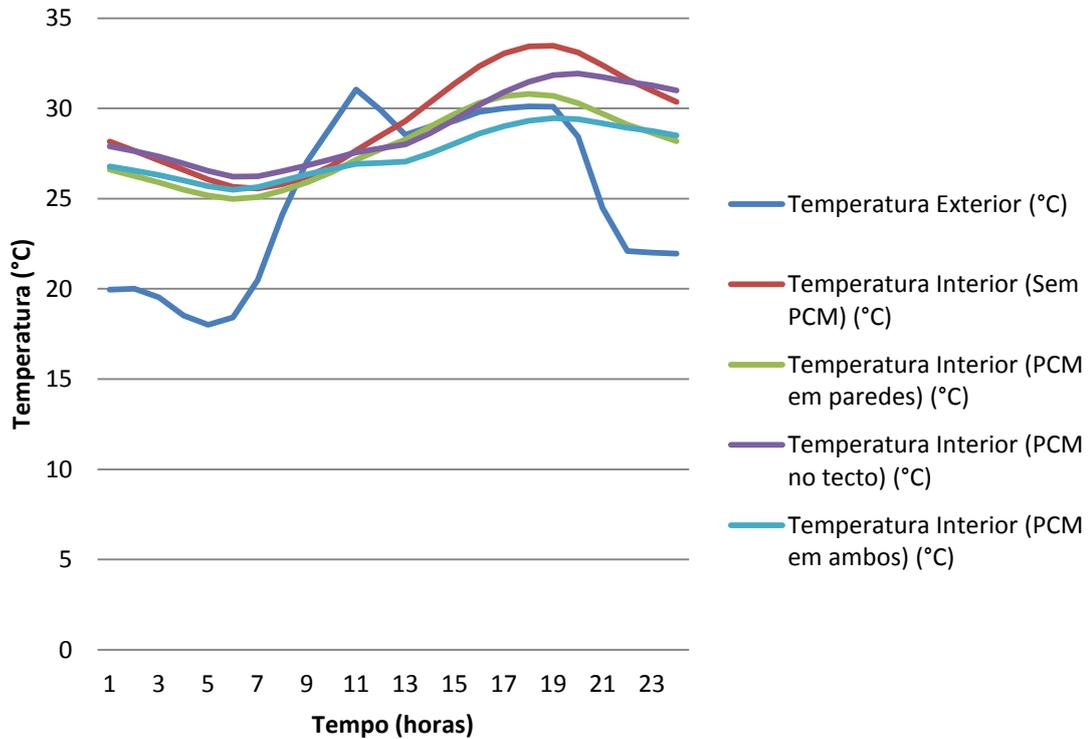


Figura 43 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24®, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.

Para a solução de parede dupla em tijolo cerâmico, a situação que contempla a colocação de PCM nas paredes e teto em conjunto apresenta o melhor desempenho térmico em comparação com os restantes métodos de colocação de PCM (apenas teto ou apenas paredes). A colocação de PCM nesta solução proporciona uma diminuição da temperatura, verificando-se um melhor desempenho térmico da solução construtiva, caminhando para a obtenção de uma temperatura mais confortável para os ocupantes do edifício.

Com PCM nas paredes e teto do edifício obtêm-se valores de temperaturas inferiores ao conseguido para os restantes métodos, verificando-se valores mais baixos de temperatura

em todas as horas do dia excetuando o intervalo de tempo entre a 1ª e 10ª hora do dia onde o método de colocação de PCM apenas em paredes apresenta temperaturas inferiores (até - 0,5°C às 8 horas). Ainda assim a colocação de PCM em paredes e tetos conduz a valores inferiores ou iguais de temperatura durante todo o dia mais quente do ano, em relação à solução sem PCM, atingindo mesmo uma diminuição de 4,1°C às 18h do mesmo dia, fixando a temperatura interior em 29,3°C.

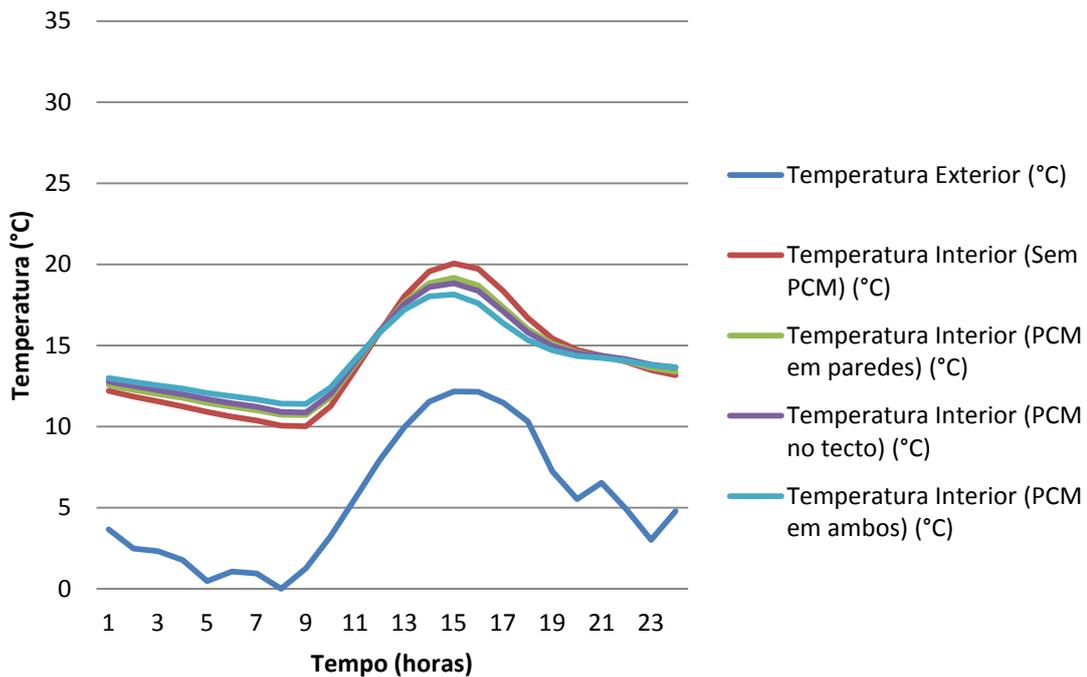


Figura 44 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24®, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.

Para o dia mais frio, à semelhança das outras soluções construtivas, a colocação de PCM no tecto e paredes do edifício apresenta-se como o método que proporciona uma menor amplitude térmica. Entre as 12 e 21 horas a colocação de PCM diminuirá a temperatura no interior do edifício.

Desde a 1ª hora do dia mais frio do ano e até às 12 horas do mesmo a colocação de PCM no tecto e paredes exteriores enquadra-se como uma boa solução, com melhor desempenho térmico, aumentando a temperatura interior do edifício, conseguindo um aumento de 1,4°C

às 9 horas. Contudo a partir das 12 horas a colocação de PCM no edifício conduz a uma diminuição da temperatura (devido à absorção de calor por parte do PCM perante temperaturas mais altas verificadas durante o dia), o que não será benéfico para o dia mais frio. A solução construtiva sem PCM apresenta temperaturas superiores ou semelhantes à hipótese de colocação de PCM, com uma temperatura superior 2,1°C às 16 horas.

Nas Figuras 45 e 46 são apresentados os resultados da colocação de duas camadas de PCM Delta-Cool 24® em tetos e paredes.

Verifica-se, contudo, pouco vantajoso a colocação de duas camadas de PCM uma vez que seria usado o dobro do PCM para uma diminuição muito pouco expressiva da temperatura no dia mais quente (1,1°C às 20 horas, em relação à solução com uma camada de PCM e 5,2°C em relação à solução sem PCM) e apenas um ligeiro aumento da temperatura do dia mais frio (0,7°C às 10 horas, em relação à solução com uma camada de PCM e 2,1°C em relação à solução sem PCM). Em comparação com a hipótese de colocação de apenas uma camada de PCM, a colocação de duas camadas apresenta resultados muito pouco expressivos que justifiquem tal investimento.

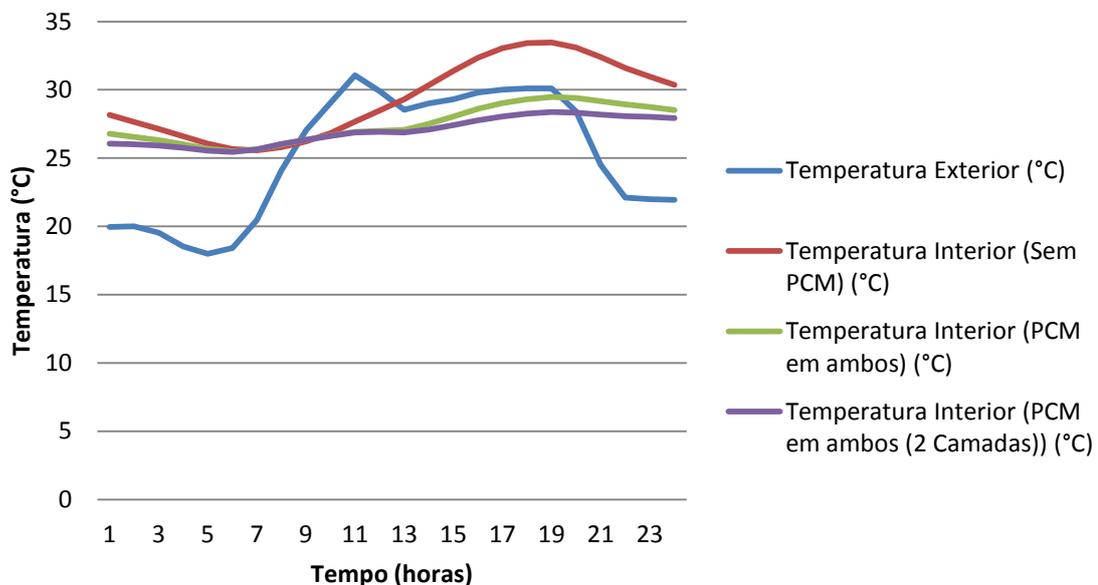


Figura 45 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24®, em 2 camadas, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.

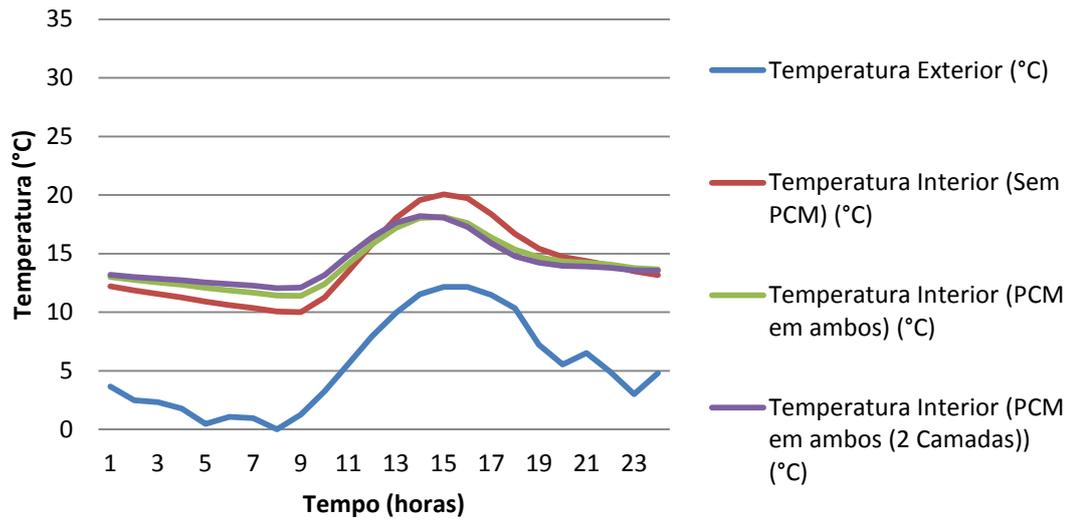


Figura 46 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24®, em 2 camadas, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.

4.1.2.3. Parede exterior simples em tijolo cerâmico

Nas Figuras 47 e 48 apresentam-se os resultados conseguidos com a colocação de Delta-Cool 24® em paredes exteriores e teto.

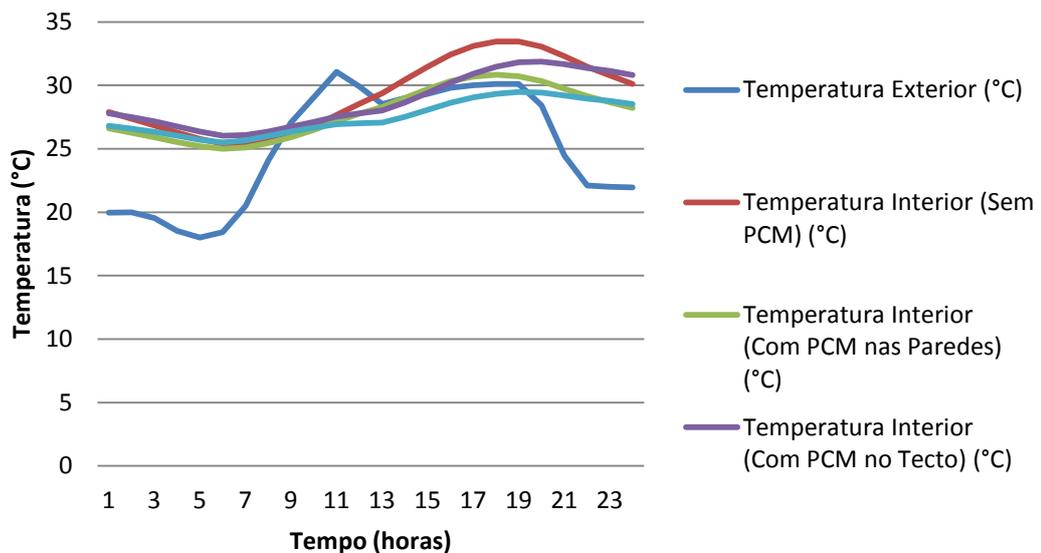


Figura 47 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24®, no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.

Verifica-se também para esta solução que a colocação de PCM em paredes e teto é o método mais vantajoso, sendo superado apenas entre a 1 e 10 horas pelo método de colocação de PCM apenas em paredes pois este apresenta temperaturas inferiores, nomeadamente menos 0,5°C às 8 horas (Figura 45).

Nas restantes horas do dia mais quente a colocação de PCM em paredes e no teto apresenta-se como a melhor hipótese, possuindo temperaturas inferiores às verificadas e relação aos outros métodos de colocação de PCM. Concretamente, em relação à solução construtiva sem PCM, a colocação de PCM no teto e paredes exteriores proporciona um melhor desempenho térmico para o dia mais quente, com diminuição de temperatura, atingindo uma temperatura mais baixa 4,1°C às 18 horas.

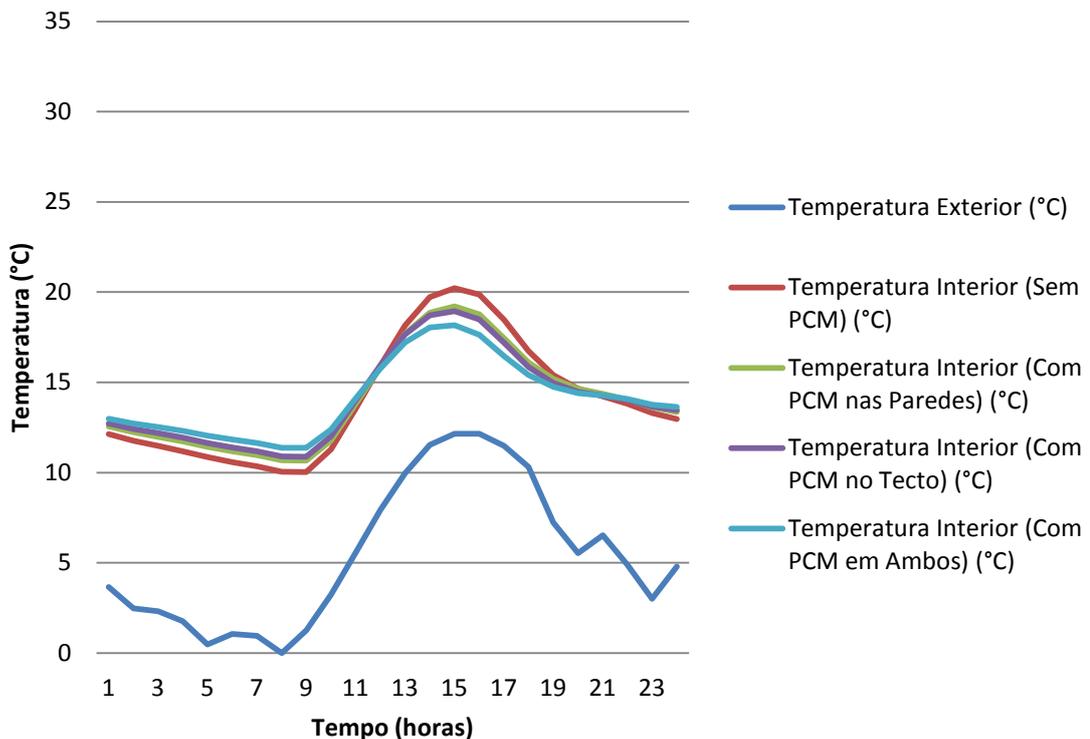


Figura 48 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24®, no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.

Colocando PCM nas paredes e no teto, o edifício apresenta um melhor desempenho térmico, mas não para todas as horas do dia (Figura 48). Desde o início do dia e até às 11

horas será mais vantajoso apresentando temperaturas sempre superiores a todas as outras opções de colocação de PCM e sem PCM na solução construtiva (1,3°C às 9 horas). No intervalo de tempo entre as 11 e 21 horas o edifício sem PCM apresenta o melhor comportamento térmico com temperaturas superiores em comparação com a solução de colocação de PCM em paredes e no teto de cerca de 2,2°C, às 16 horas. Devido à libertação de calor armazenado durante o dia (tratando-se de um PCM com uma temperatura de fusão de 24°C), entre as 21 e 24 horas a colocação de PCM em paredes e teto apresenta-se novamente como a melhor hipótese, com temperaturas superiores cerca de 0,7°C às 24 horas.

Nas Figuras 49 e 50 apresentam-se os resultados obtidos com a colocação de PCM nas paredes e no teto, em duas camadas. O edifício com duas camadas de PCM nas paredes e teto apresenta uma melhoria ligeira do desempenho térmico do edifício.

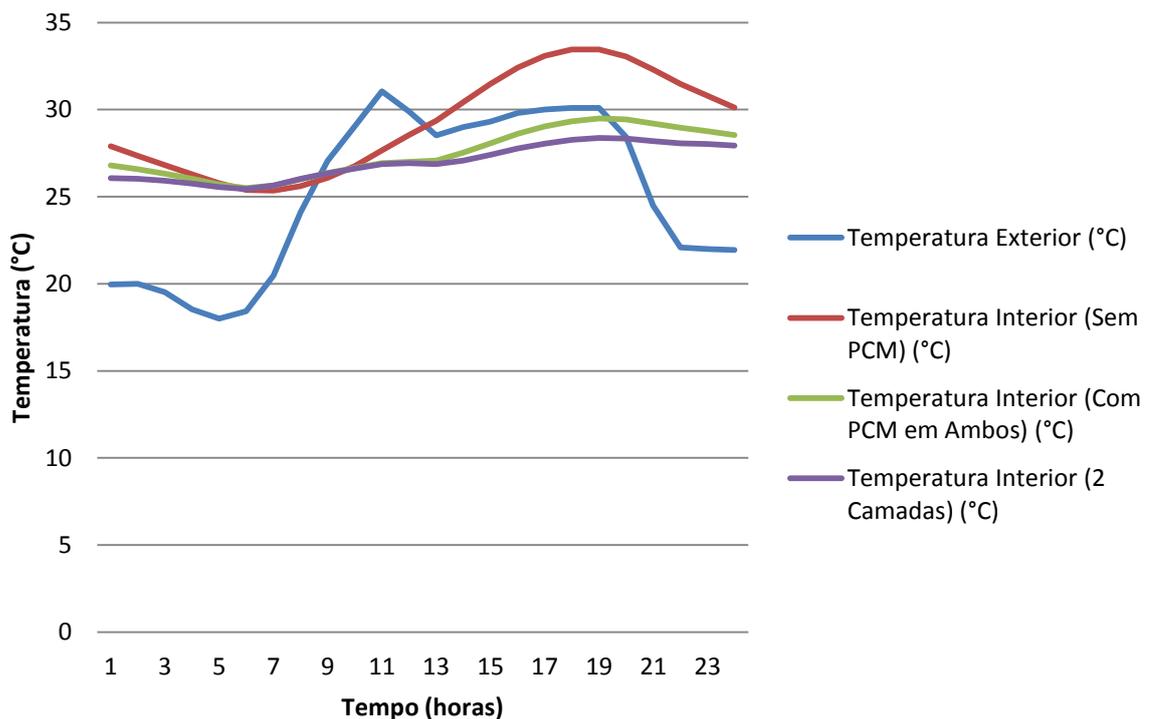


Figura 49 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24® em 2 camadas, no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.

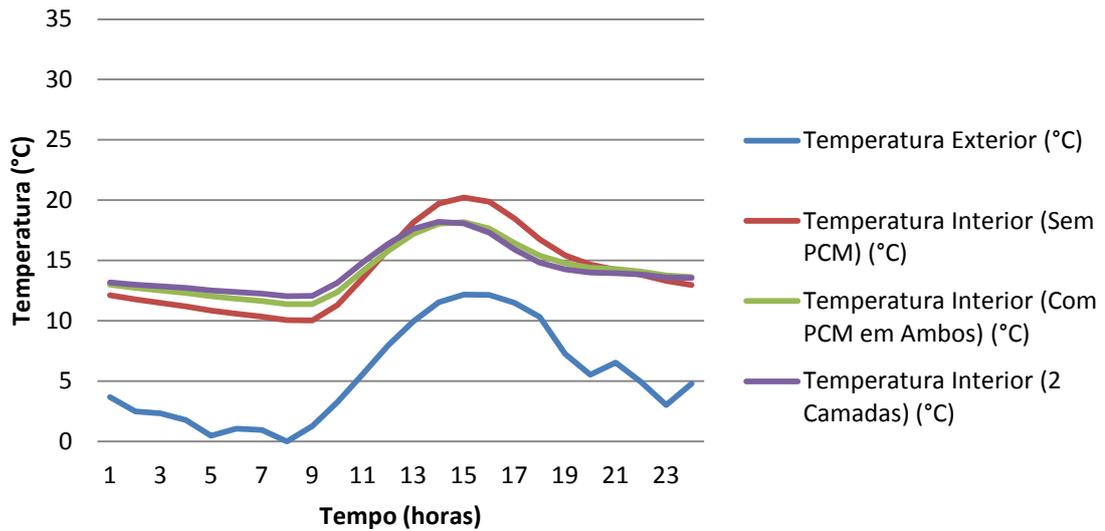


Figura 50 – Temperaturas interiores com Delta-Cool 24® em 2 camadas, no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.

A colocação de PCM em duas camadas, em paredes e teto, proporciona (em relação à solução com uma camada apenas) uma diminuição máxima de 1,1°C às 19 horas do dia mais quente (variação total de 5,2°C em relação à solução sem PCM) e um aumento máximo de apenas 0,8°C às 10 horas do dia mais frio (resultando numa variação total de 2,1°C em relação à solução sem PCM). No dia mais frio a colocação de PCM em apenas uma camada acaba por se revelar como mais vantajosa, com temperaturas superiores à solução com duas camadas, desde as 15 às 24 horas. Conclui-se então que o uso de o dobro do material resulta num melhoramento pouco significativo dos edifícios, não sendo por isso justificável o uso de duas camadas deste PCM.

4.1.3. Micronal® PCM SmartBoard™ 23/26

4.1.3.1. Parede exterior em betão armado

Com a colocação de Micronal® SmartBoard™ 23/26, tratando-se este de um PCM pronto a colocar em obra (macroencapsulado e disposto em placas de gesso cartonado com PCM integrado), levará a que não seja necessário alterar a disposição dos elementos nas soluções

construtivas de paredes exteriores, substituindo-se apenas as placas de gesso cartonado colocadas pelo interior pelo PCM [56]. Nas Figuras 51 e 52 apresentam-se os desempenhos térmicos do edifício quando o PCM é colocado em paredes, no teto, ou no conjunto paredes e teto.

Na Figura 51 são apresentadas as temperaturas verificadas no dia mais quente do ano, considerando a colocação de PCM em paredes e no teto. A colocação de PCM Micronal® SmartBoard™ 23/26 proporciona um desempenho térmico pior do que a solução construtiva sem PCM pois verificam-se durante o dia de calor temperaturas superiores (cerca de 0,4°C superior, às 7 horas) às verificadas para a solução construtiva sem a colocação de PCM. Apenas no intervalo de tempo entre as 10 e 12 horas a colocação de PCM em paredes e no teto (em conjunto ou separadamente) se afigura como uma opção que proporciona temperaturas inferiores em comparação com a solução construtiva sem PCM apesar de a diferença ser mínima.

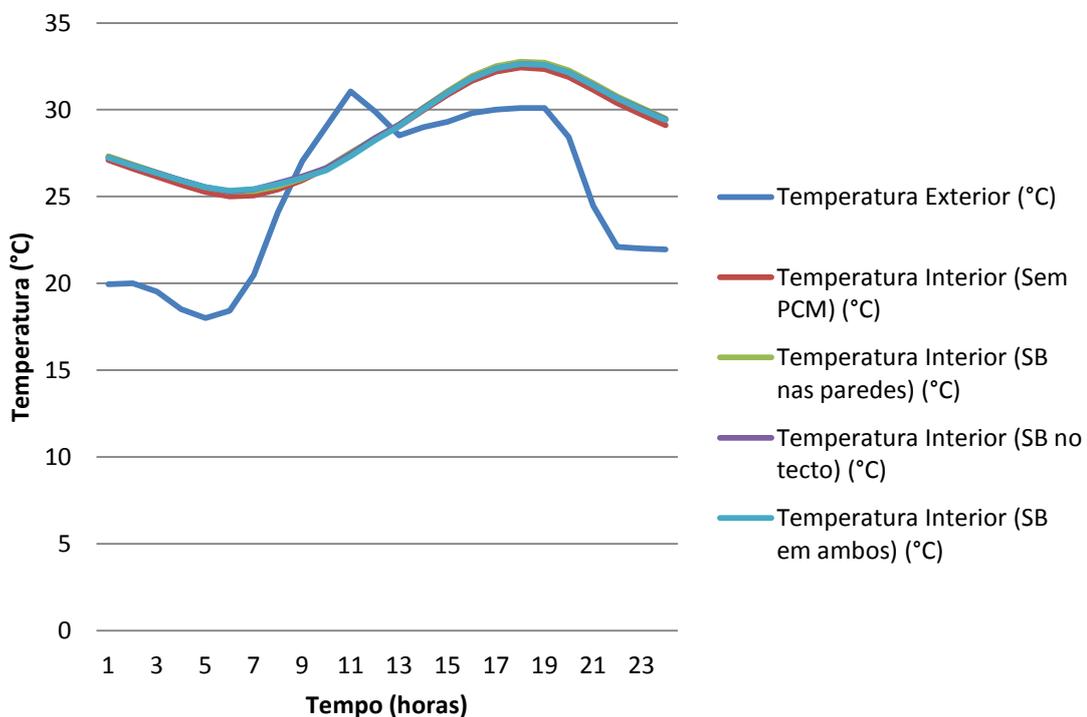


Figura 51 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ no edifício de betão, para o dia mais quente.

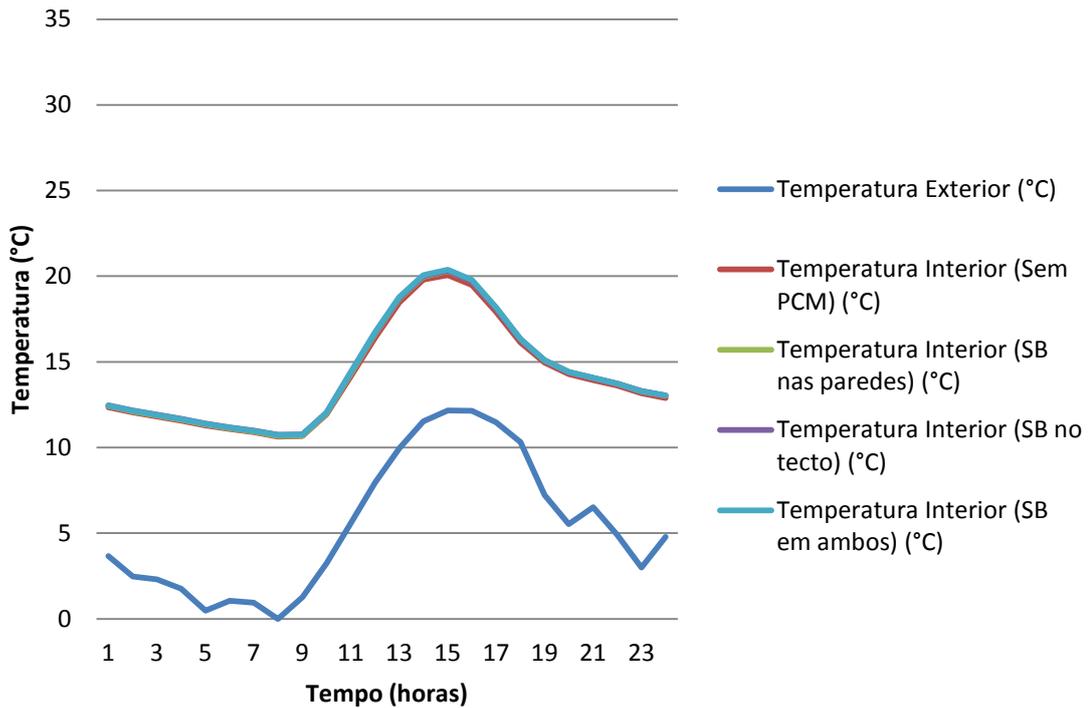


Figura 52 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ no edifício de betão, para o dia mais frio.

Para o dia mais frio (Figura 52) o uso deste PCM na solução já possui resultados favoráveis a um melhor desempenho térmico do edifício, apresentando temperaturas superiores para o dia mais frio, em relação à solução construtiva sem PCM.

Ao contrário do comportamento do Delta-Cool 24® (e apesar de possuírem temperaturas de fusão idênticas) a colocação do presente PCM durante o inverno irá proporcionar ao edifício temperaturas sempre superiores às conseguidas para a solução construtiva sem PCM. Colocando PCM em paredes e no teto (em conjunto ou separadamente) o edifício apresenta temperaturas superiores durante todo o dia mais frio, com um diferencial de temperatura máximo de 0,3°C às 12, 13 e 15 horas do dia.

Apesar de benéfico, no inverno o uso deste PCM levará a um acréscimo muito reduzido da temperatura interior e no verão chega mesmo a ser desvantajoso o uso deste material. Por isso constata-se que o seu uso não se justifica para o edifício com paredes exteriores em

betão armado. Nas Figuras 53 e 54 são ainda apresentados os gráficos relativos ao desempenho do PCM com a colocação do mesmo em duas camadas.

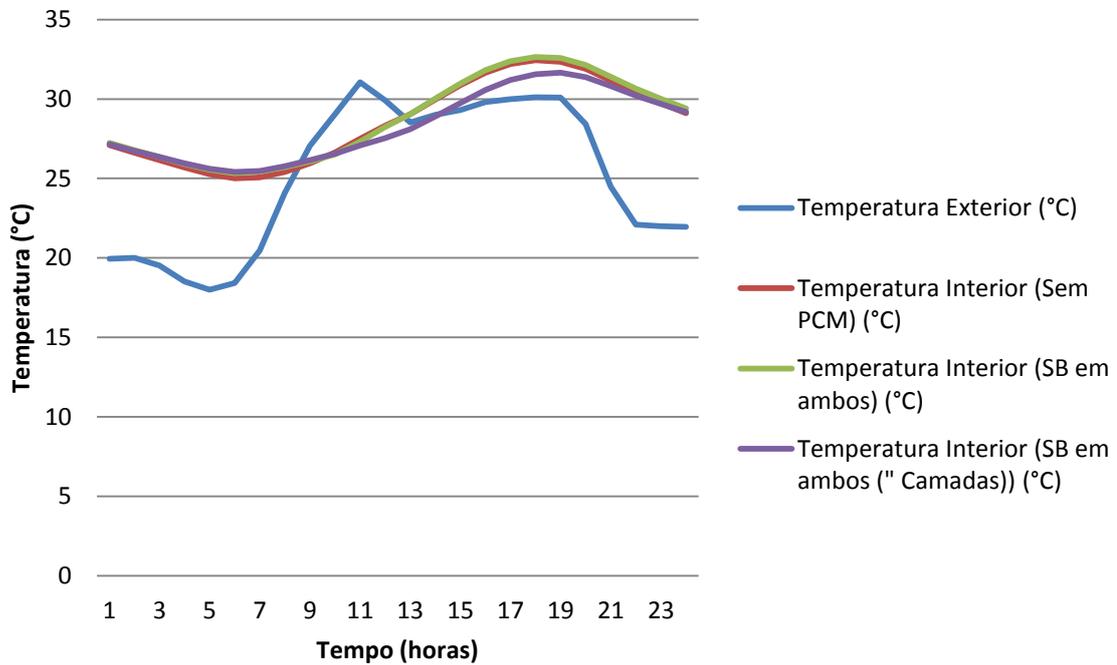


Figura 53 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ em 2 camadas, no edifício de betão, para o dia mais quente.

Para o dia mais quente (Figura 53), com a colocação do PCM em duas camadas (no teto e em paredes, em conjunto) melhora-se o desempenho térmico do edifício em relação à mesma solução construtiva com uma camada de PCM, mas ainda assim se obtém, até às 11 horas, temperaturas superiores (com uma variação de 0,4°C) em relação ao edifício sem PCM, continuando a não se verificar benéfica a colocação deste PCM mesmo no dobro da quantidade. No entanto, no período de tempo que decorre entre as 11 horas e o fim do dia o uso de duas camadas apresenta um melhor comportamento térmico, com temperaturas inferiores em comparação com o edifício sem PCM (com uma variação de 1,2°C às 16 horas). Conclui-se assim que o uso deste PCM, mesmo em duas camadas, continua a não apresentar resultados satisfatórios.

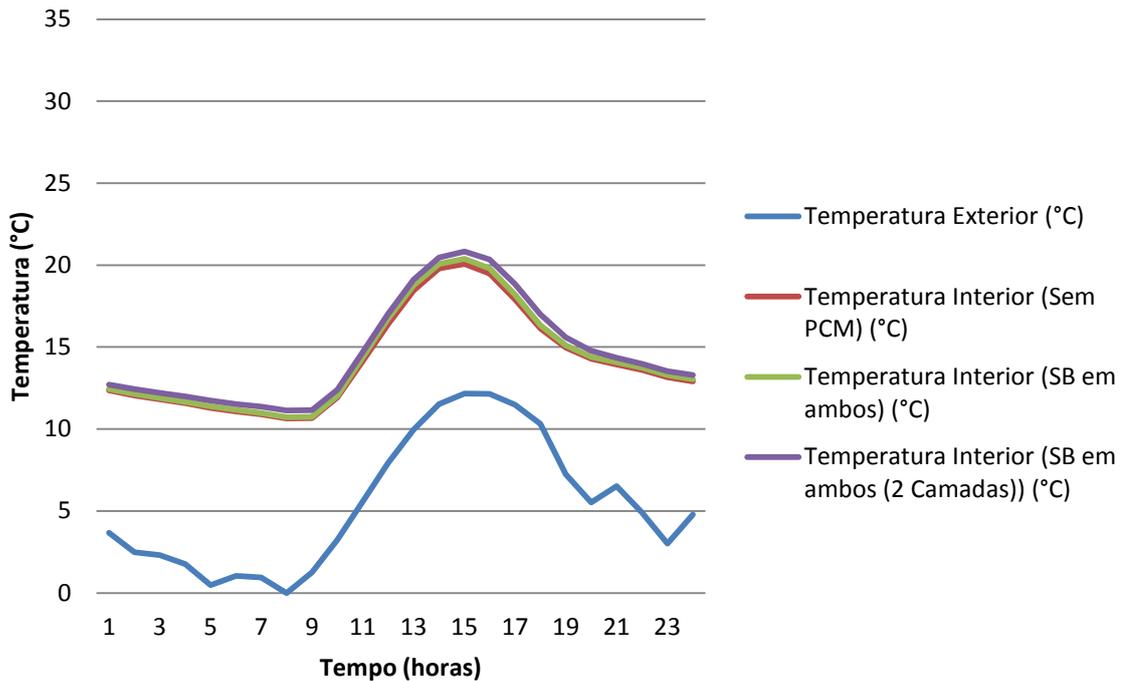


Figura 54 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ em 2 camadas, no edifício de betão, para o dia mais frio.

Pela análise da Figura 54 é possível verificar que o uso de duas camadas de PCM resulta em melhores condições térmicas do edifício durante todas as horas do dia mais frio (comparando com o uso de uma só camada), mas com um aumento muito reduzido de temperatura, cerca de 0,4°C (temperatura média durante todo o dia).

Pode-se, então, concluir que o uso de PCM em duas camadas não apresenta resultados satisfatórios o suficiente e que justifiquem o uso do dobro da quantidade de PCM, tendo em conta todo o investimento daí proveniente.

4.1.3.2. Parede exterior dupla em tijolo cerâmico

Nas Figuras 55 e 56 encontram-se os gráficos que apresentam as temperaturas obtidas no interior do edifício com a colocação do PCM nas paredes e no teto.

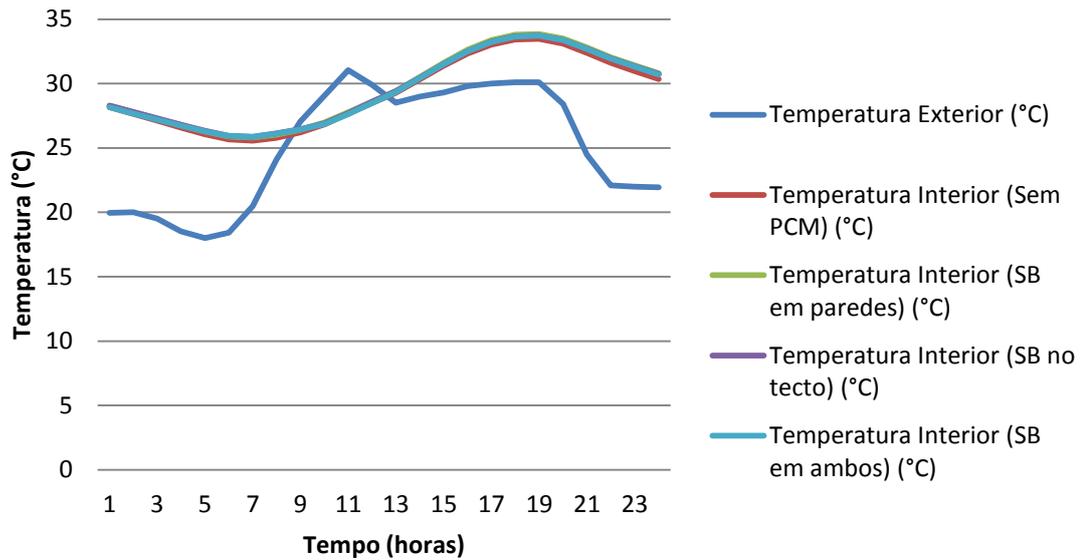


Figura 55 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.

Para o dia mais quente (Figura 55) a colocação de PCM nas paredes e teto (em conjunto ou separadamente) conduz à existência de temperaturas superiores no edifício em comparação com a solução construtiva em que não é usado PCM. O uso de PCM leva a um aumento médio, durante todo o dia, de 0,2°C, não se justificando, por isso, o seu uso durante o verão.

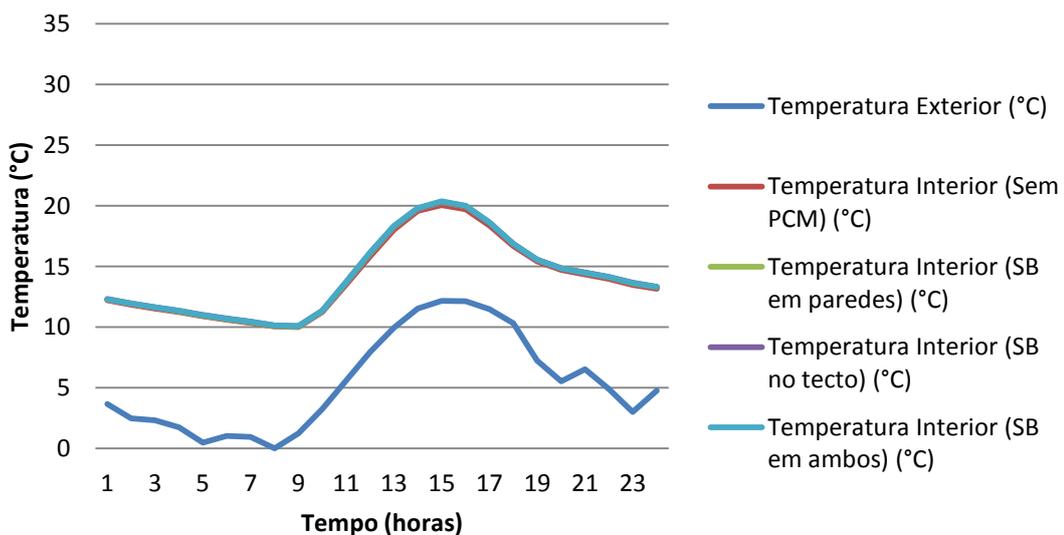


Figura 56 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.

O uso de PCM em paredes e teto do edifício, para o dia mais quente, conduz a melhores resultados (atingindo valores de temperaturas interiores mais elevadas, sendo favorável no inverno) em relação à sua não colocação. Verifica-se um aumento médio de temperatura em 0,2°C durante todo o dia, proporcionando temperaturas ambientes interiores mais elevadas em relação à solução construtiva sem PCM.

Nas Figuras 57 e 58 são apresentadas as temperaturas verificadas durante o dia mais quente e dia mais frio do ano, respetivamente, quando se coloca o mesmo PCM em duas camadas, na solução construtiva de parede dupla de tijolo cerâmico.

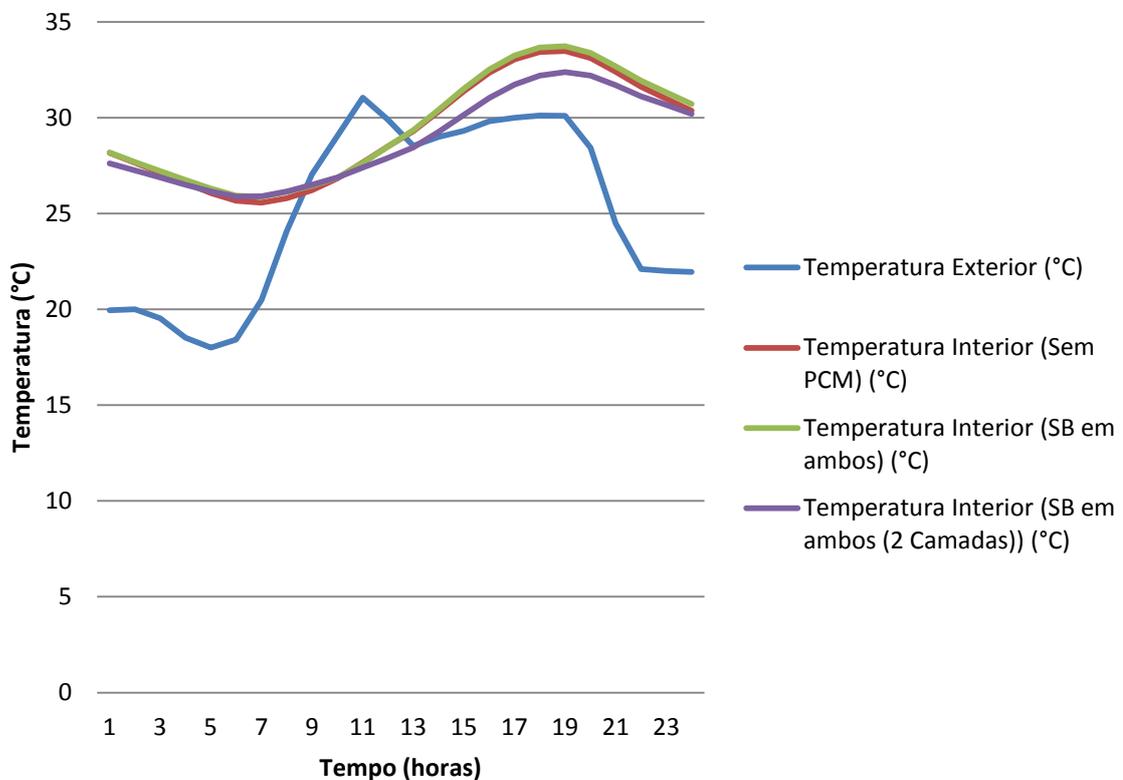


Figura 57 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ em 2 camadas, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.

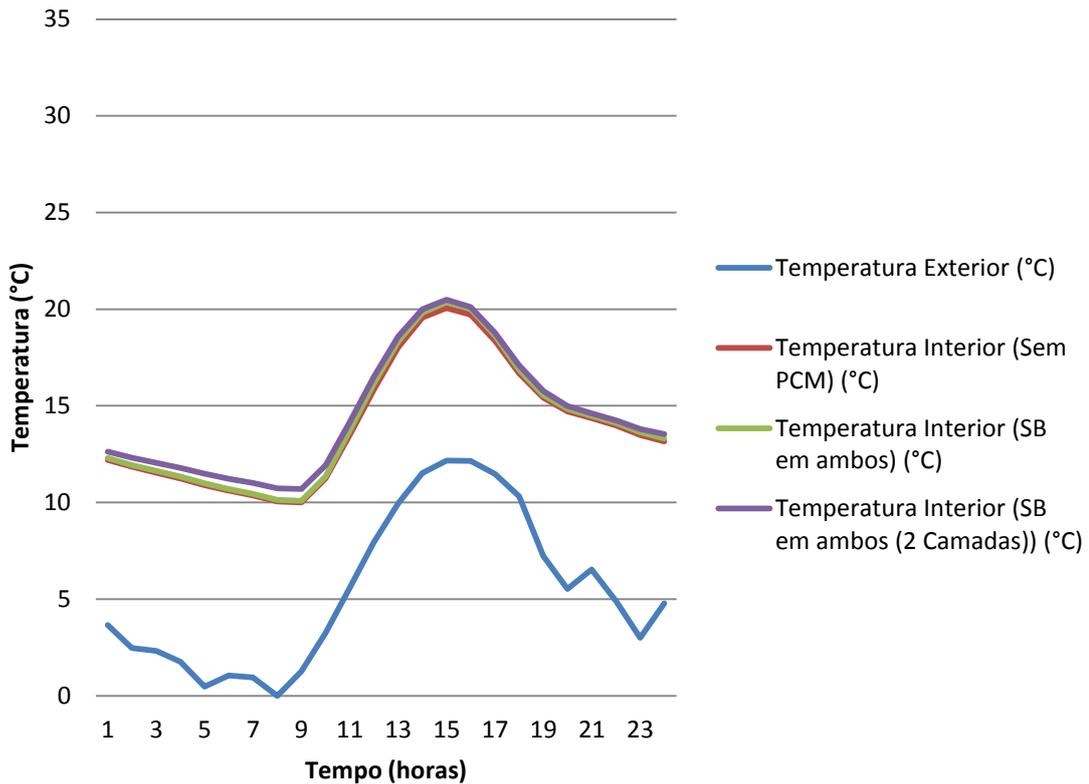


Figura 58 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ em 2 camadas, no edifício de parede dupla em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.

Verifica-se, para o dia mais quente, que a temperatura interior ambiente quando é colocado na solução construtiva duas camadas de PCM diminui 1,5°C às 17 horas (variação de temperatura em relação ao edifício com apenas uma camada, resultando numa diminuição da temperatura de 1,3°C (às 17 horas) em relação à solução sem PCM). Para o dia mais frio, a colocação de duas camadas de PCM leva a uma melhoria do desempenho térmico do edifício, devido à libertação do calor armazenado (sendo que este PCM tem uma temperatura de fusão de 24,5°C), mas com valores bastante reduzidos, o que não justificam o maior do investimento uma vez que a colocação de duas camadas apenas eleva a temperatura interior em cerca de 0,3°C, durante todo o dia e em comparação com a mesma solução construtiva com apenas uma camada do mesmo PCM, sendo que em comparação com o mesmo edifício sem PCM existe um aumento mínimo de 0,5°C.

4.1.3.3. Parede exterior simples em tijolo cerâmico

Nas Figuras 59 e 60 encontram-se representados os desempenhos térmicos dos edifícios com parede simples de tijolo cerâmico com isolamento térmico pelo exterior, quando nesta é colocado Micronal® SmartBoard™ 23/26 em paredes apenas, apenas no teto e conjuntamente em paredes e teto.

A Figura 59 mostra que o comportamento do edifício quando é colocado PCM na solução construtiva, não é o melhor, sendo mesmo prejudicial, uma vez que proporciona à parede simples de tijolo (de resto, à semelhança de outras soluções construtivas analisadas) uma gama de temperaturas iguais ou mais elevadas (cerca de 0,30°C às 24 horas), para o verão, do que o verificado para a mesma solução sem a colocação de qualquer PCM.

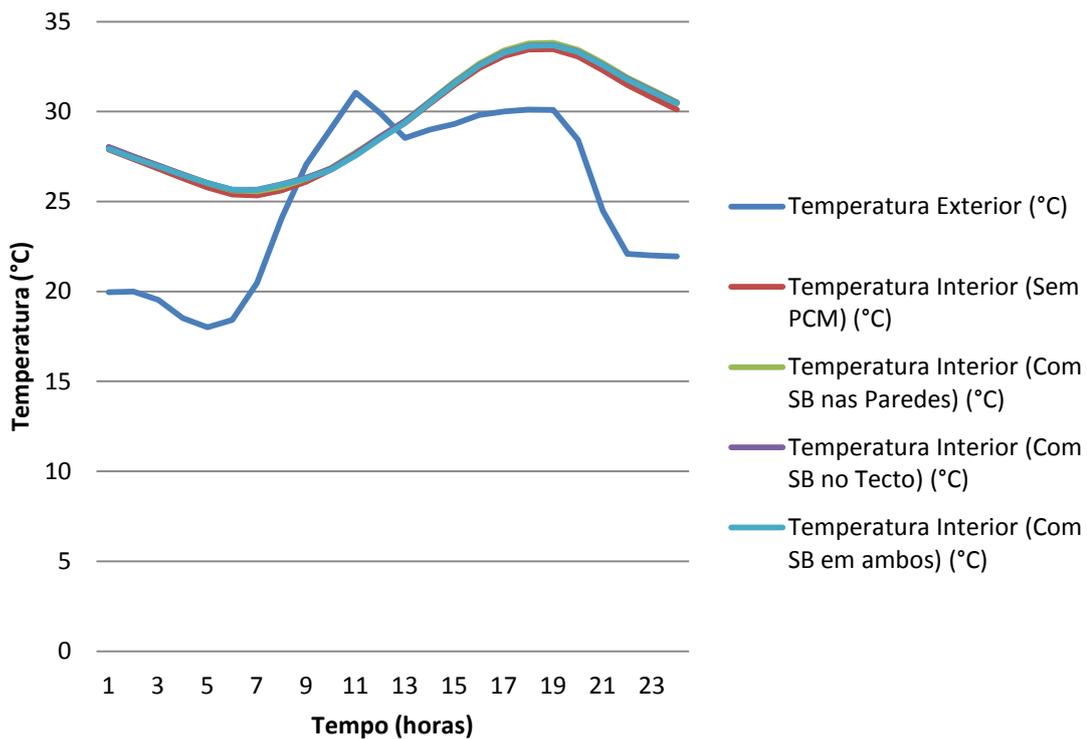


Figura 59 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.

No dia mais frio do ano (Figura 60) é verificado que o uso de PCM leva a um aumento de temperaturas, aproximando a temperatura interior do edifício das temperaturas de conforto dos ocupantes. Contudo, o uso de PCM apenas aumenta a temperatura interior, em média, cerca de 0,2°C ao longo de todo o dia.

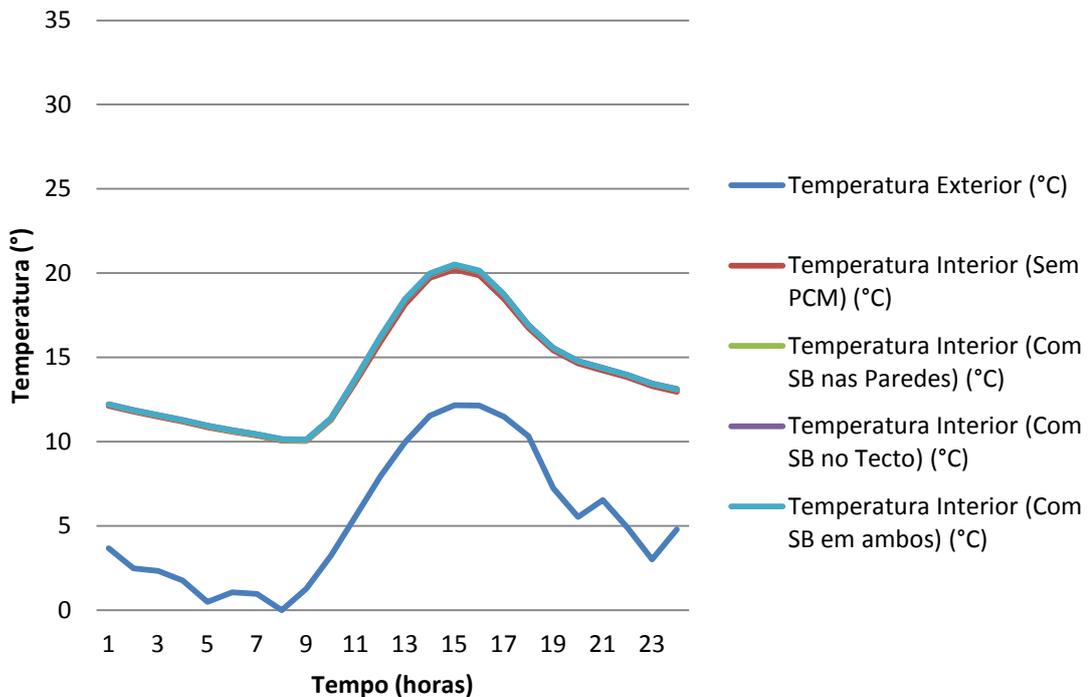


Figura 60 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ no edifício de parede simples com tijolo cerâmico, para o dia mais frio.

Colocando o dobro da quantidade de PCM (duas camadas) na parede exterior simples em tijolo cerâmico e no teto (em conjunto) verifica-se um melhoramento das condições de conforto térmico do edifício, com uma diminuição de temperaturas interiores no verão e aumento das mesmas no inverno.

Nas Figuras 61 e 62 encontram-se representados os valores de temperaturas interiores obtidos quando nas soluções construtivas (paredes e teto) são colocadas duas camadas de Micronal® SmartBoard™ 23/26.

Para o dia mais quente (Figura 61) a colocação de PCM em duas camadas leva a uma redução ligeira da temperatura durante todas as horas do dia (com uma redução máxima às 17 horas de 1,5°C em relação ao mesmo edifício com apenas uma camada de PCM, resultando numa diminuição total de 1,3°C em relação ao edifício sem PCM), exceto no intervalo que decorre entre as 6 e 10 horas, onde as temperaturas da solução com uma camada de PCM chegam a ser ligeiramente inferiores, ou seja, a colocação de duas camadas torna-se, neste período de tempo, desvantajosa em relação à situação de colocação de uma camada e, por consequência, ainda mais prejudicial em relação ao edifício sem PCM.

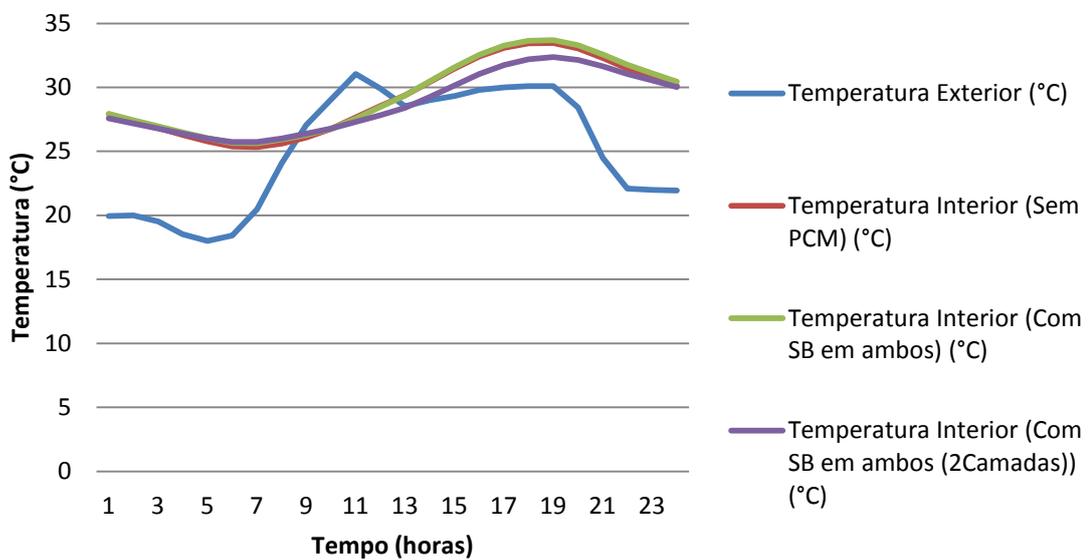


Figura 61 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ em 2 camadas, no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais quente.

Em relação ao dia mais frio (Figura 62) o uso de duas camadas de PCM leva a um aumento benéfico da temperatura interior do edifício durante todas as horas do dia. Em relação à solução que contempla o uso de uma camada apenas obteve-se um aumento de temperatura médio, ao longo de todo o dia mais frio, de cerca de 0,3°C (resultando num aumento de 0,5°C em comparação com o edifício sem PCM).

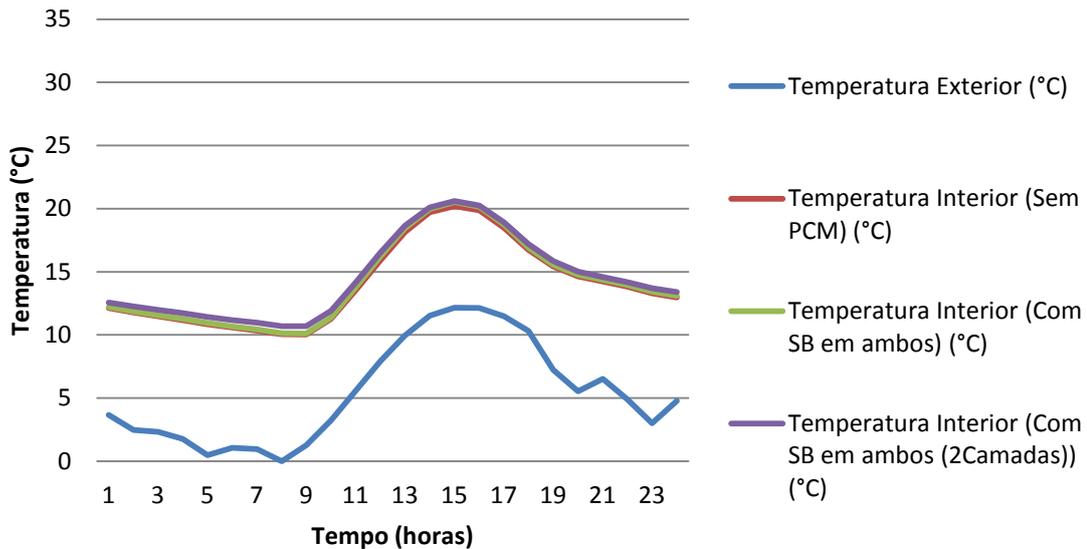


Figura 62 – Temperaturas interiores com Micronal® SmartBoard™ em 2 camadas, no edifício de parede simples em tijolo cerâmico, para o dia mais frio.

Conclui-se que apesar de uma melhoria do desempenho térmico do edifício, essa mesma melhoria é mínima e a colocação de duas camadas de PCM revela-se não compensatório pois trata-se da colocação do dobro do material no edifício para um benefício muito ligeiro das soluções construtivas.

4.1.4. Melhor solução

Pela análise efetuada às três soluções construtivas consideradas e com o mesmo coeficiente de transmissão térmica, verificam-se em primeiro lugar os seguintes aspetos:

- A parede exterior em betão armado enquadra-se como a melhor solução em comparação com as restantes, pois verifica-se para esta um registo de temperaturas inferiores no verão e superiores no inverno;
- Com o uso de elementos de sombreamento nos vãos envidraçados obtém-se (no verão e para todas as soluções construtivas) temperaturas inferiores em relação aos mesmos edifícios sem elementos de sombreamento. O edifício apresenta um maior conforto térmico interior com o uso de paredes exteriores em betão armado.

Na Tabela 31 são apresentadas todas as temperaturas obtidas para as diferentes soluções construtivas com uma camada de PCM (uma vez verificada que a colocação de duas camadas não é a melhor opção) em paredes e no teto, em conjunto (situação em que se conseguem os melhores resultados).

Tabela 31 – Temperaturas ambientes interiores resultantes, com e sem PCM.

Delta-Cool 24® (temperaturas médias interiores, em °C)				
Solução	Verão (dia mais quente)		Inverno (dia mais frio)	
	Com PCM	Sem PCM	Com PCM	Sem PCM
Parede Betão	27,49	28,56	14,31	14,15
	↓ 1,07		↑ 0,16	
Parede Alvenaria Simples	27,48	29,21	14,12	14,03
	↓ 1,73		↑ 0,09	
Parede Alvenaria Dupla	27,46	29,31	14,11	14,04
	↓ 1,85		↑ 0,07	
Micronal® SmartBoard™ 23/26 (temperaturas médias interiores, em °C)				
Solução	Verão (dia mais quente)		Inverno (dia mais frio)	
	Com PCM	Sem PCM	Com PCM	Sem PCM
Parede Betão	28,73	28,56	14,31	14,15
	↑ 0,17		↑ 0,16	
Parede Alvenaria Simples	29,37	29,21	14,19	14,03
	↑ 0,16		↑ 0,16	
Parede Alvenaria Dupla	29,5	29,31	14,20	14,04
	↑ 0,19		↑ 0,16	

Tendo em conta apenas a análise do comportamento térmico (Tabela 31) do edifício com e sem PCMs, conclui-se que a melhor solução construtiva neste sentido é a parede de betão com inclusão de PCM Delta-Cool 24® no teto e em paredes. No verão, para edifício em betão armado verifica-se que, com a inclusão de PCM, existe uma menor variação de temperatura em relação às outras soluções construtivas, mas possui uma temperatura ambiente interior

idêntica às restantes (devido à ação do PCM nas restantes soluções, levando a uma temperatura média idêntica em todos os edifícios simulados). No inverno a parede em betão armado possui temperaturas ambientes interiores mais elevadas em relação às restantes soluções, sendo que ainda se obtém um aumento de 0,16°C quando é colocado PCM no edifício.

A colocação de Micronal® SmartBoard 23/26 nas soluções não se enquadra como a melhor hipótese devido aos baixos valores de entalpia de fusão e calor específico possui (em relação ao Delta-Cool® 24), provocando variações de temperatura muito baixas quando é colocado no edifício, não sendo por isso a melhor solução.

Na Tabela 32 são apresentados os custos dos materiais que compõem as soluções construtivas. Através de uma pesquisa de mercado foram obtidos os custos dos materiais e respetivas soluções. Tendo em conta forma de encapsulamento do PCM (bolsas), as suas dimensões e densidades, obteve-se um total de 15,5kg/m². Com um custo unitário de 7€/kg para o Delta-Cool 24® tem-se um total final de 108,50€/m².

Tabela 32 – Custos das soluções construtivas [58, 59].

Solução	Elementos (Ext. -> Int.)	Custo unitário (€/m²)	Total (€/m²)
Parede Betão (simples)	Sist. Isolamento Térmico Exterior (6cm)	27,50 €	189,50 €
	Betão Armado (15cm)	37,50 €	
	Caixa-de-Ar (Não Ventilada)	0,00 €	
	Delta-Cool 24®	108,50 €	
	Gesso Cartonado	16,00 €	
Parede Tijolo Cerâmico Alvenaria Simples	Sist. Isolamento Térmico Exterior (4cm)	25,00 €	163,58 €
	Tijolo Cerâmico Furado (22cm)	14,08 €	
	Caixa-de-Ar (Não Ventilada)	0,00 €	
	Delta-Cool 24®	108,50 €	
	Gesso Cartonado	16,00 €	
Parede Tijolo Cerâmico Alvenaria Dupla	Tijolo Cerâmico Furado (15cm)	11,43 €	150,32 €
	Caixa-de-Ar (Não Ventilada)	0,00 €	
	Placa XPS (3cm)	4,50 €	
	Tijolo Cerâmico Furado (11cm)	9,89 €	
	Caixa-de-Ar (Não Ventilada)	0,00 €	
	Delta-Cool 24®	108,50 €	
	Gesso Cartonado	16,00 €	

Apesar de o edifício em betão armado com PCM possuir o melhor desempenho térmico, através da análise da Tabela 32 conclui-se que economicamente trata-se da solução com maior custo, logo a mais desfavorável. Analisando a Tabela 31 percebe-se que em relação à solução em betão armado, o edifício com paredes simples em tijolo cerâmico possui uma maior variação de temperatura no verão (1,73°C) e uma menor variação de temperatura no inverno (apenas 0,09°C em relação à solução em betão). Contudo, as diferenças de temperatura são mínimas entre estas duas soluções, enquanto que, por outro lado, o edifício com paredes simples em tijolo cerâmico apresenta custos inferiores. Conclui-se, portanto, que numa conjetura final de todos os fatores a solução de paredes exteriores simples em tijolo cerâmico é a melhor solução.

4.2. 2ª Fase

Na 2ª fase do estudo foi realizada a simulação de um edifício unifamiliar, de tipologia T2, com a utilização do PCM (Delta-Cool 24®) na sala/cozinha e quartos (sendo simulado o edifício sem o uso de PCM também, para comparação de resultados) integrado na solução construtiva de parede simples em tijolo cerâmico furado, incluindo os respetivos elementos de sombreamento em todos os vãos envidraçados do edifício, tal como havia sido concluído na primeira fase como a solução mais vantajosa.

4.2.1. Arrefecimento

Considerou-se que o edifício possui um sistema de climatização com uma eficiência de 100% para arrefecimento programado para manter as temperaturas ambientes interiores, nos períodos de ocupação do edifício, num intervalo de conforto para os ocupantes (entre os 20°C e 25°C). O sistema é programado para manter as temperaturas interiores iguais ou inferiores a 25°C das 17 às 24 horas e desde as 24 às 7 horas, permitindo nas restantes horas temperaturas ligeiramente superiores (28°C), pois o edifício tem uma taxa de ocupação mais baixa neste período (durante o período laboral).

Na Figura 63 e apresenta-se as necessidades de energia necessária (em quilo Joule) para arrefecimento do edifício, no dia mais quente e considerando o edifício sem e com PCM.

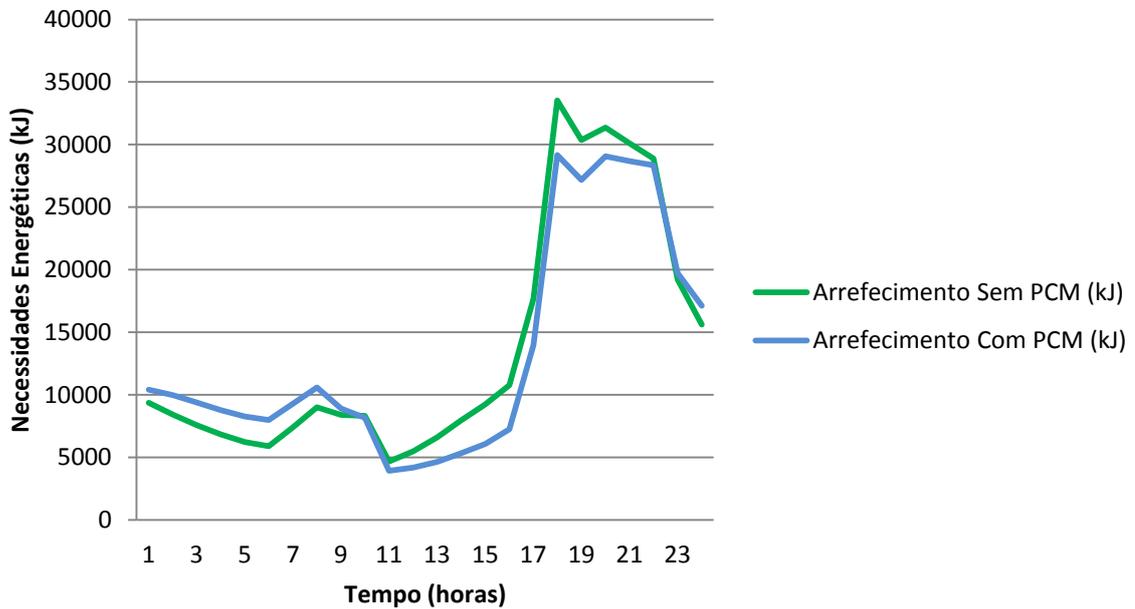


Figura 63 – Necessidades energéticas para o edifício sem e com PCM, no dia mais quente.

Constata-se que no dia mais quente do ano apenas é necessária energia para arrefecimento, pois as temperaturas verificadas são elevadas e o edifício, para além de uma inércia térmica razoável, possui vãos envidraçados de grandes dimensões, maximizando os ganhos solares em benefício do conforto térmico interior do edifício.

Nas primeiras 9 horas do dia mais quente, o edifício sem PCM necessita de menos energia para arrefecimento (uma necessidade energética média inferior em cerca de 1600 kJ) em relação ao edifício com PCM colocado na sala/cozinha e nos quartos. Nas restantes horas do dia o uso de PCM mostra-se benéfico, pois o edifício com PCM necessita de menos energia para arrefecimento, uma diferença média de 2200 kJ.

As diferenças nas necessidades energéticas para arrefecimento entre o edifício sem e com PCM resultam da capacidade de absorção de calor do PCM, com este a absorver o calor durante o dia, diminuindo as temperaturas interiores, sendo por isso necessária menos energia para arrefecimento. Por outro lado irá libertar o calor armazenado quando se

verificam temperaturas inferiores (durante a noite) sendo então necessária mais energia para arrefecimento no edifício com PCM.

4.2.2. Aquecimento

Considerou-se um sistema de climatização com uma eficiência de 100% devidamente programado para manter as temperaturas ambientes interiores do edifício próximas de 20°C (temperatura de conforto para o inverno). O sistema de climatização deverá aquecer o edifício quando se verificarem temperaturas inferiores a 18°C no período de tempo entre as 22 e 24 horas e nas primeiras 7 horas do dia seguinte (intervalo de tempo sem atividade, em que os ocupantes usam roupa de cama para se aquecer). No período laboral (durante o dia), quando o edifício não está a ser ocupado, o sistema de climatização é ativado para temperaturas inferiores a 15°C. Nas restantes horas considerou-se que o edifício deveria ser aquecido quando as temperaturas interiores forem inferiores a 20°C.

Nas Figuras 64 são mostradas as necessidades energéticas para aquecimento do edifício unifamiliar, sem e com PCM (na sala/cozinha e quartos).

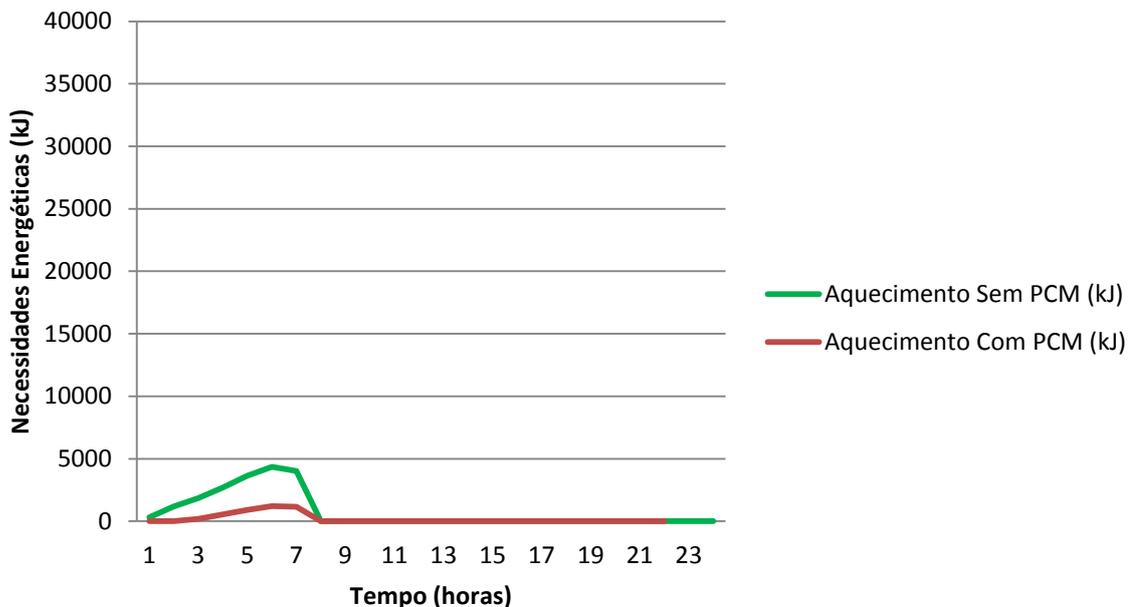


Figura 64 – Necessidades energéticas para o edifício com e sem PCM, no dia mais frio.

Com uso de PCM no edifício (na sala/cozinha e quartos) as necessidades energéticas para aquecimento são menores. O calor que o PCM consegue absorver durante o dia (devido aos ganhos solares uma vez que não são usados elementos de sombreamento durante o dia, no inverno) liberta perante temperaturas mais baixas (à noite) obtendo-se temperaturas ambientes interiores mais elevadas nas primeiras horas do dia e conseqüentemente uma menor necessidade do uso de energia para aquecimento neste período, resultando numa poupança de 2000 kJ em relação ao edifício sem PCM.

4.2.3. Necessidades energéticas anuais e custos associados

Na Tabela 33 são mostradas as necessidades energéticas anuais, para aquecimento e arrefecimento do edifício e os gastos associados, com uma taxa de 0,1393/kWh [60].

Tabela 33 – Gastos energéticos verificados nos edifícios com e sem PCM.

Necessidades energéticas anuais	
Edifício sem PCM	
Necessidades para Aquecimento	19,05 €
Necessidades para Arrefecimento	1.979,90 €
TOTAL ANUAL	1.998,95 €
Edifício com PCM	
Necessidades para Aquecimento	2,24 €
Necessidades para Arrefecimento	2.026,36 €
TOTAL ANUAL	2.028,60 €

Durante os dias o PCM tende a absorver o calor no interior do edifício durante o dia e libertar quando verificadas temperaturas mais baixas, durante a noite. Este processo dá-se nos dias mais frios e mais quentes, absorvendo e libertando mais ou menos calor de acordo com as temperaturas ambientes interiores que se verifiquem.

Tendo em conta o modo de atuação do PCM, obtêm-se gastos energéticos superiores para arrefecimento (no verão) no edifício em que é usado PCM nas divisões estipuladas. Pelo contrário, no inverno os gastos energéticos para aquecimento do edifício são menores no edifício com PCM.

Colocando PCM na sala/cozinha e quartos consegue-se uma poupança de energia anual, para aquecimento, de 16,81€. Em contrapartida, no mesmo edifício com PCM, tem-se um maior gasto energético anual para arrefecimento, com uma diferença de mais 46,46€. A colocação de PCM Delta-Cool 24[®] na sala/cozinha e nos quartos (perfazendo, a soma das suas áreas, um total de 201,75m²) terá um custo final de 21.889,90€.

5. CONCLUSÕES

5.1. Conclusões gerais

O estudo desenvolvido tinha como finalidade encontrar o PCM (ou conjunto de PCMs) que melhor se adequa ao clima da cidade do Porto. Para a realização deste estudo estava previsto a integração de PCM nas soluções construtivas mais usuais no país, simulando-se as várias hipóteses de colocação de PCM no edifício ao mesmo tempo que o uso do PCM é otimizado. Uma vez encontrado o PCM com melhor desempenho térmico, previa-se numa fase posterior estudar quais os consumos energéticos verificados com o uso desse PCM num edifício unifamiliar.

Perante os resultados obtidos e analisados na 1ª fase de simulação previu-se que a melhor opção seria o uso do PCM Delta-Cool® 24 em uma camada, em paredes e tetos do edifício, usando uma solução construtiva para paredes exteriores de tijolo simples com isolamento térmico pelo exterior de 4cm de espessura. Esta solução é a que se posiciona como a melhor solução também devido ao seu custo de construção, que será inferior a outras soluções com desempenhos térmicos ligeiramente superiores.

Na 2ª fase simula-se um edifício unifamiliar, de tipologia T2, recorrendo ao uso da solução construtiva escolhida como a melhor após a 1ª fase de simulação. No edifício é colocado PCM apenas nos compartimentos com mais ganhos solares (nas divisões com os vãos envidraçados orientados a sul), resultando em temperaturas interiores mais elevadas e, por consequência, um melhor desempenho por parte do PCM.

No final, obteve-se um total para gastos energéticos anuais de 1.998,95€ no edifício sem PCM e um total de 2.028,26€ no mesmo edifício, com PCM. Tais resultados devem-se à capacidade de libertação de calor por parte do PCM perante temperaturas mais baixas nos dias mais quentes (durante a noite), levando a que seja necessária mais energia para arrefecimento em relação ao edifício sem PCM. No inverno, pelos mesmos fatores verifica-se uma poupança energética por parte do edifício com PCM e em relação ao mesmo sem PCM.

Torna-se importante ainda referir que o uso de uma camada de PCM Delta-Cool 24[®] nas paredes e tetos, da sala/cozinha e quartos, do edifício considerado para a 2^a fase de simulação, terá um custo total de 21.889,90€.

Através das metodologias seguidas neste estudo não se obteve os resultados esperados, concluindo-se que, nas condições em que o PCM foi usado, consegue-se uma poupança energética no inverno, para os dias mais frios, mas em contrapartida é observado um gasto energético mais elevado no verão, em relação às mesmas situações em que o estudo se integra, sem PCM.

No verão, através do uso de sistemas de ventilação natural e com a otimização dos ganhos solares do edifício consegue-se uma diminuição das temperaturas mais altas verificadas no verão e conseqüentemente, uma diminuição das respetivas necessidades energéticas.

Contudo, as diferenças entre as necessidades energéticas verificadas no edifício sem e com PCM são mínimas, podendo obter-se resultados positivos (com poupanças energéticas compensatórias) seguindo-se outro tipo de metodologia, usando-se outros PCMs ou considerando-se diferentes condições de utilização do PCM, pois na realização deste estudo percebe-se que existem PCMs comercializados com excelentes características, com condições para diminuir a amplitude térmica interior de um edifício perante o clima Português.

5.2. Perspetivas futuras

O estudo da implementação de PCM em Portugal apresenta-se como um trabalho de grande valor, devendo ser estudadas futuramente outras soluções construtivas com a inclusão de diferentes tipos de PCM, com pontos de fusão mais baixos e recorrendo a outras formas de encapsulamento. Através do estudo das inúmeras hipóteses de colocação de PCM nos vários tipos de edifícios (inclusive edifícios com diferentes tipos de vãos envidraçados e conseqüentes ganhos solares) poderá chegar-se a uma conclusão ou solução construtiva compensatória, com PCM integrado.

No futuro deverão ser realizados mais trabalhos neste âmbito, testando-se a inclusão de outros tipos de PCMs em diferentes soluções construtivas e em edifícios com diferentes características. É importante ainda estudar-se o uso de PCM nos edifícios em outras zonas do país, zonas com diferentes climas, que poderão levar a uma melhor reação dos PCMs e resultando daí maiores poupanças energéticas.

O uso de *softwares* de simulação é necessário para que se consiga obter uma previsão do que acontece no edifício com a inclusão de PCM, podendo o uso de PCM no país ser estudado inicialmente dessa forma para um melhor conhecimento do material, contudo do uso destes programas apenas resulta uma simples previsão do comportamento dos materiais, sendo que para resultados mais rigorosos deverão ser efetuados estudos de campo.

No entanto, poderá concluir-se ainda que um único PCM não se adapta a todo o clima de Portugal, podendo existir um tipo e quantidade específica de PCM que melhor se adequa a cada clima, uma vez que diferem bastante as condições metrológicas das várias regiões do país.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Parlamento Europeu e Concelho, Diretiva 2002/91/CE do parlamento europeu e do concelho, *relativa ao desempenho energético de edifícios*. 16 de dezembro de 2002.
- [2] Mendes Gonçalves, Mariana, *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.
- [3] EDP – Energias de Portugal, S.A., *Guia prático da eficiência energética*. Portugal, junho de 2006.
- [4] Direção Geral de Energia, *Eficiência Energética nos Edifícios*. Portugal, February 2002.
- [5] Informação disponível em: www.adene.pt
- [6] Magueijo Vítor, et al, *Medidas de eficiência energética aplicáveis à indústria Portuguesa: um enquadramento tecnológico sucinto*. Portugal.
- [7] EDP, *Guia da eficiência energética*. Portugal.
- [8] Silva Lima, António Manuel, *Armazenamento de energia térmica em componentes de edifícios sobre os quais incide radiação solar direta*, Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Térmica. Porto, 1995.
- [9] Veer Tyagi, Vineet Buddhi D., *PCM thermal storage in buildings: A state of art*, Devi Ahilya University. Índia, 13 August 2005.
- [10] Dias Ferreira da Silva, Nelson Tiago, *Incorporação de materiais de mudança de fase em materiais de construção*, Dissertação apresentada à Universidade do Minho para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Guimarães, abril de 2009.
- [11] Danny Harvey, L.D., *Energy efficiency and the demand for energy services*. UK.
- [12] Barroso de Aguiar, J.; M. Monteiro, José, *Argamassas para reboco interior com propriedades térmicas melhoradas*, Concreta - marcação CE obrigatória em argamassas: uma Garantia de Qualidade, Universidade do Minho. 2004.
- [13] Fabral Architectural Systems, *Phase Change, a high-performance energy saving material*. IK, 2010.
- [14] F. Cabeza, L, *Next Generation cost effective phase change materials for increased energy efficiency in renewable energy systems in buildings*, University of Lleida. Cost, Spain.
- [15] Pasupathy, A.; Velraj, R., *Phase change material based thermal storage for energy conservation in building architecture*, Anna University. India, 2006.

- [16] M. Monteiro, José; B. Aguiar, José; M. Bragança, Luís; R. Gomes, Jaime; Micrópolis, Pedro Santos, *Argamassas com desempenho térmico melhorado*.
- [17] Sharma, S.D.; Sagara, Kazunobu, *Latent heat storage materials and systems: a review*, International Journal of Green Energy. Japan, 2005.
- [18] M.ravikumar; Srinivasan, Pss., *Phase change material as a thermal energy storage material for cooling of building*, K S R College of Technology. India.
- [19] M. Farid, Mohammed; M. Khudhair, Amar; Ali K. Razack, Siddique; Al-Hallaj, Said, *A review on phase change energy storage: materials and applications*, The University of Auckland. New Zeland, 2003.
- [20] Schossig, Peter, *TES Material Development for Building Application*, Institute for solar energy systems ISE. Fraunhofer, 6 June 2008.
- [21] Harland, Alice; MacKay, Christina; Vale, Brenda, *Phase Change Materials in architecture*, Victoria University of Wellington. Wellington.
- [22] Neoquímica, *Materiais de mudança de fase para isolamento térmico e armazenamento de energia*. Carregado, Lisbon.
- [23] Companhia de Arquitetura e Design. Informação disponível online em: <http://www.planetacad.com>
- [24] E. Feustel, Helmut; Stetiu, Corina, *Thermal performance of phase change wallboard for residential cooling application*, Indoor Environment Program, University of California. Berkeley, USA, April 1997.
- [25] GLASSX – Storage, Heating and Cooling. Informação disponível online em: <http://www.glassx.ch>
- [26] Institut Solare Energiesysteme, *Buildings and technical building components*, informação disponível online em: www.ise.fraunhofer.de. Freiburg, Germany.
- [27] L. Kazmerski, Lawrence, *Renewable & sustainable energy reviews*, National Renewable Energy Laboratory. USA, February 2011.
- [28] Kendrick, Christopher; Walliman, Nicholas, *Removing unwanted heat in lightweight buildings using phase change materials in building components: simulation modelling for PCM plasterboard*, Oxford Institute for Sustainable Development, Oxford Brookes University. Oxford, England, 14 May 2007.
- [29] Informação disponível online em: <http://www.multilinguarchive.com>

- [30] Schmidt, Marco, *Phase Change Materials – latent heat storage for interior climate control*, BASF. Germany.
- [31] Cabeza, Luisa; Heinz, Andreas, *Inventory of phase change materials (PCM)*, A Report of IEA solar heating and cooling programme - “Advanced storage concepts for solar and low energy buildings”, Institute of Thermal Engineering Graz University of Technology Austria, University of Lleida. February 2005.
- [32] Cunha, Sandra, *Reabilitação de edifícios com integração de materiais de mudança de fase*, Universidade de Aveiro.
- [33] RUBITHERM. Informação disponível online em: <http://www.rubitherm.de>
- [34] Cristopia. Informação disponível online em: <http://www.cristopia.com>
- [35] TEAP. Informação disponível online em: <http://www.teappcm.com>
- [36] Doerken. Informação disponível online em: <http://www.doerken.de>
- [37] Mitsubishi Chemical. Informação disponível online em: <http://www.mfc.co.jp>
- [38] Climator. Informação disponível online em: <http://www.climator.com>
- [39] EPS Ltd. Informação disponível online em: <http://epsLtd.co.uk>
- [40] Konstantinidou, Christina V., *Integration of thermal energy storage in buildings*, Master Thesis – University of Texas. Texas, 2010.
- [41] Dörken, *Phase Change Material – Thermal Storage Mass for a Comfortable Interior Climate*, Delta®-Cool 24. Germany.
- [42] Dörken, *Thermal storage system in solar houses Review of the American Solar Decathlon*, Technical workshop on technologies developed in the field of the sdeurope competition. Lisbon, November 2010.
- [43] Crawley, Drury B., et al, *Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*, U.S. Department of Energy. Washington, DC, 2005.
- [44] Departamento de Energia dos Estados Unidos. Informação disponível online em: <http://www.eere.energy.gov>
- [45] B. Crawley, Drury; W. Hand, Jon; Kummert, Michaël; T. Griffith, Brent, *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.

- [46] Muruganantham, Karthik, *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.
- [47] Tetlow David, *Issues of modelling PCM: A case study in EnergyPlus Simulation*, University of Nottingham.
- [48] H. Henninger, Robert; J. Witte, Michael, *EnergyPlus Testing with HVAC Equipment Performance Tests CE100 to CE200 from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007*, U.S. Department of Energy. Washington, D.C., November 2011.
- [49] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., *ANSI/ASHRAE Standard 140-2001*, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, July 2001.
- [50] Almeida, Manuela, *A Nova Regulamentação Térmica RCCTE*, Departamento de Engenharia Civil - Universidade do Minho. Guimarães.
- [51] Laboratório Nacional de Engenharia Civil, *Documento de homologação DH 911*, Homologação de novos materiais e processos de construção. Lisbon, December 2010.
- [52] Preceram – Indústria de Construção, SA, *Ficha técnica de tijolo cerâmico de enchimento de furação horizontal*. Pombal.
- [53] Dataset do *EnergyPlus*.
- [54] AENOR, *Dados técnicos WALLMATE™*, Homologação com certificado. Portugal.
- [55] Hörman, *Portas seccionadas de garagem*. Germany.
- [56] Tetlow, David; Su, Yuehong; Riffat, Saffa B, *EnergyPlus simulation analysis of incorporating microencapsulated PCMs (Phase Change Materials) with internal wall insulation (IWI) for hard-to-treat (HTT) houses in the UK*, Department of Architecture and the Built Environment, University of Nottingham. Istanbul, September 2011.
- [57] KNAUF; Micronal®, *K764 Knauf PCM Smartboard™ 23/26*, Gypsum board with latent heat storage. Germany.
- [58] Informação disponível em: www.orcamentos.eu
- [59] Informação disponível em: www.builditsolar.com
- [60] Informação disponível em: www.edp.pt