

**Experimental of the thermal energy storage through the
utilization of Phase Change Materials (PCM) in an office
room**

Ana Sofia Domingues Cabeça

Thesis to obtain the Master of Science Degree in
Energy Engineering and Management

Supervisors: Prof. Carlos Augusto Santos Silva

Dr. Rui Pedro da Costa Neto

Examination Committee

Chairperson: Prof. Edgar Caetano Fernandes

Supervisor: Dr. Rui Pedro da Costa Neto

Member of the Committee: Prof. José Manuel Vaz Velho Barbosa Marques

June 2018

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer ao Professor Rui Neto e ao Professor Carlos Silva por me terem dado a oportunidade de desenvolver esta tese de mestrado e por todo o apoio facultado durante o seu desenvolvimento.

Um especial obrigado à minha família por todo o apoio demonstrado nesta e em todas as fases da minha vida. Por todas as palavras de coragem e incentivo, que me fizeram acreditar que tudo é possível com esforço e dedicação.

Por fim gostaria de agradecer aos meus amigos que são uma parte fundamental na minha vida e ao meu namorado Francisco, pelo apoio incondicional demonstrado tanto no desenvolvimento deste trabalho, como em todo o meu percurso académico.

Resumo

O principal objetivo desta dissertação é estudar o comportamento térmico de 6 placas de gesso com PCM microencapsulado, quando dispostas em diferentes configurações e analisar o seu impacto no desempenho térmico de um gabinete. O estudo foi feito a partir da monitorização de dois gabinetes vizinhos, em que um foi equipado com 6 placas e o segundo não sofreu qualquer alteração. Foram realizados dois ensaios na qual foram testados os seguintes cenários: No 1º cenário as placas foram incorporadas nas paredes internas e nas paredes externas como camada final das mesmas. No 2º cenário as placas localizadas nas paredes internas foram removidas e suspensas no teto. Um terceiro ensaio foi realizado de forma a validar várias suposições feitas na análise do 2º cenário. Em ambos os ensaios ocorreu uma diminuição na flutuação da temperatura do ar no gabinete com PCM. O melhor resultado foi obtido no 2º cenário onde ocorreu uma atenuação máxima de 1°C entre o gabinete com e sem PCM. O PCM não foi capaz de solidificar, reduzindo a eficácia do sistema. A adição de ventilação noturna, permitiria que o PCM solidificasse durante a noite e conseguisse completar ciclos térmicos. Concluiu-se que a melhor opção corresponde a incorporar as placas com PCM nas paredes externas da divisão. Fatores como a radiação solar e o arrefecimento noturno promovem a fusão e solidificação do PCM, ajudando-o a completar ciclos de carga e descarga. Assim, se os gabinetes em estudo tivessem baixa inércia térmica, as placas atingiriam um melhor desempenho térmico.

Palavras-chave: Materiais com mudança de fase; Edifícios com elevada inércia térmica; Monitorização *in-situ*; Armazenamento de energia térmica;

Abstract

In order to assess the potential of six PCM gypsum wallboards an office room has been monitored during approximately eight days. Another room, identical to the first one, was not equipped with PCM wallboards but was also monitored. Two experimental tests were performed and analyzed, using real measured data. Two different configurations were considered: In scenario 1, PCM gypsum wallboards were incorporated into internal and external walls as a final wall layer and in scenario 2, PCM wallboards located into the internal walls were removed and suspended in the ceiling. A third experimental test was performed to validate several assumptions made in the analysis of scenario 2. Air temperature fluctuating was reduced in the office with PCM in both experimental tests but was proven that configuration of scenario 2 is the best choice. In the second test was found a maximum attenuation of 1°C between the office with and without PCM. Results show that PCM was not able to solidify, and the effectiveness of the system was reduced because of that. If night ventilation were used, the PCM inside the wallboards would have solidified during the night and it would have the ability to complete thermal cycles. It was found that incorporate wallboards in external walls is the best option since external factor like solar radiation and night cooling helps to complete the melting and solidifying processes of PCM. If the study offices had low thermal inertia, PCM wallboards would reach a better thermal performance.

Keywords: Phase Change Materials; High thermal inertia buildings; In-situ monitoring; Thermal energy storage;

Índice

1.	Introdução.....	14
2.	Estado de arte	17
2.1	Armazenamento de Energia Térmica.....	17
2.2	Materiais com mudança de fase (PCMs)	18
2.3	Incorporação de PCMs em sistemas LHTES para conforto térmico em edifícios.....	24
2.4	Visão geral dos principais sistemas LHTES para aplicação em edifícios.....	29
2.5	Mercado dos PCMs	36
2.6	Análise económica de sistemas de LHTES	37
3.	O edifício.....	39
3.1	Caracterização do espaço.....	39
3.2	Coeficientes de transmissão térmica	43
3.3	Inercia térmica	44
3.4	Taxa de renovação de ar.....	45
3.5	Caracterização do sistema de climatização	48
4.	Materiais e Metodologia	50
4.1	Caracterização do material com mudança de fase e metodologia de análise....	50
4.2	Equipamentos.....	53
4.3	Configurações experimentais e procedimento	53
5.	Resultados e Discussão	60
5.1	1º ensaio.....	60
5.2	2º ensaio.....	70
5.3	Caracterização do segundo cenário com câmara termográfica.....	79
6.	Conclusão.....	85
7.	Trabalhos Futuros	87
	Bibliografia	88
	Anexo I.....	93
	Anexo II.....	95
	Anexo III.....	96

Índice de Figuras

Figura 1- Diferentes tipos de armazenamento de energia térmica	17
Figura 2- Princípio de funcionamento dos PCMs.....	19
Figura 3- Classificação dos PCMs. Adaptado de Zhou et al. (2012).....	20
Figura 4- Temperaturas e entalpias de fusão dos PCMs. Adaptado de Zhou et al. (2012).	21
Figura 5- Estrutura e princípio de funcionamento de um PCM encapsulado. Adaptado de Salunkhe et al.(2012).....	26
Figura 6- Módulos CSM. Retirado de Zhou et al.(2012).	27
Figura 7- Processos de Microencapsulamento. Adaptado de Tristão (2014).....	28
Figura 8-(a) Placa de gesso com Micronal ®PCM micro encapsulado (BASF); (b) National Gypsum ThermalCORE Panel (National Gypsum).....	28
Figura 9- Elementos da parede projetada por Stritih e Novak. Retirado de Pasupathy et al.(2008) ...	31
Figura 10- Placa com 60% em massa de incorporação de parafina microencapsulada. Retirado de Kuznik et al.(2008).....	33
Figura 11- Tijolos com macrocápsulas de PCM. Retirado de (T. Silva et al., 2012).	34
Figura 12-Corte esquemático de blocos de tijolo contendo PCM macroencapsulado. Retirado de Alawadhi (2008).....	34
Figura 13- Pannel antes de ser preenchido pela pasta de gesso com microcápsulas. Retirado de Koschenz & Lehmann (2004)	35
Figura 14- Deslocação das cargas de pico e atenuação do pico de temperatura interior.Retirado de Jelle & Kalnæs (2017)	36
Figura 15- Edifício do IST-TagusPark e respetivos blocos. Retirado de Raposo (2015)	39
Figura 16- a) Planta do gab16.20 e gab16.22; b) Desenho 3D da geometria do gab16.20;	40
Figura 17- Parede Exterior Superior	41
Figura 18-Parede exterior inferior	41
Figura 19- Paredes Internas.....	41
Figura 20-Chão.....	42
Figura 21- Teto	43
Figura 22- Inércia térmica dos elementos construtivos.....	45
Figura 23- Decaimento de CO2	47
Figura 24- Regressão linear da curva de decaimento do CO2.....	48
Figura 26 – Digrama funcional. Retirado de Industrie Tecknik®(2014).	49
Figura 25- Termostato eletrónico Industrie Tecknik®.	49
Figura 27- Grelha de insuflação	49
Figura 28- a) PCM Micronal®; b) Knauf Comfortboard 23.....	50
Figura 29- Curvas de Ceq durante o processo de fusão e solidificação	51
Figura 30- Curvas de entalpia de fusão e solidificação do PCM	52
Figura 31- a) Disposição das placas nas paredes internas; b) Disposição das placas na parede externa superior; c) Disposição das placas na parede externa inferior	55
Figura 32- Localização do termopar T ₄	56

Figura 33- Localização dos termopares T ₁ , T ₂ , T ₆ , T ₇ e do data logger DL _{16.20}	56
Figura 34- Placas de PCM suspensas no teto	57
Figura 35- Espaçamento entre a placa superior e inferior do conjunto PSb	58
Figura 36-Localização dos termopares T ₄ e T ₈	58
Figura 37- Configuração das placas com PCM(a amarelo) no 1º ensaio	60
Figura 38- Evolução da temperatura e radiação exterior durante o 1º ensaio	60
Figura 39- Evolução das temperaturas interiores dos gab16.20 (com PCM) e gab16.22 (sem PCM) e da temperatura exterior durante o 1º ensaio	61
Figura 40- Evolução da temperatura interior no gabinete com PCM a 0,01m, 1,12m e 2,55m durante o 1º ensaio.....	62
Figura 41- Localização dos termopares T ₇ , T ₆ , T ₂ e T ₁ no 1º ensaio, no gab16.20.....	63
Figura 42- Evolução da temperatura das paredes internas 2 e 3, PCM [b] e temperatura do ar interior durante o 1º ensaio, no gabinete com PCM (gab16.20)	63
Figura 43- Localização dos conjuntos de placas [a] e [b] e da placa [c].....	64
Figura 44- Evolução da temperatura das placas com PCM durante o 1º ensaio	65
Figura 45- Quantidade de energia acumulada e libertada durante o 1º ensaio	66
Figura 46- Balanço de energia global durante o 1º ensaio	66
Figura 47- Balanço de energia por conjunto de placas durante o 1º ensaio	67
Figura 48- Contribuição do calor sensível e latente no balanço de energia (1º ensaio).....	68
Figura 49 – Eficiência da acumulação do PCM nas placas [a], [b] e [c], no 1º ensaio	68
Figura 50- Configuração das placas com PCM (a amarelo) no 2º ensaio, gab16.20.....	70
Figura 51- Evolução da temperatura e radiação exterior durante o 2º ensaio	70
Figura 52- Evolução das temperaturas interiores dos gab16.20 (com PCM) e gab16.22 (sem PCM) e da temperatura exterior durante o 2º ensaio	71
Figura 53- Evolução da temperatura interior a 0,01m, 1,12m durante o 2º ensaio, no gab16.20	72
Figura 54- Evolução a temperatura das paredes internas 2 e 3, no gab16.20	73
Figura 55- Localização dos conjuntos de placas [a], PSa e PSb.	73
Figura 56- Distribuição da iluminância no gab16.20	74
Figura 57- Evolução da temperatura das placas com PCM durante o 2º ensaio, no gab 16.20	75
Figura 58 -Quantidade de energia acumulada e libertada durante o 1º ensaio, no gab16.20	75
Figura 59- Balanço de energia global durante o 1º ensaio, no gab16.20	76
Figura 60- Balanço de energia por conjunto de placas durante o 2º ensaio, no gab 16.20	76
Figura 61- Contribuição do calor sensível e latente no balanço de energia (2º ensaio), no gab 16.20	77
Figura 62- Eficiência da acumulação do PCM nas placas [a], [b] e [c], no 2º ensaio.....	77
Figura 63- Evolução da temperatura interna.....	80
Figura 64- a) e c) Imagens termográficas do conjunto de placas PSa, às 13h45 e 15h45; b) Imagem real do conjunto PSa	80
Figura 65- Vista inferior do conjunto de placas de placas PSa.....	81
Figura 66- a) e c) Imagens termográficas do conjunto PSa, às 17h15 e 19h15; b) Imagem real do conjunto PSa	81

Figura 67- a) Imagem termográfica do conjunto PSa às 19h15; b) Imagem real do conjunto PSa	81
Figura 68- a) e c) Imagens termográficas do conjunto PSb, às 13h15 e 15h15; b) Imagem real do conjunto PSb	82
Figura 69- Imagens termográficas do conjunto PSb às 17h15 e 19h15	82
Figura 70- Imagens reais: a) [a] superior; b) [a] inferior	83
Figura 71- Imagens termográficas do conjunto de placas [a]	84
Figura 72- Data logger Omega OM-DAQPRO-5300 (https://www.omega.com/pptst/OM-DAQPRO-5300.html)	96
Figura 73- Data logger HOBO U12-011 Temp/RH (http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-011)	96
Figura 74- Medido de CO2- Chauvin Arnoux C.A 1510 (http://www.chauvin-arnoux.com/en/produit/c-a-1510.html)	97
Figura 75- Câmera Térmica Milwaukee®- M12™ 160 X 120 Thermal Imager Kit (https://www.milwaukeeetool.com/instruments/thermal-imaging/2260-21)	97
Figura 76- Estação meteorológica e respetivo display	97

Índice de tabelas

Tabela 1- Resistências térmicas superficiais	44
Tabela 2- Coeficientes de transmissão térmica dos elementos construtivos	44
Tabela 3-Propriedades das Knauf Comfortboard 23	50
Tabela 5- Valores de temperatura externa 1º ensaio.....	71
Tabela 6- PCMs orgânicos, sais hidratados e eutéticos (Silva 2009; Cabeza et al. 2011; Zhou et al.2012).....	93
Tabela 7-PCMs comerciais disponíveis no mercado (Tyagi & Buddhi, 2007;Pasupathy et al. 2008; Silva, 2009;Mendes et al. 2010; Cabeza et al.2011).	94
Tabela 8- Característica dos materiais. Disponibilizado por Ricardo Gomes, Centro de Estudos em Inovação, Tecnologia e Políticas de Desenvolvimento (IN).....	95
Tabela 9- Especificações dos data loggers HOBO U12-011 Temp/RH	96

Acrónimos

ASHRAE -*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

AVAC- Aquecimento, ventilação e ar condicionado

LHS- Armazenamento de calor latente

LHTES- Sistemas de armazenamento de energia térmica de calor latente

PCM- Material com mudança de fase

PCMs-Materiais com mudança de fase

PMMA- Polimetilmetacrilato

SHS- Armazenamento de calor sensível

TES- Sistemas de armazenamento de energia térmica

Nomenclatura

C_{eq} - Capacidade de calor específico equivalente

c_{ext} - Concentração volúmica do gás traçador no exterior

c_0 - Concentração inicial do gás traçador no instante inicial ($t = 0$)

C_p - Calor específico

C_{pl} - Calor específico molar da fase líquida

C_{ps} - Calor específico molar da fase sólida

$c(t)$: concentração volúmica do gás

E_{st} - Energia térmica efetivamente acumulada pelo PCM

e - Espessura da camada

f_m - Fração do material que muda de fase

i - Condutibilidade do material

L - Capacidade máxima de acumulação de calor latente

m - Massa

P - Período de 24 horas

Q - Calor total armazenado

Q_L - Calor latente

Q_s - Calor sensível

Q_v - Caudal de ventilação

R_j - Resistência térmica da camada j

R_{ph} - Número de renovações horárias

R_{si} - Resistência térmica interior

R_{se} - Resistência térmica exterior

t - Tempo

T -Temperatura

T_1 - Temperatura inicial

T_2 -Temperatura final

T_{ext} - Temperatura exterior

T_s - Temperatura de solidificação

T_b - Temperatura de ebulição

T_f - Temperatura de fusão

U - Coeficiente de transmissão térmica

V -Volume efetivo do espaço

ΔH - Variação da entalpia

ΔH_f - Variação da entalpia de fusão

ΔH_v - Variação da entalpia de vaporização

η_{PCM} - Eficiência de acumulação do PCM

1. Introdução

A eficiência energética nos edifícios consiste atualmente num objetivo primordial para as políticas energéticas a nível regional, nacional e internacional (Pérez-Lombard et al., 2008). Os edifícios são um sector líder de consumo nos países desenvolvidos. À escala mundial o setor dos edifícios no ano de 2010 foi responsável por 32% do uso final global de energia e por 19% das emissões globais (BCSD Portugal, 2015). Na União Europeia (EU) o sector dos edifícios consome pelo menos 40% do total de energia final e liberta conseqüentemente cerca 40% das emissões totais de CO₂ (Diakaki et al., 2008). Assim, torna-se fulcral que as políticas energéticas tenham uma orientação explícita de preservar e racionalizar o uso de energia nos edifícios. Em Portugal encontra-se em exercício a “Estratégia 20-20-20 para 2020”, que perspetiva uma redução de 20% ao consumo energético proveniente da eficiência. Para acompanhar esta redução também se pretende uma diminuição de 20% das emissões poluentes e que 20% da energia consumida seja fornecida por fontes renováveis (Sousa, 2016)

Este crescente consumo de energia é reflexo do acesso de milhões de pessoas a melhor habitação e da procura por conforto térmico que se reproduz em necessidade de aquecimento e arrefecimento. Numa abordagem não sustentável, os edifícios estão a aumentar a sua dependência em sistemas ativos para assegurar condições de conforto térmico para os seus ocupantes. O uso de equipamentos de aquecimento, ventilação e ar condicionado (AVAC) tem vindo a generalizar-se, levando ao consumo de grandes quantidades de energia, que se reproduz em elevadas emissões de CO₂ e grandes custos de investimento, operação e manutenção.

Os sistemas de armazenamento de energia térmica (TES do inglês “*thermal energy storage*”) podem ser utilizados como alternativa aos sistemas da AVAC ou em simultâneo. A energia consumida vai ser menor ou nula, diminuindo assim a dependência relativa aos combustíveis fósseis. A grande vantagem destes sistemas prende-se por permitir através de energias renováveis, como a radiação solar e o arrefecimento noturno, sincronizar os períodos de oferta e procura de energia (Jelle & Kalnæs, 2017). O sistema TES mais conhecido de se aplicar em edifícios envolve o armazenamento de calor sensível (SHS, do inglês “*sensible heat storage*”) através da mudança de temperatura do material. O processo consiste em armazenar e libertar energia de forma passiva, no entanto em comparação com sistemas de armazenamento de calor latente (LHS do inglês “*latent heat storage*”) em que ocorre a mudança de fase do material, é requerido um maior volume para armazenar a mesma quantidade de energia (Nkwetta & Haghghat, 2014).

Segundo Sadineni et al.(2011) estratégias de eficiência energética para edifícios passivos que sejam *environmental- friendly* são soluções viáveis para os problemas de crise energética e poluição ambiental. Efetivamente uma maneira de reduzir o consumo de energia nos edifícios passa por incorporar materiais de mudança de fase (PCMs do inglês “*phase change materials*”) em sistemas de armazenamento de energia térmica de calor latente (LHTES do inglês “*latent heat thermal energy storage*”) como paredes de edifícios, portadas, tetos ou pavimentos. Os PCMs têm a capacidade de

libertar grandes quantidades de calor a uma temperatura específica, atuando quase como reservatórios de calor isotérmicos (Soares et al., 2013).

O princípio de funcionamento dos PCMs é muito simples, no entanto a otimização da integração destes em sistemas LHTES e a integração ótima destes sistemas em edifícios trata-se de um processo complexo e desafiante.

A incorporação de PCMs num edifício é feita na maioria das situações através de implementação de placas com PCM que são colocadas no interior do edifício. Quando incorporadas nas paredes interiores e exteriores adquirem a capacidade de acumular e libertar calor ao longo do dia, afetando a temperatura interior e a quantidade de energia consumida. Quando aplicadas em edifícios leves (*lightweight buildings*), que se caracterizam pela sua baixa inércia térmica, fornecem um aumento significativo na capacidade de este armazenar energia térmica. Por outro lado, se estivermos perante um *heavyweight building* as condições térmicas podem ser melhoradas mas os resultados não serão significativos (Becker, 2014).

O principal objetivo desta dissertação é estudar o comportamento térmico de 6 placas de gesso com PCM microencapsulado, quando dispostas em diferentes configurações e analisar o seu impacto no desempenho térmico da divisão. O estudo foi feito a partir da monitorização de dois gabinetes vizinhos localizados no edifício do IST-TagusPark. Um dos gabinetes foi equipado com com 6 placas Knaufl Comfortboard 23 e o outro foi utilizado como gabinete de referência não sofrendo qualquer tipo de alteração.

Fatores como a orientação da placa e sua disposição na divisão afetam fortemente a eficiência do PCM nela incorporado. Assim, foram testadas no total 2 configurações. Numa primeira abordagem as placas foram incorporadas nas paredes internas e na parede externa como camada final das mesmas. Posteriormente, foram retiradas das paredes internas e suspensas no teto. De forma a estudar o impacto da incorporação das placas no desempenho térmico, monitorizou-se no mesmo período os dois gabinetes. A partir das curvas de flutuação da temperatura do ar interior foi possível avaliar a contribuição das placas na atenuação dos picos de temperatura. Para além da temperatura do ar, também se monitorizou a temperatura das placas e das diversas soluções construtivas. Desta forma foi possível estudar de que forma as placas influenciam o comportamento térmico das soluções envolventes e qual a eficiência do PCM ao longo dos ensaios.

Este documento é constituído por 7 capítulos. O capítulo 2 corresponde ao estado de arte onde é feita uma revisão dos diversos tipos de PCMs existentes e das suas propriedades, dos processos de incorporação de PCMs em sistemas LHTES, nomeadamente o processo de imersão, incorporação direta e encapsulação e a revisão dos tipos de sistemas LHTES suscetíveis de integrar em edifícios. Por fim é feita uma breve análise do impacto económico resultante da aplicação de sistemas LHTES em edifícios e do mercado dos PCMs.

O capítulo 3 é dedicado à caracterização do edifício em termos de estruturas construtivas, coeficientes de transmissão térmica e inércia térmica. Neste mesmo capítulo é descrito o sistema de climatização e a metodologia utilizada para o cálculo da taxa de renovação de ar da divisão em estudo.

Os materiais e metodologias utilizadas durante a fase experimental são descritos no capítulo 4. Adicionalmente é caracterizado o PCM utilizado e são descritos os fundamentos teóricos utilizados como referência para a análise dos ensaios presente no capítulo 5.

O capítulo 5 é referente à apresentação e discussão de resultados, onde são analisados os dados recolhidos experimentalmente. Por último, no capítulo 6 e 7 estão presentes as principais conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2. Estado de arte

2.1 Armazenamento de Energia Térmica

A energia térmica pode ser armazenada com recurso à variação da energia interna de um material em termos de calor sensível, calor latente e calor de reação (Sharma et al., 2009). Assim, no armazenamento de energia na forma de calor podemos considerar dois tipos de armazenamento: térmico e termoquímico (Mendes et al., 2010)(Figura 1).

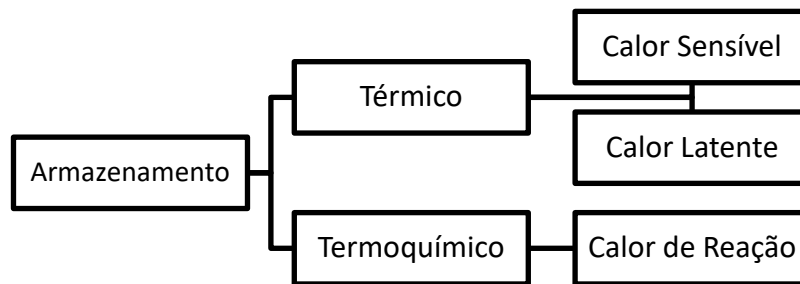


Figura 1- Diferentes tipos de armazenamento de energia térmica

Nos sistemas de armazenamento de calor sensível (SHS) a energia térmica é armazenada a partir do aumento da temperatura de um sólido ou de um líquido (Sharma et al., 2009). Todas as substâncias armazenam calor quando a sua temperatura aumenta, libertando-o mais tarde quando ocorre um decréscimo da sua temperatura. Se este processo não for acompanhado por uma mudança de fase, estamos perante um armazenamento de calor sensível. O calor armazenado (Q) numa gama de temperatura fixa depende da quantidade de substância e da sua capacidade calorífica. Esta quantidade de energia é descrita pela equação (1), onde T_i e T_f são a temperatura inicial e final respetivamente, m a massa e C_p o calor específico da massa a pressão constante (Hariri & Ward, 1988).

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m C_p dT \quad (1)$$

O calor latente é a quantidade de energia armazenada quando um quilograma de material muda de fase a temperatura uniforme (Koekenbier, 2011). Os sistemas de armazenamento de calor latente (LHS) são baseados no calor absorvido ou libertado quando um material de armazenamento sofre mudança de fase sólido-líquido ou líquido-gasoso (Sharma et al., 2009). A capacidade de armazenamento de um sistema LHS é dada pela equação (2) onde Q representa o calor total armazenado por um material no estado sólido quando a temperatura aumenta de T_s para T_b (temperatura de ebulição) passando por T_f (temperatura de fusão). Sendo n a quantidade de material em moles, C_{ps} e C_{pl} o calor específico molar da fase sólida e líquida, respetivamente, ΔH_f a entalpia de fusão e ΔH_v a entalpia de vaporização (Hariri & Ward, 1988).

$$Q = n \int_{T_s}^{T_f} C_{ps} dT + n\Delta H_f + n \int_{T_f}^{T_b} C_{pl} dt + n\Delta H_v \quad (2)$$

Os sistemas de armazenamento termoquímico baseiam-se na energia absorvida e libertada na quebra e formação de ligações moleculares numa reação química reversível. Neste caso, o calor armazenado depende do material de armazenamento, do calor de reação e do grau de conversão da reação (Mendes et al., 2010).

Apesar da maioria das aplicações fazerem uso de sistemas SHS, verifica-se que é necessário um maior volume de material para um sistema SHS armazenar a mesma quantidade de energia que um sistema LHS (Soares et al., 2013). Os sistemas LHS proporcionam uma densidade de armazenamento mais elevada, com variações de temperatura mínimas durante os processos de carga e descarga, promovendo um armazenamento de energia térmica mais eficiente (Nkwetta & Haghighat, 2014).

2.2 Materiais com mudança de fase (PCMs)

2.2.1 Princípio de funcionamento dos PCMs

Os materiais de mudança de fase caracterizam-se por serem materiais com elevada entalpia de fusão que armazenam calor latente. A transferência de energia térmica ocorre quando o material muda de fase sólida para fase líquida e vice-versa. Inicialmente estes materiais comportam-se da mesma forma que os materiais de armazenamento de energia convencionais, a temperatura aumenta e estes absorvem calor. A diferença prende-se por os PCMs terem a capacidade de absorver e libertar energia a temperatura quase contante e armazenarem grandes quantidades de energia (Sharma et al., 2009).

Quando a temperatura aumenta as ligações químicas dos materiais quebram e o material muda de fase sólida para fase líquida. Esta mudança de fase trata-se de um processo endotérmico, ocorrendo absorção de calor. Quando a temperatura ambiente desce, o PCM retorna ao estado sólido libertando o calor armazenado e mantendo o ambiente envolvente a uma temperatura próxima da temperatura de mudança de fase do PCM (Baetens et al., 2010). A figura 2 ilustra de maneira simplificada o processo de mudança de fase de um PCM.

Os materiais de mudança de fase têm a capacidade de armazenar 5-14 vezes mais calor por unidade de volume que materiais que absorvem calor sensível (Sharma et al., 2009). Morrison & Abdel-Khalik (1978) e Ghoneim (1989) demonstraram que para armazenar a mesma quantidade de energia por unidade de volume, o material rocha, requer sete vezes mais volume de armazenamento que a cera parafínica 116 (P116-Wax), cinco vezes mais volume que a parafina de grau técnico e oito vezes mais volume que o PCM *Glauber's salt* ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

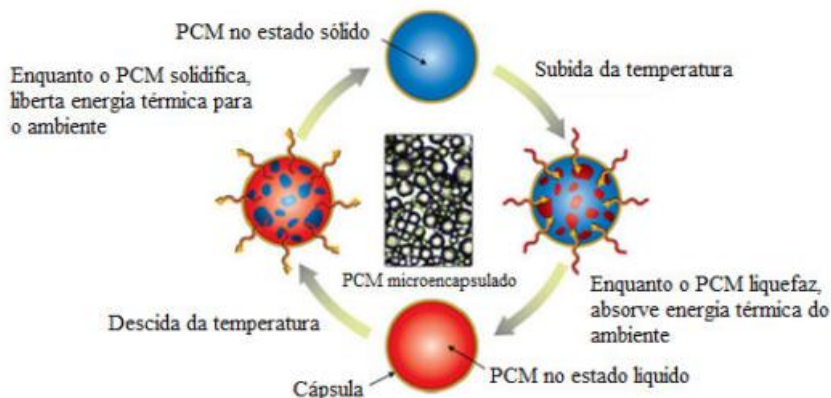


Figura 2- Princípio de funcionamento dos PCMs. Retirado de Sá (2015)

2.2.2 Propriedades Térmicas, Físicas, Químicas, Económicas e Ambientais

Os materiais de mudança de fase usados em sistemas TES devem apresentar temperaturas de fusão/solidificação numa gama prática de aplicabilidade, possuir um elevado calor latente de fusão e boa condutividade térmica. Adicionalmente, para serem integrados em sistemas LHTES é necessário que apresentem certas propriedades térmicas, físicas, cinéticas, químicas e económicas. Estas propriedades são propostas por vários autores nomeadamente: Sharma et al. (2009); Baetens et al. (2010); Soares et al. (2013). O impacto ambiental dos PCMs durante o seu ciclo de vida deve ser minimizado, desta maneira são sugeridas propriedades ambientais pretendidas.

Do ponto de vista das propriedades térmicas os PCMs devem garantir um intervalo de temperatura de mudança de fase adequado à operação pretendida, apresentar elevado calor latente de transição por unidade de volume de forma a minimizar o tamanho do depósito de armazenamento de calor e boa condutividade térmica em ambas as fases de forma a otimizar o processo de carga/descarga da energia armazenada.

Analisando de uma perspetiva física, os PCMs devem cumprir os seguintes pressupostos: densidade elevada, pequena variação de volume no processo de transição de fase, equilíbrio de fase favorável (i.e., ausência de segregação de fases) e baixo vapor de pressão à temperatura de operação. Estas condições são desejáveis para facilitar a incorporação em materiais de construção ou outras estruturas.

Relativamente às propriedades cinéticas, é essencial que a velocidade de cristalização/taxa de nucleação dos PCMs seja elevada de forma a evitar o sobreaquecimento da fase líquida. A situação de sobreaquecimento acontece quando é necessário arrefecer o material a uma temperatura abaixo da temperatura de fusão para que este solidifique e consequentemente liberte o calor armazenado. A ocorrência deste fenómeno afeta fortemente o desempenho do PCM visto que a temperatura a que vai ocorrer a mudança de fase será diferente da pré-definida que se adequa à operação pretendida.

Do ponto de vista químico, os materiais de mudança de fase devem apresentar ciclos de carga/descarga totalmente reversíveis e boa estabilidade a longo prazo de forma a não ocorrer degradação após um elevado número de ciclos. Esta degradação é provocada pela perda de água de hidratação, decomposição química ou incompatibilidade com materiais de construção. Os PCMs não se devem apresentar características inflamáveis, tóxicas ou explosivas.

Em termos económicos, os materiais de mudança de fase devem ser abundantes, disponíveis e apresentar um custo de aquisição/manutenção baixo de forma a constituírem uma solução rentável em comparação com outras formas de armazenamento de energia. Por questões ambientais devem ser facilmente separáveis dos outros constituintes de forma a possibilitar a sua reciclagem e apresentar baixa *embodied energy*.

2.2.3 Classificação dos PCMs

Os PCMs são classificados com base na sua composição química e dividem-se em 3 grandes grupos: orgânicos, inorgânicos e eutéticos (Figura 3). Os materiais de mudança de fase orgânicos podem ser subdivididos em parafínicos e não parafínicos. Os compostos não parafínicos incluem uma seleção de materiais orgânicos como ácidos gordos, ésteres, álcoois e glicóis. Os ácidos gordos são os compostos que têm recebido maior importância e subdividem-se em 6 grupos: caprílico, cáprico, láurico, mirístico, palmítico e esteárico (Baetens et al., 2010). Os compostos inorgânicos são subdivididos em sais hidratados e metálicos (os metais apresentam temperaturas de fusão muito altas, não sendo assim

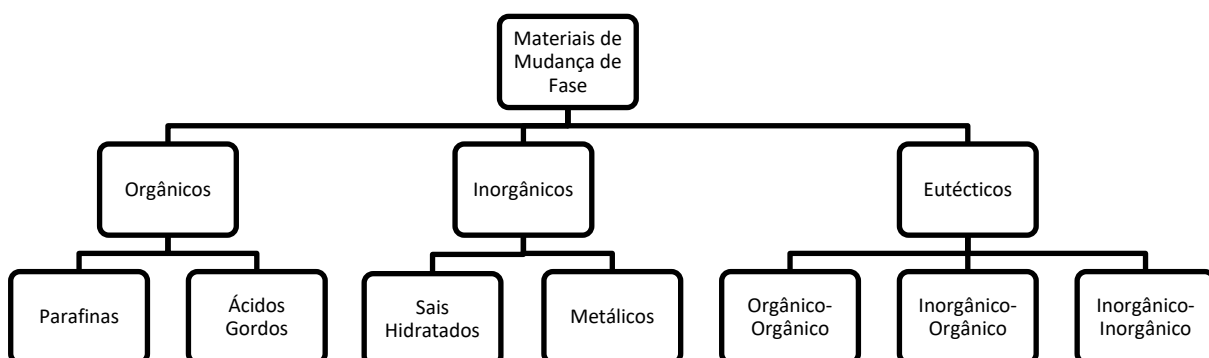


Figura 3- Classificação dos PCMs. Adaptado de Zhou et al. (2012).

possível incorporarem sistemas de LHTES)(Soares et al., 2013). A classificação eutético é atribuída quando o produto é a composição de dois ou mais componentes que fundem e cristalizam congruentemente formando uma mistura de cristais compostos (Tyagi & Buddhi, 2007). Na figura 4 pode ser consultada a gama típica de temperaturas e entalpias de fusão associadas a cada grupo.

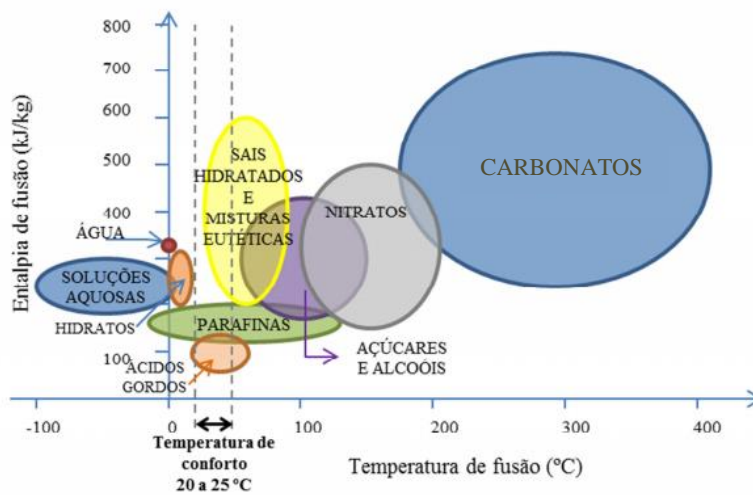


Figura 4- Temperaturas e entalpias de fusão dos PCMs. Adaptado de Zhou et al. (2012).

Cada grupo apresenta um comportamento térmico e químico específico quando integrado em sistemas LHTES. Os detalhes associados a este comportamento são descritos de seguida.

2.2.4 Orgânicos

Os PCMs orgânicos são na sua maioria não corrosivos e caracterizam-se por uma fusão /solidificação congruente (i.e., ausência de segregação de fase), um comportamento térmico estável a longo prazo e pouco ou nenhum sobreaquecimento. Esta categoria de PCMs subdivide-se em matérias parafínicas e não parafínicas, sendo que os parafínicos podem ser ainda distinguidos entre hidrocarbonetos parafínicos e ceras parafínicas.

Hidrocarbonetos parafínicos

As parafinas são subprodutos do petróleo que consistem em cadeias lineares de n-alcenos com a seguinte fórmula química: C_nH_{2n+2} com $n \geq 16$. As parafinas puras são constituídas apenas por alcanos. Os primeiros quatro alcanos da série (do metano CH_4 até ao butano C_4H_{10}) são gasosos à temperatura ambiente e pressão atmosférica. Os compostos entre C_5H_{12} e $C_{17}H_{36}$ são líquidos e os outros compostos, com mais de 17 átomos de carbono por molécula são cera sólida à temperatura ambiente (Himran et al., 1994). Tanto o ponto de fusão como o calor latente de fusão aumentam com o tamanho na cadeia, ou seja, aumentam consoante o número de átomos de carbonos existentes. As parafinas caracterizam-se por serem bons PCMs devido ao seu amplo intervalo de temperaturas de mudança de fase, por serem quimicamente inertes, não corrosivas e estáveis a temperaturas inferiores a 500 °C (Sharma et al., 2009). Apresentam pequenas variações de volume durante a mudança de fase e baixa pressão de vapor após a fusão. A grande desvantagem dos hidrocarbonetos parafínicos prende-se por apresentarem baixa condutividade térmica no estado sólido ($\approx 0,21$ W/m.K) (Mendes et al., 2010).

Ceras parafínicas

As ceras parafínicas apresentam na sua constituição aproximadamente 75% de alcanos, sendo a restante percentagem relativa a iso-alcenos, ciclo-alcenos e alquilbenzenos (Himran et al., 1994). Este tipo de material é usualmente denominado de parafinas de grau técnico e amplamente utilizado como alternativa aos hidrocarbonetos parafínicos por ser mais atrativo economicamente (Sharma et al.,

2009). As ceras parafínicas apresentam as mesmas propriedades que as parafinas puras (hidrocarbonetos parafínicos), no entanto o facto de serem constituídas por várias cadeias de átomos de carbono de diversos tamanhos reproduz-se num ponto de fusão menos preciso. As parafinas de grau técnico consistem assim numa ótima opção às parafinas puras em aplicações que não requeiram uma precisa temperatura de fusão do PCM (Lora, 2014).

Não parafínicos

Os compostos não parafínicos são a classe que PCMs que apresentam a maior diversidade em termos de propriedades (A. Sharma et al., 2009). Abhat et al. (1983) Buddhi & Sawhney (1994) identificaram uma série de ácidos gordos, ésteres, álcoois e glicóis adequados para o armazenamento de energia. Estes compostos apresentam a desvantagem de serem inflamáveis e incompatíveis com temperaturas excessivamente elevadas, chamas ou agentes oxidantes (Sharma et al., 2004). Caracterizam-se por um elevado calor latente de fusão, baixa condutividade térmica e diversos níveis de toxicidade (Sharma et al., 2009).

Os ácidos gordos ($\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$) são os compostos com maior interesse e caracterizam-se por apresentarem temperaturas de mudança de fase relativamente baixas, elevado calor latente de fusão, pequena variação de volume durante a mudança de fase e ausência de sobrearrefecimento durante a fase de solidificação. Os ácidos gordos subdividem-se em 6 grupos, nomeadamente: caprílico, cáprico, láurico, mirístico, palmítico e esteárico com respetivamente 8 a 18 átomos de carbono por molécula. As temperaturas de fusão associadas a estes ácidos estão entre os 17-64 °C e as entalpias de fusão entre os 155-180 kJ/kg. Um importante aspeto prende-se por não existir nenhum composto cuja temperatura de mudança de fase seja próxima da temperatura de conforto de 21°C (Baetens et al., 2010). Este tipo de compostos orgânicos apresenta boa estabilidade a longo prazo, segundo Sharma et al. (2004) o ácido esteárico mantém as suas propriedades após 1500 ciclos térmicos. No entanto a temperatura de fusão deste composto é de 64°C o que inviabiliza a sua utilização em aplicações de conforto térmico em edifícios. Outro inconveniente da sua utilização está no seu custo que é de 3 vezes superior à parafina de grau técnico (Hasnain,1998)

2.2.5 Inorgânicos

Os compostos inorgânicos em geral têm elevado calor de fusão e boa condutividade térmica, caracterizam-se por apresentarem baixo custo e não serem inflamáveis. No entanto possuem algumas desvantagens nomeadamente apresentar um comportamento corrosivo com a maioria dos metais e sofrerem sobrearrefecimento e segregação de fase (Baetens et al., 2010).

Sais Hidratados

Relativamente aos materiais de mudança de fase inorgânicos, os sais hidratados são a classe mais importante e têm sido estudados intensamente para aplicações em sistemas LHTES.

As propriedades mais atrativas destes materiais são: elevado calor latente de fusão por unidade de volume; elevada condutividade térmica (quase o dobro das parafinas); pequenas variações de volume no processo de fusão. Apresentam-se como materiais não corrosivos, compatíveis com plástico no entanto são considerados ligeiramente tóxicos (Mendes et al., 2010)

O maior problema na utilização de sais hidratados como PCMs em sistemas de armazenamento de energia térmica é relativo à segregação de fase. Os sais podem ter 3 tipos de comportamento na fusão: congruente, incongruente e semi-congruente. Na sua maioria apresentam uma fusão incongruente que ocorre quando o sal não é totalmente solúvel na sua água de hidratação à temperatura de fusão. Como os n moles de água não são suficientes para dissolver uma mole de sal, a solução resultante fica sobrenadante, à temperatura de fusão. O sal sólido, de maior densidade deposita-se no fundo do depósito e fica indisponível para se recombinar com a água no processo inverso de arrefecimento. Isto resulta num processo cada vez menos reversível de fusão-solidificação do sal hidratado em cada ciclo de carga-descarga de calor (Sharma et al., 2009).

Outro problema é relativo ao sobrearrefecimento sofrido pelos sais hidratados. A taxa de nucleação é geralmente muito baixa à temperatura de fusão, assim para atingir uma taxa de nucleação razoável a solução tem de ser sobrearrefecida e assim a energia em vez de ser descarregada à temperatura de fusão é descarregada a uma temperatura inferior (A. Sharma et al., 2009).

O sal *Glauber* ou $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ apresenta temperaturas de mudança de fase entre os 32 e os 35°C e um calor latente de fusão de aproximadamente 254 kJ/kg (Baetens et al., 2010). Este sal hidratado é amplamente conhecido e trata-se do PCM mais económico de se utilizar em sistemas de armazenamento de energia térmica, no entanto o problema de sobrearrefecimento e segregação de fase restringe a sua aplicabilidade (Farid et al., 2004). Abhat (1983) verificou que o sal $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ sofre um decréscimo no calor latente de fusão de cerca de 73% após 1000 ciclos de térmicos.

O sal hidratado, cloreto de cálcio hexahidratado ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) apresenta os mesmos problemas associados ao $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, no entanto um grande número de companhias teve sucesso na resolução dos mesmos ao encapsular este sal. No entanto o calor latente do sal encapsulado é menor que o apresentado pelo sal puro devido à água e aos agentes de nucleação adicionados (Farid et al., 2004).

2.2.6 Eutéticos

Os PCMs eutéticos são compostos por dois ou mais componentes, em que cada um funde e solidifica de forma congruente formando uma mistura de cristais. Este processo ocorre quase sempre sem segregação de fases, ou seja, caracterizam-se por uma fusão congruente (Tyagi & Buddhi, 2007). Em geral a temperatura de fusão do composto final é inferior à verificada pelos seus materiais individualmente. Estes materiais de mudança de fase são divididos em 3 grupos de acordo com os

materiais pela qual são constituídos: orgânicos-orgânicos, inorgânicos- inorgânicos, inorgânicos-orgânicos (Baetens et al., 2010).

2.3 Incorporação de PCMs em sistemas LHTES para conforto térmico em edifícios

2.3.1 PCMs potenciais para aplicação em edifícios e PCMs Comerciais

Apesar de se considerar por defeito que a temperatura de conforto humano se encontra em os 20 e os 28°C, é importante considerar que os intervalos de temperatura variam ao longo do ano de acordo com a estação. Assim a ASHRAE (*"American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers"*) sugeriu uma lista de temperaturas e fluxos de ar para diferentes tipos de edifícios e condições ambientais. Para o período de verão foi sugerido que a temperatura ambiente estivesse entre os 23,5-25,5°C e para o período de inverno entre os 21-23 °C (Zhou et al., 2012).

Para serem integrados em sistemas LHTES para aplicação em edifícios, são preferíveis PCMs que apresentem uma temperatura de fusão entre os 18-30°C. Na tabela 1, presente do anexo I, estão presente alguns potenciais PCMs, incluindo PCMs orgânicos, sais hidratados e eutéticos.

Os PCMs comerciais, suscetíveis de utilizar em aplicações de conforto térmico em edifícios, estão presentes na tabela 2 (anexo I).

2.3.2 Incorporação de PCMs em materiais de construção

Uma vez selecionado o PCM, tendo em conta o intervalo de temperatura pretendido para a aplicação e as suas propriedades termofísicas é importante avaliar como este pode ser incorporado em sistemas LHTES (materiais de construção ou elementos do edifício) (Soares et al., 2013). Hawes et al.(1993) que a incorporação direta, a imersão e a encapsulação são os três métodos mais promissores de incorporação de PCMs nos materiais de construção convencionais. Através do seu ensaio concluíram ainda que a temperatura de fusão do PCM varia quando incorporado em materiais de construção.

Apesar de apresentarem diferentes processos de operação, os métodos de incorporação direta e imersão caracterizam-se por incorporarem diretamente PCMs nos materiais de construção convencionais. O primeiro método é considerado o mais simples e económico (Soares et al., 2013).

2.3.2.1 Incorporação direta

Neste método os PCMs, que se encontram no estado líquido ou em pó, são adicionados diretamente a materiais de construção tais como gesso, betão e argamassas durante a sua produção. Em adição ao seu baixo custo, outra vantagem prende-se por não ser necessário equipamento complementar durante o processo. As principais desvantagens deste método são as fugas e a possível incompatibilidade com materiais de construção (Zhou et al., 2012).

2.3.2.2 Imersão

O método de imersão consiste em mergulhar materiais porosos (placas de gesso, tijolo ou blocos de betão) em PCM fundido para que este seja absorvido por ação capilar. Este método, à semelhança com o método de incorporação direta, também pode apresentar problemas de fugas de PCM durante os ciclos térmicos (Zhou et al., 2012).

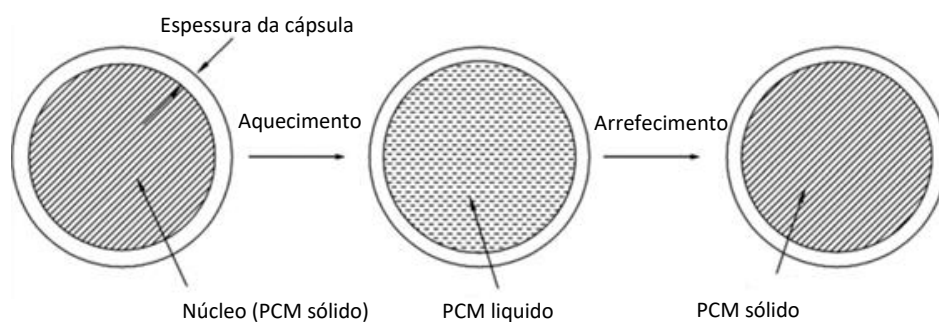
2.3.2.3 Encapsulação

O processo de encapsulamento surgiu nos anos 40 e 50 pela mão de *Barret K.Green* e consiste no envolvimento de partículas de PCM de modo a evitar o contacto com os materiais de construção (Salunkhe & Shembekar, 2012). As cápsulas que envolvem o PCM são normalmente produzidas à base de polímeros (Vaz, 2012).

Regin et al.(2008) afirmam que a encapsulação de um PCM deve (i) satisfazer os requisitos de resistência, flexibilidade, resistência à corrosão e estabilidade térmica; (ii) atuar como uma barreira para proteger o PCM de interações prejudiciais com o ambiente; (iii) fornecer superfície suficiente para a transferência de calor; E (iv) proporcionar estabilidade estrutural e fácil manuseamento.

O objetivo primário deste processo consiste em isolar o PCM de modo a preservar as características do mesmo e a reduzir a sua reação com o meio envolvente. Outras vantagens do encapsulamento prendem-se por melhorar a condutividade térmica e a estabilidade térmica e mecânica dos PCMs. O problema relativo a inflamabilidade dos PCMs orgânicos, pode ser solucionado através deste processo, encapsulando os mesmos com materiais inorgânicos que operam como retardadores de chama.

A figura 5 demonstra a estrutura e o princípio de funcionamento de um PCM encapsulado. Este é constituído por um núcleo onde se encontra o PCM e por uma cápsula envolvente constituída por



polímeros. A cápsula deve apresentar resistência mecânica suficiente para sustentar as pressões provocadas pelas variações volumétricas resultantes da mudança de fase. Alguns fabricantes adicionam bolsas de ar ao núcleo de forma a prevenir problemas relacionados com esta variação de volume. A espessura da cápsula é um parâmetro crítico de ser dimensionado, visto que uma cápsula substancialmente fina apresenta resistências térmicas /estruturais baixas e uma espessura excessiva leva a que a quantidade de PCM diminua, sendo necessário aumentar o volume do recipiente (Salunkhe et al., 2012).

Figura 5- Estrutura e princípio de funcionamento de um PCM encapsulado. Adaptado de Salunkhe et al.(2012).

Tendo por base o tamanho das cápsulas, o encapsulamento dos PCMs pode ser classificado como (Salunkhe et al., 2012):

- Macroencapsulamento (> 1mm)
- Microencapsulamento (0-1000 μm)
- Nanoencapsulamento (0-1000 nm).

Macroencapsulamento

O processo de macroencapsulamento consiste na incorporação de PCM em recipientes com forma esférica, tubular, cilíndrica ou retangular que são posteriormente integrados em materiais de construção (Zhou et al., 2012).

As macrocápsulas devem ser dimensionadas de acordo com a aplicação, visto que os parâmetros térmicos e geométricos do recipiente para uma certa quantidade de PCM vão influenciar diretamente o processo de transferência de calor, o tempo de fusão e consequentemente a performance do PCM encapsulado (Agyenim et al., 2010). Assim, o recipiente deve ser otimizado de forma a aumentar a taxa de transferência de calor durante o processo de mudança de fase e a evitar perdas de material, corrosão e problemas relacionados com a variação de volume verificada durante a mudança de fase do PCM (Soares et al., 2013).

A aplicação deste tipo PCMs encapsulados não afeta em grande escala a estrutura da construção e reduz problemas de inflamabilidade (Soares et al., 2013). No entanto apresenta a desvantagem de apresentar baixa condutividade térmica e problemas relacionados com a transferência de calor. Este segundo ocorre devido á diferença de temperatura que se verifica entre o núcleo e a parede do recipiente resultado das dimensões do mesmo. A quantidade de PCM que se encontra junto à parede do recipiente solidifica, ao contrário do PCM junto do núcleo que não efetua a mudança de fase e permanece no estado líquido (Salunkhe et al., 2012). Este fenómeno afeta a performance de sistema LHTES, impedindo que a descarga de calor ocorra na totalidade (Schossig et al.,2005).

Atualmente podem ser encontrados no mercado painéis de PCM denominados de módulos CSM fabricados á base de alumínio com um revestimento anti corrosão muito eficiente (Figura 6). Este produto é comercializado pela RUBITHERM® e pode incorporar diversos PCMs comerciais (Zhou et al., 2012).

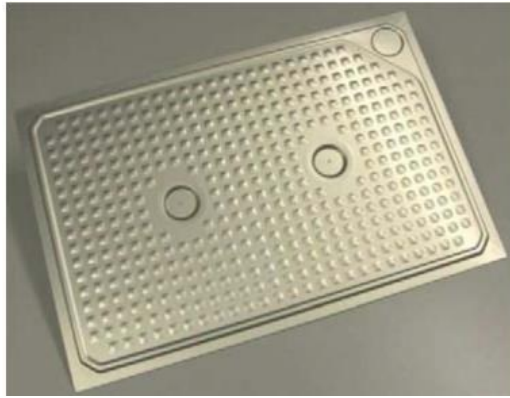


Figura 6- Módulos CSM. Retirado de Zhou et al.(2012).

Microencapsulamento

Tyagi et al.(2011) definem o microencapsulamento como o processo em que partículas individuais de material líquido ou sólido são revestidas por uma película contínua polimérica, produzindo cápsulas de pequena dimensão denominadas de microcápsulas. As microcápsulas podem ser esféricas, de parede contínua, ou podem ser assimétricas. Sendo que os materiais encapsulados podem se encontrar no estado sólido, líquido ou gasoso, este processo permite que os materiais na fase líquida e gasosa sejam mais fáceis de manusear (Tyagi et al., 2011). Este processo expande assim as possibilidades de integração dos PCMs em materiais de construção como cimento, cal, betão, tintas, têxteis e outros revestimentos (Kuznik et al., 2011).

A técnica de microencapsulamento melhora a transferência de calor e controla as variações de volume existentes durante a mudança de fase do PCM (Tyagi & Buddhi, 2007). Em termos de incorporação em materiais de construção, este processo apresenta vantagens em comparação com o macroencapsulamento. Possui uma aplicação mais fácil e o modo de construção dos edifícios não necessita de sofrer qualquer alteração (Vaz, 2012).

No entanto, estudos publicados demonstram que as propriedades dos materiais de construção são por vezes afetadas. Segundo Farid et al. (2004) esta técnica afeta a estrutura mecânica dos materiais de construção e promove em alguns casos o sobrearrefecimento do PCM. Hunger & Entrop (2009) concluíram que um aumento de microcápsulas na mistura de betão auto compactável modifica o material em termos de propriedades térmicas e mecânicas. O betão endurecido, após o aumento da percentagem do PCM encapsulado, diminui a condutividade térmica e a resistência à compressão.

Por outro lado Cabeza et al. (2007) defendem que apesar de ser uma técnica dispendiosa, é segura e não interfere com as propriedades do betão. Consideram que o PCM se trata de mais um agregado que não afeta as funções essenciais das paredes de betão endurecidas.

Um dos fatores principais para uma boa performance do PCM encapsulado é referente ao material pela qual a cápsula é constituída que deve ser compatível com os materiais onde vão ser incorporados e apresentar requisitos mínimos em termos de estabilidade física, química e mecânica. O tipo de processo de microencapsulamento também é um fator importante (Tristão, 2014). Na figura 7 estão presentes os processos químicos, mecânicos e físico-químicos utilizados na produção de microcápsulas.

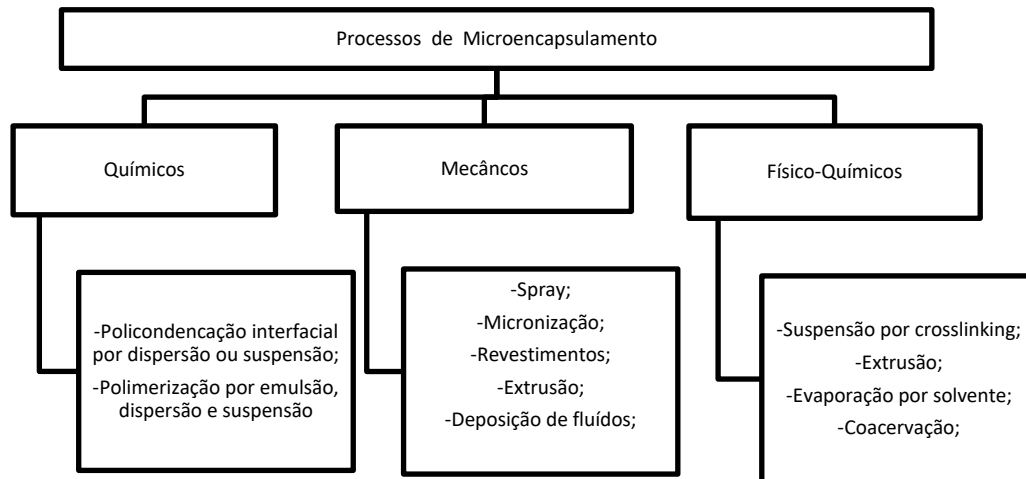


Figura 7- Processos de Microencapsulamento. Adaptado de Tristão (2014)

No mercado podemos encontrar um tipo de painel de gesso cartonado produzido pela *National Gypsum®* que incorpora na sua constituição Micronal® PCM produzido pela BASF®. Este produto é denominado *National Gypsum ThermalCORE Panel* (Figura 8), apresenta uma temperatura de fusão de 23 °C e uma entalpia de fusão de 22 kJ/kg.

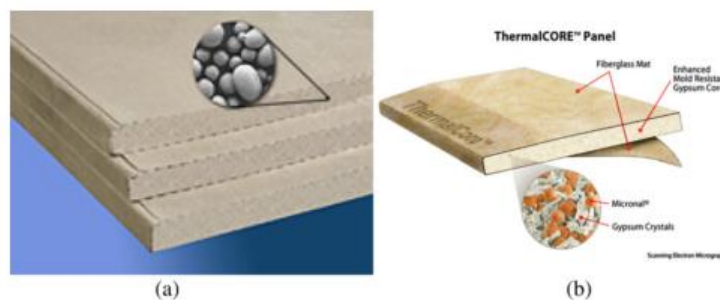


Figura 8-(a) Placa de gesso com Micronal®PCM micro encapsulado (BASF); (b) *National Gypsum ThermalCORE Panel* (*National Gypsum*). Adaptado de Costa (2014).

O microencapsulamento apresenta-se como o método mais promissor de encapsulamento para a integração de PCMs em matérias de construção. No entanto, devido ao material de encapsulação, a capacidade de armazenamento de calor latente por unidade de volume e massa é menor quando comparada com a capacidade do PCM puro (Jelle & Kalnæs, 2017).

2.3.3 Técnicas para melhorar a transferência de calor

Os PCMs caracterizam-se por apresentarem baixa condutividade térmica que se traduz numa inadequada transferência de calor e em reduzidas taxas de carga e descarga durante os ciclos

térmicos. Isto leva a que o sistema não utilize por completo toda a capacidade de calor latente dos PCMs e que reduzam a capacidade de absorver e libertar energia térmica. Evola et al. (2014), estudaram o comportamento de placas com PCM durante o período de Verão e concluíram que estas apenas tiraram vantagem de 45% da capacidade total de armazenar calor latente. Apresentaram como principais fatores a condutividade térmica, as condições climáticas locais e a disposição das placas no espaço.

Assim, para a maioria dos sistemas de LHTES passivos torna-se necessário a aplicação de técnicas que melhorem a transferência de calor. Têm sido propostas várias técnicas nomeadamente: (i) dispersão de partículas de elevada condutividade no PCM (e.g Cu, Al, grafite, etc.);(ii) impregnação de material poroso de alta condutividade com o PCM (e.g matriz de grafite ou espumas metálicas);(iii) inserção de materiais fibrosos como fibras de carbono;(iv) técnicas de encapsulação para aumentar a superfície de transferência de calor; E (v) colocação de alhetas metálicas no PCM.

Na maioria dos sistemas LHTES passivos os materiais de construção onde os PCMs estão incorporados não se encontram em contacto direto com a radiação solar. Durante o período de inverno, a redução da taxa de transferência de calor e o *delay* no processo de transferência de calor deve ser evitado tirando vantagem da radiação solar. A cor e a condutividade térmica do material final podem melhorar a transferência de calor, absorvendo uma maior quantidade de radiação solar e transferindo mais calor para o PCM por condução. Durante o período de verão, para que os sistemas LHTES passivos apresentem uma boa performance pode ser implementado proteções solares adequadas e ventilação noturna. Na maioria dos casos, a incorporação de dispositivos de ventilação de baixo consumo permite acelerar as trocas de calor entre a superfície e o PCM ajudando-o a completar as suas cargas e descargas de calor (Soares et al., 2013).

2.4 Visão geral dos principais sistemas LHTES para aplicação em edifícios

A utilização de PCMs para armazenamento de energia térmica em edifícios tem vindo a ser considerada desde 1980 (Sharma et al., 2009). Os sistemas de armazenamento de energia latente são preferíveis, relativamente aos sistemas de armazenamento sensível, em virtude da sua elevada capacidade de armazenamento e do processo de armazenamento se dar de forma isotérmica.

O isolamento térmico dos edifícios é um parâmetro importante na construção dos mesmos visto que o seu bom desempenho evita custos associados ao aquecimento ou arrefecimento do ambiente interior. A sua implementação é essencial para que não ocorram fugas de calor, no entanto em alguns casos pode ser prejudicial originado um sobreaquecimento das divisões que se traduz numa temperatura ambiente superior às temperaturas de conforto humano. Os materiais de mudança de fase se forem bem aplicados podem vir a ter um importante papel na resolução deste problema (Pereira & Costa 2014).

A aplicação de PCMs em edifícios caracteriza-se por ter normalmente dois objetivos distintos, o primeiro é focado no uso de radiação solar para aquecimento ou do frio noturno para arrefecimento e o segundo passa por utilizar fontes de calor ou frio artificiais. Em ambos os casos o armazenamento de calor ou frio é necessário para sincronizar a disponibilidade com a procura em função do tempo e da potência requerida. Basicamente existem três formas diferentes de utilizar os PCMs para aquecimento e arrefecimento de edifícios: (i) PCMs nas paredes dos edifícios; (ii) PCMs em outros componentes de construção; (iii) PCMs em unidades de armazenamento de calor e frio (Sharma et al., 2009).

Os dois primeiros são sistemas passivos onde o calor ou frio armazenado é automaticamente libertado quando a temperatura interior ou exterior aumenta ou diminui para além do ponto de fusão. O terceiro caracteriza-se por ser um sistema ativo onde o calor ou frio armazenado se encontra em depósitos térmicos separados do edifício através de isolamento (Tyagi & Buddhi, 2007).

A ótima integração dos PCMs em sistemas LHTES e a integração destes nos edifícios é um processo complexo que inclui o dimensionamento de diversos parâmetros (Soares et al., 2013). Dependendo de onde e como o PCM está integrado em sistemas LHTES são utilizados PCMs com diferentes pontos de fusão (Tyagi & Buddhi, 2007) e com diversas quantidades de massa térmica. Certos parâmetros precisam de ser dimensionados em função dos ganhos internos e das condições climáticas específicas do local onde o edifício se encontra. A abordagem para avaliar o potencial de aplicar os PCMs em edifícios deve ainda ser diferente para edifícios residenciais ou de serviços, bem como para edifícios com baixa ou elevada inércia térmica. Por conseguinte, a abordagem deve diferir tendo em conta se a inclusão do PCM é otimizada com o intuito de reduzir as necessidades de arrefecimento no verão ou as de aquecimento no inverno (Soares et al., 2013).

A implementação de PCMs em paredes de trombe, placas, persianas, sistemas de aquecimento de pavimento e em tetos falsos têm vindo a ser cada vez, mas utilizada em aplicações de aquecimento e arrefecimento dos edifícios.

Os testes e desenvolvimento neste campo são realizados a partir de protótipos de placas com PCM e de PCM incorporado em betão com o intuito de melhorar a capacidade de armazenamento de energia térmica das placas de gesso padrão e dos blocos de betão, com particular interesse na deslocação das cargas de pico (*peak load shifting*) e na utilização da energia solar.

De seguida será dada uma visão geral dos principais sistemas LHTES com PCM para aplicação em edifícios.

2.4.1 Parede de Trombe

A parede de trombe, geralmente implementada nas fachadas sul dos edifícios, é constituída por uma parede de alvenaria e por uma camada de vidro ou plástico simples ou dupla localizada a 10 cm da primeira. A absorção de calor ocorre no espaço entre a parede e o vidro. A superfície exterior da parede é preta promovendo a absorção do calor que é posteriormente armazenado na massa da parede. Quando a temperatura ambiente do edifício baixa para valores inferiores à temperatura da

parede o calor é transferido. A transferência de calor entre a parede e o espaço interior pode ser controlado através de uma cortina isolante, colocada entre a parede e o vidro, que pode ser fechada durante a noite.

Tradicionalmente a parede de Trombe baseia-se em sistemas de armazenamento de calor sensível, no entanto devido ao grande potencial de armazenamento de calor por unidade de massa dos PCMs, a substituição da alvenaria por PCMs, trata-se de um conceito bastante atrativo. Para a mesma quantidade de energia armazenada, a parede com PCMs requer menos espaço e é mais leve que a parede de Trombe tradicional com alvenaria.

A parede com PCMs colocada na fachada sul é aquecida durante o dia devido à radiação solar ocorrendo a fusão do PCM. Durante a noite o PCM começa a solidificar e a libertar o calor para o interior da divisão ocorrendo o aquecimento da mesma (Tyagi & Buddhi, 2007). Os PCMs comuns de seres utilizados nesta aplicação são os sais hidratados e os hidrocarbonetos parafínicos. De forma a aumentar a condutividade e a eficiência são adicionados aditivos metálicos (A. Sharma et al., 2009).

Bourdeau (1980) testou duas paredes que continham na sua constituição o PCM cloreto de cálcio hexahidratado caracterizado por apresentar um ponto de fusão de 29°C. Ele concluiu-o que a parede com PCM com 8,1 cm de espessura obteve uma melhor performance térmica que a parede de alvenaria com 40 cm (Pasupathy et al., 2008).

Stritih & Novak (2002) projetaram uma parede experimental constituída por cera parafínica preta (ponto de fusão 25-30°C) que permitiu absorver radiação solar com uma eficiência de 79 %. O calor

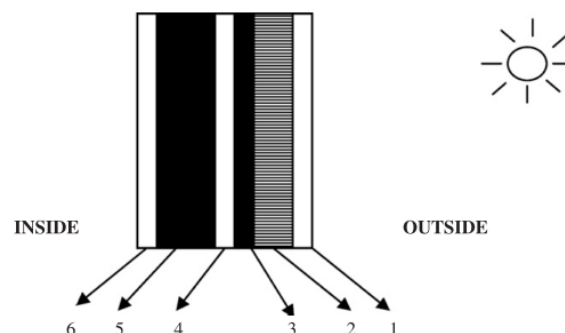


Figura 9- Elementos da parede projetada por Stritih e Novak. Retirado de Pasupathy et al.(2008)

armazenado era usado de forma a aquecer o ar que posteriormente seria utilizado para aquecer o edifício. A parede era constituída por seis componentes principais como pode ser visualizado na figura 9. A parede apresentava o seguinte funcionamento: A radiação solar de curto comprimento de onda passa através do vidro constituído por um material isolante transparente (1,2), que evita a transferência de calor por convecção. O PCM envolvido por um invólucro de plástico feito de policarbonato, absorve e armazena energia principalmente na forma de calor latente. O ar é aquecido no compartimento de ar (4) onde é transferido para o interior do edifício. O isolamento (5) e o gesso (6) são elementos padrão de construção (Pasupathy et al., 2008).

2.4.2 Placas de PCMs

As placas de PCM são materiais suscetíveis para a incorporação de PCMs e apresentam-se como bons substitutos à baixa massa térmica *standard*, utilizada na construção tradicional, por serem menos dispendiosas e obterem melhores resultados em termos de armazenamento de energia térmica. O PCM é incorporado em placas de gesso, estuque ou outras estruturas de construção que irão apresentar características térmicas próximas das apresentadas pelo PCM (Zhou et al., 2012)

A eficiência destes materiais depende de diversos factores: (i) como o PCM está incorporado na placa; (ii) a orientação da placa; (iii) condições climáticas; (iv) ganhos solares; (v) ganhos internos; (vi) cor da superfície; (vii) taxa de ventilação; (viii) PCM seleccionado e respectiva temperatura de fusão; (ix) intervalo de temperatura a que a mudança de fase do PCM ocorre; E (x) capacidade de calor latente por unidade de superfície da parede (Soares et al., 2013).

De seguida serão apresentados diversos ensaios com placas de PCM e respetivas conclusões.

Shapiro et al.(1988) demonstrou que existem vários PCM adequados de serem incorporados em placas de gesso cartonado possíveis de serem utilizados em aplicações de armazenamento térmico para o clima da Florida. Estes PCMs consistiam numa mistura de ésteres metílicos, nomeadamente palmitato de metilo, estearato de metilo e misturas de ácidos gordos de cadeia curta (ácido cáprico e ácido láurico). Apesar de estes materiais de mudança de fase apresentarem uma capacidade de calor latente elevada, o intervalo de temperatura de fusão não está próximo do intervalo de temperaturas de conforto térmico para climas quentes.

Kuznik et al.(2008) de forma a melhorarem o comportamento térmico de uma placa utilizada como revestimento interior num edifício realizaram um estudo com o objetivo de otimizar a espessura da mesma. Tiveram por base as evoluções de temperatura interna/externa para um período de 24h. A placa continha 60% em massa de incorporação de parafina microencapsulada com uma temperatura de mudança de fase de 22°C (Figura 10). A espessura ótima encontrada foi de 1cm, sendo que com esta espessura a placa permitiu duplicar valor de inercia térmica do edifício.

Kuznik et al. (2008) avaliaram a performance térmica de duas paredes, uma com PCMs e outra sem PCMs, para um dia de verão. Os autores utilizaram o PCM presente na figura 10 para demonstrar que uma placa com PCM reduz as flutuações de temperatura e o efeito de sobreaquecimento. Concluíram que a placa de PCM, com 5 mm de espessura, consegue armazenar duas vezes mais energia térmica que a parede sem PCM. Segundo os autores para que uma parede de betão conseguisse armazenar a mesma quantidade de energia seria necessário que tivesse 8 cm de espessura.

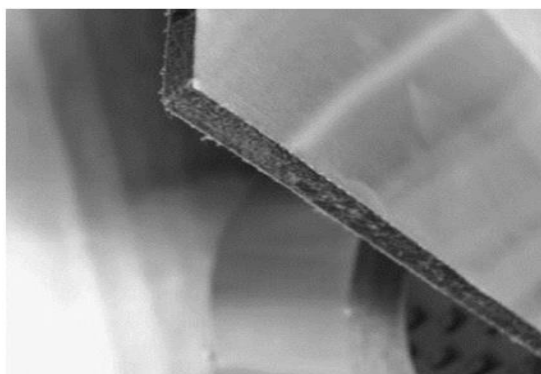


Figura 10- Placa com 60% em massa de incorporação de parafina microencapsulada. Retirado de Kuznik et al.(2008)

De forma a avaliar o potencial de instalar placas de PCM com 60% em massa de parafina microencapsulada (ponto de fusão e solidificação de 13,6°C e 23,5°C, respetivamente) Kuznik et al., (2011), monitorizaram um escritório, durante um ano, onde foram colocadas placas de PCM nas paredes laterais e no teto. Um outro escritório, com as mesmas dimensões, mas sem qualquer placa de PCMs instalada, também foi monitorizado durante o mesmo intervalo de tempo. Os resultados demonstraram que as placas de PCM permitiram melhorar o conforto térmico dos ocupantes, pois a temperatura do ar variou entre a temperatura de fusão e solidificação do PCM, caso isto não ocorresse a experiência não apresentaria melhorias no comportamento térmico do escritório. Os autores frisam assim importância de escolher um PCM que tenha temperaturas de mudança de fase adequadas a aplicação. Apesar do escritório com placas de PCM ter apresentando melhor *performance*, a diferença não foi muito significativa pois o outro escritório não apresentava baixa inércia térmica.

Shilei et al. (2007) avaliaram o impacto de instalar uma placa de PCM com incorporação de 26% em massa de ácidos gordos numa divisão interior, localizada no nordeste da China durante o período de inverno. Os resultados experimentais demonstraram que as placas contribuíram para melhorar a *performance* térmica da divisão, nomeadamente reduzir as flutuações do ar interior e a transferência de calor para o exterior.

Athienitis et al. (1997) estudaram o comportamento de uma célula teste, revestida com placas de gesso cartonado durante o período de inverno. As placas continham 25% em massa de estearato de butilo incorporado com uma temperatura de fusão entre os 17-21°C. A célula foi conservada a 23°C durante o período diurno e a 16°C durante o noturno. Obteve-se uma redução de temperatura máxima de 4°C e ocorreu uma redução de 15% de consumo de energia para aquecimento.

2.4.3 Portadas com PCM

As portadas com PCM são colocadas no exterior da envolvente envidraçada dos edifícios. As portadas são abertas durante o dia onde a face interior fica exposta á radiação solar provocando a fusão do PCM. Durante a noite, quando as portadas se encontram fechadas as janelas são abertas e a face interior da portada fica em contacto direto com o interior do edifício. Neste ponto do processo o PCM solidifica e liberta a energia anteriormente acumulada (Tyagi & Buddhi, 2007)

2.4.4 Blocos de betão ou tijolo com PCM

Os blocos de betão ou tijolo são amplamente utilizados em construções. A utilização destes materiais incorporados com PCM resulta em estruturas com elevada inércia térmica e sem grande massa associada (V. V. Tyagi & Buddhi, 2007).

Silva et al. (2012) avaliaram o potencial de incorporar parafina macroencapsulada numa parede de alvenaria de tijolo constituído por argila típica portuguesa (figura 11). Os resultados revelaram que a incorporação do PCM contribui para atenuar as flutuações da temperatura do espaço interior, reduzindo a amplitude térmica de 10°C para 5 °C.



Figura 11- Tijolos com macrocápsulas de PCM. Retirado de (T. Silva et al., 2012).

Alawadhi (2008) avaliou o desempenho térmico de blocos de tijolos comuns incorporados com macrocápsulas cilíndricas com PCM para climas quentes. Com a implementação deste material o autor pretendia que durante o dia ocorresse uma diminuição do fluxo de calor do exterior para o interior, sendo que o calor seria absorvido pelos tijolos antes de atingir o espaço interior. Durante o período noturno o calor armazenado seria dissipado tanto para o interior como para o exterior. Foram avaliadas

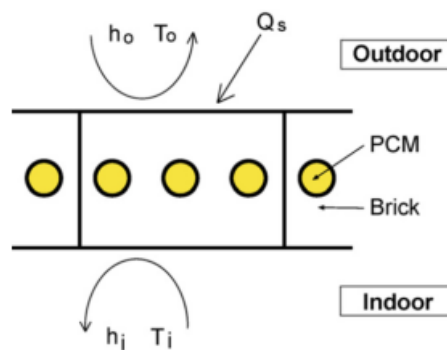


Figura 12-Corte esquemático de blocos de tijolo contendo PCM macroencapsulado. Retirado de Alawadhi (2008).

diferentes configurações, variando a quantidade, tipo e localização dos PCM no tijolo. Foi demonstrado que a melhor performance acontece quando três macrocápsulas cilíndricas (figura12) são colocadas na linha central do tijolo. Com esta configuração foi possível reduzir o fluxo de calor para o espaço interior em cerca de 17,55%.

2.4.5 Pavimentos com PCM

A utilização de pavimentos para sistemas de aquecimento e arrefecimento dos edifícios tem vindo a ser testada. O pavimento radiante é considerado um sistema eficaz para combater o fenómeno de estratificação da temperatura em espaços interiores. A incorporação de PCMs nestes sistemas permite aumentar a sua eficiência e reduzir o número total de horas em que o sistema está ativo.

Farid & Chen (1999) propuseram um sistema de pavimento radiante constituído por uma camada de 30mm de PCM (cera de parafínica com ponto de fusão de 40º) colocada entre a superfície de aquecimento e os ladrilhos. Concluíram que o calor proveniente do pavimento radiante pode aumentar significativamente de 30 W/m² para 75 W/m² se a camada com PCM for utilizada.

2.4.6 Tetos falsos com PCM

Os tetos falsos podem ser utilizados como sistemas de aquecimento ou arrefecimento (Soares et al., 2013). As aplicações que têm vindo a ser desenvolvidas consistem em painéis onde a capacidade de armazenamento de energia dos PCMs é utilizada fazendo uso de tubos capilares onde podem circular fluidos quentes ou frios.

Desenvolveram um painel constituído por um tabuleiro de aço por uma rede de tubos capilares onde circula água, envolvida por uma pasta de gesso com 25% em massa de microcápsulas com PCM.

Koschenz & Lehmann (2004) desenvolveram um painel constituído por um tabuleiro de aço e por uma rede de tubos capilares onde circula água, envolvida por uma pasta de gesso com 25% em massa de microcápsulas com PCM (figura 13). O painel com aproximadamente 5 cm de espessura, apresenta cerca de 13kg PCM/m² com uma temperatura de fusão de 22°C. Durante o ensaio, o processo de fusão demorou cerca de 7,5 horas quando sujeito a uma carga térmica de 40W/m². Durante este período de carga foi possível armazenar 290Wh/m². Sendo que o ensaio foi realizado para edifícios de escritórios

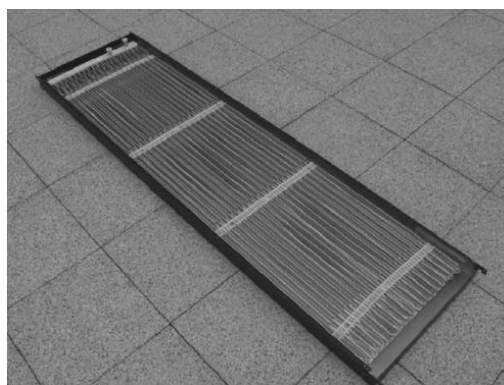


Figura 13- Painel antes de ser preenchido pela pasta de gesso com microcápsulas. Retirado de Koschenz & Lehmann (2004)

o resultado é significativo na medida em que o período de fusão do PCM coincide com a duração do horário de trabalho, contribuindo para a regulação da temperatura interior durante esse mesmo período.

2.4.7 Deslocação de Cargas de Pico

Como referido anteriormente, a utilização de sistemas de LHTES pode ser uma das soluções a adotar de forma a sincronizar a produção e procura de energia. Fazendo uso das taxas de eletricidade fora do pico, os PCMs podem fundir/solidificar de forma a armazenar “energia elétrica” na forma calor latente que poderá ser usado quando necessário (Sharma et al., 2009). Assim, um edifício integrado com sistemas LHTES adquire a vantagem de poder deslocar as cargas resultantes dos sistemas de AVAC das horas de pico para as horas correspondentes ao vazio (Figura 14). Como resultado, a potência necessária e consequentemente o investimento em equipamento destinado a cobrir o consumo das horas de pico será reduzido, refletindo-se num serviço menos dispendioso para o consumidor. A integração de sistemas LHTES permite que os clientes usufruam de taxas mais atrativas correspondentes ao horário do vazio ou super vazio (Khudhair & Farid, 2004).

Em sistemas de placas com PCM, a utilização dos sistemas de AVAC nas horas do vazio pode contribuir para melhorar a performance térmica destes sistemas de LHTES. Durante o período do vazio os sistemas de AVAC podem arrefecer as placas com PCM de forma remover o calor latente residual existente, ajudando assim o PCM a completar o seu ciclo térmico. Posteriormente, quando um novo ciclo for iniciado a placa vai conseguir absorver uma maior quantidade de calor. Com esta conjugação de sistemas ativos e passivos é possível atingir um nível de conforto térmico utilizando sistemas ativos de baixa potência que consomem energia elétrica em horas em que as taxas de são mais atrativas do ponto de vista económico.

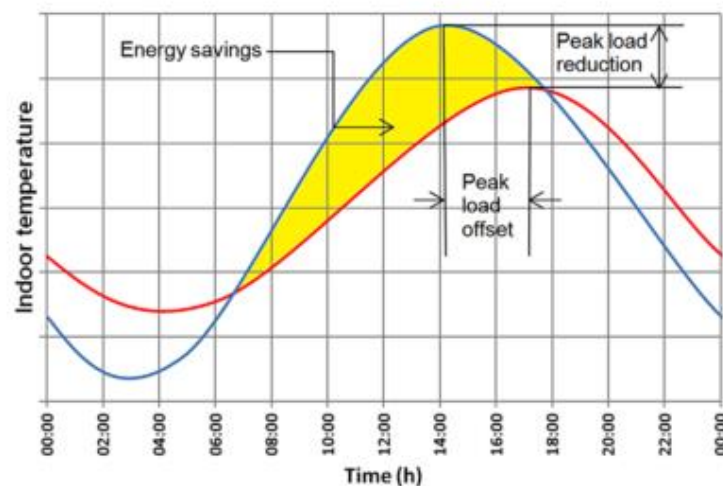


Figura 14- Deslocação das cargas de pico e atenuação do pico de temperatura interior. Retirado de Jelle & Kalnæs (2017)

2.5 Mercado dos PCMs

Segundo o *Global advanced Phase Change Material forecast 2017-2025 report* espera-se que o mercado global do PCM cresça de 753 Milhões em 2017 até 3259,64 Milhões em 2025, com uma taxa anual composta de 20,09%. Este crescimento é resultado da procura por tecnologias que visam a poupança de energia e que se caracterizam por serem *environment-friendly*. O crescimento da construção em países como a China, Índia e Brasil, é apontado como o maior *driver* do mercado dos

produtos com PCM. A consciencialização do impacto dos combustíveis fósseis e do seu desaparecimento em função do uso indiscriminado, faz com que estas nações adotem legislação mais exigente a nível ambiente, promovendo o uso de materiais mais *environment-friendly*.

Os fatores que impulsionam o uso de PCM são relativos à conservação de energia, redução dos gases com efeito de estufa, operação sobre um longo período, elevada massa térmica, amplo intervalo de temperaturas e deslocação das cargas de pico.

A segmentação do mercado dos PCM é feita de acordo com o tipo de PCM e respectivas aplicabilidades. Desta forma podemos dividir o mercado em parafinas, sais hidratados e segmentar as aplicações em: Edifícios e construção; refrigeração comercial; sistemas de AVAC; armazenamento de energia; transportes e têxtil;

A maior cotação do mercado pertence ao sector da construção e armazenamento de frio, no entanto é esperado que a procura aumente no sector têxtil. As parafinas são a base para PCM mais utilizada e as que detém o maior mercado. Existem um grande número de fornecedores de parafinas, nas quais se destacam: Exxon Mobil, Sasol, Chevron, Reliance, Nippon, Shell e Petrobras. O facto de as parafinas apresentarem um ponto de fusão que varia entre os -10°C e os 180°C , torna-as suscetíveis de serem utilizadas em diversas aplicações, como edifícios, sistemas de AVAC e armazenamento de frio.

Os *players* do mercado dos produtos com PCM têm utilizado diversas estratégias para o crescimento económico. No topo da lista estão presentes empresas como a ADVANSA B.V, BASF e CRODA INTERNATIONAL.

O mercado Europeu contém a maior cotação de mercado no que toca a produtos com PCM, seguido do Norte Americano. Fatores como a exigente regulação governamental no que toca à eficiência energética e a consciencialização dos benefícios do uso de produtos com PCM, contribuem para o crescimento do mercado nesta região. Em 2016 a União Europeia atualizou a diretiva da eficiência energética onde impôs um target de 30% de eficiência energética em 2030. Em adição ficou estabelecido que a comunidade europeia devia reduzir em pelo menos 40% as emissões de CO₂ até ao ano de 2030. Estes targets apresentam-se como fatores extras que promovem o uso de PCM na Europa.

2.6 Análise económica de sistemas de LHTES

Os sistemas de LHTES armazenam energia que pode ser consumida num período diferente da sua produção ou do seu armazenamento. Este facto pode balançar a dessincronização entre a produção e a procura de energia. Segundo os autores, a deslocação de cargas de pico trata-se de um processo rentável: Os PCMs podem armazenar energia a tarifas mais baixas ou a custo zero através de recurso naturais como a radiação solar. No entanto, os ganhos por parte destes sistemas devem compensar o custo de instalação usando o sistema de *pay back years*. Os autores concluíram que a viabilidade económica destes sistemas pode ser avaliada a partir do número de ciclos de utilização (*pay back cycle*) em substituição do sistema de *pay back years*. Demonstraram que o *pay back cycle* dos sistemas

LHTES é fortemente afetado pelo preço do PCM utilizado e pelo preço da energia que seria pago se esta fosse consumida (Setterwall et al., 2005).

A incorporação de PCMs em edifícios continua a ser uma tecnologia dispendiosa, no entanto pode contribuir para o deslocamento das cargas de pico, conservação de energia, redução dos picos de consumo e redução dos consumos de energia. Segundo Soares et al. (2013), devem ser desenvolvidas análises técnico-económicas relativas ao impacto de incluir sistemas de LHTES em edifícios, de forma a determinar em que condições é vantajoso a implementação deste tipo de sistemas. Estes sistemas caracterizam-se por serem mais rentáveis que os sistemas *standard* que se baseiam no armazenamento de calor sensível, assim a utilização destes em substituição dos sistemas *standard* deve ser discutida mais aprofundadamente tendo em conta a relação custo-eficácia.

Shilei et al. (2007) demonstraram que implementação de placas com PCMs reproduz-se numa grande redução dos custos operacionais dos sistemas de HVAC durante o período de verão. Com a implementação deste sistema de LHTES foi possível transferir as cargas de pico de energia elétrica para horas onde o consumo de energia é mais baixo, ou seja, para as horas correspondentes ao vazio.

Peippo et al.,(1991) também avaliaram o efeito de implementar placas com PCM em termos de poupança de energia, para o clima de Helsínquia. Com esta solução foi possível reduzir a energia associada aos sistemas de aquecimento em cerca de 2GJ/ano, que se reproduziu num benefício anual de \$34. Para estes cálculos foi assumido um período de *payback* de 18 anos e um custo de 1,5\$/kg para o PCM. Considerando outro PCM e outras condições climáticas, nomeadamente Madison (Wisconsin), as simulações demonstraram que foi possível reduzir a energia associada aos sistemas de aquecimento em cerca de 3GJ/ano, resultando um período de *payback* 9 anos. Assumindo um *cost of heat* de aproximadamente 17\$/GJ e um custo de 1,5\$/kg para o PCM.

Stovall & Tomlinson (1995) concluíram através de uma simulação energética que a integração de placas de PCM numa casa em Boston permite poupar cerca de \$190 por ano, com período de *payback* de 3 a 5 anos.

3. O edifício

A temperatura interna e o desempenho térmico de um edifício dependem de vários fatores como a estrutura do edifício, as características do sistema construtivo e dos materiais utilizados, nomeadamente a espessura das paredes e do respetivo isolamento, a dimensão dos vãos envidraçados e ainda a condutividade e o calor específico dos materiais de construção. Todos estes parâmetros são refletidos num valor de inércia térmica associada à estrutura do edifício que contribui para a redução das oscilações da temperatura interna. A taxa de renovação de ar e o funcionamento de equipamentos auxiliares de aquecimento e arrefecimento são parâmetro que influenciam em grande escala o desempenho de um edifício em termos energéticos sendo assim importante a sua caracterização.

A incorporação de PCMs num sistema não é sempre igual e depende de fatores como a quantidade e tipo de PCM a utilizar bem como das propriedades físicas e térmicas do mesmo. O clima local e a orientação do edifício são também fatores importantes para que uma maior performance do sistema seja atingida. De forma a compreender a divisão em estudo, todos estes parâmetros serão abordados e caracterizados ao longo deste capítulo.

3.1 Caracterização do espaço

O edifício do IST-TagusPark foi construído entre 1998-2008 pela empresa Pardal Monteiro Arquitetos. Encontra-se edificado em Oeiras, distrito de Lisboa e é constituído por quatro pisos, três dos quais acima do solo e outro subterrâneo. Atualmente o edifício é constituído por 5 blocos caracterizados de A a E (figura 15).



Figura 15- Edifício do IST-TagusPark e respetivos blocos. Retirado de Raposo (2015)

O gabinete em estudo está orientado a sudeste e localiza-se no 4º piso do bloco E. Apresenta uma área de 13,14 m², um pé direito que varia entre os 3,01 e os 3,26 m (figura 16). O gabinete em estudo

será denominado por gab16.20 (ou gabinete com PCM) e o gabinete de referência, homólogo a este será referido como gab16.22 (ou gabinete sem PCM). Estes dois gabinetes são contíguos, apresentam a mesma área e dispõem da mesma exposição solar.

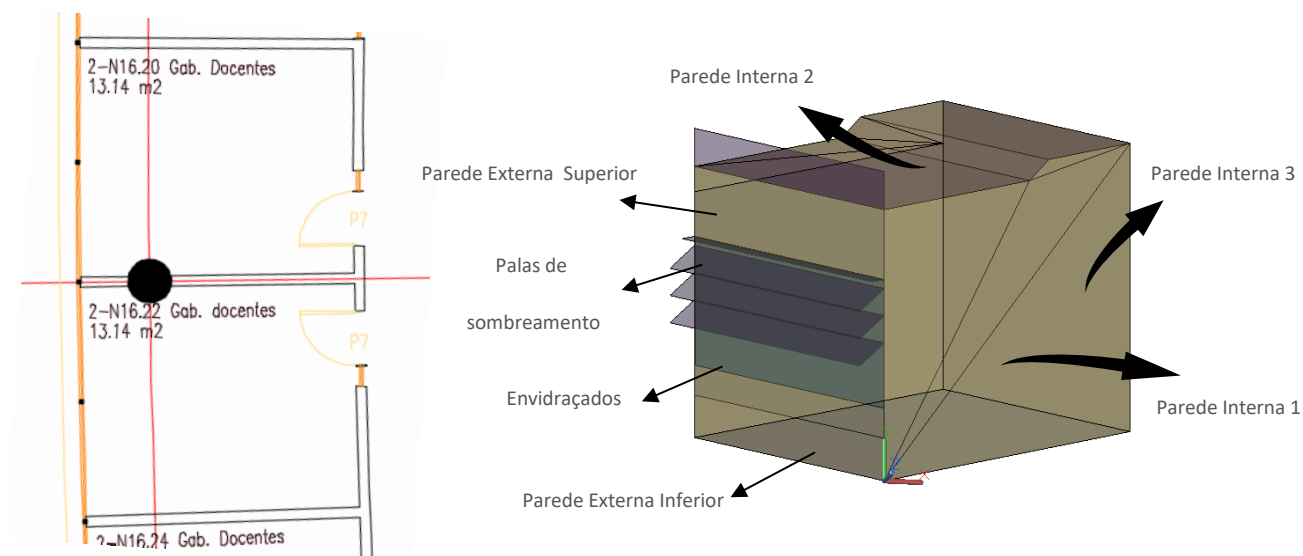


Figura 16- a) Planta do gab16.20 e gab16.22; b) Desenho 3D da geometria do gab16.20;

3.1.1 Fachada Sudeste

3.1.1.1 Vãos envidraçados e dispositivos de sombreamento exterior

A fachada sudeste de ambos os gabinetes é constituída por 2 vãos envidraçados, que correspondem a uma área total de 4,65 m². O vão envidraçado superior é constituído por duas janelas fixas e o inferior por duas janelas de correr. Ambos possuem vidro duplo com uma câmara-de-ar de 12mm e uma caixilharia híbrida composta por alumínio e policloreto de vinilo (PVC).

Do lado exterior dos envidraçados existem 3 palas de sombreamento com uma disposição horizontal. Estas palas são móveis, podendo ser orientadas consoante o ângulo de incidência do sol. Este tipo de dispositivo exerce funções de controlo solar permitindo reduzir a luminosidade e o calor transmitido por radiação. A fachada sul é composta ainda por uma pala fixa que pertence á própria estrutura da fachada que se encontra disposta na horizontal.

3.1.1.2 Parede Exterior

As soluções construtivas da parede exterior diferem acima e abaixo dos envidraçados, desta forma serão divididas em parede exterior superior e parede exterior inferior.

A parede exterior superior apresenta uma área de 2,6m² e é constituída por um painel de fibrocimento com 0,01 m de espessura, um isolamento de 0,05m de espuma rígido poliestireno extrudido (XPS), um bloco de betão com 0,08 m de espessura e revestido pelo interior com estuque projetado de 0,005m

de espessura. Entre a camada de estuque e o bloco de betão existe uma caixa-de-ar horizontal de 0,015m (figura 17).

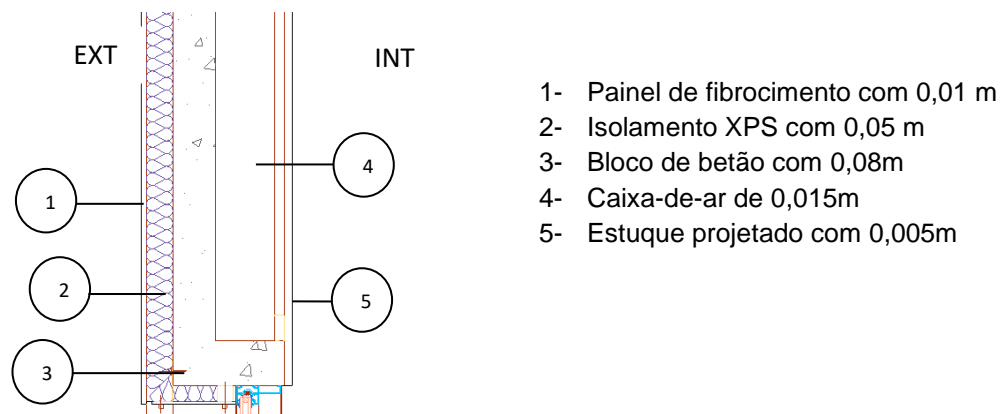


Figura 17- Parede Exterior Superior

A parede exterior inferior apresenta uma área de 2,7 m² e é constituída por um painel de fibrocimento com 0,01 m de espessura, um isolamento de 0,05m de espuma rígida poliestireno extrudado (XPS) e por duas camadas argamassa, a primeira de cal escura (0,02m) e a segunda constituída por cimento e areia (betonilha) com 0,2 m de espessura. Em semelhança com a parede sul cima é rebocado interiormente com estuque de projetado de 0,005m de espessura (figura 18).

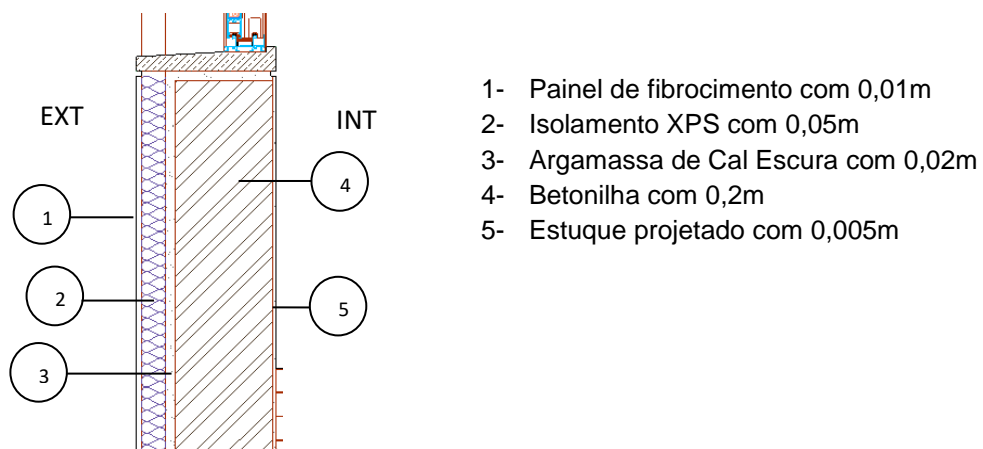


Figura 18- Parede exterior inferior

3.1.2 Paredes Interiores

As paredes interiores são constituídas por um pano de alvenaria de tijolo cerâmico furado com 0,25m de espessura e revestidas em ambas as faces por uma camada de estuque projetado (0,005m). As paredes interiores 1 e 2 são homólogas apresentando uma área total de 12,3 m². Na parede interior 3 existe uma porta de madeira e uma pequena janela, ambas com caixilharia em alumínio que perfazem um total de 2,4 m². A parede interior 3 apresenta assim uma área total de 10,3 m² (figura 19).

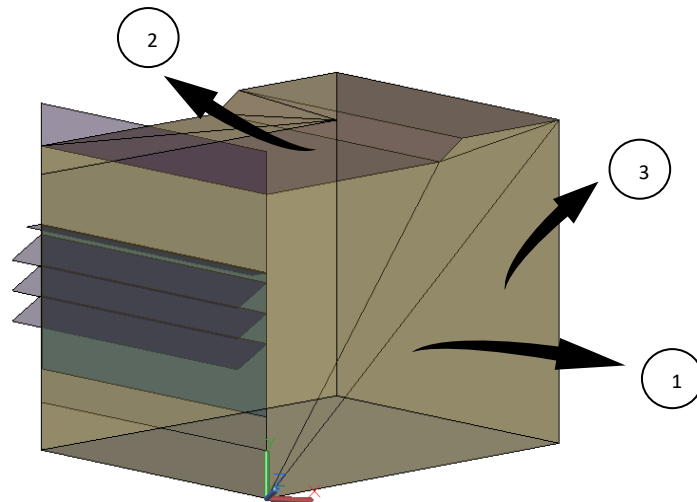


Figura 19-Parede Interiores

3.1.3 Chão

O chão apresenta uma área de 13,4 m² e é constituído por um bloco de betão de 0,47m de espessura, rebocado inferiormente com uma camada de estuque projetado (0,02m). Na parte superior é revestido por um soalho de madeira flutuante de 0,02m de espessura (figura 20).

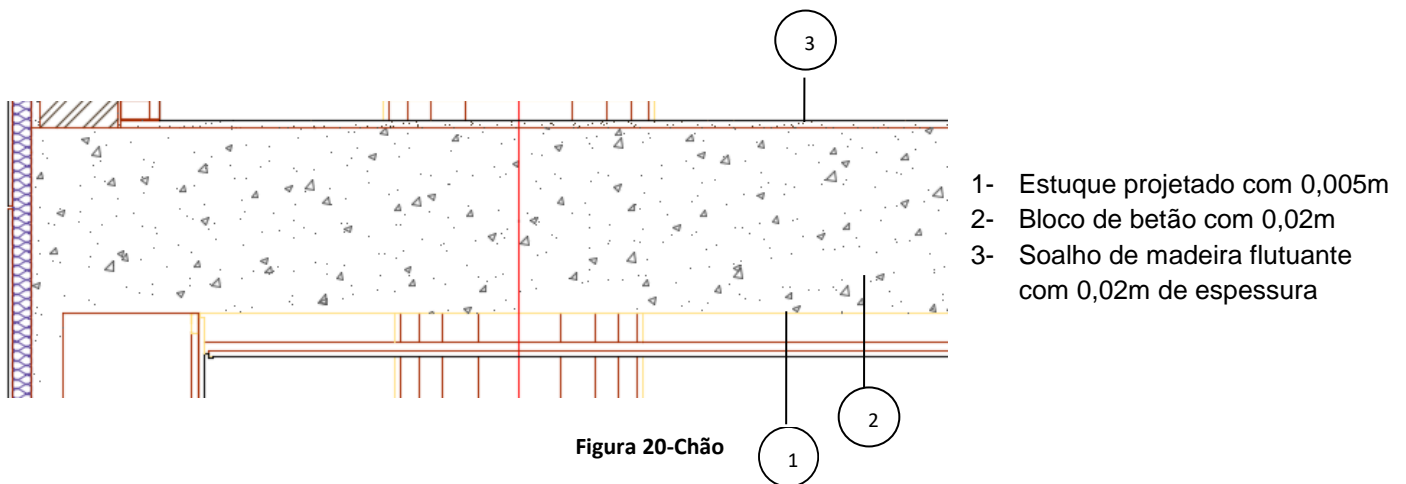


Figura 20-Chão

3.1.4 Teto

Com uma área total de 13,24m², o teto é constituído por uma lajeta de betão de 0,06m de espessura em contacto com o exterior. A camada seguinte corresponde a 0,05 m de isolamento XPS seguida de uma tela impermeabilizadora e de uma camada de betonilha com 0,002m e 0,03m de espessura, respetivamente. A espessura da camada de betão difere ao longo do teto apresentando assim 3 espessura diferentes. As camadas I, II e III apresentam respetivamente 0,47m, 0,35m e 0,22 m de espessura. Entre a betonilha e os blocos de betão existe uma camada de tijolo de 0,2m de espessura. À semelhança com as paredes o teto é rebocado interiormente com estuque de projetado de 0,005m de espessura (figura 21).

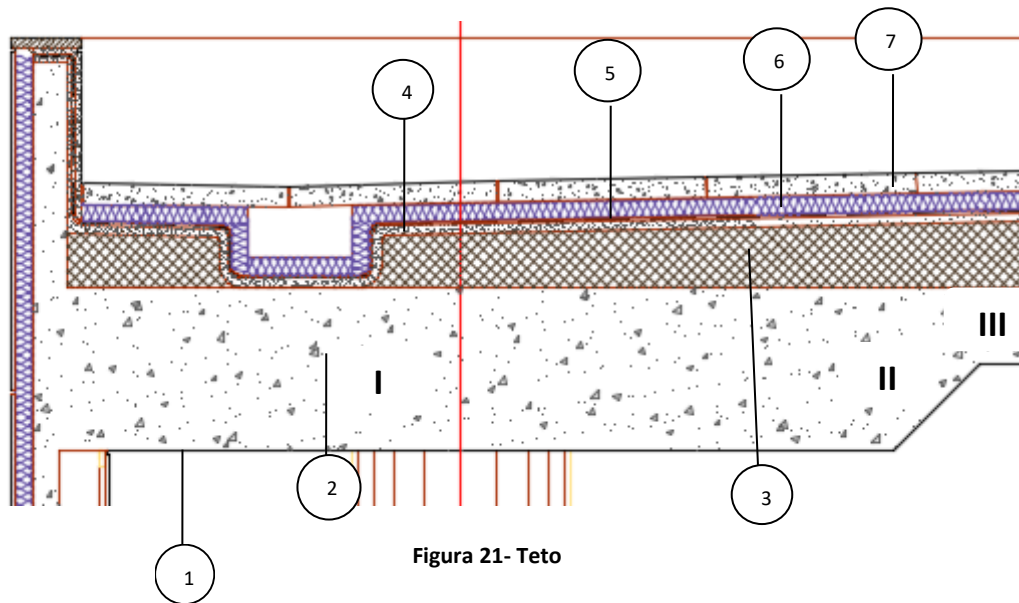


Figura 21- Teto

- 1- Estuque projetado com 0,005m
- 2- Bloco de betão
- 3- Tijolo com 0,2m
- 4- Betonilha com 0,03m
- 5- Tela impermeabilizadora com 0,002m
- 6- Isolamento XPS com 0,05m
- 7- Lajeta de betão com 0,06m

3.2 Coeficientes de transmissão térmica

O coeficiente de transmissão térmica (U) de um elemento caracteriza a transferência de calor que ocorre entre os ambientes ou meios que este separa, tornando-se assim um importante parâmetro a ser caracterizado para as diferentes soluções construtivas que constituem o gabinete em estudo.

O cálculo deste parâmetro deve ser determinado de acordo com a norma europeia EN ISO 6946, segundo a qual o valor de U é calculado segundo a seguinte fórmula:

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{se}} \quad [W/(m^2 \cdot ^\circ C)] \quad (3)$$

Em que:

R_j – Resistência térmica da camada j ;

R_{si} – Resistência térmica interior;

R_{se} – Resistência térmica exterior;

O cálculo da resistência térmica de cada camada deve ser calculado em função da espessura da camada (e) e da condutibilidade do material (i), assim para o cálculo deste parâmetro foi utilizada a seguinte expressão:

$$R_j = \frac{e_j}{i_j} \quad [(m^2 \cdot ^\circ C)/W] \quad (4)$$

Os valores das resistências térmica superficiais, R_{si} e R_{se} variam em função da posição do elemento construtivo e do sentido do fluxo de calor, assim a EN ISO 6946 apresenta uma tabela com valores a serem utilizados de acordo com estes dois parâmetros (tabela 1).

Tabela 1- Resistências térmicas superficiais

Sentido do fluxo de calor		Resistências térmicas [$m^2 \cdot ^\circ C/W$]	
		Exterior R_{se}	Interior R_{si}
Horizontal ¹		0,04	0,13
Vertical ²	Ascendente	0,04	0,10
	Descendente	0,04	0,17

1-Paredes (até +/- 30° com a vertical)

2-Coberturas e pavimento (até +/- 60° com a horizontal)

Aplicando as equações anteriormente descritas obtiveram-se os valores de U presentes na tabela seguinte (tabela 2). Os valores de espessura e condutibilidade de cada camada podem ser consultados no Anexo II onde está presente a tabela com as características dos materiais de construção.

Tabela 2- Coeficientes de transmissão térmica dos elementos construtivos

Elemento Construtivo		Coeficiente de Transmissão Térmica U [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
Paredes	Interiores	1,13
	Exterior Superior	0,55
	Exterior Inferior	0,58
Teto	I	0,50
	II	0,51
	III	0,53
Chão		1,77

Analisando os valores de U conclui-se que o gabinete em estudo se trata de uma divisão bem isolada visto que as paredes externas e o teto apresentam valores baixos de transmissão térmica.

3.3 Inércia térmica

A inércia térmica caracteriza-se como o fenómeno de amortecimento das ações térmicas exteriores e interiores por parte do edifício, que se reflete numa menor variação da temperatura interior. Este fenómeno é essencial para que o conforto térmico seja atingido tendo em conta a constante variação por parte de ações térmicas exteriores como a radiação solar e a temperatura exterior. No entanto um edifício bem isolado, com elevada inércia térmica pode levar a uma temperatura interior elevada, fora da gama de conforto térmico durante a estação quente quando os ganhos solares são mais elevados.

Com base nos valores dos coeficientes térmicos calculados anteriormente e tendo em conta as características e a espessura dos materiais utilizados nas diferentes soluções construtivas é notório que a divisão em estudo apresenta uma elevada inércia térmica. De forma a contabilizar esse valor de inércia foi utilizada a equação (5) que traduz a quantidade de energia necessária para que a temperatura da solução construtiva varie um grau celsiu ($\Delta T = 1^\circ\text{C}$). Esta quantidade de energia depende da massa (m) e do calor específico da mesma a pressão constante (C_p).

$$Q = m C_p \Delta T \quad [\text{KJ}] \quad (5)$$

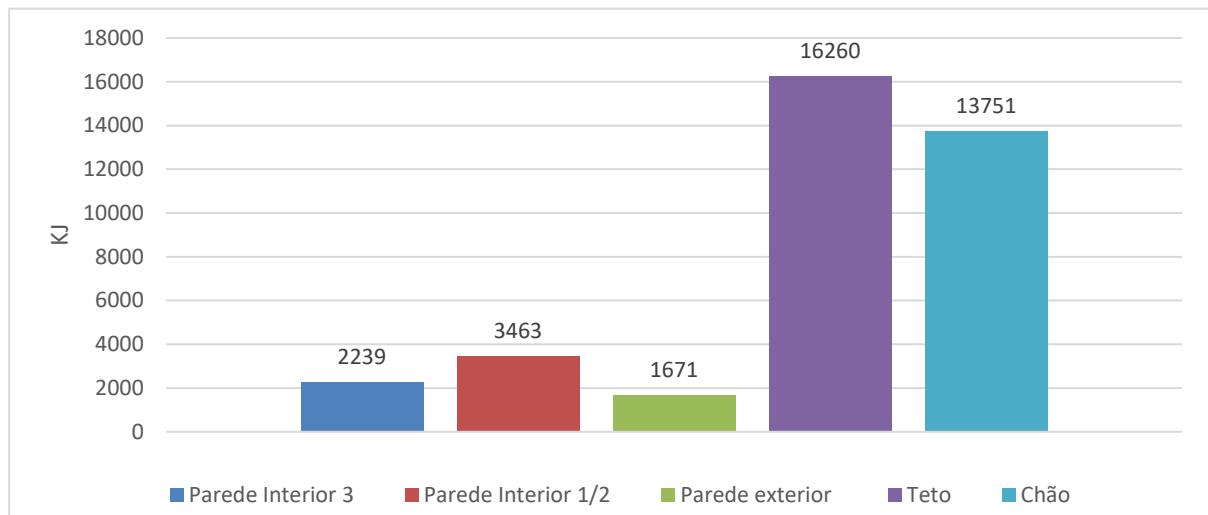


Figura 22- Inércia térmica dos elementos construtivos

Os valores obtidos podem ser observados na figura 22, na qual é possível observar que as soluções construtivas que mais contribuem para esta elevada inercia térmica são o teto e o chão.

3.4 Taxa de renovação de ar

Um dos principais métodos utilizados na determinação da taxa de renovação de ar em edifícios é o método do gás traçador. Neste método, o gás traçador é injetado na divisão em estudo e a sua concentração é medida ao longo do tempo. Existem diversas técnicas possíveis de aplicar na determinação da taxa de renovação de ar, nomeadamente a técnica do decaimento, técnica da emissão constante, técnica do estado estacionário e técnica da emissão constante com recolha passiva- PFT. O gás traçador deve apresentar propriedades específicas, sendo assim são frequentemente utilizados como gases traçadores os seguintes gases:

- Hexafluoreto de enxofre, SF_6
- Dióxido de carbono, CO_2
- Peróxido de azoto (óxido nitroso), N_2O
- Perfluorbenzeno (PB), C_6F_6
- Perfluormetilbenzeno (PMB), C_7F_8

Na técnica de decaimento, após se obter uma concentração inicial uniforme o decaimento da concentração é medido ao longo do tempo e a taxa de renovação horária é determinada com base nos valores registados.

Considerando um regime permanente, em que não ocorra produção nem absorção do gás traçador e a concentração deste no exterior é nula a equação do balanço de massa em termos de caudais volúmicos é dada pela seguinte expressão:

$$V \frac{dc(t)}{dt} + Q_v \cdot c(t) = 0 \quad (6)$$

Sendo:

- V : volume efetivo do espaço [m^3]
- Q_v : caudal de ventilação [$m^3 \cdot s^{-1}$]
- $c(t)$: concentração volúmica do gás
- t : tempo [s]

Resolvendo a equação em ordem ao tempo obtém-se:

$$c(t) = c_0 \cdot e^{-\frac{Q_v}{V} t} \quad (7)$$

Sendo c_0 a concentração inicial do gás traçador no instante inicial ($t = 0$) .

Se o gás traçador utilizado fizer parte da constituição do ar exterior como é o caso do CO_2 , que se encontra presente com uma concentração que varia entre os 300 e os 500 ppm, a concentração do gás no ar exterior não pode ser considerada nula. Assim a equação anterior assume a seguinte forma:

$$c(t) = c_{ext} - c_{ext} \cdot e^{-\frac{Q_v}{V} t} + c_0 \cdot e^{-\frac{Q_v}{V} t} \quad (8)$$

Sendo:

- c_{ext} : concentração volúmica do gás traçador no exterior

Rescrevendo a equação e considerando que R_{ph} representa o número de renovações horárias, obtém-se:

$$R_{ph} = \frac{Q_v}{V} = - \frac{\ln\left(\frac{c(t) - c_{ext}}{c_0 - c_{ext}}\right)}{t} \quad (9)$$

Representado graficamente em função do tempo o logaritmo natural da diferença entre a concentração do gás traçador e a sua concentração no exterior obtemos uma função logarítmica em que o módulo do declive da reta corresponde à renovação horária no intervalo de tempo considerado.

O módulo do declive pode ser obtido através da reta de regressão linear resultado da aplicação do método dos mínimos quadrados aos valores experimentais ou pelo cálculo da média dos módulos dos declives entre medições durante o intervalo de tempo de medição considerado (equação 10).

$$\frac{\sum_{i=0}^n \left| \frac{\ln(c(t_i) - c_{ext}) - \ln(c(t_{i+1}) - c_{ext})}{t_{i+1} - t_i} \right|}{n - 1} \quad (10)$$

Em que n corresponde ao número de medições.

De forma obter o número de renovações horárias correspondente ao escritório 2N16.20 foi aplicado o método do gás traçador seguido da técnica de decaimento explicitados anteriormente. O gás traçador utilizado foi o dióxido de carbono na qual se considerou que a sua concentração no ar exterior (C_{ext}) seria de 430 ppm. Este valor de C_{ext} é convencionalmente utilizado em métodos *in-situ* (Cui et al. 2015).

Os valores de concentração de CO₂ foram registados num total de aproximadamente 60 horas, com um intervalo de tempo de 10 min entre cada mediação, sem que ocorresse durante esse período, qualquer perturbação em termos de ocupação, abertura de portas/janelas ou ativação do sistema de ventilação. Os valores foram registados com recurso a um medidor de CO₂ (Chauvin Arnoux C.A 1510) descrito no capítulo materiais e metodologias. Os valores registados estão presentes na figura 23, apresentado de seguida.

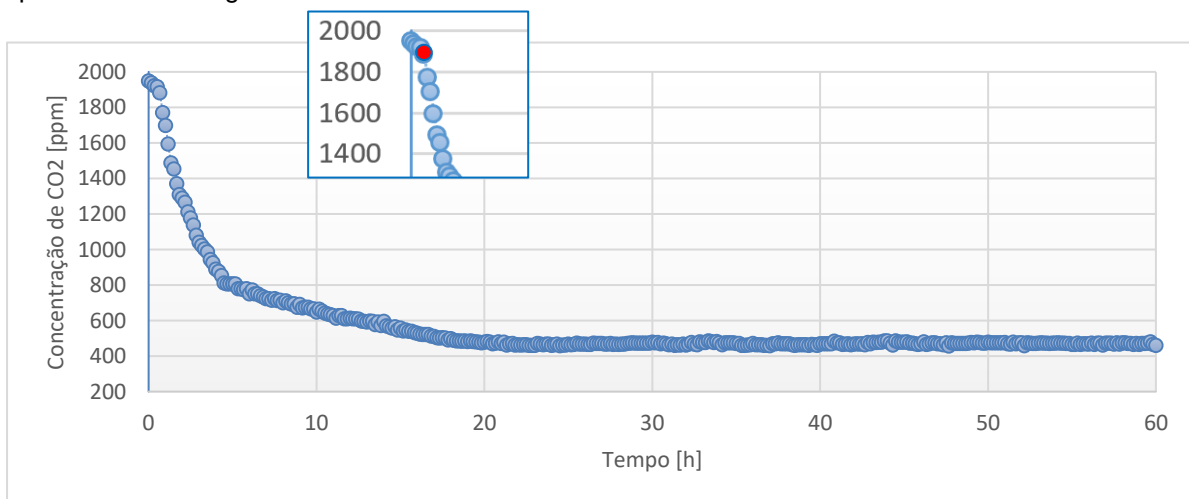


Figura 23- Decaimento de CO₂

Convencionalmente o valor registado na primeira medição é escolhido como o ponto inicial da curva de decaimento, no entanto em muitos casos o ponto inicial não é tão claro pois existe uma zona inicial de transiente durante a qual a curva não apresenta um comportamento exponencial (Cui et al., 2015). De forma a contornar este problema de transiente foi considerado como ponto inicial o momento em que a concentração de CO₂ atinge os 1883 ppm (figura 24). O ponto final foi seleccionado com base

no comportamento da curva ao longo das 60 horas onde é visível que ao final das 20 primeiras horas a concentração de CO₂ estabiliza.

Assim foi considerado como ponto final o momento em que a concentração atinge os 480 ppm. Analizando a figura 24 é notório que a reta de regressão linear resultante da aplicação do método dos mínimos quadrados não se ajusta aos dados representados ($R^2 = 0,9688$). Assim o valor de 0,172 renovações de ar por hora foi obtido através do cálculo da média dos módulos dos declives entre medições (equação 10).

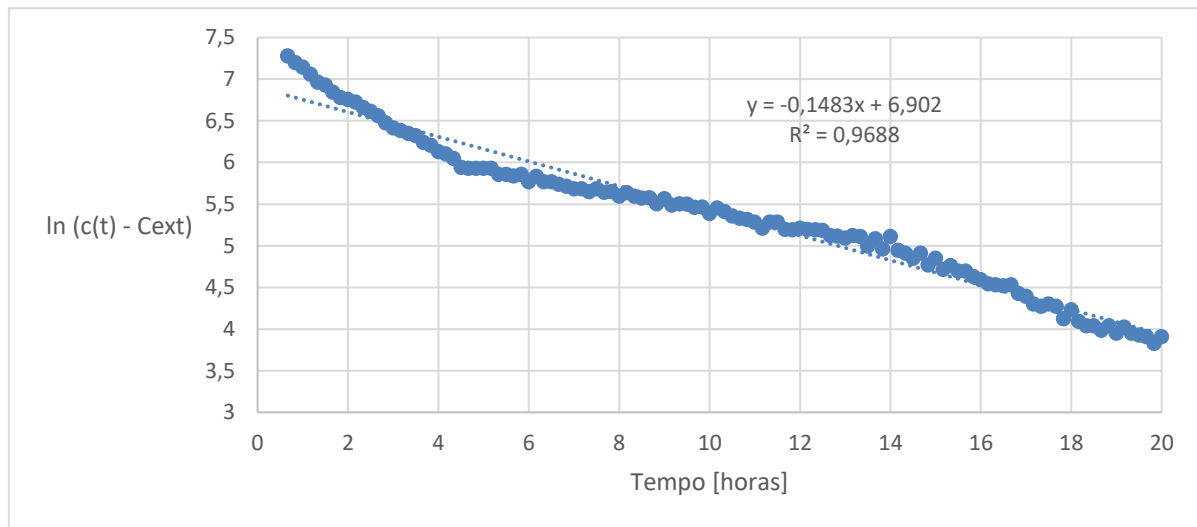


Figura 24- Regressão linear da curva de decaimento do CO₂

3.5 Caracterização do sistema de climatização

O edifício IST-TagusPark apresenta um sistema de climatização centralizado em que o fluido térmico é a água, apresentando assim a designação de sistema tudo-água. Neste tipo de sistemas o frio ou o calor é levado ao local a climatizar por água refrigerada ou água quente. Este tipo de sistemas pode apresentar uma conceção base de 2 ou 4 tubos. No primeiro caso existe apenas um circuito constituído por um tubo de ida e outro de retorno que possibilita a circulação de água quente ou água fria. No segundo caso em que existem 4 tubos, o sistema é constituído por 2 tubos (ida + retorno) que garantem o aquecimento, enquanto os outros 2 tubos permitem o arrefecimento. Este tipo de conceção permite aquecer divisões enquanto outras são arrefecidas. Este tipo de necessidades ocorre principalmente nos períodos de meia-estação, reflexo da orientação dos envidraçados das diferentes divisões que proporcionam ganhos térmicos de radiação solar direta a horas distintas.

Como já foi referido, edifício do IST- Taguspark está dividido em 5 blocos, os blocos construídos primeiramente (A-C) apresentam um sistema de climatização a 2 tubos e os restantes (D e E) possuem um sistema de climatização a 4 tubos. Assim tanto o gab16.20 como o gab16.22 apresentam um sistema a 4 tubos.

Neste sistema existe um *chiller*, responsável por fornecer água fria ao circuito de arrefecimento e uma caldeira com o objetivo de fornecer água quente ao circuito de aquecimento. A caldeira com câmara de

combustão atmosférica, trabalha a gás natural e apresenta um rendimento global de aproximadamente 85%. A água quente nas tubagens apresenta uma temperatura na ordem dos 80°C. Responsável pelo processo de arrefecimento, o *chiller* de compressão, alimentado a energia elétrica proveniente da rede nacional, apresenta uma potência elétrica máxima de 302kW e um EER¹ de aproximadamente 2,1 (Raposo, 2015).

Cada gabinete está equipado com um termostato eletrónico da Industrie Technik® (figura 25) que permite controlar os ventilo-convectores. Este modelo de termostato está equipado com um interruptor on/off e por um seletor de velocidades que permite ao operador escolher uma das três velocidades possíveis.



Figura 26- Termostato eletrónico Industrie Technik®.
Retirado de Industrie Technik®(2014).

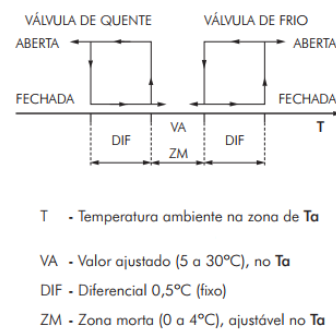


Figura 25 – Digrama funcional. Retirado de Industrie Technik®(2014).

Com este equipamento é ainda possível controlar a temperatura numa gama de ajuste entre os 5°C e os 30°C com um diferencial de 0,5°C. A regulação da temperatura do ar de saída do ventilo-convectores é feita a partir da abertura e do fecho das válvulas de quente e frio (figura 26).



Figura 27- Grelha de insuflação

As grelhas de insuflação e de extração são constituídas por alhetas móveis horizontais que permitem ajustar a direção do fluxo de ar. Cada grelha possui 11 alhetas e apresenta uma área de 1,2 m² (figura 27).

¹ EER-Energy Efficiency Ratio

4. Materiais e Metodologia

4.1 Caracterização do material com mudança de fase e metodologia de análise

As Knauf Comfortboard 23 são placas de gesso comercializadas no mercado alemão pela Knauf® que contêm na sua constituição aproximadamente 18% em massa de PCM Micronal® microencapsulado (figura 28 b)).

Comercializado pela BASF, o PCM Micronal® consiste numa microcápsula de aproximadamente 5 µm que apresenta no seu núcleo uma mistura de cera de parafina no estado sólido cuja temperatura de mudança de fase se situa nos 23°C (figura 28 a)). A cápsula é constituída por PMMA (polimetilmetacrilato), livre de formaldeído e permite uma variação volumétrica do PCM de 10% durante a mudança de fase. Segundo o fabricante o PCM não sofre qualquer decréscimo na sua performance após 10 000 ciclos térmicos, o equivalente a pelo menos 30 anos de utilização.

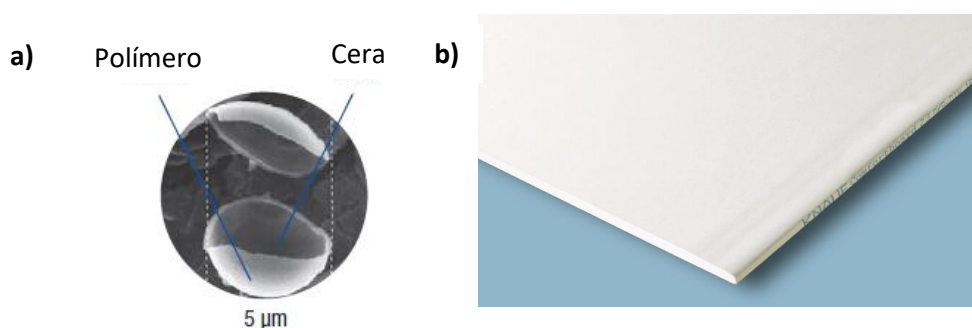


Figura 28- a) PCM Micronal®; b) Knauf Comfortboard 23

Na tabela 3 presente de seguida, é possível consultar um resumo das características mais relevantes relativas às placas Knauf Comfortboard 23. Estes dados foram disponibilizados pela Knauf®.

Tabela 3-Propriedades das Knauf Comfortboard 23

Dimensões (L x C) (mm)	1250 x 2000
Espessura (mm)	12,5
Peso (kg/m ²)	11
Peso PCM (kg/m ²)	2
Densidade (kg/m ³)	880
Temperatura de fusão (°C)	23
Temperatura de solidificação (°C)	22
Calor específico-C _p (kJ/m ² . K)	12,76
Capacidade de calor latente -ΔH (kJ/m ²)	200
Condutividade Térmica -λ (W/m.K)	0,23

O processo de fusão da cera de parafina não ocorre na sua totalidade a uma temperatura específica, mas para um intervalo de temperaturas. De forma a quantificar a quantidade de calor absorvido pela parafina durante a mudança de fase, é utilizado um parâmetro denominado de capacidade de calor específico equivalente, C_{eq} . Este parâmetro representa a energia térmica necessária para produzir a variação de uma unidade de temperatura numa unidade de massa de PCM em condições de pressão constante (equação 1). O C_{eq} é obtido através de teste laboratoriais onde a variação da entalpia (ΔH) é medida após ter sido imposta à amostra de PCM uma flutuação periódica da temperatura. Os resultados obtidos descrevem geralmente um comportamento que se ajusta a uma curva de Gauss, cujo pico corresponde a temperatura de fusão T_f (Evola & Marletta, 2014).

$$C_{eq}(T) = \frac{\Delta H(T)}{\Delta T} \quad [\text{kJ/kg}] \quad (11)$$

Na figura 29 estão descritas as curvas que representam o C_{eq} durante o processo de fusão e solidificação do PCM. Como pode ser observado, o processo de fusão inicia-se aproximadamente à temperatura de 18°C e está completo aos 24°C, logo após a temperatura de fusão de 23°C.

A curva que descreve a capacidade de calor equivalente durante a fase de solidificação não corresponde aos valores determinados para a fase de fusão. É visível que o PCM após estar

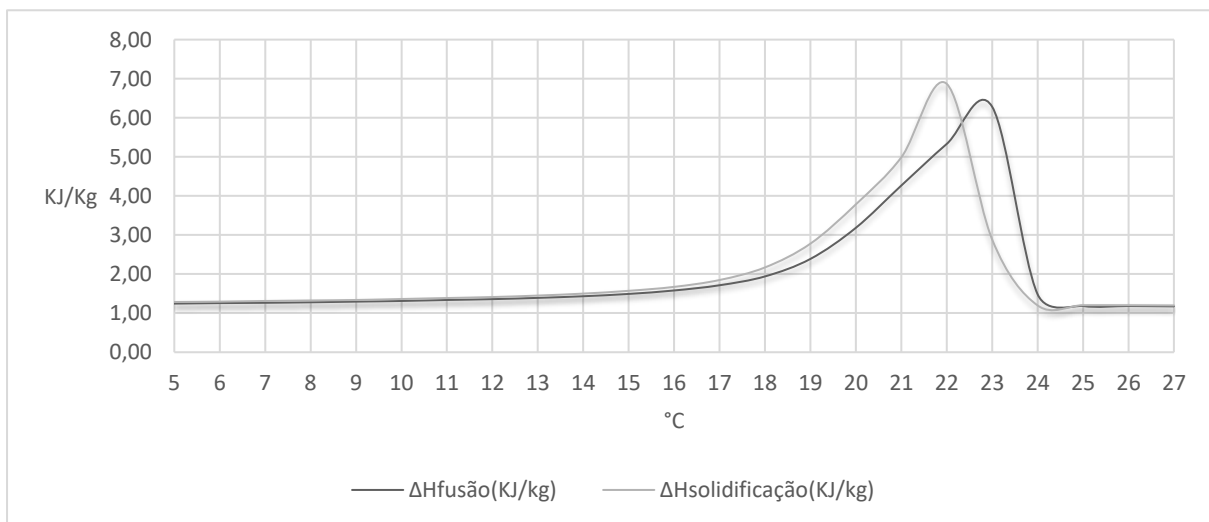


Figura 29- Curvas de C_{eq} durante o processo de fusão e solidificação

completamente fundido a 23°C necessita de arrefecer até à temperatura de 22°C para libertar a energia acumulada. Este fenómeno é intitulado de histerese e é provocada na maioria dos casos pelo sobreaquecimento. Esta propriedade do material é comum em PCMs microencapsulados como referido anteriormente na revisão bibliográfica.

Como é visível na figura 30 as curvas de entalpia para o processo de fusão e solidificação também variam entre si. Durante a análise de resultados de forma a obter resultados precisos relativos à acumulação de energia nas placas, foi utilizada como base a curva respetiva à média entre as entalpias de fusão e solidificação.

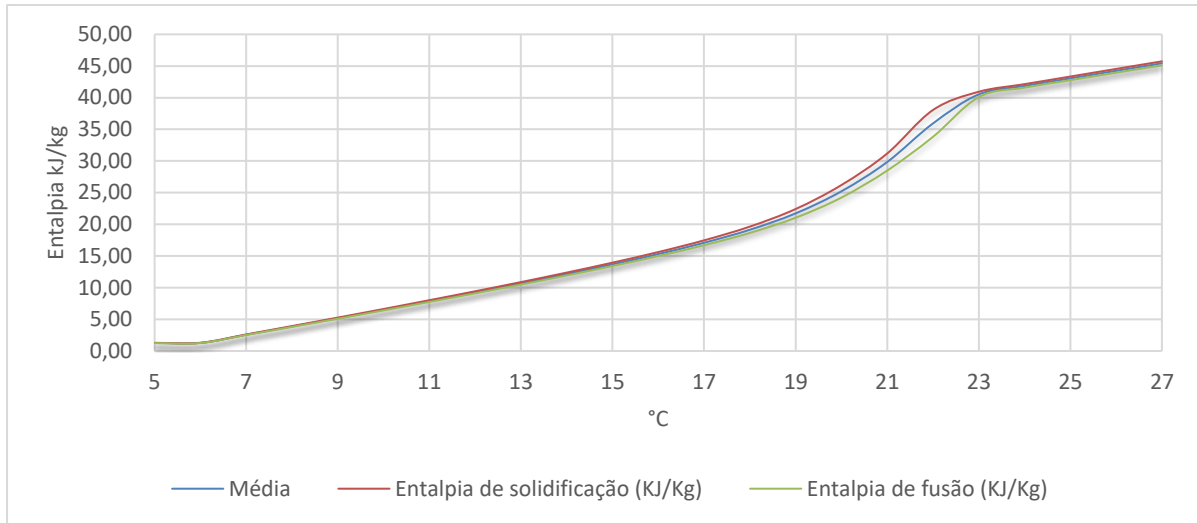


Figura 30- Curvas de entalpia de fusão e solidificação do PCM

A partir da aplicação do método dos mínimos quadrados à curva média resultaram duas equações polinomiais que fornecem os valores de entalpia para diferentes valores de temperatura.

Para $5 < T \leq 22^\circ\text{C}$:

$$H(T) = 3 \times 10^{-5} T^5 - 0,0007 T^4 - 0,0103 T^3 + 0,4447 T^2 - 3,0629 T + 6,9148 \quad [\text{KJ/Kg}] \quad (11)$$

Para $22 < T \leq 27^\circ\text{C}$:

$$H(T) = 0,1538 T^3 - 11,621 T^2 + 293,33 T - 2430,8 \quad [\text{KJ/Kg}] \quad (12)$$

A equação polinomial 11 e 12 podem ser consideradas boas aproximações tendo em conta que apresentam, respectivamente, um R^2 de 0,9998 e 0,9934.

De forma a quantificar a energia acumulada ou libertada num determinado instante pelas placas em termos de calor latente e calor sensível foi aplicada a equação 13, onde Q representa o calor acumulado/libertado em kJ, Q_s e Q_L o calor sensível e latente (respectivamente), m a massa em kg, C_p o calor específico em kJ/kg .°C, T_2 e T_1 a temperatura final e inicial(respectivamente), f_m a fração do material que muda de fase e ΔH a variação de entalpia.

$$Q = Q_s + Q_L = \int_{T_1}^{T_2} m C_p dT + m f_m \Delta H \quad [\text{kJ}] \quad (13)$$

Do ponto de vista energético existe uma diferença para as diversas temperaturas dentro da gama de mudança de fase. Quando o PCM está a temperaturas próximas da temperatura de fusão de pico

(23°C) apresenta uma capacidade de acumular energia térmica superior à registrada quando se encontra à temperatura de início de mudança de fase. Desta forma para avaliar o desempenho do PCM nas condições reais será calculada a eficiência de acumulação do PCM. Este parâmetro corresponde ao rácio entre a energia térmica efetivamente acumulada E_{st} pelo PCM, e a capacidade máxima de acumulação de calor latente (L), (equação 14). Tendo em conta que os ciclos térmicos são diários, a energia térmica efetivamente acumulada foi avaliada por períodos de 24 horas (P). A capacidade máxima de acumulação de calor latente foi fornecida pelo fabricante (200 KJ/m²) e a energia térmica efetivamente acumulada foi calculada a partir da segunda parcela da equação (13), que corresponde ao calor latente (Evola & Marletta, 2014).

$$\eta_{PCM} = \frac{E_{st}}{L} = \frac{\int_P \left(C_{eq} \cdot \frac{dT_{PCM}}{dt} \right) dt}{\int_{T_m}^{T_s} C_{eq}(T) dt} \quad (14)$$

4.2 Equipamentos

Durante os ensaios foram utilizados os seguintes aparelhos:

- Data logger Omega® e Termopares
- Data logger HOBO®
- Mediador de CO2
- Câmara termográfica
- Estação meteorológica

As especificações de cada aparelho podem ser consultadas no anexo III.

4.3 Configurações experimentais e procedimento

Como descrito anteriormente este trabalho experimental tem por objetivo estudar o comportamento térmico de 6 placas de gesso com PCM microencapsulado, quando dispostas em diferentes configurações e analisar o seu impacto no conforto térmico da divisão.

Durante o trabalho experimental foram realizados um total de cinco ensaios na qual foram testados dois cenários. A principal diferença entre estes foi a disposição espacial das placas no gabinete e o mês em que o ensaio ocorreu. Dos cinco ensaios realizados apenas três serão apresentados e discutidos nos futuros capítulos.

4.3.1 Configurações gerais comuns a todos os ensaios

- Nos dois dias precedentes ao início de cada ensaio o sistema de climatização permaneceu ligado em ambos gabinetes na qual se selecionou no termostato a velocidade 3 e uma temperatura de 15°C. Esta medida foi tomada de forma a remover o calor existente nas placas de gesso e nas restantes soluções

construtivas e com o intuito de homogeneizar a temperatura entre os gabinetes. O sistema de climatização foi desligado nos instantes prévios ao início de cada ensaio.

- Durante todo o período experimental não existiu qualquer perturbação em ambos os gabinetes (sem ocupação, sistema de climatização em modo off, portas e janelas permanentemente fechadas)

- As 3 palas de sombreamento foram dispostas na vertical em ambos os gabinetes de forma a minimizar a entrada de radiação.

- Em todos os ensaios as temperaturas foram registadas com um intervalo de tempo de 15 min entre cada medição.

4.3.2 Calibração

Data logger Omega® e Termopares

Previamente a cada ensaio, todos os termopares do tipo k sofreram um processo de calibração na qual foram expostos às mesmas condições térmicas que um termómetro de mercúrio (resolução de 0,5°C), utilizado como referência. A calibração dos termopares foi realizada com recurso ao software Daqlab na qual se registou durante 1 min com um intervalo de tempo entre cada medição de 10 segundos os valores de temperatura de cada termopar. Analisando a diferença entre os valores de temperatura registados pelos termopares e pelo termómetro procedeu-se posteriormente à calibração individual de cada termopar através do processo de calibração do software Daqlab que permite compensar até ao nível decimal o desvio existente entre a temperatura de referência e a dada pelo termopar. Após esta correção um novo ensaio foi registado durante o mesmo período e intervalo de tempo. Caso algum termopar apresenta-se um desvio significativo em relação a valor de referência, todo o processo de calibração era repetido até todos os termopares estarem em concordância com a referência. É de notar que mesmo após várias repetições do processo de calibração os termopares não atingiram o equilíbrio, no entanto nunca apresentaram um desvio superior a 0,2°C em relação ao valor de referência.

Após a instalação dos termopares nos locais e superfícies a medir uma nova calibração foi realizada com recurso a dois termopares do tipo k, não expostos, com um diâmetro de 0,5 mm instalados num multímetro. Mais uma vez com o auxílio do software Daqlab foi registado durante 1 min com um intervalo de tempo entre cada medição de 10 segundos os valores de temperatura de cada termopar. Durante este intervalo de tempo os locais e as superfícies medidos pelos 8 termopares foram sujeitos a medições por parte dos 2 termopares ligados ao multímetro de forma a garantir a sua calibração. Na maioria dos casos este processo demonstrou que o primeiro processo de calibração foi suficiente para garantir resultados precisos e fidedignos.

Data logger HOBO®

De modo a analisar o desvio entre as medições registadas pelos dois data loggers HOBO® (DL_{16.20} e DL_{16.22}), estes foram expostos lado a lado durante 55 horas na qual registaram valores de temperatura do ar e humidade relativa com um intervalo de 15 min entre medições.

Calculando a média da diferença entre medições dos dois data loggers para os mesmos instantes, concluiu-se que apresentam um desvio entre si de 0,036 °C para a temperatura e 0,483% para a humidade relativa.

4.3.3 1º cenário

Numa abordagem inicial optou-se por incorporar as 6 placas de gesso como uma camada interna das paredes do gabinete. As placas foram colocadas em contacto com as paredes atuando como camada final das mesmas. Neste cenário foram usados aproximadamente 14 m² de placas que correspondem a um peso total de 155,6 kg (28,3 kg de PCM). A disposição das placas pode ser consultada nas figuras apresentadas de seguida.

a)



-Parede interna 2:
Número de placas: 3
Área total: 7,5m²

-Parede interna 3:
Número de placas:1
Área total: 2,5 m²

b)



- Parede Exterior Superior:
Área: 2,6 m²

c)



- Parede Exterior Inferior
Área: 1,5 m²

Figura 31- a) Disposição das placas nas paredes internas; b) Disposição das placas na parede externa superior; c) Disposição das placas na parede externa inferior

De forma a retratar a evolução das temperaturas no gabinete foram usados 8 termopares do tipo k e dois *data loggers* HOBBO®. No gab16.20 foram colados 7 termopares e um *data logger* HOBBO® nas seguintes localizações:

- Termopar 1 (T_1) – Altura do plano de trabalho (1,12m)
- Termopar 2 (T_2) – Parede interna 3
- Termopar 4 (T_4) – Altura dos ventilo-convetores (aproximadamente 2,65m)
- Termopar 5 (T_5) – Chão (0,01m)
- Termopar 6 (T_6) – Placa de PCM (parede interna 2)
- Termopar 7 (T_7) – Parede interna 2
- Termopar 8 (T_8) – Placa de PCM (parede exterior inferior)
- Data logger HOBBO® 16.20 (DL_{16.20}) -Altura do plano de trabalho (1,12m)



Figura 32- Localização do termopar T_4



Figura 33- Localização dos termopares T_1 , T_2 , T_6 , T_7 e do *data logger* DL_{16.20}

No gabinete de referência, gab16.22 foram colocados um termopar e o segundo datalogger HOBBO®:

- Termopar 3 (T_3) – Altura do plano de trabalho (1,12m)

- Data logger HOBO® 16.22 (DL_{16.22}) – Altura do plano de trabalho (1,12m)

Os termopares T₁, T₃, T₄, T₅ e os *data loggers* DL_{16.20} e DL_{16.22} foram colocados com o objetivo medir a temperatura do ar nos respetivos locais. Os restantes termopares foram colocados em contacto com as superfícies com o intuito de registar a evolução da temperatura nas mesmas. Estes últimos foram instalados com recurso a 3 tiras de fita de alumínio de forma melhorar a transferência de calor entre as superfícies e os termopares e consequentemente medir com melhor precisão os valores registados pelas superfícies.

4.3.4 2º cenário

Numa segunda abordagem considerou-se que seria vantajoso suspender 4 das 6 placas de forma a analisar qual o seu desempenho em comparação com os resultados obtidos com o primeiro cenário. Uma das razões que *a priori* justificaram este cenário é a possibilidade desta configuração melhorar a recirculação de ar verificada no escritório. O facto de o ar quente subir e o calor que este armazena ser absorvido pelas placas, faz com que o ar arrefeça e consequentemente desça melhorando a recirculação de ar e promovendo a ausência de estratificação de temperaturas. Esta configuração apresenta ainda a vantagem de duplicar a área superficial de transferência de calor entre as placas e o ar ambiente, promovendo as trocas de calor entre os mesmos, que se reproduz numa maior facilidade por parte no PCM de derreter e solidificar.

A área de placas utilizada foi constante tanto para o 1º como para o 2º ensaio e as paredes externas foram revestidas de igual forma. No entanto as 4 placas que estavam incorporadas nas paredes internas 2 e 3 foram suspensas no teto com a configuração demonstrada na figura 34.



Figura 34- Placas de PCM suspensas no teto

Cada conjunto de duas placas (PSa e PSb) foi suspenso ao teto com o auxílio de 6 varões roscados fixos com buchas metálicas. As placas superiores e inferiores foram colocadas de forma a terem um espaçamento de 10 cm e a estarem centradas com as grelhas dos ventilo-convectores. Dado que cada grelha apresenta um comprimento de 20 cm, a placa superior foi colocada a 5cm do início da grelha e

a placa inferior a 5 cm do final da mesma (figura 35). O conjunto de placas PSa e PSb foram colocados na direção das grelhas de insuflação e extração respectivamente. As alhetas das grelhas foram colocadas na horizontal de forma a maximizar a entrada de ar e a redirecionar o fluxo para a placas.

Neste cenário, os termopares e o *data logger* foram colocados no gabinete 16.20 com a seguinte disposição:

- Termopar 1 (T_1) – Candeeiro de pé (1,50m)
- Termopar 2 (T_2) – Altura do plano de trabalho (1,12m)
- Termopar 3 (T_3) – Placa de PCM (parede exterior inferior)
- Termopar 4 (T_4) –PSa – centro da placa inferior
- Termopar 5 (T_5) – Parede interna 3
- Termopar 6 (T_6) – Chão (0,01m)
- Termopar 7 (T_7) – Parede interna 2
- Termopar 8 (T_8) – PSb – centro da placa inferior
- Data logger HOBO® 16.20 (DL_{16.20}) -Altura do plano de trabalho (1,12m)

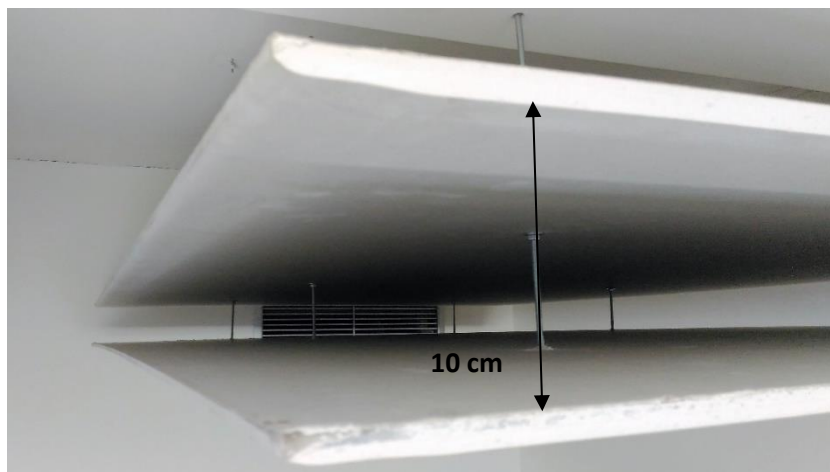


Figura 35- Espaço entre a placa superior e inferior do conjunto PSb



Figura 36-Localização dos termopares T_4 e T_8

O gabinete 16.22 foi equipado apenas com um data logger HOBO®:

- Data logger HOBO® 16.22 (DL_{16.22}) – Altura do plano de trabalho (1,12m)

Os termopares T₃, T₄, T₅, T₇ e T₈, á semelhança com o 1º cenário foram colocados com recurso a 3 tiras de fita de alumínio. Os restantes termopares e *data loggers* foram colocados com o objetivo medir a temperatura do ar nos respetivos locais.

4.3.5 Caracterização do segundo cenário com câmara termográfica

Com a configuração de placas suspensas e com o auxílio da câmara termográfica Milwaukee®, realizou-se no dia 17 de julho, entre as 11h50 e as 19h15, um ensaio onde se obteve fotografias termográfica do gabinete com PCM (gab16.20).

De forma a registar o comportamento das placas em regime de acumulação e libertação de calor, o sistema de ventilação foi ligado às 10h00 e desligado às 16h00. Assim, o período de libertação de calor corresponde ao período entre as 11h50 e as 16h00 e o período de acumulação entre as 16h00 e as 19h15.

A monitorização foi realizada com recurso à câmara termográfica Milwaukee® e ao Data logger HOBO® 16.20. A localização deste último foi a mesma registada no segundo ensaio. As fotografias termográficas foram registadas com intervalos de 1 horas.

5. Resultados e Discussão

5.1 1º ensaio

Durante este ensaio foi testado o primeiro cenário descrito no capítulo 4.3.3 que consiste na incorporação das 6 placas de gesso como uma camada interna das paredes do gabinete (figura 37). Com este ensaio espera-se demonstrar que a incorporação das placas de PCM no meio permite atenuar as flutuações de temperatura. Através da acumulação de calor na forma latente, o gabinete com PCM (gab16.20) deverá apresentar menor amplitude térmica que o gabinete sem PCM (gab16.22).

Este ensaio teve a duração de aproximadamente 4 dias, dado que teve início no dia 19 de maio às 10h00 e terminou no dia 23 às 11h00.

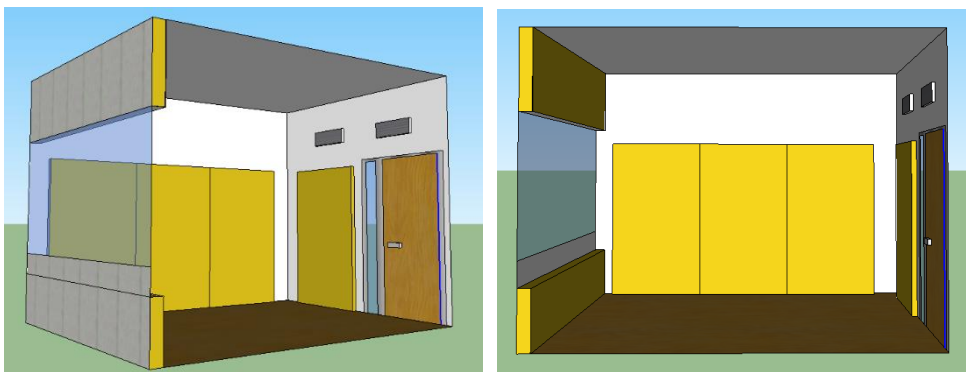


Figura 37- Configuração das placas com PCM(a amarelo) no 1º ensaio

Temperatura e Radiação Exterior

Na figura 38 é possível visualizar o comportamento da temperatura e da radiação exterior durante este primeiro ensaio.

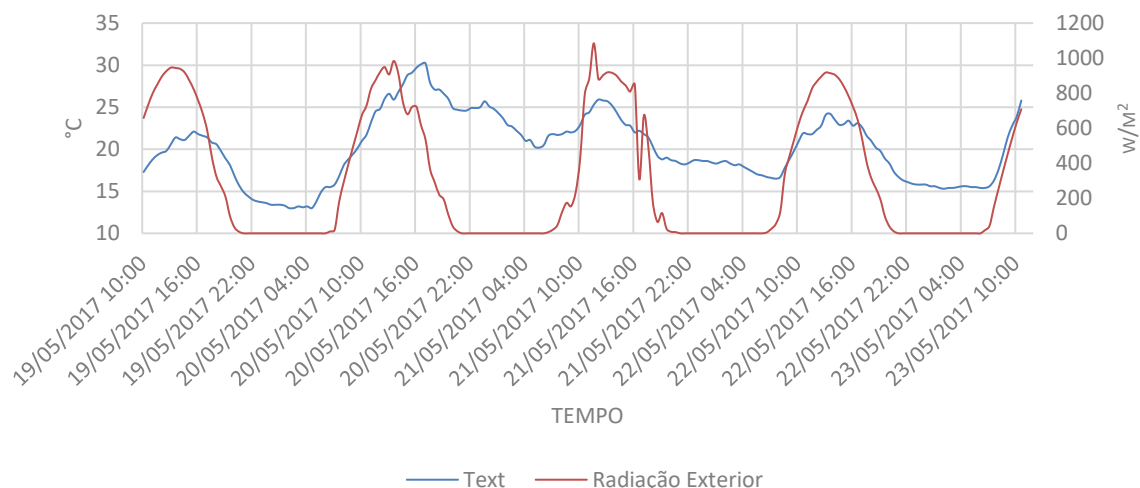


Figura 38- Evolução da temperatura e radiação exterior durante o 1º ensaio

Em termos de temperatura exterior o dia 20 foi o que apresentou maior amplitude térmica, tendo-se verificado neste dia o mínimo semanal de 13°C e o máximo de 30,2°C. A temperatura máxima, mínima e média dos dias na qual decorreu o ensaio podem ser consultadas na tabela 4.

Tabela 4- Valores de temperatura externa 1º ensaio

Dia	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tmédia [°C]
19/mai	22,1	13,6	18,6
20/mai	30,2	13	21,5
21/mai	25,9	18,2	21,9
22/mai	24,2	15,8	19,4
23/mai	25,8	15,3	17,3

Temperatura do ar interior

A figura 39 demonstra a evolução da temperatura do ar interior no gabinete com PCM e sem PCM registada respetivamente pelos data loggers DL_{16.20} e DL_{16.22}. Através da análise do gráfico é notória uma ligeira atenuação da temperatura do ar no gabinete com PCM. Esta atenuação é mais evidente no pico I, II e III onde ocorre uma atenuação média de 0,07°C. A atenuação máxima é registada no pico I e apresenta aproximadamente o valor de 0,2°C. O efeito das placas de PCM é comprovado com estes resultados tendo em conta que a diminuição na flutuação da temperatura é mais evidente na gama de temperaturas abaixo dos 24°C, que corresponde ao valor a partir da qual o PCM presente nas placas está totalmente fundido e apresenta uma capacidade residual de armazenar calor latente.

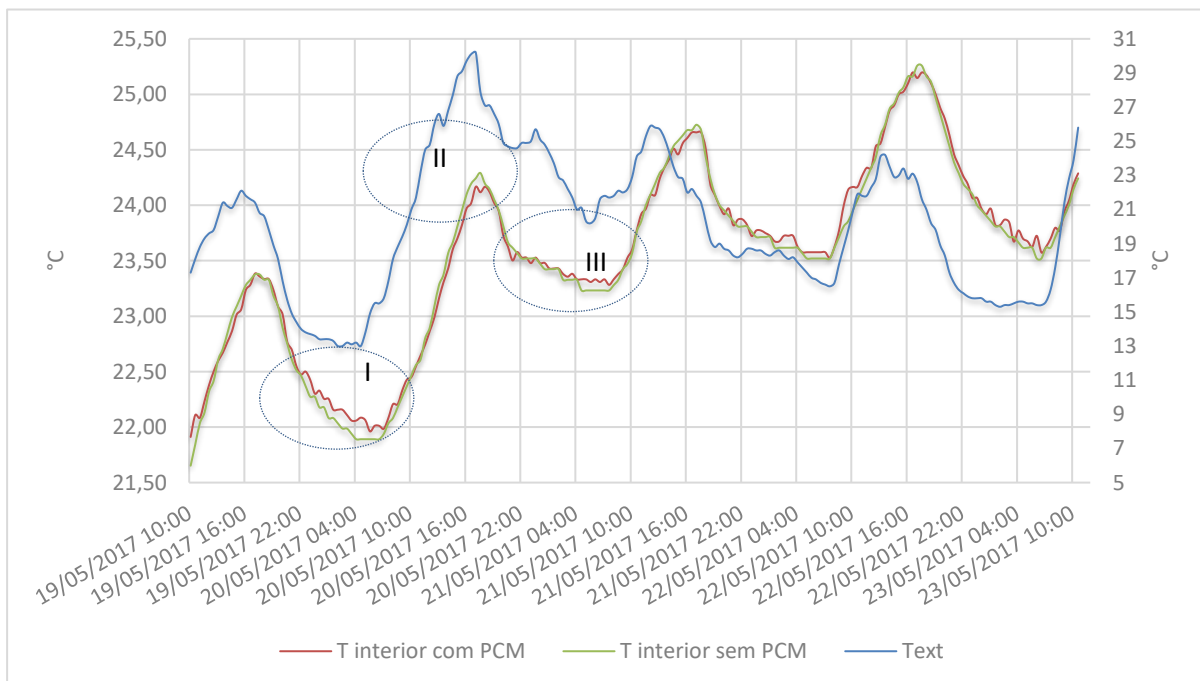


Figura 39- Evolução das temperaturas interiores dos gab16.20 (com PCM) e gab16.22 (sem PCM) e da temperatura exterior durante o 1º ensaio

Estratificação da Temperatura

Em termos de estratificação da temperatura é possível consultar na figura 40 os resultados obtidos pelos termopares T₄, T₅ e pelo sensor DL_{16.20} colocados respetivamente a 2,55 m, 0,01m e 1,12 m de altura. A diferença média de temperatura entre a altura de 0,01 e 2,55m foi de aproximadamente 1°C e de 0,5°C entre as temperaturas registadas a 1,12 e 2,55m bem como a 1,12 e 0,01m. A partir destes valores é possível concluir que a estratificação existente promove um grau elevado de conforto térmico, dado que a diferença de temperatura entre os tornozelos e o hipotálamo de uma pessoa sentada é de apenas 0,5°C e o desconforto térmico é atingido quando esta diferença vertical é superior a 3°C (Zhang et al.,2005).

Analisando o comportamento das 3 curvas é notório que a curva que representa a temperatura registada a 1,12 m de altura apresenta uma variação superior às restantes. Este fenómeno é resultado da imposição de temperatura por parte do teto e do chão que apresentam elevada inércia térmica provocando uma menor variação das temperaturas verificadas a 2,55 e 0,01 m de altura, respetivamente.

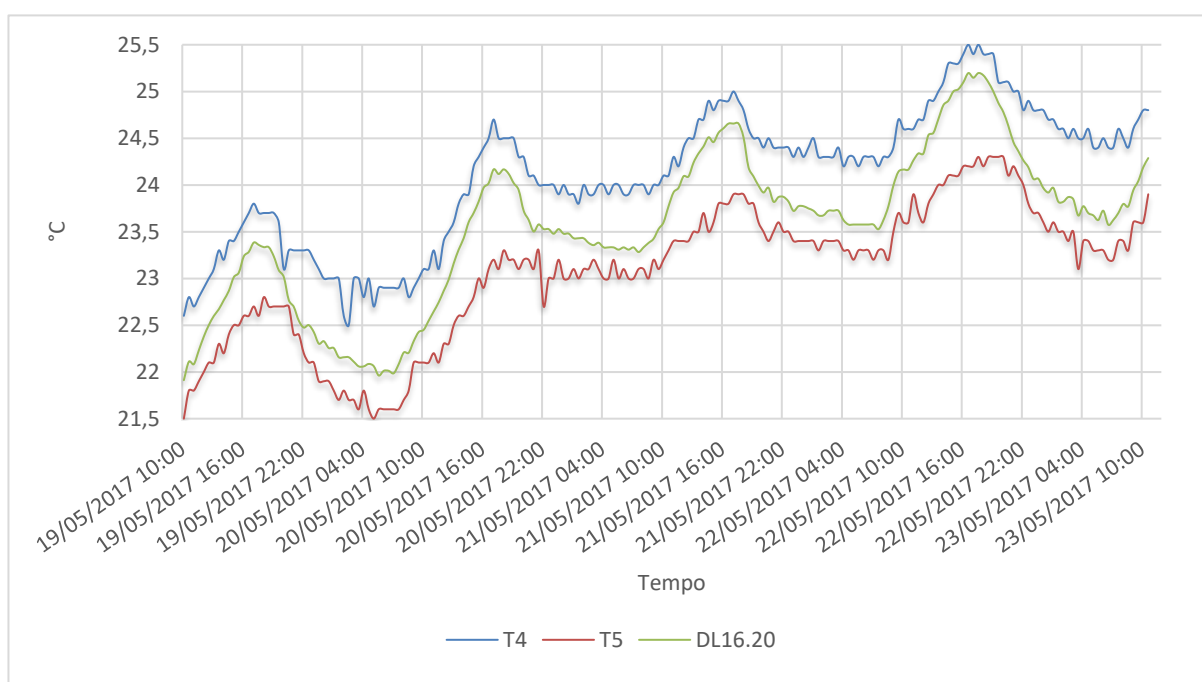


Figura 40- Evolução da temperatura interior no gabinete com PCM a 0,01m, 1,12m e 2,55m durante o 1º ensaio

Temperatura das Paredes

A partir dos dados retratados na figura 42, registados pelos termopares T₂, T₆, T₇ e ainda pelo data logger DL_{16.20} (figura 41) é possível consultar a evolução das duas paredes internas, da temperatura do ar e da placa de PCM localizada na parede interna 2 [b].

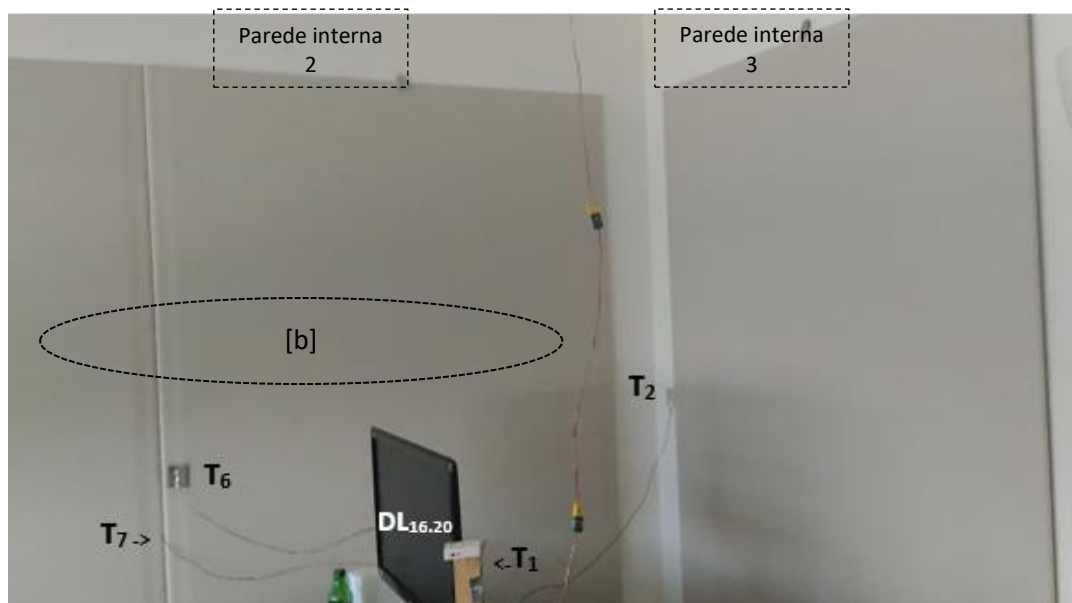


Figura 41- Localização dos termopares T7, T6, T2 e T1 no 1º ensaio, no gab16.20

Apesar da parede interna 2 apresentar uma maior inercia térmica em comparação com a parede interna 3, esta última apresenta ao longo do ensaio picos menos acentuados. Isto pode ser justificado pela vizinhança de cada uma das paredes. A parede 3 está em contacto com um corredor na qual a temperatura não varia acentuadamente. Por sua vez a parede 2 está em contacto com um gabinete ocupado na qual a abertura das janelas por parte do ocupante é um hábito constante. Este comportamento promove uma maior taxa de renovação de ar na divisão vizinha, justificando o arrefecimento mais acentuado verificado pela parede 2 durante o ensaio. Os valores de temperatura da parede 3 são resultado da radiação solar difusa proveniente dos envidraçados.

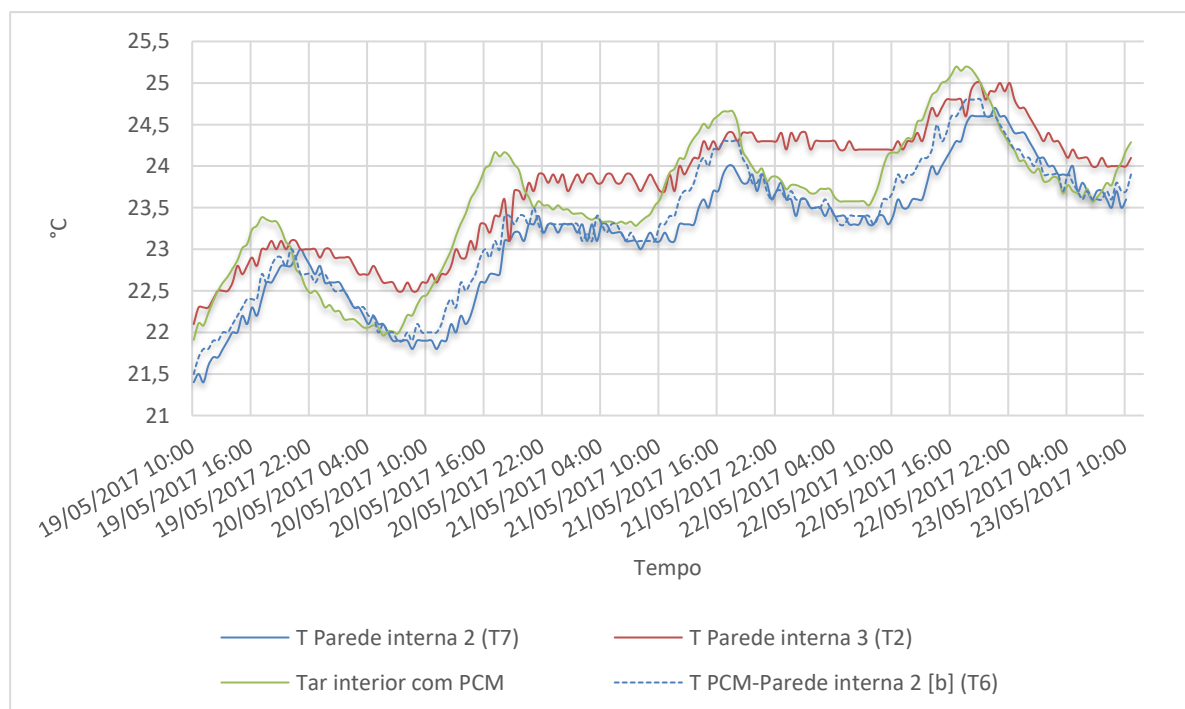


Figura 42- Evolução da temperatura das paredes internas 2 e 3, PCM [b] e temperatura do ar interior durante o 1º ensaio, no gabinete com PCM (gab16.20)

Analisando a evolução da temperatura da parede interna 2 e do conjunto de placas [b] nela incorporado é visível que ambas apresentam o mesmo comportamento, mas que existe um desfasamento no tempo. A temperatura das placas varia mais rapidamente que a temperatura da parede, atingindo temperaturas mais elevadas com uma desfasagem que vai aumentando ao longo do ensaio. Este fenómeno é justificado pela diferença entre as massas e ainda pela inércia térmica de cada uma. A parede acumula apenas calor sensível, mas a placa de PCM acumula calor sensível e latente. A inércia térmica da parede é contante contrapondo-se à das placas que tendo em conta a gama de temperaturas ($21 < T < 25^{\circ}\text{C}$) diminui ao longo do ensaio. Esta diminuição da inércia faz com que a quantidade de energia necessária para aumentar um grau celsius diminua e consequentemente as placas atinjam temperaturas superiores mais rapidamente.

Temperatura das Placas e Energia Armazenada

Os dados relativos à temperatura registada pelo conjunto de placas [a] e [b] foram obtidos diretamente pelos termopares T_8 e T_6 , no entanto a placa [c] não foi monitorizada, existindo unicamente dados relativos à temperatura da parede na qual esta está incorporada. Face à impossibilidade de obter estes dados foi considerado que a diferença de temperaturas entre a parede e a placa de PCM seria da mesma ordem de grandeza que a verificada entre a parede interior 2 e o conjunto de placas [b]. Durante o ensaio foi monitorizada somente a placa incorporada na parede exterior inferior. Por defeito será considerado que a placa localizada na parede exterior superior apresentou a mesma temperatura que a inferior

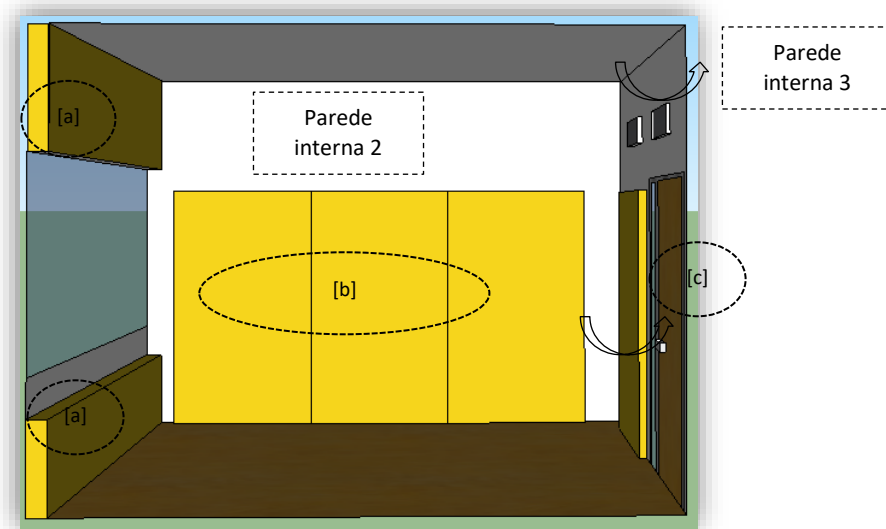


Figura 43- Localização dos conjuntos de placas [a] e [b] e da placa [c]

Como era de esperar a maior flutuação de temperatura ocorreu para as placas de PCM incorporadas nas paredes exteriores [a] (figura 44). Apesar de serem bem isoladas, as paredes exteriores apresentam menor inércia térmica que as paredes interiores e estão diretamente expostas ao decréscimo acentuado de T_{ext} durante a noite bem como à radiação solar.

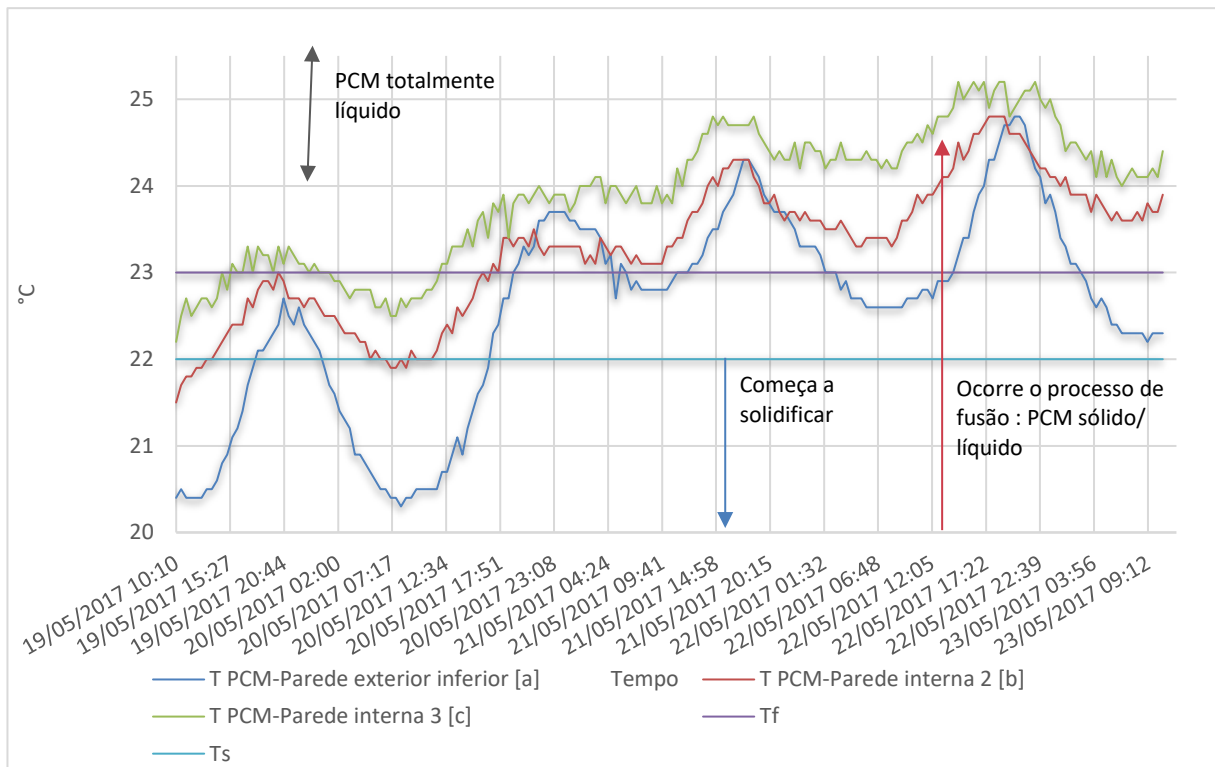


Figura 44- Evolução da temperatura das placas com PCM durante o 1º ensaio

Em concordância com o registado por parte das paredes 2 e 3, a placa [c] apresentou valores de temperaturas superiores aos registados pelo conjunto de placas [b]. Esta diferença pode ser mais uma vez justificada pela quantidade de radiação solar difusa que cada uma recebe. Como seria de esperar, o facto das placas de PCM estarem a atuar como camada final das paredes onde estão incorporadas faz com que a sua temperatura seja imposta pelas mesmas.

No dia 19, após ser desligado o sistema de ventilação, as placas demonstraram na sua totalidade uma subida acentuada da temperatura. Este aumento foi mais evidente por parte das placas [a], visto serem estas as mais afetadas por parte da radiação solar e devido ao arrefecimento noturno acentuado por parte da parede exterior, por condução e convecção. Na madrugada de dia 20, resultado do decréscimo acentuado por parte da T_{ext} , as placas [a] conseguiram regenerar apresentando temperaturas inferior à temperatura de fusão. O conjunto de placas [b] e a placa [c], também conseguiram libertar energia para o ambiente interior que se refletiu num aumento da temperatura interior do gabinete. Esta libertação de energia coincide temporalmente com o pico I demonstrado anteriormente na figura 39 onde existe uma diferença média de aproximadamente $0,07^{\circ}\text{C}$ entre o gabinete com e sem PCM. De facto, foi neste dia que ocorreu a maior libertação de energia por parte das placas como é visível na figura 45. Após este período de descarga seguiu-se um período de acumulação onde todas as placas atingiram temperaturas superiores à temperatura de fusão, acumulando na totalidade 845 KJ (figura 45). Este período coincide temporalmente com o pico II, onde a temperatura no gabinete sem PCM foi superior à registada pelo gabinete com PCM (figura 39). O dia 20 traduziu-se por ser o dia em que a taxa de libertação e acumulação de calor foi maior por parte das placas com PCM. Nos dias que o procederam, as temperaturas das placas situaram-se na sua maioria em valores superiores aos da temperatura da

fusão, diminuindo assim a capacidade de libertar a energia acumulada e consequentemente acumular menos energia.

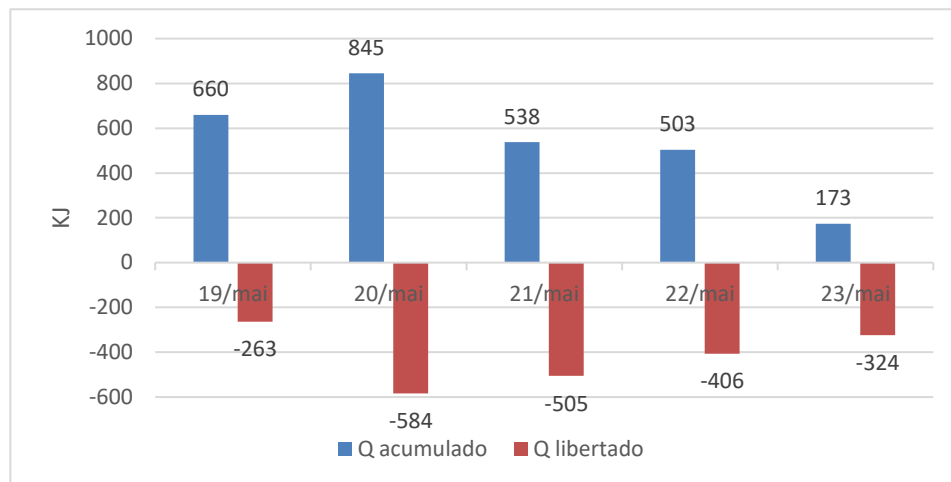


Figura 45- Quantidade de energia acumulada e libertada durante o 1º ensaio

Analisando a figura 45, verifica-se que o calor acumulado foi sempre superior ao libertado, à exceção do dia 23. Se o ensaio tivesse terminado no final do dia 23 o calor acumulado seria mais uma vez superior ao libertado, no entanto como o ensaio terminou às 11h00 da manhã, apenas foi monitorizado o período de regeneração. Tal como descrito no capítulo 4.1 o calor acumulado e libertado foi calculado a partir da equação 13, tendo por base as temperaturas medidas pelos termopares.

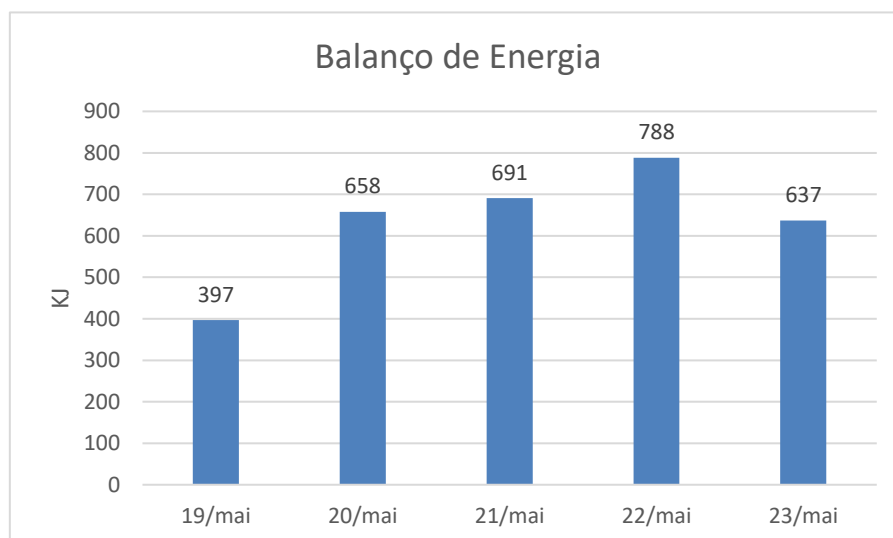


Figura 46- Balanço de energia global durante o 1º ensaio

Contabilizando a energia remanescente do dia anterior e a energia acumulada e libertada nesse dia resulta a energia existente nas placas no final de cada dia. É visível em termos de balanço de energia, que o calor acumulado vai aumentando no decorrer do ensaio, com a exceção do último dia. Se o ensaio tivesse terminado no final do dia 23, a quantidade de energia seria certamente superior a 788 kJ.

Esperar-se-ia em termos de balanço de energia que os valores de energia acumulada fossem aproximadamente constantes ao longo do ensaio. Este seria um resultado ótimo, porque traduziria que as placas tinham conseguido regenerar por completo estando totalmente disponíveis para iniciar um novo ciclo térmico.

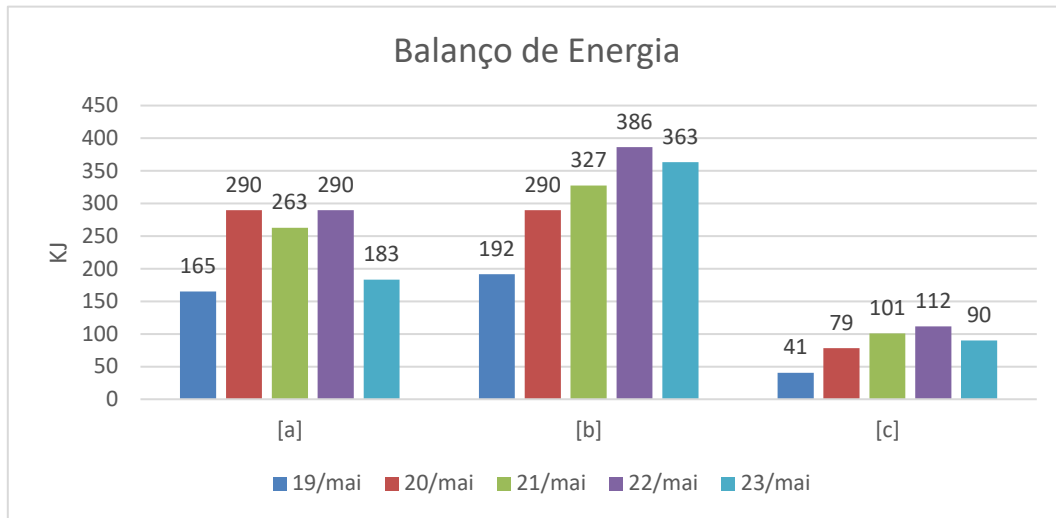


Figura 47- Balanço de energia por conjunto de placas durante o 1º ensaio

Analisando individualmente o balanço de energia de cada conjunto de placas (figura 47), verifica-se mais uma vez que as placas [a] apresentam o melhor desempenho térmico. Olhando para os dias 20, 21 e 22 é notório que a quantidade de energia acumulada pelo conjunto [b] e pela placa [c] vai aumentando, ou seja, a sua capacidade de regeneração vai diminuindo. Por sua vez as placas [a] apresentam valores quase constantes ao longo destes 3 dias, porque a sua localização permitiu que arrefecessem e conseqüentemente libertassem o calor acumulado. Com estes resultados conclui-se que dos 3 conjuntos, apenas o [a] teve a capacidade completar ciclos térmicos (ciclo de carga e descarga de energia).

Globalmente estes resultados demonstram que a incapacidade de libertar o calor armazenado vai aumentando ao longo do ensaio. Este resultado é reflexo das características da divisão onde o ensaio foi desenvolvido. A baixa taxa de renovação de ar (0,172 renovações de ar por hora) aliada à elevada inercia térmica da divisão contribuem para que seja difícil remover o calor das soluções construtivas e que conseqüentemente a temperatura das placas e do ar se mantenham em gamas de temperatura cada vez mais elevadas.

A figura 48 representa em termos de balanço de energia o contributo em percentagem do calor latente e sensível ao longo dos dias na qual o ensaio ocorreu. Verifica-se que a acumulação de calor foi feita na sua maioria com recurso a calor sensível, visto a percentagem do mesmo ser sempre superior a 55%. O calor latente teve um contributo de 45% no primeiro dia, mas foi diminuindo com o decorrer do ensaio. Esta diminuição na capacidade de armazenar energia na forma latente, está diretamente relacionada com as gamas de temperaturas das placas registadas durante os dias de teste. Como descrito anteriormente, a capacidade máxima de acumular calor por parte do PCM microencapsulado, é máxima aos 23°C mas diminui drasticamente entre este valor e os 24°C. Retomando, à figura 39,

onde estão presentes as evoluções das temperaturas das placas, verifica-se que a partir do final do dia 20 a temperatura das placas evolui gradualmente para valores superiores a 23 °C, justificando assim a diminuição na capacidade de armazenamento na forma latente.

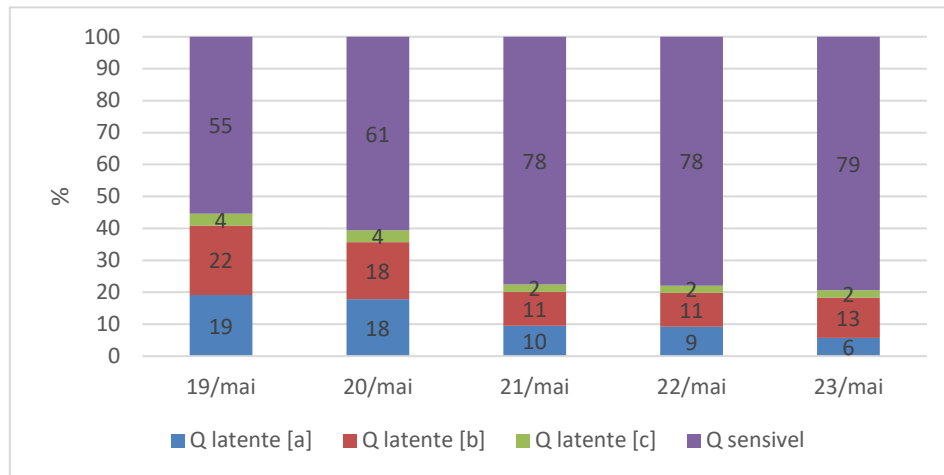


Figura 48- Contribuição do calor sensível e latente no balanço de energia (1º ensaio)

Analisando a contribuição individual de cada conjunto é evidente que a placa [c] teve uma menor contribuição comparativamente a [a] e [b], justificada pela diferença de áreas e gamas de temperatura.

No entanto importa frisar que o desempenho térmico do conjunto de placas [a] é da mesma ordem de grandeza do verificado pelo conjunto de placas [b] apesar deste apresentar aproximadamente o dobro da sua área e da sua massa. Isto significa que apesar de apresentar uma área menor, o conjunto de placas [a] favorece de uma melhor localização que lhe permite regenerar, sendo este o fenómeno mais importante para que um ótimo desempenho térmico seja atingido.

Segundo o fabricante cada placas apresenta uma capacidade de calor latente igual a 200 kJ/m². Tendo em conta o número de placas e respetiva área, a capacidade de calor latente total do conjunto é de 2820 kJ. A placa [c] apresenta uma capacidade de 500 kJ e as placas [a] e [b] uma capacidade de 820 kJ e 1500 kJ, respetivamente.

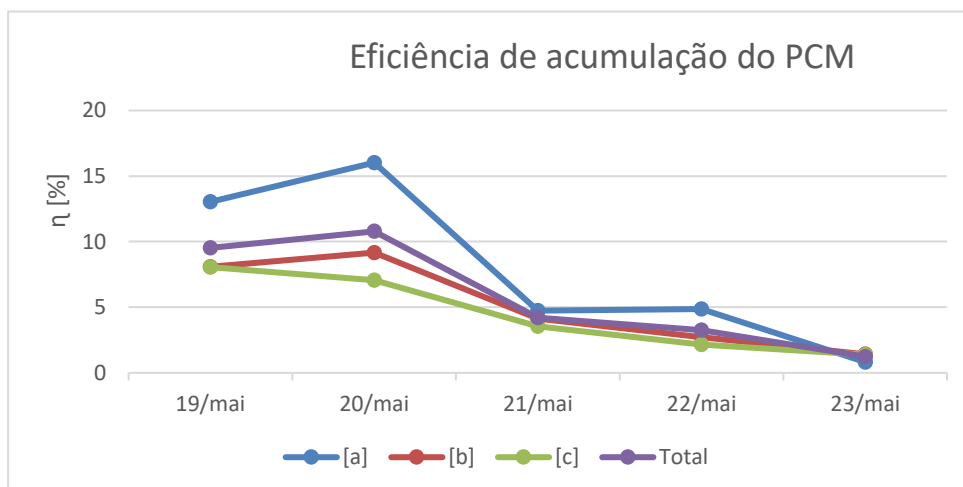


Figura 49 – Eficiência da acumulação do PCM nas placas [a], [b] e [c], no 1º ensaio

Tendo por base a capacidade de acumulação de calor latente de cada conjunto e o calor efetivamente acumulado na forma latente foi possível calcular a eficiência de acumulação do PCM em cada uma das placas e globalmente (figura 49). Como descrito no capítulo 4.1 este parâmetro foi calculado a partir da equação 14.

A máxima eficiência foi atingida pelas placas [a] no segundo dia do ensaio, onde apresentaram um valor de 16%. A eficiência diminuiu ao longo do ensaio, resultado das temperaturas superiores à T_f atingidas pelas placas, que impossibilitam o arrefecimento do PCM. No último dia do ensaio as placas atingiram eficiências na ordem dos 1%. Estes valores de eficiência comprovam que esta configuração não tira vantagem da capacidade de armazenar calor latente.

Conclusões

Com este primeiro ensaio pode ser concluído que esta configuração de placas seria uma boa alternativa se a divisão fosse arrefecida durante a noite de forma a regenerar o PCM microencapsulado nas placas, completando assim os ciclos térmicos. Esta necessidade de arrefecimento é comprovada especialmente para as placas incorporadas nas paredes interiores. Analisando os valores de temperatura destas conclui-se que a sua temperatura é imposta pelas paredes onde estão incorporadas e que o facto de apenas estar disponível uma face como superfície de contacto entre as placas e o ar, limita as trocas de calor entre os mesmos. Verifica-se que as placas colocadas na parede exterior obtêm um melhor desempenho térmico porque o contacto direto com o meio exterior permite que arrefeçam durante o período noturno (PCM solidifica) e aqueçam (PCM funde) durante o dia devido á exposição de radiação solar, conseguindo assim completar ciclos térmicos.

A necessidade de arrefecimento advém do facto deste estudo ser realizado numa divisão com inercia térmica elevada e com uma taxa de renovação de ar baixa. O desempenho das placas incorporadas nas paredes interiores seriam certamente melhores se estivessemos perante um edifício com uma construção leve, ou seja, com baixa inércia térmica.

Esta configuração permitiu remover do gabinete um máximo de 788 kJ de calor, dos quais 22% em forma de calor latente e 78% na forma de calor sensível. A eficiência do PCM foi baixa, em termos globais atingiu um máximo de 11%. Individualmente as placas [a] obtiveram a melhor eficiência atingindo um valor de 16% no segundo dia do ensaio. Este resultado é reflexo da localização das mesmas. A percentagem reduzida de acumulação de calor na forma latente é reflexo da baixa condutividade térmica das placas, localização e ausência de ventilação noturna.

5.2 2º ensaio

O 2º ensaio teve como objetivo testar o 2º cenário na qual 4 das 6 placas de PCM foram suspensas no teto, tal como descrito no capítulo 4.3.4 (figura 50). Pretende-se demonstrar com este ensaio que esta configuração promove a recirculação de ar e as trocas de calor entre placas e o ar ambiente, resultando numa melhor performance por parte das mesmas que se irá refletir numa atenuação mais acentuada por parte dos picos de temperatura do ar interior.

Este ensaio ocorreu no mês de julho e teve a duração de aproximadamente 4 dias. Teve início no dia 3 às 14h30 e terminou no dia 7 às 12h30.

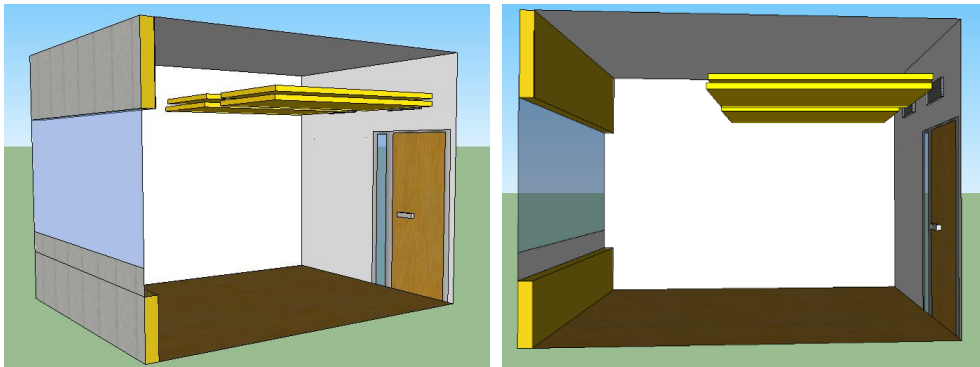


Figura 50- Configuração das placas com PCM (a amarelo) no 2º ensaio, gab16.20

Temperatura e Radiação Exterior

Na figura 51 podemos consultar a evolução da temperatura exterior e da radiação solar durante os 5 dias do ensaio.

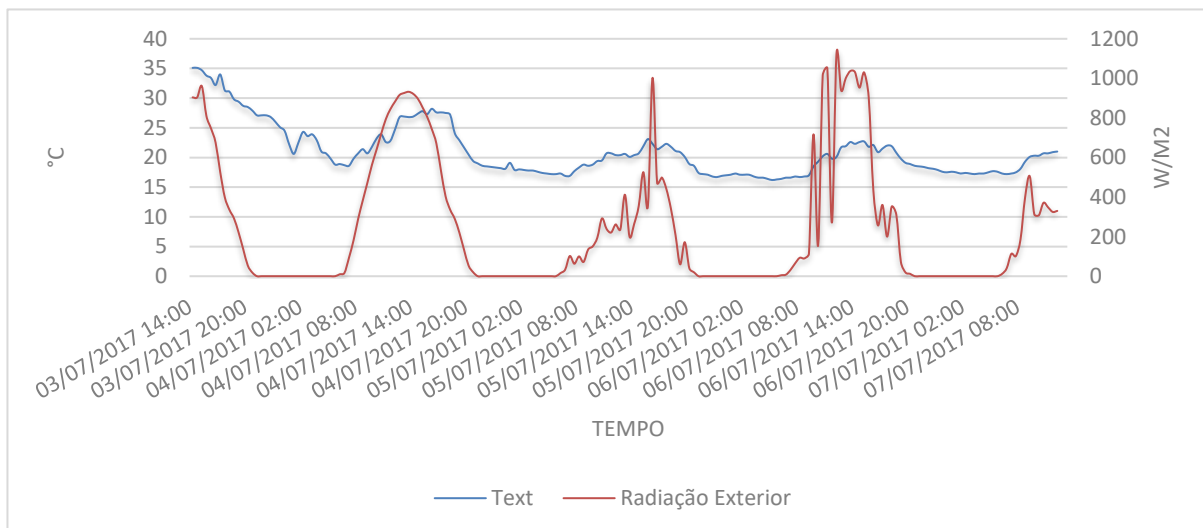


Figura 51- Evolução da temperatura e radiação exterior durante o 2º ensaio

Como é possível visualizar a temperatura exterior apresentou valores mais elevados no dia 3 e 4 de julho, começando a diminuir a partir do dia 5. Este decréscimo foi acentuado visto existir uma diferença de 14 °C entre as temperaturas máximas registadas no primeiro e no último dia do ensaio. No dia 4 a

radiação solar apresentou um comportamento típico de dia limpo ao contrário dos dias posteriores que, como é possível concluir pelo comportamento da radiação, se caracterizaram por serem nublados com algumas aberturas.

A temperatura máxima, mínima e média dos dias na qual decorreu o ensaio podem ser consultadas na tabela 5.

Tabela 4- Valores de temperatura externa 1º ensaio

Dia	Tmax [°C]	Tmin [°C]	Tmédia [°C]
03/jul	35,1	25,1	30,2
04/jul	28,2	18,2	22,7
05/jul	23,1	16,7	19,1
06/jul	22,7	16,2	18,9
07/jul	21	17,2	18,4

Temperatura do ar interior

Os resultados presentes na figura 52 foram obtidos a partir das medições efetuadas pelos data loggers DL_{16.20} e DL_{16.22}. A temperatura do ar no gabinete com PCM foi sempre menor que a verificada no gabinete sem PCM, à exceção do pico I onde a temperatura no gabinete sem PCM foi ligeiramente inferior.

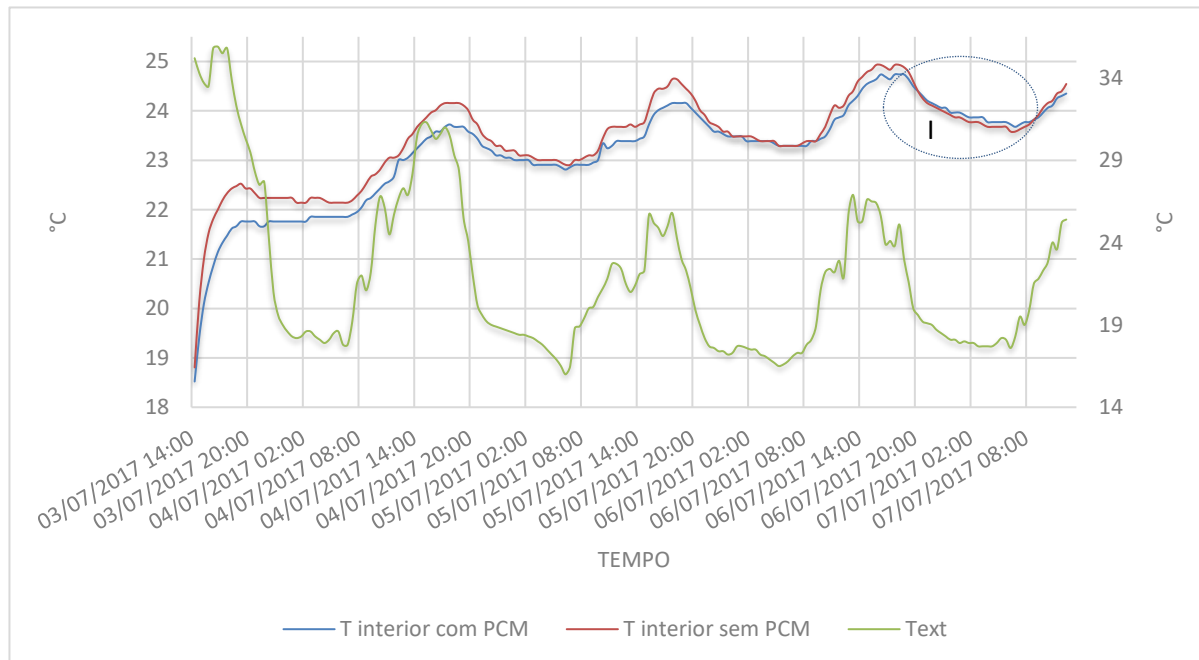


Figura 52- Evolução das temperaturas interiores dos gab16.20 (com PCM) e gab16.22 (sem PCM) e da temperatura exterior durante o 2º ensaio

No dia 3, após ser desligado o sistema de climatização, a temperatura interior teve uma subida acentuada em ambos os gabinetes. No entanto, é notório que devido à presença das placas de PCM, a temperatura no gabinete 16.20 teve um crescimento menos acentuado. O PCM microencapsulado,

em resposta ao aumento da temperatura começou a fundir e a armazenar o calor na forma de calor latente, removendo-o do ar ambiente. A temperatura no gabinete com PCM aumentou de 18,5°C para 21,8°C. No caso de não estar equipado com as placas de PCM subiria para 22,5 °C como o verificado no gabinete sem PCM.

A atenuação da temperatura foi mais evidente nos dias 3, 4 e 5 de julho, onde ocorreu uma atenuação média de 0,7°C, 0,4°C e 0,2°C, respetivamente. Em concordância com o registado no primeiro ensaio é notório que a atenuação da temperatura é mais evidente nos primeiros dias onde as temperaturas se situam abaixo dos 24°C. Olhando para os valores médios e máximos de atenuação de temperatura conclui-se que esta configuração é mais eficaz no que toca à diminuição da flutuação de temperatura do ar. O máximo de atenuação neste ensaio é de aproximadamente 1°C, um valor 5 vezes superior ao máximo registado no 1º ensaio (0,2°C).

Estratificação da Temperatura

Face ao número limitado de termopares, não foi possível monitorizar neste ensaio a temperatura do ar a 2,55m de altura. Desta forma apenas estão disponíveis as medições a 0,01 e 1,12m de altura, registadas respetivamente pelo termopar T₁ e pelo datalogger DL_{16.20} (figura 53).

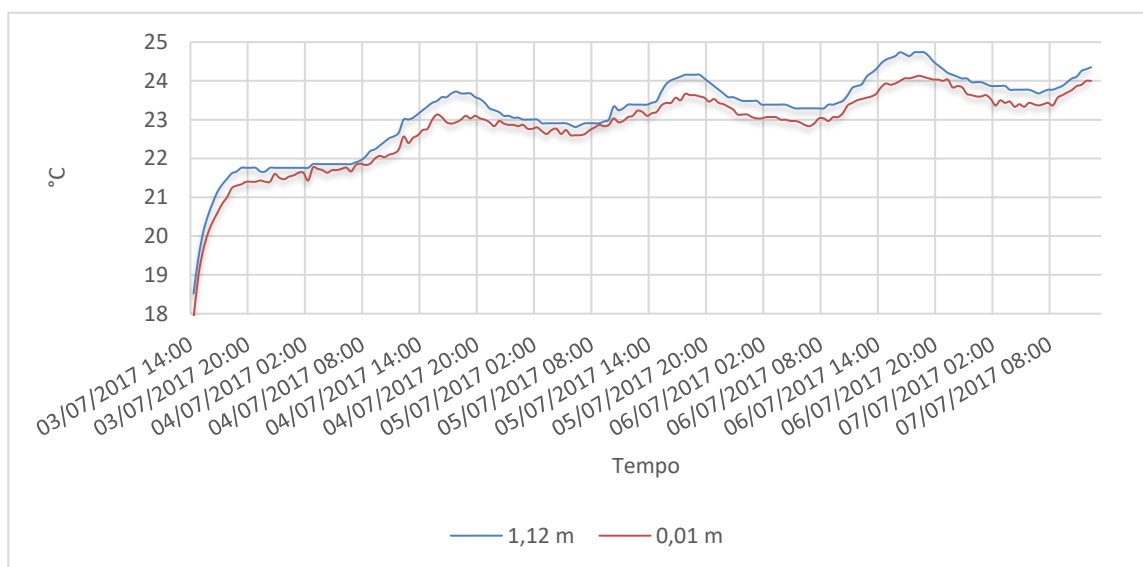


Figura 53- Evolução da temperatura interior a 0,01m, 1,12m durante o 2º ensaio, no gab16.20

A diferença média entre as temperaturas a 1,12 e 0,01m foi mais baixa que a registada no 1º ensaio. Este valor desceu de 0,5 °C para 0,36°C. Fica assim comprovado que esta configuração promove a recirculação do ar que se reproduz numa menor estratificação. Em concordância com o comprovado o 1º ensaio a estratificação existente promove um grau elevado de conforto térmico.

Temperatura das paredes

A partir do termopar T₅ e T₇, foi possível monitorizar as paredes internas 3 e 2, respetivamente (figura 54). A diferença de temperatura entre as paredes foi menor neste ensaio bem como a amplitude de temperatura registada pelas mesmas.

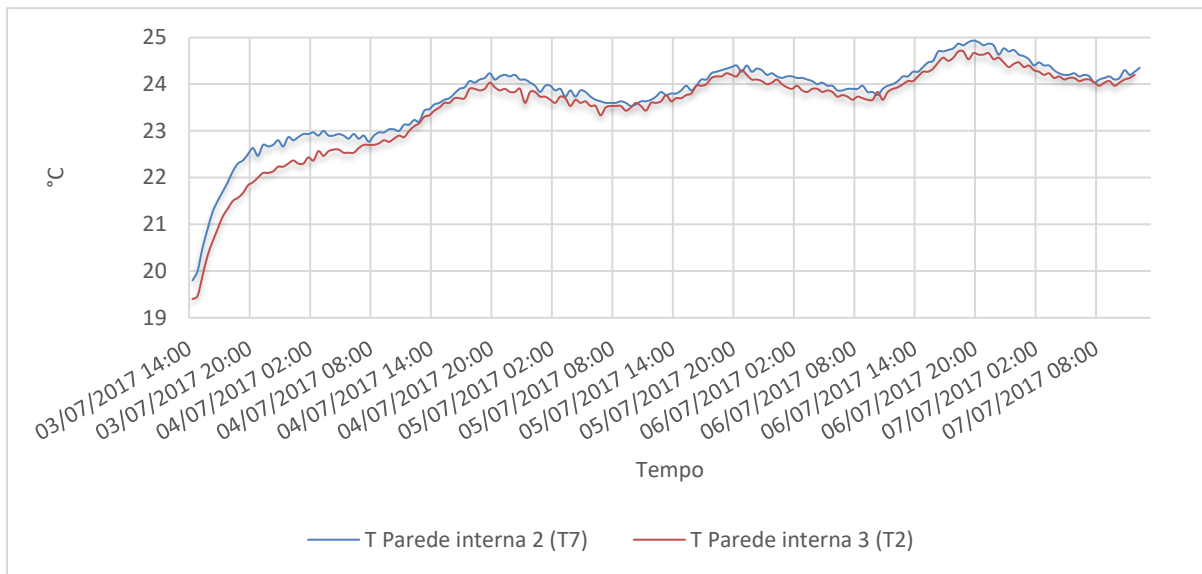


Figura 54- Evolução a temperatura das paredes internas 2 e 3, no gab16.20

Temperatura das Placas e Energia Armazenada

Em concordância com o descrito no capítulo 4.3.4, os conjuntos de placas PSb, PSa e [a], foram monitorizados respetivamente pelos termopares T_8 , T_4 e T_3 . Tal como no 1º ensaio apenas foi monitorizada a placa de PCM localizada na parede exterior inferior. Por defeito será mais uma vez considerado que a placa incorporada na parede exterior superior apresentou os mesmos valores de temperatura registados pela placa monitorizada. Face à impossibilidade de monitorizar as quatro placas que constituem os conjuntos de placas PSa e PSb, devido ao número limitado de termopares, apenas foram monitorizadas as placas inferiores de cada um dos conjuntos. Será considerado que as placas superiores apresentaram os mesmos valores de temperatura que os registados pelas placas inferiores.

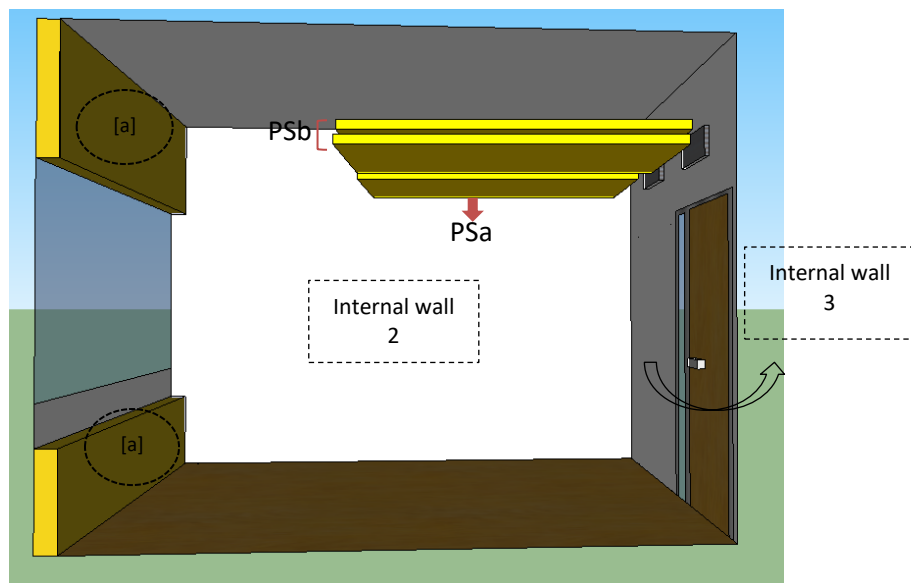


Figura 55- Localização dos conjuntos de placas [a], PSa e PSb.

Como é possível visualizar na figura 57, o conjunto de placas o PSa apresentou ao longo do ensaio temperaturas superiores às registadas por parte do conjunto PSb. Esta diferença de comportamento poderá relacionada com a exposição solar que cada conjunto de placas recebe e ainda com o tipo de mobiliário que se encontra por baixo das mesmas. Tendo em conta a orientação do gabinete, verifica-se que o conjunto de placas PSa, recebe mais radiação solar. Isto pode ser comprovado pela figura 56 que demonstra a iluminância em diferentes coordenadas do gabinete 16.20. É notório que a iluminância diminui ao longo do eixo dos y, ou seja, é máxima perto da parede interior 2 e mínima à medida que nos vamos aproximando da parede interior 1. Este estudo foi realizado no dia 2 de outubro, aproximadamente à 13h30, hora na qual se dá o máximo de perpendicularidade com a tangente do sol. Este ensaio foi realizado no âmbito da tese de mestrado da colega Susana Figueiredo.

Outro fator é relativo a um móvel preto, situado por baixo do conjunto PSb, que absorve a radiação solar, impedido que seja refletida para as placas.

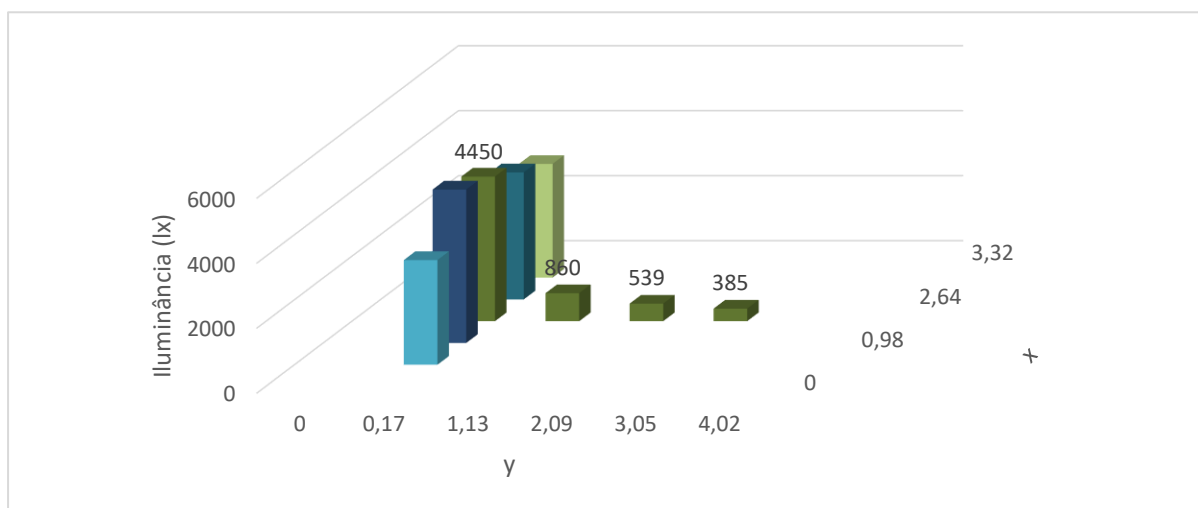


Figura 56- Distribuição da iluminância no gab16.20

Relativamente às placas situadas nas paredes exteriores [a] verifica-se uma flutuação de temperatura mais acentuada comparativamente ao verificado nos conjuntos PSa e PSb. Apesar da sua temperatura não descer abaixo da temperatura de fusão, estas conseguem regenerar libertando o calor acumulado. A flutuação térmica das placas suspensas é mínima no decorrer do ensaio e ambas atingem rapidamente temperaturas superiores à temperatura de fusão. Este comportamento pode ser justificado por 3 fatores:

- Proximidade das placas entre si (10 cm);
- Proximidade dos conjuntos de placas ao teto (solução construtiva com elevada inércia térmica);
- Estratificação da temperatura do ar (as placas estão localizadas numa “zona de saturação” de ar quente);

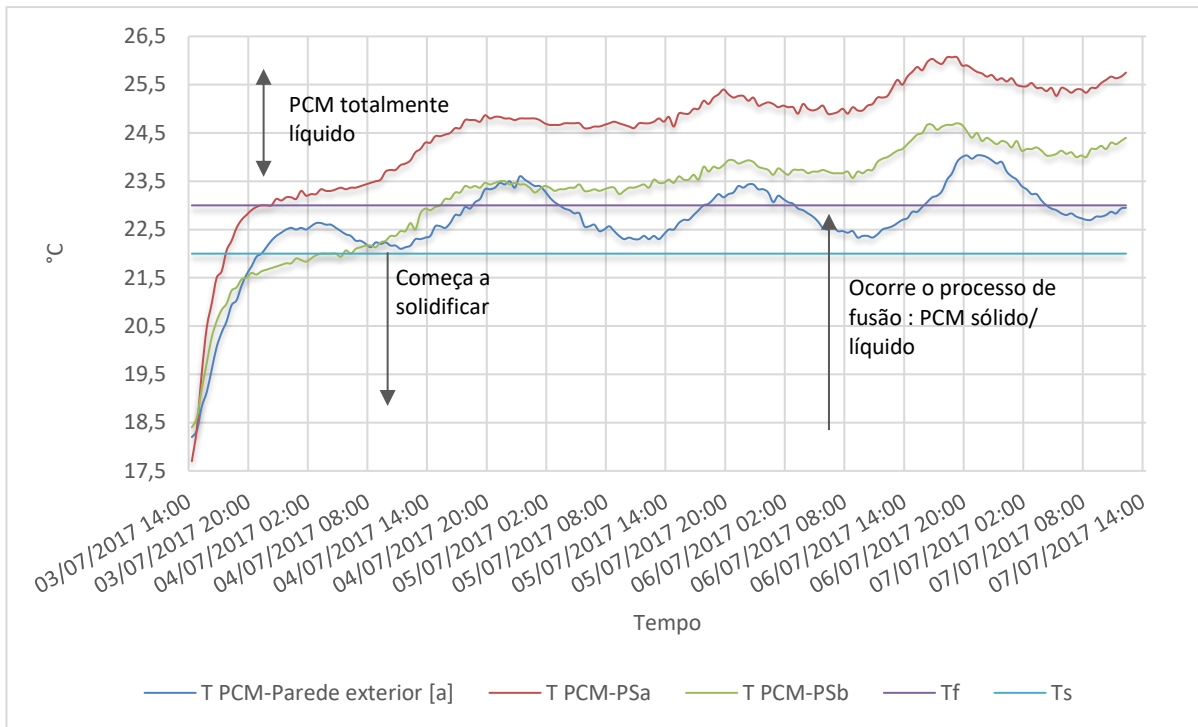


Figura 57- Evolução da temperatura das placas com PCM durante o 2º ensaio, no gab 16.20

Olhando para figura 58, onde é possível visualizar a energia acumulada e libertada nos diversos dias de ensaio é notório que no primeiro dia ocorre o máximo de armazenamento. No momento inicial, as placas estavam todas entre os 17°C-18°C e a temperatura exterior era de aproximadamente 35°C. Esta diferença de temperatura justifica a subida acentuada da temperatura por parte das placas que resultou numa grande acumulação de calor por parte das mesmas. À temperatura de 17°C ou 18°C o PCM microencapsulado encontra-se na sua maioria em estado sólido, totalmente disponível para fundir e acumular calor latente. No dia 4, segundo dia do ensaio, o total de calor acumulado diminuiu para menos de metade do valor registado no primeiro dia, resultado justificado pelo facto da libertação de calor ter sido quase nula durante o período noturno.

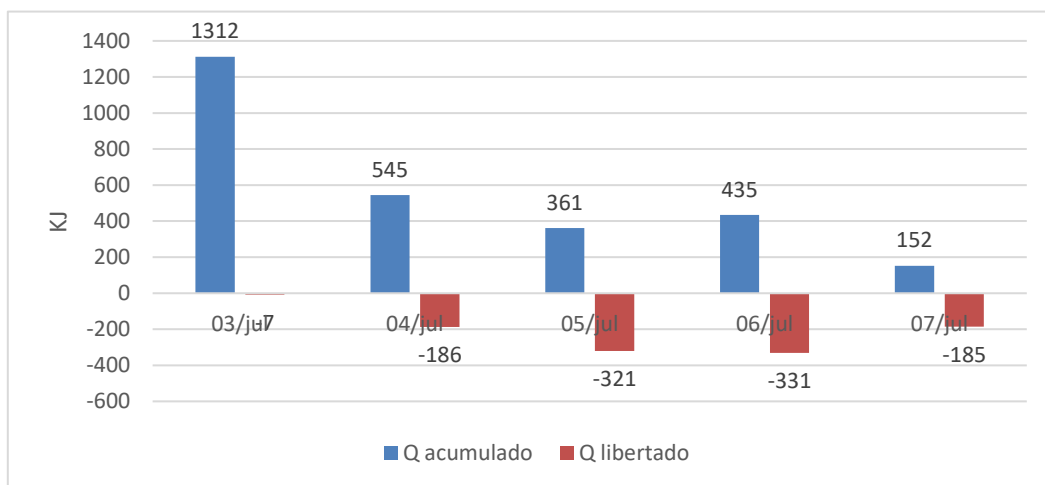


Figura 58 -Quantidade de energia acumulada e libertada durante o 1º ensaio, no gab16.20

Analisando o balanço de energia (figura 59) verifica-se que a energia acumulada no 1º dia é em média 3 vezes superior à acumulada no 1º ensaio. Isto ocorreu porque a energia libertada pelas placas no 1º ensaio foi 2 vezes superior à registada neste ensaio. Esta configuração promove a acumulação de energia devido à camada de ar quente que a envolve (resultado da estratificação da temperatura) mas impossibilita a libertação da mesma.

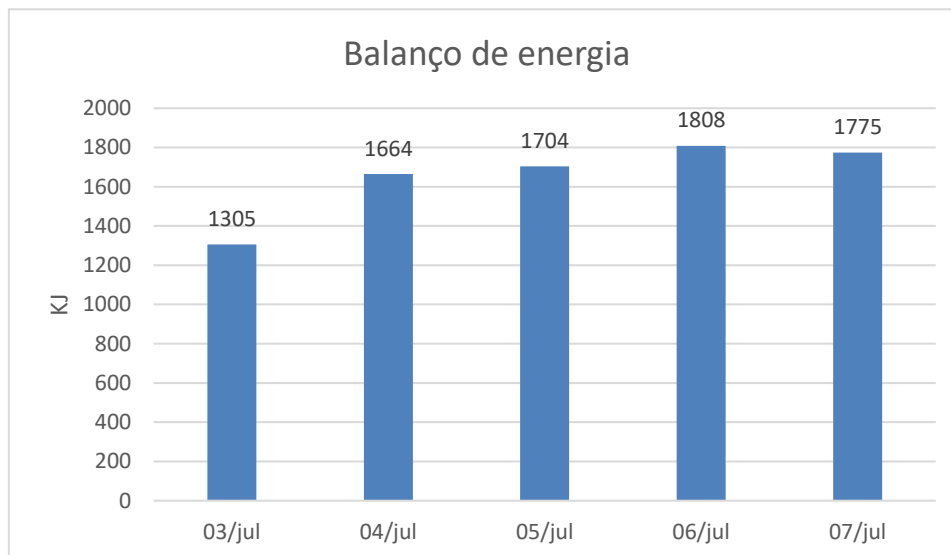


Figura 59- Balanço de energia global durante o 1º ensaio, no gab16.20

Como seria de esperar, tendo em consideração as gamas de temperatura e a flutuação da mesma, a placa [a] conseguiu efetuar ciclos de carga e descarga, contrariamente ao registado pelas placas suspensas (figura 60).

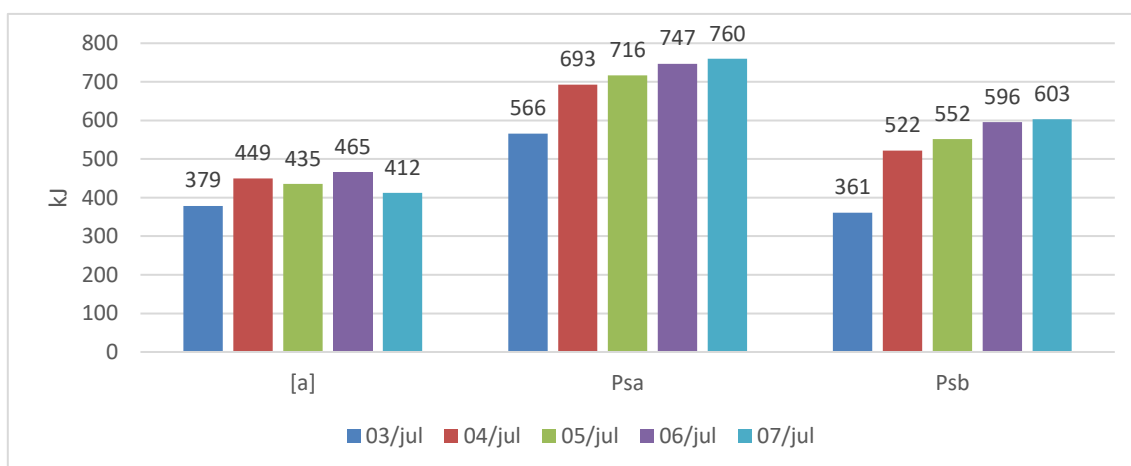


Figura 60- Balanço de energia por conjunto de placas durante o 2º ensaio, no gab 16.20

Analisando em termos de balanço de energia o contributo em percentagem do calor latente e sensível (figura 61), verifica-se que as proporções foram contantes ao longo do ensaio. O calor sensível representou cerca 63% e o calor latente teve uma representatividade de aproximadamente 37%.

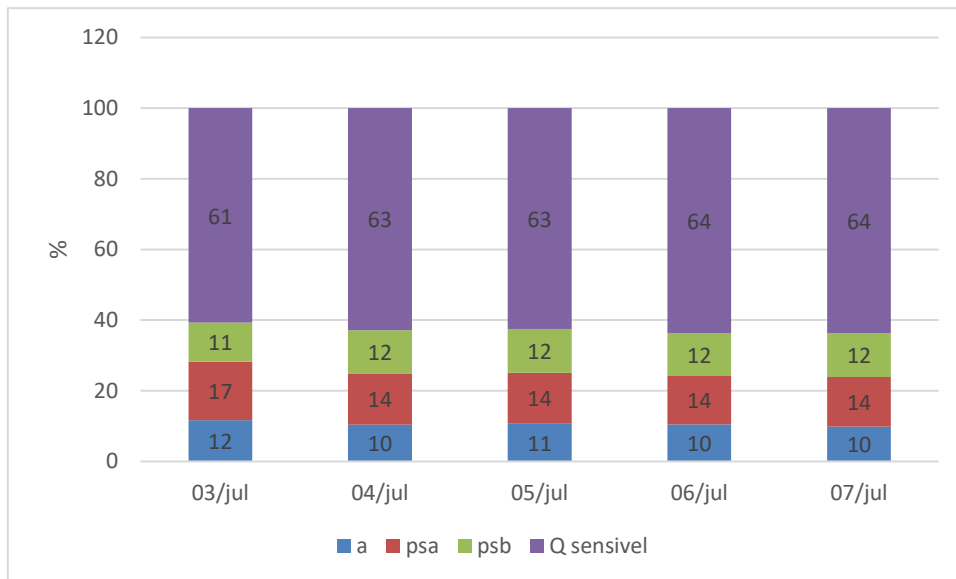


Figura 61- Contribuição do calor sensível e latente no balanço de energia (2º ensaio), no gab 16.20

A capacidade de acumulação de calor latente do conjunto de placas apresenta o mesmo valor que no 1º ensaio (2822 kJ), no entanto devido à configuração das placas a distribuição por conjunto de placas é diferente. Os conjuntos de placas suspensa PSa e PSb apresentam uma capacidade de 1000kJ e as placas [a] um total de 820kJ. A partir da comparação destes valores de capacidade máxima com os valores de calor latente efetivamente armazenado, foi possível calcular a eficiência da acumulação do PCM dos conjuntos de placas durante os dias de ensaio.

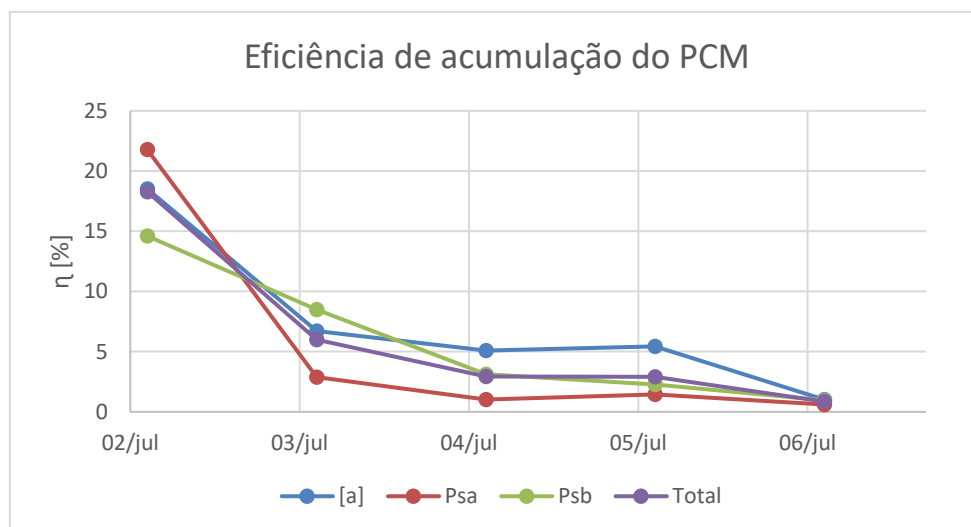


Figura 62- Eficiência da acumulação do PCM nas placas [a], [b] e [c], no 2º ensaio

Analisando a figura 62 concluímos que as placas atingiram a máxima eficiência no primeiro dia e que esta diminuiu de forma acentuada ao longo do ensaio, até atingir no último dia o valor de 1%. No 1º dia o conjunto de placas PSa conseguiu aproveitar 22 % da capacidade total disponível, seguido do conjunto [a] que atingiu um valor de 19%. A eficiência do conjunto [a] diminuiu ao longo do ensaio de forma mais gradual devido à sua localização que lhe permite, como dito anteriormente, libertar o calor acumulado regenerando assim o PCM microencapsulado. Contrariamente, as placas suspensas atingiram a saturação no primeiro dia e não regeneraram, provocando assim uma diminuição do

primeiro para o segundo dia de ensaio de 19 % e 6%, na eficiência dos conjuntos PSa e PSb, respetivamente.

Conclusões

As placas suspensas estão em constante contacto com a camada de ar quente que se forma devido à estratificação de temperatura existente nas divisões. A energia acumulada neste ensaio foi em média 3 vezes superior à acumulada no 1º ensaio, no entanto a energia libertada foi 2 vezes inferior. Assim, esta configuração promove a acumulação de energia nas placas, mas impede a libertação da mesma.

O máximo de atenuação neste ensaio foi de aproximadamente 1°C, um valor 5 vezes superior ao máximo registado no 1º ensaio (0,2°C) e a estratificação baixou 0,2°C em relação ao valor apresentado no 1º ensaio. A eficiência global dos conjuntos de placas atingiu o seu máximo neste ensaio, apresentando um valor de 18%. No entanto foi notório que a eficiência diminuiu mais rapidamente ao longo deste ensaio.

Com esta configuração, a incorporação de dispositivos de ventilação de baixo consumo permitiria acelerar as trocas de calor entre a superfície e o PCM ajudando-o a completar as suas cargas e descargas de calor e a aumentar a performance térmica do sistema.

Em conformidade com o concluído no 1º ensaio, verifica-se que a necessidade de arrefecimento advém do facto deste estudo ser realizado numa divisão com inércia térmica elevada e uma baixa taxa de renovação de ar. O desempenho das placas seria certamente melhores se estivéssemos perante um edifício com baixa inércia térmica.

5.3 Caracterização do segundo cenário com câmara termográfica

Com a configuração de placas suspensas e com o auxílio da câmara termográfica Milwaukee®, realizou-se no dia 17 de julho, entre as 11h50 e as 19h15, um ensaio onde se obteve fotografias termográfica do gabinete com PCM (gab16.20).

Com este ensaio pretendeu-se identificar e estudar o comportamento da temperatura nos diferentes pontos das placas e entre placas. Durante a análise do 2º ensaio foi considerado para efeitos de contabilização de energia acumulada e libertada que toda a área da placa estava à temperatura medida pelo termopar. Foi ainda considerado que as placas superiores dos conjuntos PSa e PSb estavam à mesma temperatura que as placas inferiores.

Relativamente às placas [a] (superior e inferior), foi considerado que a temperatura medida pelo termopar localizada na placa inferior correspondia à sentida pela placa superior. De modo a estudar a veracidade destas suposições, realizou-se este ensaio onde vai ser possível analisar com recursos a fotografias termográficas o comportamento das placas em diversas condições térmicas.

Idealmente este estudo deveria ter sido realizado nos mesmos dias da realização do ensaio. No entanto devido a questões logísticas tal ação não foi possível de acontecer. De forma a contornar esta questão foi simulado artificialmente um ciclo térmico com recurso ao sistema de ventilação do gabinete 16.20. De forma a registar as variações de temperatura em regime de acumulação e libertação de calor, o sistema de ventilação foi ligado às 10h00 e desligado às 16h00. Assim, o período de libertação de calor corresponde ao período entre as 11h50 e as 16h00 e o período de acumulação entre as 16h00 e as 19h15.

Temperatura interior e exterior

Durante o ensaio foi possível monitorizar a temperatura exterior com recurso à estação meteorológica e a temperatura interior através do datalogger DL_{16.20}. A monitorização do ensaio teve início às 11h50, no entanto o sistema de ventilação foi ligado às 10h00. Assim às 11h50, a divisão estava a receber à aproximadamente 2h00 um fluxo de ar frio constante com uma temperatura de 15°C e a temperatura do ar não desceu abaixo dos 23°C. Apesar de ser uma divisão bem isolada e como tal não variar muito com os estímulos externos, o facto de possuir envidraçados de tamanho significativo, faz com que seja influenciada fortemente pela radiação solar que entra pelos mesmos. No período de arrefecimento a T_{ext} foi aumentando gradualmente, bem como a radiação solar o que impossibilitou a temperatura interior de atingir valores inferiores a 22°C (figura 64).

Após as 16h00, altura em que o sistema de ventilação foi desligado, a temperatura interior subiu rapidamente, estabilizando por volta das 18h30 quando a temperatura exterior começou a descer e a radiação incidente foi sendo cada vez menor.

Este gráfico demonstra uma forte resistência ao arrefecimento por parte da divisão, no entanto este cenário não traduz um cenário otimizado. O período de arrefecimento, de forma ser eficiente teria de

acontecer durante o período noturno quando a temperatura exterior decresce e não existem ganhos solares. Deste modo, este ensaio não será utilizado para caracterizar a eficiência das placas em termos de libertação e acumulação de energia.

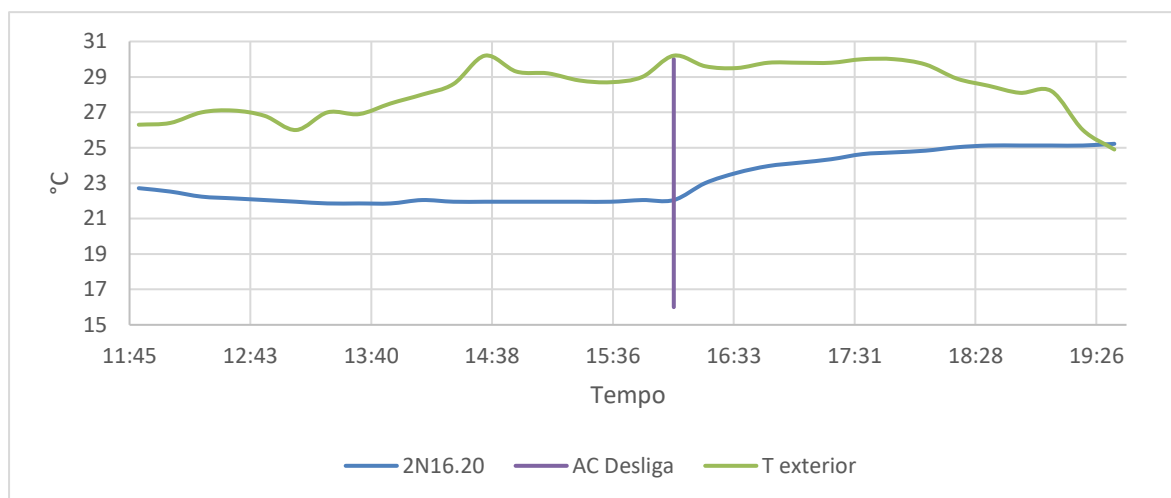


Figura 63- Evolução da temperatura interna e externa

Conjunto PSa

As placas do conjunto PSa estão localizadas na direção na conduta de insuflação. No entanto a conduta não está centralizada, provocando uma heterogeneidade das temperaturas nos diversos pontos das placas (figura 64).

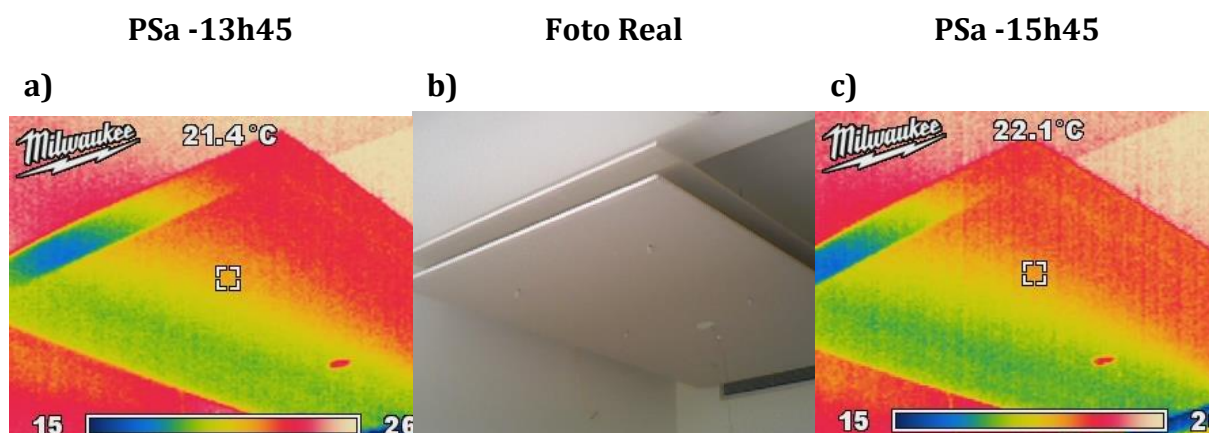


Figura 64- a) e c) Imagens termográficas do conjunto de placas PSa, às 13h45 e 15h45; b) Imagem real do conjunto PSa

Através das imagens termográficas é possível validar que a temperatura do fluxo de ar era de efetivamente 15°C e que a descentralização da conduta faz com que a parte esquerda da placa arrefeça com mais facilidade. Embora não seja muito notório verifica-se um arrefecimento geral nas placas durante as 2 horas que intervalam as duas fotografias.

A partir da figura 65, recolhida às 15h45 comprova-se que existe homogeneidade de temperatura entre a placa superior e inferior validando assim a suposição de que as placas se encontram ambas à temperatura medida pelo termopar.

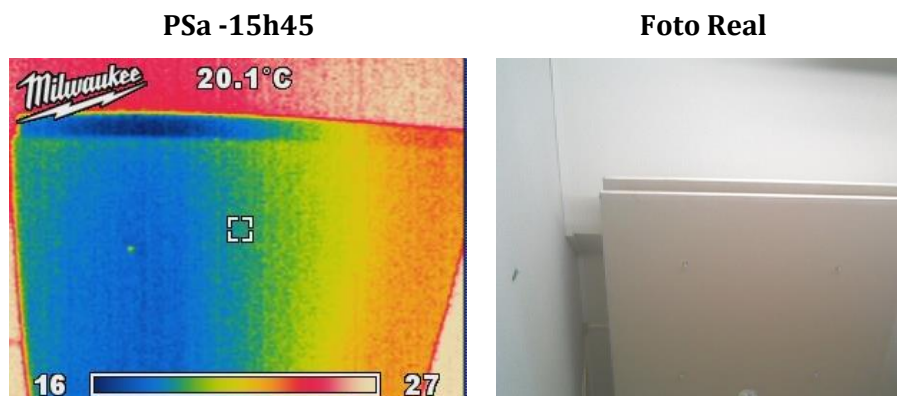


Figura 65- Vista inferior do conjunto de placas de placas PSa

Durante o período de aquecimento as placas apresentaram o mesmo comportamento (figura 67). Verifica-se que existe heterogeneidade nos vários pontos da placa e homogeneidade entre placas (figura 66). É notório que às 19h15, 3 horas após o sistema de ventilação ser desligado a o conjunto de placas tende para equilíbrio térmico com o ar envolvente.

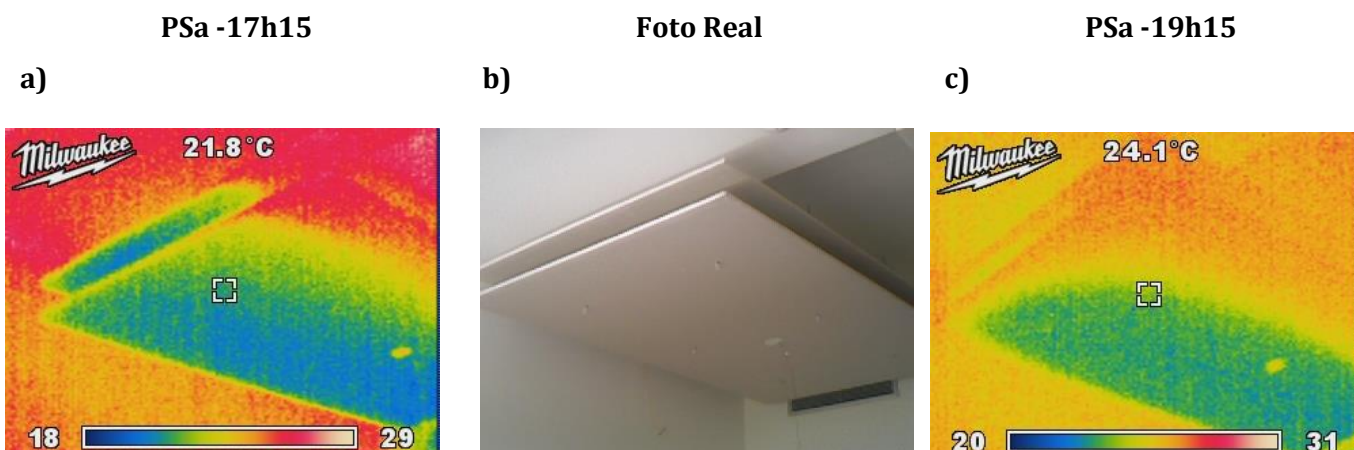


Figura 66- a) e c) Imagens termográficas do conjunto PSa, às 17h15 e 19h15; b) Imagem real do conjunto PSa

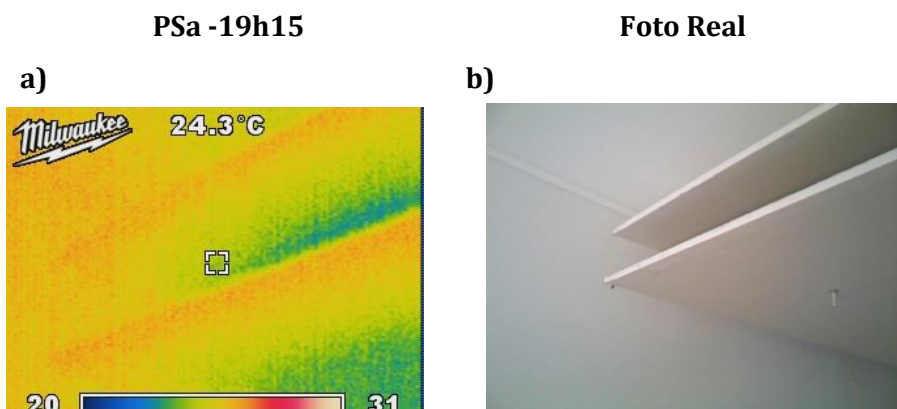


Figura 67- a) Imagem termográfica do conjunto PSa às 19h15; b) Imagem real do conjunto PSa

Conjunto PSb

O conjunto PSb apresentou um comportamento diferente face ao conjunto PSa. Como anteriormente descrito este conjunto está localizado na direção da conduta de retorno. Este facto faz com que a temperatura do fluxo seja superior a 15 °C e que as placas não tenham a mesma taxa de arrefecimento apresentada pelo conjunto PSa. Isto pode ser comprovado pelas fotografias da figura 68, onde se pode realizar que a heterogeneidade verificada no conjunto PSa não ocorre para o conjunto PSb. Neste caso, a temperatura é homogénea entre placas e em todos os pontos da placa.

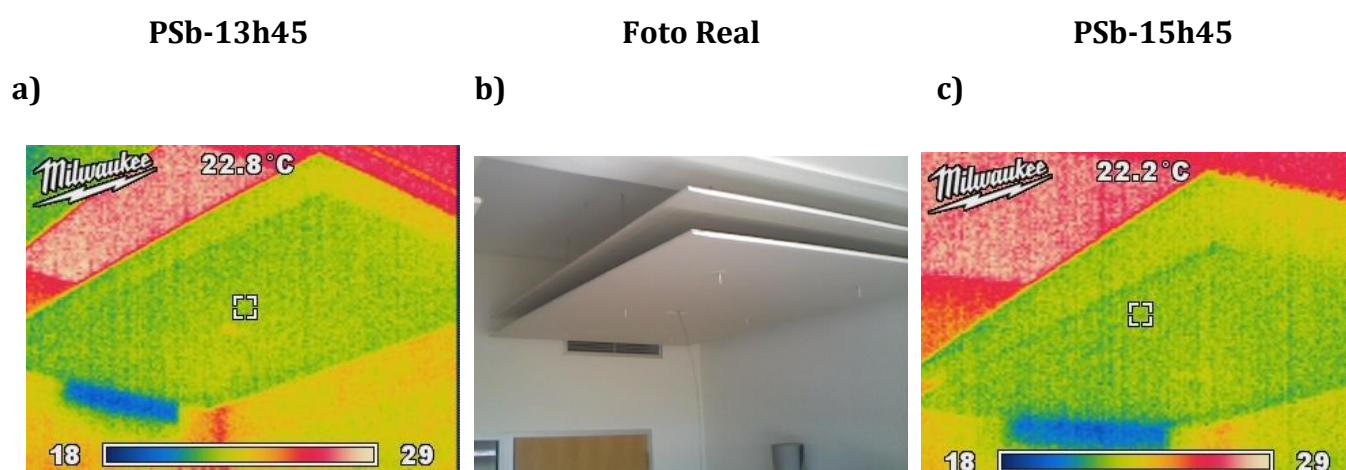


Figura 68- a) e c) Imagens termográficas do conjunto PSb, às 13h15 e 15h15; b) Imagem real do conjunto PSb

Verificou-se que uma hora após ter sido desligado o sistema de ventilação as placas se encontravam à mesma temperatura que o meio envolvente e que o teto apresentava uma temperatura superior. Às 19h15, as placas e todas as soluções construtivas estavam em equilíbrio térmico (figura 69)

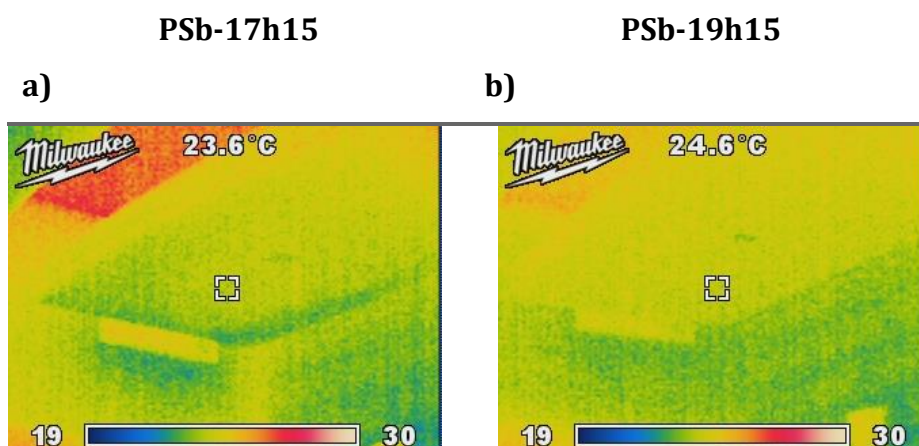


Figura 69- Imagens termográficas do conjunto PSb às 17h15 e 19h15

Concluimos que as placas do conjunto PSb apresentam o mesmo comportamento térmico tanto em regime de arrefecimento como de aquecimento e que a temperatura é constante em todos os pontos das placas. Comprova-se que o facto de se ter assumido que a temperatura da placa superior era igual

à medida pelo termopar localizado na placa inferior, não acresce erros aos resultados apresentado em termos de energia acumulada e libertada.

Conjunto de placas [a]

Realizando a mesma análise para a placa [a] superior e [a] inferior, verificamos que a placa inferior apresenta valores de temperatura mais homogêneos nos diversos pontos da placa, quando comparada com a superior (figura 71).

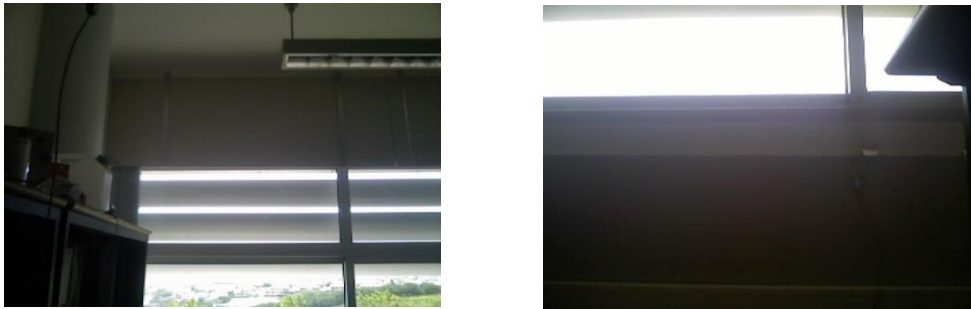
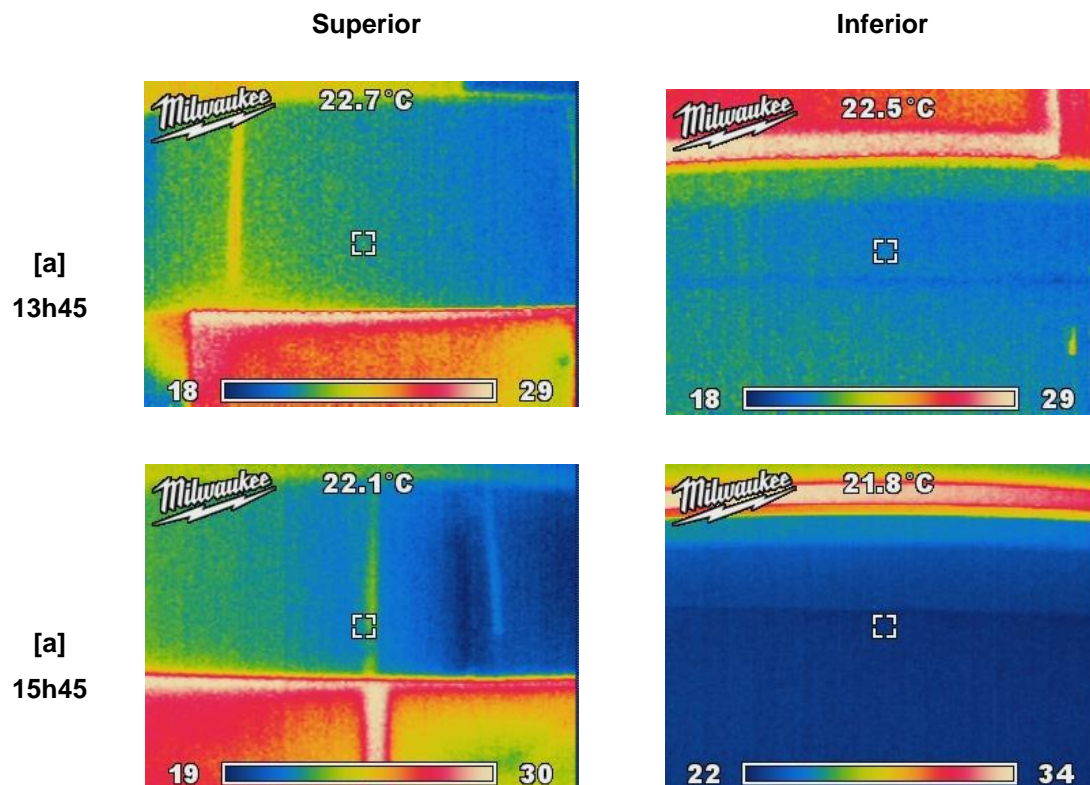


Figura 70- Imagens reais: a) [a] superior; b) [a] inferior



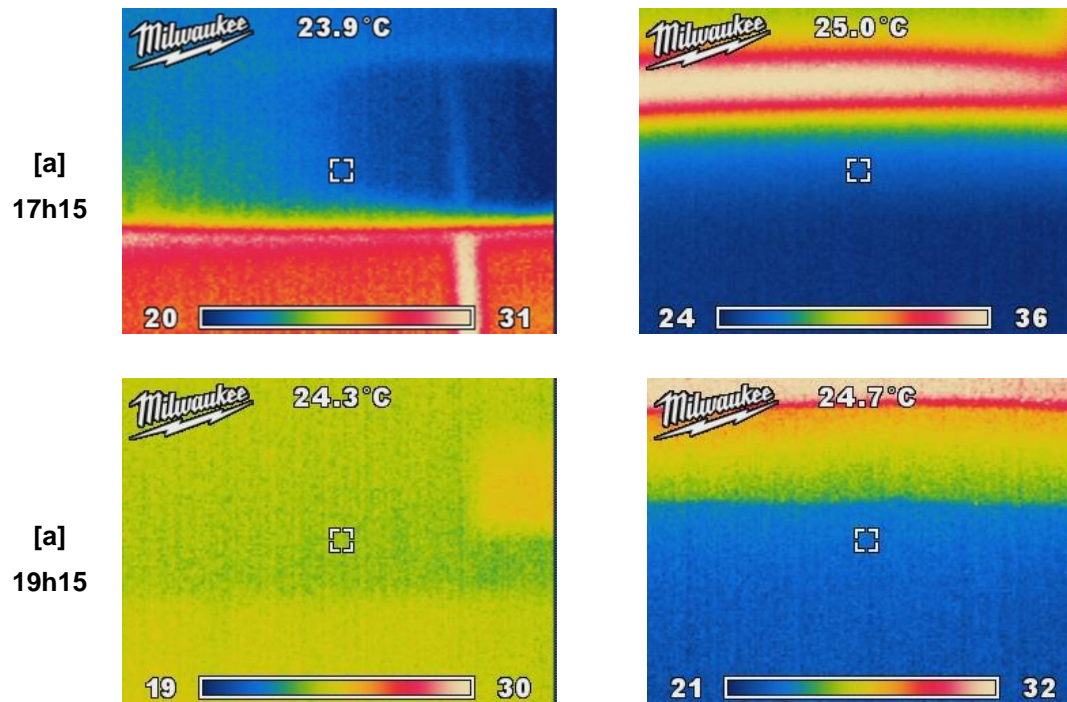


Figura 71- Imagens termográficas do conjunto de placas [a]

Tanto em regime de aquecimento como arrefecimento, as placas apresentaram temperaturas diferentes entre si. Deste modo concluímos que existe um erro em considerar que a temperatura medida pelo termopar representa a temperatura real da placa superior.

No entanto, a partir das temperaturas registadas pela câmara verifica-se que a diferença entre elas nunca foi superior a 1,1°C.

Conclusões

Com este ensaio verificámos que existe homogeneidade de temperatura entre a placa superior e inferior dos conjuntos PSa e PSb e que a heterogeneidade de temperatura nos diversos pontos de cada placa verificada no conjunto PSa não ocorre para o conjunto PSb. Esta heterogeneidade resulta do facto do sistema de ventilação ter estado ativo. De facto, 3 horas após o sistema de ventilação ter sido desligado, a temperatura nos diversos pontos das placas PSa apresentou-se cada vez mais homogénea. Isto significa que a heterogeneidade das placas só ocorreu nas primeiras horas de 2º ensaio, visto que posteriormente toda a área da placa entra em equilíbrio térmico com o meio envolvente. Desta forma, o facto de se ter considerado que as temperaturas medidas pelos termopares T4 e T8, representavam as temperaturas reais das placas superiores e de ambas as placas em todos os seus pontos, não acresce um erro significativo ao ensaio.

O mesmo se pode aplicar para o conjunto de placas [a], visto que a variação entre a placa superior e inferior foi de apenas 1,1°C.

6. Conclusão

Com este trabalho experimental foi possível concluir que a incorporação de placas com PCM aumenta o desempenho térmico da divisão ao atenuar os picos de temperatura registados pela temperatura do ar interior. No entanto, através da comparação entre os dois gabinetes é notório que diferença não foi significativa pois ambos apresentam uma elevada inércia térmica. No 1º ensaio a diferença máxima entre o gabinete com e sem PCM foi de 0,2°C e no 2º ensaio registou-se uma diferença de 1°C.

Tal como descrito na bibliografia a eficiência das placas com PCM depende fortemente das características do edifício e do clima onde estas vão ser incorporadas. Fatores como a inércia térmica do edifício e a taxa de renovação de ar, podem condicionar o desempenho térmico das placas, reduzindo a capacidade de estas completarem ciclos térmicos. Este facto foi comprovado mais uma vez através dos dois ensaios realizados neste trabalho experimental, onde se verificou que as placas apresentaram uma taxa de libertação de calor muito reduzida.

No 1º ensaio verificou-se que as trocas de calor são limitadas por existir apenas uma superfície de contacto entre as placas e o ar. As outras superfícies das placas estão em contacto com as paredes, ocorrendo uma imposição de temperatura por parte destas. Neste cenário em que as placas são incorporadas como camadas finais das paredes, conclui-se que as placas incorporadas nas paredes externas são a melhor opção. As paredes exteriores apresentam uma inércia térmica inferior à registada pelas outras soluções construtivas e o contacto direto destas com os estímulos exteriores promove a fusão e a solidificação do PCM encapsulado nas placas.

Em conformidade com o ocorrido no 1º ensaio, as placas localizadas nas paredes externas foram as que apresentaram melhor *performance* térmica no 2º ensaio. Neste ensaio a acumulação de calor foi superior à registada no 1º ensaio, no entanto a libertação de calor foi menor. Isto é justificado pelo comportamento das placas suspensas. Devido à sua localização, estas conseguiram acumular energia, mas foram incapazes de a libertar. Apesar de neste cenário se ter duplicado a superfície de contacto entre as placas e o ar, a proximidade entre placas, a camada de estratificação onde se encontram e o facto de estarem próximas do teto, impossibilitou a libertação de calor por parte das mesmas.

A otimização de um sistema de LHTES passa por encontrar a temperatura de fusão do PCM ideal para a aplicação e a percentagem do PCM em massa. Neste caso concluímos que de acordo com as características do gabinete e com o clima em questão a temperatura de fusão do PCM deveria ser superior. A percentagem em massa de PCM (18%) e a baixa condutividade das placas reproduziram-se numa baixa capacidade de armazenar calor latente. A eficiência global dos conjuntos de placas, em termos de utilização de calor latente atingiu o seu máximo no 2º ensaio, apresentando um valor de 18%.

Tendo em conta estes resultados conclui-se que a incorporação de dispositivos de ventilação de baixo consumo permitiria acelerar as trocas de calor entre a superfície e o PCM ajudando-o a completar as suas cargas e descargas de calor e a aumentar a performance térmica do sistema.

O desempenho das placas seria certamente melhor se estivéssemos perante um edifício com uma construção leve. Um *heavyweight building*, como o gabinete em estudo, não consegue beneficiar tanto da incorporação de placas com PCM porque já possui elevada inércia térmica.

7. Trabalhos Futuros

A incorporação de PCMs em LHTES tem mostrado um grande potencial em termos de redução das necessidades de aquecimento e arrefecimento. No entanto a aplicação destes sistemas tem um maior impacto em edifícios com baixa inércia térmica. Desta forma estas duas configurações deviam ser testadas num edifício com baixa inércia térmica, de forma a avaliar o desempenho térmico das mesmas nessas condições. A adição de sistemas de ventilação, natural ou mecânica (de baixo consumo) também devem ser implementados de forma a solucionar o problema de solidificação do PCM.

Globalmente verifica-se que a microencapsulação reduz a capacidade de armazenar calor latente e que trata de um processo dispendioso. Desta forma torna-se importante que os trabalhos de R&D se foquem no desenvolvimento de novos processos de incorporação ou na otimização do processo de microencapsulação, atuando em parâmetros como a cápsula e a percentagem de PCM no produto final.

Outro problema identificado é relativo à baixa transferência de calor, resultado da baixa condutividade térmica das placas que leva a uma baixa taxa de absorção e libertação por parte do PCM. De facto, esta é uma das principais razões que leva à redução da capacidade do sistema de armazenar e libertar calor latente. Desta forma devem ser estudadas novas soluções de forma a aumentar a condutividade térmica dos materiais finais.

Bibliografia

- Abhat, A. 1983. "Low Temperature Latent Heat Thermal Energy Storage: Heat Storage Materials." *Solar Energy* 30(4):313–32.
- Agyenim, Francis, Neil Hewitt, Philip Eames, and Mervyn Smyth. 2010. "A Review of Materials, Heat Transfer and Phase Change Problem Formulation for Latent Heat Thermal Energy Storage Systems (LHTESS)." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14(2):615–28.
- Alawadhi, Esam M. 2008. "Thermal Analysis of a Building Brick Containing Phase Change Material." *Energy and Buildings* 40(3):351–57.
- Athienitis A, Liu C, Hawes D, Banu D, Feldman D. Investigation of the thermal performance of a passive solar test-room with wall latent heat storage. *Build Environ* 1997;32(5):405-10
- Baetens, Ruben, Bjorn Petter Jelle, and Arild Gustavsen. 2010. "Phase Change Materials for Building Applications: A State-of-the-Art Review." *Energy and Buildings* 42(9):1361–68.
- Becker, Rachel. 2014. "Improving Thermal and Energy Performance of Buildings in Summer with Internal Phase Change Materials." *Journal of Building Physics* 37(3):296–324.
- Buddhi, D. and Sawhney, R.L., 1994, "Proc: Thermal energy storage and energy conversion", School of Energy and Environmental Studies, Devi Ahilya University, Indore, India
- Cabeza, L. F., A. Castell, C. Barreneche, A. De Gracia, and A. I. Fernández. 2011. "Materials Used as PCM in Thermal Energy Storage in Buildings: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(3):1675–95. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>).
- Cabeza, Luisa F. et al. 2007. "Use of Microencapsulated PCM in Concrete Walls for Energy Savings." *Energy and Buildings* 39(2):113–19.
- Costa, Susana. 2014. "Armazenamento de Energia Térmica Através de Materiais de Mudança de Fase." Retrieved (<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/73754/2/98207.pdf>).
- Cui, Shuqing, Michaël Cohen, Pascal Stabat, and Dominique Marchio. 2015. "CO2 Tracer Gas Concentration Decay Method for Measuring Air Change Rate." *Building and Environment* 84:162–69.
- Diakaki, Christina, Evangelos Grigoroudis, and Dionyssia Kolokotsa. 2008. "Towards a Multi-Objective Optimization Approach for Improving Energy Efficiency in Buildings." *Energy and Buildings* 40(9):1747–54.
- Evola, G., L. Marletta, and F. Sicurella. 2014. "Simulation of a Ventilated Cavity to Enhance the Effectiveness of PCM Wallboards for Summer Thermal Comfort in Buildings." *Energy and Buildings* 70:480–89. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.09.021>).

Evola, G., & Marletta, L. 2014. The effectiveness of PCM wallboards for the energy refurbishment of lightweight buildings. *Energy Procedia*, 62, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.362>

Farid, Mohammed M., Amar M. Khudhair, Siddique Ali K. Razack, and Said Al-Hallaj. 2004. "A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications." *Energy Conversion and Management* 45(9–10):1597–1615.

Farid MM, Chen XD.1999. Domestic electric space heating with heat storage. *Proc Instn Mech Engrs* 1999;213:83–92

Ghoneim, A. A. 1989. "Comparison of Theoretical Models of Phase Change and Sensible Heat Storage for Air and Water Solar Heating Systems." *Solar Energy* 42(3):209–20.

Hariri, A. S. and I. C. Ward. 1988. "A Review of Thermal Storage Systems Used in Building Applications." *Building and Environment* 23(1):1–10.

Hasnain S.M. 1998. "Review on Sustainable Thermal Energy Storage Technologies, Part I: Heat Storage Materials and Techniques." *Energy Conversion and Management* 39(11):1127–38. Retrieved (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890498000259>).

Hawes, D. W., D. Feldman, and D. Banu. 1993. "Latent Heat Storage in Building Materials." *Energy and Buildings* 20(1):77–86.

Himran, Syukri, Aryadi Suwono, and G.Ali Mansoori. 1994. "Characterization of Alkanes and Paraffin Waxes for Application as Phase Change Energy Storage Medium." *Energy Sources* 16(1):117–28.

Hunger, M. and Ag Entrop. 2009. "The Direct Incorporation of Micro-Encapsulated Phase Change Materials in the Concrete Mixing process—A Feasibility Study." *Systems and Materials* 141–48. Retrieved (http://www.utwente.nl/ctw/gtbcenter/Publications_Folder/CIB_W115_Conference_Proceedings_Pub_323_10-6-2009.pdf#page=143).

Jelle, B. P. and S. E. Kalnæs. 2017. *Chapter 3 – Phase Change Materials for Application in Energy-Efficient Buildings*. Elsevier Ltd. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-101128-7.00003-4>).

Khudhair, Amar M. and Mohammed M. Farid. 2004. "A Review on Energy Conservation in Building Applications with Thermal Storage by Latent Heat Using Phase Change Materials." *Energy Conversion and Management* 45(2):263–75.

Koekenbier, S. F. 2011. "PCM Energy Storage during Defective Thermal Cycling." (September).

Koschenez, Markus and Beat Lehmann. 2004. "Development of a Thermally Activated Ceiling Panel with PCM for Application in Lightweight and Retrofitted Buildings." *Energy and Buildings*

36(6):567–78.

Kuznik, Frédéric, Damien David, Kevyn Johannes, and Jean Jacques Roux. 2011. “A Review on Phase Change Materials Integrated in Building Walls.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(1):379–91.

Kuznik, Frédéric, Joseph Virgone, and Kevyn Johannes. 2011. “In-Situ Study of Thermal Comfort Enhancement in a Renovated Building Equipped with Phase Change Material Wallboard.” *Renewable Energy* 36(5):1458–62. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.008>).

Kuznik, Frédéric, Joseph Virgone, and Jean Noel. 2008. “Optimization of a Phase Change Material Wallboard for Building Use.” *Applied Thermal Engineering* 28(11–12):1291–98.

Lora, Davide. 2014. “Phase change material product design.Market and business development assessment in the food industry.”

Mendes, J. F., Joyce, A., Horta, P., & Brites, M. J. (2010). "Armazenamento de energia solar térmica". LNEG

Morrison, D. J. and S. I. Abdel-Khalik. 1978. “Effects of Phase-Change Energy Storage on the Performance of Air-Based and Liquid-Based Solar Heating Systems.” *Solar Energy* 20(1):57–67.

Nkwetta, Dan Nchelatebe and Fariborz Haghighat. 2014. “Thermal Energy Storage with Phase Change Material - A State-of-the Art Review.” *Sustainable Cities and Society* 10:87–100. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2013.05.007>).

Pasupathy, A., R. Velraj, and R. V. Seeniraj. 2008. “Phase Change Material-Based Building Architecture for Thermal Management in Residential and Commercial Establishments.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(1):39–64.

Peippo, K., P. Kauranen, and P. D. Lund. 1991. “A Multicomponent PCM Wall Optimized for Passive Solar Heating.” *Energy and Buildings* 17(4):259–70.

Pérez-Lombard, Luis, José Ortiz, and Christine Pout. 2008. “A Review on Buildings Energy Consumption Information.” *Energy and Buildings* 40(3):394–98.

Raposo, Carlos. 2015. “Modelação de Consumos Energéticos No Pavilhão de IST- TagusPark E Definição de Medidas de Racionalização Dos Consumos Energéticos Engenharia Mecânica.”

Regin, A.Felix, S. C. Solanki, and J. S. Saini. 2008. “Heat Transfer Characteristics of Thermal Energy Storage System Using PCM Capsules: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(9):2438–51.

Sadineni, Suresh B., Srikanth Madala, and Robert F. Boehm. 2011. “Passive Building Energy Savings: A Review of Building Envelope Components.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(8):3617–31. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>).

- Salunkhe, Pramod B. and Prashant S. Shembekar. 2012. "A Review on Effect of Phase Change Material Encapsulation on the Thermal Performance of a System." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16(8):5603–16. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.037>).
- Schossig, P., H. M. Henning, S. Gschwander, and T. Hausmann. 2005. "Micro-Encapsulated Phase-Change Materials Integrated into Construction Materials." *Solar Energy Materials and Solar Cells* 89(2–3):297–306.
- Setterwall, Fredrik et al. 2005. "Annex 17: Advanced Thermal Energy Storage Trough Application of Phase Change Materials and Chemical Reactions – Feasibility Studies and Demonstration Projects. Final Report." *International Energy Agency - Final Report. Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage*. Retrieved (http://www.celsius.co.kr/phase_change_materials/download/energy/Advanced_Thermal_Energy_Storage_through_application_of_PCMS.pdf).
- Sharma, Atul, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi. 2009. "Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials and Applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(2):318–45.
- Shapiro, M. 1989. "Development of the enthalpy storage materials, mixture of methyl stearate and methyl palmitate." Subcontract Report to Florida Solar Energy Center
- Sharma, Someshwar Dutt, Hiroaki Kitano, and Kazunobu Sagara. 2004. "Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal Applications." *Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ.* 29:31–64.
- Shilei, Lv, Feng Guohui, Zhu Neng, and Dongyan Li. 2007. "Experimental Study and Evaluation of Latent Heat Storage in Phase Change Materials Wallboards." *Energy and Buildings* 39(10):1088–91.
- Silva, Nelson Tiago Dias Ferreira da. 2009. "Incorporação de Materiais de Mudança de Fase Em Materiais de Construção." 1–217.
- Silva, Tiago, Romeu Vicente, Nelson Soares, and Victor Ferreira. 2012. "Experimental Testing and Numerical Modelling of Masonry Wall Solution with PCM Incorporation: A Passive Construction Solution." *Energy and Buildings* 49:235–45. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.010>).
- Soares, N., J. J. Costa, A. R. Gaspar, and P. Santos. 2013. "Review of Passive PCM Latent Heat Thermal Energy Storage Systems towards Buildings' Energy Efficiency." *Energy and Buildings* 59:82–103. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.12.042>).
- Sousa, Pedro. 2016. "Optimização Da Eficiência Energética Em Edifícios Públicos."
- Stritih U, Novak P. 2002. Thermal storage of solar energy in the wall for building ventilation.

Second workshop: IEA, ECES IA Annex 17, Advanced thermal energy storage techniques—feasibility studies and demonstration projects, Ljubljana, Slovenia. 3–5

Tristão, Paulo Jorge Soares. 2014. “Encapsulação de Materiais de Mudança de Fase (PCM) Para Aplicações No Armazenamento de Energia.” 89. Retrieved (<https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/11511>).

Tyagi, V. V., S. C. Kaushik, S. K. Tyagi, and T. Akiyama. 2011. “Development of Phase Change Materials Based Microencapsulated Technology for Buildings: A Review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(2):1373–91. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.006>).

Tyagi, Vineet Veer and D. Buddhi. 2007. “PCM Thermal Storage in Buildings: A State of Art.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11(6):1146–66.

Vaz, Ana Margarida. 2012. “Comportamento Térmico de Edifícios Em Portugal Usando Materiais de Mudança de Fase.”

Zhang, H., C. Huizenga, Edward A. Arens, and T. Yu. 2005. “Modeling Thermal Comfort in Stratified Environments.” *Center for the Built Environment UC Berkeley 2005* (Indoor Environmental Quality (IEQ)):133–37.

Zhou, D., C. Y. Zhao, and Y. Tian. 2012. “Review on Thermal Energy Storage with Phase Change Materials (PCMs) in Building Applications.” *Applied Energy* 92:593–605. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>).

Anexo I

Tabela 5- PCMs orgânicos, sais hidratados e eutéticos (Silva 2009; Cabeza et al. 2011; Zhou et al.2012).

PCM	Tipo	Temperatura de fusão (°C)	Calor Latente de Fusão (kJ/kg)	Condutividade Térmica (W/mK)
Parafina C ₁₆ -C ₁₈	Orgânico	20-22	152	-
Parafina C ₁₃ -C ₂₄	Orgânico	22-24	189	0,21
Parafina C ₁₈	Orgânico	28	244	0,15
CH ₃ (CH ₂) ₁₆ COO (CH ₂) ₃ CH ₃ (Estereato de butilo)	Orgânico	19	140	-
CH ₃ (CH ₂) ₁₂ COOC ₃ H ₇ (Palmitato de propilo)	Orgânico	19	186	-
CH ₃ (CH ₂) ₁₁ OH (1-Dodecanol)	Orgânico	26	200	-
CH ₃ (CH ₂) ₁₆ CH ₃ (n-Octadecano)	Orgânico	28	200	0,148 (líquido) 0,15 (sólido)
Estearato de vinil	Orgânico	27-29	122	-
C ₁₂ H ₂₂ O ₄ (Dimetil sebacato)	Orgânico	21	120-135	-
Poliglicol E600	Orgânico	22	127,2	0,1897
45% CH ₃ (CH ₂) ₈ COOH 55% CH ₃ (CH ₂) ₁₀ COOH (45/55 ácido cáprico + ácido laurico)	Orgânico eutético	21	143	-
Palmitato de propilo	Orgânico	19	186	-
Octadecil 3-mercaptopropilato	Orgânico	21	143	-
KF.4H ₂ O (Flureto de potássio tetrahidratado)	Sal Hidratado	18,5	231	-
Mn(NO ₃).6H ₂ O	Sal Hidratado	25,8	125,9	-
CaCl ₂ .6H ₂ O (Cloreto de cálcio hexahidratado)	Sal Hidratado	29,7	171	-
CaCl ₂ .6H ₂ O+Nucleado+MgCl ₂ .6H ₂ O (2:1) (Cloreto de cálcio/Cloreto de magnésio)	Inorgânico eutético	25	127	-
48% CaCl ₂ +4,3% NaCl+0,4% KCL+47,3% H ₂ O	Inorgânico eutético	26,8	188	-

Tabela 6-PCMs comerciais disponíveis no mercado (Tyagi & Buddhi, 2007;Pasupathy et al. 2008; Silva, 2009;Mendes et al. 2010; Cabeza et al.2011).

Fabricante	Designação Comercial	Tipo de produto	Temperatura de fusão (°C)	Calor Latente de Fusão (kJ/kg)	Condutividade Térmica (W/mK)
Rubitherm GmbH	RT20	Parafina	22	172	0,88
	RT25		26	232	-
	RT26		25	131	0,88
	RT27		28	179	0,87
	RT30		28	206	-
Climator	Climsel C23	Sal hidratado	23	148	-
	Climsel C24		24	108	1,48
TEAP	TH24	Sal hidratado	24	45,5	0,8
Mitsubishi Chemical	STL27	Sal hidratado	27	213	1,09
Cristopia	S27	Sal hidratado	27	207	-
	AC27				1,47
BASF	Micronal DS 5008	Parafina	23	110	-
	Micronal DS 5001		26		-
Astor wax by Honey well	Astorstat HA17	Parafina	21,7-22,8	-	-
	Astorstat HA18		27,2-28,3	-	-
EPS Ltd.	E23	Sal hidratado	23	155	0,43
	E28		28	193	0,21

Anexo II

Tabela 7- Característica dos materiais. Disponibilizado por Ricardo Gomes, Centro de Estudos em Inovação, Tecnologia e Políticas de Desenvolvimento (IN)

Nome	Rugosidade	Espessura (m)	Condutividade (W/m.°C)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (J/kg.°C)
Alvenaria de tijolo cerâmico furado	<i>Medium rough</i>	0,25	0,39	1200	920
Argamassa de Cal Escura	<i>Medium Smooth</i>	0,02	1,3	1900	1046
Betão	<i>Smooth</i>	0,47	2,2	2300	900
Betão	<i>Smooth</i>	0,08	2,2	2300	900
Betão	<i>Smooth</i>	0,35	2,2	2300	900
Betão	<i>Smooth</i>	0,22	2,2	2300	900
Betonilha	<i>Rough</i>	0,2	1,65	2000	900
Betonilha	<i>Rough</i>	0,03	1,13	2000	1000
Soalho de madeira flutuante	<i>Smooth</i>	0,02	1,3	2300	1000
Tijolo	<i>Smooth</i>	0,2	1,3	1460	880
Estuque projectado	<i>Medium rough</i>	0,005	0,3	600	920
Estuque projectado	<i>Medium rough</i>	0,02	0,3	600	920
Fibrocimento	<i>MediumRough</i>	0,01	0,48	1500	1800
Isolamento XPS	<i>Medium Smooth</i>	0,05	0,037	30	1550
Lajeta de betão	<i>Rough</i>	0,06	1,13	2000	1000
Tela impermeabilização	<i>Smooth</i>	0,002	0,14	1200	1040

Anexo III

Data logger Omega® e Termopares

Durante os ensaios experimentais foi utilizado um *data logger* de forma a medir e a registar com precisão os valores de temperatura. O *data logger* utilizado, Omega OM-DAQPRO-5300 (figura 34), possui 8 canais e possibilita ao operador registar medições com um intervalo de tempo de 1 segundo, 10 segundos, 15 min, 30 min ou 1 hora. A capacidade de armazenamento depende da memória do *logger*, sendo indefinida quando este está ligado a um computador que contenha o software DaqLab. As temperaturas foram medidas com recuso a 8 termopares do tipo k (liga de Cromel-Alumel), expostos, com 0,51 mm de diâmetro e isolados com uma fita de poliamida fundida, kapton. De acordo com as especificações presentes no manual os termopares do tipo k cobrem um intervalo de temperatura entre os – 250 e os 1200°C e apresentam uma resolução de 0,1°C e uma precisão de 0,5°C para temperaturas entre os -50-50°C.



Figura 72- Data logger Omega OM-DAQPRO-5300
(<https://www.omega.com/pptst/OM-DAQPRO-5300.html>)

Data logger HOBO®

A temperatura e a humidade relativa (HR) do gabinete em estudo e homólogo foram monitorizadas com recurso a dois *data loggers*, HOBO U12-011 Temp/RH. As especificações destes aparelhos estão descritas na tabela 9 apresentada de seguida.



Figura 73- Data logger HOBO U12-011 Temp/RH
(<http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u12-011>)

Tabela 8- Especificações dos data loggers HOBO U12-011 Temp/RH

Intervalo de medida	Temperatura: -20-70°C Humidade relativa: 5-95% HR
Precisão	Temperatura: $\pm 0,35^{\circ}\text{C}$ para $0 < T < 50^{\circ}\text{C}$ Humidade relativa: $\pm 2,5\%$ para $10 < \text{HR} < 90\%$ HR Até um máximo de $\pm 3.5\%$
Resolução	Temperatura: $0,03^{\circ}\text{C}$ a 25°C Humidade relativa: $0,03\%$ HR
Memória	64K bytes (43 000 medições a 12-bit)

Medidor de CO₂

De forma a obter as medições necessárias para o cálculo da taxa de renovação de ar horária foi utilizado o medidor de CO₂ Chauvin Arnoux C.A 1510. Este modelo permite medir valores de CO₂ entre os 0 e os 5000 ppm com uma precisão de ± 50 ppm.



Figura 74- Medido de CO₂- Chauvin Arnoux C.A 1510
(<http://www.chauvin-arnoux.com/en/produit/c-a-1510.html>)

Câmara termográfica

As fotografias termográficas das placas em estudo foram registadas com recurso a uma câmara termográfica da Milwaukee®, modelo M12™ 160 X 120 Thermal Imager Kit. Este equipamento têm a capacidade de medir temperaturas numa gama entre os -10 e os 350 °C com uma sensibilidade térmica de 0,1°C a 30°C.



Figura 75-Câmara Térmica Milwaukee®- M12™ 160 X 120 Thermal Imager Kit
(<https://www.milwaukeetool.com/instruments/thermal-imaging/2260-21>)

Estação meteorológica

Os valores de temperatura exterior e radiação solar foram recolhidas com recurso à estação meteorológica Davis Instruments Vantage Pro2. A estação está colocada no telhado do edifício, na direcção do gab16.20.



Figura 76- Estação meteorológica e respetivo display