



Universidade de Aveiro
2014

Departamento de Ambiente e Ordenamento

Lídia Cristina

Carvalho Baptista

Nogueira

**Estudo de um edifício solar passivo com parede
de Trombe usando PCMs**



Universidade de Aveiro
2014

Departamento de Ambiente e Ordenamento

Lídia Cristina **Estudo de um edifício solar passivo com parede de trombe**
Carvalho Baptista **usando PCMs**
Nogueira

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

O Júri

Presidente	Professora Doutora Maria Isabel Aparício Paulo Fernandes Capela Professora Associada, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro
Arguente	Professor Doutor Fernando José Neto da Silva Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica
Orientador	Professor Doutor António José Barbosa Samagaio Professor Associado, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

O meu apreço ao Professor Doutor António Samagaio, pela orientação, pelos profundos e vastos conhecimentos transmitidos, disponibilidade constante, motivação, paciência e bons conselhos partilhados na execução da minha dissertação.

Ao Eng.º Luís Silva, ao Eng.º Pedro Sequeira e ao Eng.º Nuno Vieira da empresa *Weber Saint-Gobain*, pela disponibilidade e partilha de conhecimento na realização do estudo experimental e a todas as pessoas da empresa envolvidas pelo apoio prestado e tratamento excelente. À empresa BASF, no nome do Eng.º Manuel Morgado, na disponibilização de material (PCM) necessário à concretização experimental deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e ao Vítor Rodrigues e Maria Figueiredo, pela cedência de espaço no laboratório e de materiais essenciais à concretização do trabalho prático.

Aos colegas e amigos conquistados na equipa de futsal do curso, na AAUAv, no NEEA-AAUAv e no Conselho Pedagógico da Universidade de Aveiro que cooperaram comigo nestas equipas, pelo exemplo e ajuda no trabalho em prol da comunidade académica, pelas boas experiências vividas, desafios ultrapassados e crescimento pessoal.

Aos meus amigos André Silva e Andrea da Silva pela amizade, presença e encorajamento, não só na dissertação, mas também no percurso académico e pessoal. À Carla Monteiro pela companhia na luta desta aventura, entreajuda partilhada e ânimo sempre presente.

Ao incrível grupo de amigos que possuo, pelo apoio, cumplicidade, diversão, pelos sorrisos, abraços e mimos partilhados.

A toda a família, pilar de valores e princípios, essenciais para a formação no ser que sou hoje.

Aos meus irmãos Marta e Leonel e à minha cunhada Carla pela união, suporte e motivação nas dificuldades e conquistas, demonstrando sempre o maior carinho e compreensão.

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo amor e fé depositados sempre em mim. Um agradecimento especial por proporcionarem continuamente as melhores condições possíveis e pelo desenvolvimento pessoal mediante o melhor do seu exemplo e ensinamentos.

Palavras-chave

Edifício solar passivo; materiais de mudança de fase (*PCM*); parede de Trombe; célula de teste; armazenamento de energia térmica.

Resumo

A presente dissertação teve como principal objetivo estudar o comportamento de um compósito com *PCM* parafínico microencapsulado numa matriz de Leca® e cimento, tendo em vista a redução de consumos energéticos em climatização e melhoria do conforto térmico. Para tal, foram produzidas lajetas e aplicadas como parede de Trombe numa célula de teste, segundo as práticas utilizadas em edifícios solares passivos de ganho indireto.

Ensaio experimentais foram realizados em dois compartimentos de uma célula de teste, a fim de avaliar o desempenho térmico das lajetas com *PCM* usando um sistema de monitorização existente para o efeito. Posteriormente procedeu-se a uma comparação com os resultados obtidos usando um modelo parametrizado, de acordo com as opções disponibilizadas pelos programas de simulação *Google SketchUp* e *EnergyPlus*. A comparação permitiu concluir que existe uma boa concordância entre os dados obtidos na estação meteorológica medidos na Universidade de Aveiro, os valores experimentais medidos na célula de teste e os resultados numéricos.

O estudo revelou ainda a importância da existência da parede de Trombe com *PCM* incorporado, verificando-se quer nas medições, quer no modelo de simulação, uma redução média da temperatura interior, sobretudo nos valores máximos. Por fim, através do estudo da simulação de um edifício solar passivo de ganho direto, aplicando os mesmos parâmetros da parede de Trombe, mostrou-se que esta é mais eficiente do que o sistema de ganho direto, uma vez que consegue atenuar os picos de temperatura.

Keywords Passive solar system; phase change materials (PCM); Trombe wall; test cell; thermal energy storage.

Abstract The main objective of this thesis is to study the behavior of a composite with microencapsulated paraffin PCM in a matrix composed of Leca® and cement, in order to reduce energy costs in air conditioning and improve thermal comfort. In order to reach this goal, slabs were produced and used as a Trombe wall in a test cell, following the best practices of indirect-gain passive solar building design.

Experimental tests in a two-compartment test cell enabled the evaluation of the thermal performance of the slabs with PCM through a monitoring system installed for this purpose. Subsequently, a comparison between experimental data and numerical results was performed using of a parameterized model, according to the input data provided by the simulation programs Google SketchUp and EnergyPlus. Good agreement was found between the data obtained from the weather station data, measured at the University of Aveiro, the experimental values measured in the test cell and the numerical results.

The study highlighted the relevance of the Trombe wall with embedded PCM, observed both in the measurements and in the simulation model, in particular, an average reduction in the values of maximum indoor temperature. Finally, simulating a direct gain passive solar building and using the same parameters used in the Trombe wall model, it can be concluded that it is more efficient than the direct gain system, since it can most effectively attenuate maximum indoor temperature values.

Índice

Índice.....	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	v
Lista de abreviaturas.....	vi
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Metodologia.....	3
1.4 Estrutura do trabalho.....	4
2 Edifícios solares passivos	5
2.1 Introdução.....	5
2.2 Edifícios bioclimáticos.....	6
2.2.1 Edifício solar passivo de ganho direto	8
2.2.2 Edifício solar passivo de ganho indireto	9
2.2.2.1 Paredes de Trombe.....	10
2.2.3 Edifício solar passivo de ganho isolado	11
2.3 Materiais constituintes de edifícios solares passivos.....	11
2.4.1 EnergyPlus.....	12
3 Procedimentos de estudo da célula de teste e do material compósito	14
3.1 Caracterização da argamassa com <i>PCM</i>	14
3.2 Produção das lajetas de argamassa com <i>PCM</i>	17
3.2.1 Molde.....	17
3.2.2 Pintura das lajetas	19
3.3 Célula de teste.....	20
3.3.1 Caracterização da célula de teste	20
3.3.1.1 Fachadas Norte, Este e Oeste	21
3.3.1.2 Fachada divisória.....	21
3.3.1.3 Pavimento	21
3.3.1.4 Cobertura	21
3.3.1.5 Vão envidraçado	22
3.3.2 Parede de Trombe	22
3.4 Sistema de aquisição de dados	23
3.4.1 Sensores.....	23
3.4.1.1 Temperatura e humidade relativa (interior) – Sonda JUMO 907021/21 ..	24
3.4.1.2 Temperatura e humidade relativa exterior – Sonda HD 9008 TR.....	24
3.4.1.3 Radiação global – piranómetro.....	26
3.4.1.4 Fluxo de calor - fluxímetros Hukseflux HFPO1	27
3.4.1.5 Temperatura interior - sondas <i>PT100</i>	27
3.4.2 Sistema de monitorização	28
3.5 Modelação (<i>Google SketchUp</i>) e simulação (<i>EnergyPlus</i>).....	30
4 Resultados e discussão.....	32
4.1 Monitorização das variáveis externas pelo CESAM e célula de teste.....	33
4.2 Avaliação do desempenho térmico – Ensaios experimentais.....	36
4.3 Avaliação do desempenho térmico – Simulação com <i>EnergyPlus</i>	42
4.3.1 Verificação da aplicação do modelo de simulação na célula de teste	42
4.3.2 Conformidade entre os ensaios experimentais e o modelo de simulação	44
4.3.3 Relação entre o estudo de ganho indireto e direto obtido por simulação	45
4.4 Síntese dos resultados gerais.....	46

4.4.1	Considerações finais	46
4.4.2	Economia de energia	46
5	Conclusão e desenvolvimentos futuros	47
5.1	Conclusões gerais	47
5.2	Desenvolvimentos futuros	47
	Referências Bibliográficas	49

Índice de Figuras

Figura 1 - Balanço energético de 2011 (Fonte: DGEG)	1
Figura 2 – Elementos chave de um edifício solar passivo [9]	7
Figura 3 – Edifício Solar XXI – Edifício com necessidade de energia quase-nula (nZEB), (Fonte: LNEG).....	8
Figura 4 – Ilustração exemplar de um edifício solar passivo de ganho direto [13]	9
Figura 5 – Ilustração exemplar de um edifício solar passivo de ganho indireto com parede de Trombe [13]	10
Figura 6 - Ilustração exemplar de um edifício solar passivo de ganho isolado [13]	11
Figura 7 - Micrografia eletrónica do <i>PCM Micronal DS 5040 X</i> , as partículas de pó consistem em aglomerados de microcápsulas (Fonte: <i>BASF</i>)	14
Figura 8– <i>PCM Micronal DS5040 X</i> (a) no saco de 30kg; (b) a ser pesado para a mistura; (c) <i>Leca</i> ® <i>XS</i> e cimento	15
Figura 9 – (a) Mistura dos materiais constituintes da argamassa; (b) amassadura da argamassa com PCM através da misturadora	17
Figura 10 –Moldes construídos para produção das lajetas (a) por encher (b) enchimento e (c) após preenchimento com argamassa	18
Figura 11 - Aspeto final da produção das lajetas (a) no molde; (b) fora do molde	18
Figura 12 – Lajetas com tinta preta <i>CIN Vinylmatt</i> (a) durante a pintura e (b) após a pintura.....	19
Figura 13 – Localização da célula de teste [Fonte: Google Earth]	20
Figura 14 – Parede de Trombe erigida depois da construção da estrutura em madeira (a) dentro do compartimento experimental; (b) parte exterior da célula de teste	22
Figura 15 - Sondas <i>JUMO 907021/21</i> na parede interior Norte(a) célula experimental e (b) célula de referência.....	24
Figura 16 - Sonda <i>HD 9008 TR</i> na célula de teste.....	26
Figura 17 - Piranómetro <i>LP PYRA</i> da <i>Delta Ohm</i> na cobertura da célula de teste.....	26
Figura 18 -Fluxímetro <i>Hukseflux HFPO1</i> (a) na parede de Trombe da célula experimental; (b) no vidro com cartolina preta da célula de referência.	27
Figura 19 – Exemplo de colocação de sondas de temperatura <i>PT100</i> (a) na parte superior da célula de referência; (b) vidro com cartolina na célula de referência; (c) parte superior e parede divisória da célula experimental	28
Figura 20 -Sistema de monitorização na célula de referência.....	29
Figura 21 - <i>Software EZ Data Logger Basic</i>	30
Figura 22 - Modelização da célula de teste no <i>Google SketchUp</i> (a) fachada Poente-Sul, sem parede de Trombe; (b) fachada Nascente-Norte com as estradas nos compartimentos; (c) e (d) fachada Sul e Sudeste, respetivamente, com parede de Trombe.....	31
Figura 23 - Radiação solar global efetuadas pelo CESAM e pela célula de teste (a) entre 4 e 22 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor	33
Figura 24 - Temperatura exterior efetuada pelo CESAM e pela célula de teste (a) entre 5 e 21 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor.....	34
Figura 25 - Humidade relativa exterior efetuadas pelo CESAM e pela célula de teste (a) entre 5 e 21 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor	35
Figura 26 - Temperatura exterior e radiação solar global efetuadas (a) entre 5 e 21 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor.....	36
Figura 27 -Humidade relativa exterior, na célula de referência e célula experimental efetuadas (a) entre 5 e 21 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor	37

Figura 28 - Medição da temperatura interior, na célula de referência e célula experimental efetuadas (a) entre 5 e 21 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor..	38
Figura 29 – Relação entre o fluxo de calor e a temperatura, na célula de referência e célula experimental realizada nos dias 20 e 21 de Agosto	41
Figura 30 – Simulação da temperatura interior, nas células de referência e experimental, efetuada entre 12 e 16 de Agosto	42
Figura 31 – Comparação entre as temperaturas obtidas na célula de referência por simulação e pelas sondas entre 12 e 16 de Agosto	44
Figura 32 – Comparação entre as temperaturas obtidas na célula experimental por simulação e pelas sondas, entre 12 e 16 de Agosto	44
Figura 33 –Desempenho térmico do estudo de ganho indireto (Parede de Trombe)e para o caso de ganho direto, simulados	45

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Composição da argamassa com PCM utilizada no trabalho experimental (% em massa).	14
Tabela 2 - Propriedades do <i>PCM MicronalDS5040 X</i> [10].....	15
Tabela 3 – Características da argamassa [9]	16
Tabela 4 - Referências das sondas de instrumentação.....	23
Tabela 5 -Características do sensor de humidade e temperatura, HD 9008 TR [16].....	25
Tabela 6 – Identificação dos módulos recetores a partir da Figura 13.....	29
Tabela 7 – Nomenclatura definida para apresentação dos resultados	32
Tabela 8 - Síntese dos resultados da temperatura interior do compartimento de referência e experimental efetuados entre o dia 5 e 21 de Agosto	40
Tabela 10 - Síntese da simulação da temperatura interior do compartimento de referência e experimental efetuada entre o dia 5 e 21 de Agosto	43
Tabela 11 - Síntese dos principais resultados da monitorização e simulação realizadas	46

Lista de abreviaturas

AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
BASF	<i>Building Loads Analysis and System Thermodynamics</i>
BLAST	<i>Building Loads Analysis and System Thermodynamics</i>
CESAM	Centro de Estudos do Ambiente e do Mar
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
DOE	<i>Department of Energy (United States)</i>
EPBD	Desempenho Energético dos Edifícios
GEE	Gases de Efeito Estufa
INE	Instituto Nacional de Estatística
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
MDSC	<i>Modulated Differential Scanning Calorimeter</i>
PCM	<i>Phase Change Materials</i>
RECS	Regulamento de desempenho Energético dos edifícios de Comércio e Serviços
REH	Regulamento de desempenho Energético dos edifícios de Habitação
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
SCE	Sistema de Certificação Energética dos edifícios
U	Coeficiente de transmissão térmica
UA	Universidade de Aveiro
UE	União Europeia

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A evolução da sociedade humana está profundamente relacionada com a disponibilidade de recursos e a capacidade de gerar energia. Esta é fundamental para o bem-estar económico e social, é essencial para colmatar necessidades básicas, como alimentação, conforto, comunicação, assim como para o desenvolvimento de tecnologias e riqueza da indústria. As questões negativas da produção e consumo de energia prendem-se com a exploração excessiva dos recursos e o impacte nefasto no ambiente, como é possível observar atualmente com as alterações climáticas, a destruição dos ecossistemas e os efeitos nocivos na saúde humana. Nesta perspetiva urge a necessidade de desenvolver investigação, inovação e desenvolvimento tecnológico, aplicados à eficiência energética, tendo em vista o desenvolvimento sustentável e desta forma otimizar o consumo energético[1].

Na Europa o setor dos edifícios é responsável pelo consumo de aproximadamente 40 % da energia final. No entanto, mais de 50 % deste consumo pode ser reduzido através de medidas de eficiência energética, o que pode representar uma redução anual de 400 milhões de toneladas de CO₂ (valor aproximado da totalidade do acordo da União Europeia acerca do Protocolo de Quioto).

Em Portugal, o consumo de energia por parte dos edifícios representava 29 %, em 2011, sendo este setor a origem do consumo de 62 % de energia elétrica. Esta tendência tem vindo a aumentar com o acréscimo da qualidade e conforto (aquecimento e arrefecimento) dos edifícios. Os consumos associados ao conforto térmico registam 21,5 % e 0,5 % destinados ao aquecimento e arrefecimento, respetivamente, do consumo energético do setor residencial[2],[3].

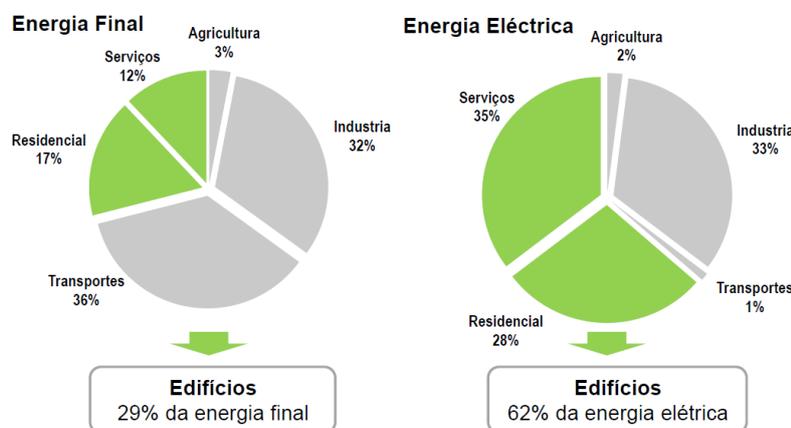


Figura 1 - Balanço energético de 2011 (Fonte: DGEG)

De forma a colmatar este problema, a política nacional tem avançado com legislação relativa ao desempenho energético dos edifícios. Nesta perspetiva surge o Decreto-Lei 40/90, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), com os seguintes objetivos:

- Melhoria das condições de conforto;
- Minimização de patologias/condensações;
- Qualidade térmica envolvente = isolamento térmico e vidros duplos;
- Fatores solares máximos.

Em 1998 foi publicado o Decreto-Lei 118/98, Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE), com os subseqüentes propósitos:

- Uso racional de energia;
- Qualidade das prestações dos equipamentos instalados;
- Segurança das instalações;
- Regulamento incide sobre dimensão e qualidade dos sistemas técnicos.

A Diretiva 2002/91/CE, Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD), apresenta os seguintes fins:

- Enquadramento geral para uma metodologia de cálculo do desempenho energético integrado dos edifícios;
- Aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos novos edifícios;
- Aplicação de requisitos mínimos para o desempenho energético dos grandes edifícios existentes que sejam sujeitos a importantes obras de renovação;
- Certificação energética dos edifícios;
- Inspeção regular de caldeiras e instalações de ar condicionado nos edifícios e, complementarmente, avaliação da instalação de aquecimento quando as caldeiras apresentarem mais de 15 anos.

Atingindo os propósitos anteriormente descritos, é possível aumentar a eficiência energética nos edifícios, potenciar a melhoria da qualidade dos edifícios (quer novos, quer existentes), reduzir a dependência externa de energia e reduzir as emissões de gases de efeito de estufa (GEE), contribuindo para o cumprimento do Protocolo de Quioto e também proteger e informar melhor a população. Esta Directiva foi transposta em 2006 para a ordem jurídica nacional e é composta por três Decretos-Lei, o Decreto-Lei n.º 78/2006 de 4 de Abril, Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE), o Decreto-Lei n.º 79/2006 de 4 de Abril, Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios (RSECE) e o Decreto-Lei n.º 80/2006 de 4 de Abril, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE).

Em 2010 surge a Diretiva 2010/31/EU com a revisão do Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) da Diretiva 2002/91/CE.

Por fim, o Decreto-Lei 118/2013, que transpõe a Diretiva 2010/31/EU, vem contribuir para a contínua melhoria do desempenho dos edifícios de habitação com a existência do Regulamento de desempenho Energético dos edifícios de Habitação (REH), Regulamento de desempenho Energético dos edifícios de Comércio e Serviços (RECS) e o Sistema de Certificação Energética dos edifícios (SCE). Este decreto assenta nos princípios a seguir descritos:

- Refinamento no cálculo;
- Diminuição das necessidades energéticas;
- Requisitos de eficiência;
- Aposta na reabilitação;
- Continuação da aposta nas energias renováveis.

1.2 Objetivo

O principal objectivo do projeto baseia-se na simulação em computador do comportamento de um edifício solar passivo com parede de Trombe usando *PCM*, através do programa *EnergyPlus* do *DOE* dos EUA e a comparação dos resultados com dados experimentais a obter em ensaios.

1.3 Metodologia

A metodologia deste projeto compreende em quatro diferentes procedimentos. O trabalho foi iniciado pela revisão bibliográfica sobre edifícios solares passivos, com particular atenção a aplicações de *PCM* em edifícios, seguindo numa segunda fase correspondente ao trabalho experimental que passa pela produção de lajetas de cimento, composto de Leca® e *PCM* e colocação das mesmas no interior de uma célula de teste, como parede de Trombe, existente no campus da UA, destinada a obter dados de energia e de conforto característicos em edifícios. No terceiro procedimento leva-se a cabo a simulação do comportamento térmico da mesma célula de teste no programa *EnergyPlus*. Por fim, são comparados os parâmetros de energia e de conforto característicos referidos na segunda e terceira fases.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro apresenta um breve enquadramento da temática e os objetivos pretendidos. O segundo capítulo explora o estudo bibliográfico acerca dos diferentes tipos de edifícios solares passivos, materiais constituintes em construções deste tipo, especialmente PCM e ainda o programa de simulação dinâmica utilizado neste tipo de aplicações. No terceiro capítulo é descrita a construção do material a ser utilizado nas medições tendo em conta as suas propriedades, a construção da estrutura para a edificação da parede de Trombe e as características da célula de teste e do sistema de aquisição de dados. No quarto capítulo, são expostos e analisados os resultados obtidos pela célula de teste e a sua comparação com os dados adquiridos pelo *EnergyPlus*. Para finalizar, o quinto capítulo refere-se às conclusões fundamentais deste estudo experimental e às sugestões para projetos futuros.

2 Edifícios solares passivos

2.1 Introdução

Como necessidade de otimizar a climatização e diminuir o consumo de energia nos edifícios tem-se vindo a desenvolver várias alternativas, nas últimas décadas, como o armazenamento de calor nos edifícios [4]. Neste Capítulo faz-se a classificação das diferentes terminologias solares passivas, com uma maior incidência nas implicações energéticas das mesmas. A relação entre a configuração dos elementos construtivos e os ganhos e perdas de calor é comprometida pela influência da colocação das diversas camadas da envolvente exterior dos edifícios e tipos de materiais na sua composição.

A utilização de materiais de mudança de fase (*Phase Change Material, PCM*) apresenta uma elevada capacidade de armazenamento de energia térmica durante a mudança de fase, nos edifícios solares passivos, alterando os picos de aquecimento e arrefecimento e a melhoria do ambiente interno [5].

A construção dos edifícios acarreta questões acerca da previsão do exato comportamento energético, pois é influenciada por vários fatores, como as condições climáticas do ambiente e as características de construção. Como solução deste problema, têm sido desenvolvidos métodos de engenharia, métodos estatísticos e métodos de inteligência artificial [6]. O *EnergyPlus* surge aqui para simular a carga térmica e analisar o comportamento energético dos edifícios. Este tem proveniência nos programas *Building Loads Analysis and System Thermodynamics (BLAST)* e *DOE-2.1E*. O *EnergyPlus* é um mecanismo de simulação com entrada e saída de arquivos de texto, efetua operações que permitem calcular as necessidades de carga de aquecimento e arrefecimento, num intervalo de tempo estipulado, as condições de sistema secundário AVAC e o consumo de energia de equipamentos e outras simulações que são necessárias para prever o desempenho térmico de um edifício. Esta solução integrada fornece uma previsão mais precisa da temperatura do espaço, essencial para o sistema e dimensionamento das plantas e conforto e saúde dos utilizadores [7].

2.2 Edifícios bioclimáticos

O Sol é o interveniente direto e indireto da maior parte dos acontecimentos meteorológicos e das características ligadas ao conforto térmico. Este comporta-se como um corpo negro a 5762 K quando emite radiação e apenas uma fração da radiação solar emitida atinge a superfície terrestre, que se subdivide da seguinte forma: 21 % atinge a Terra diretamente; 29 % difundida pelas nuvens e atinge a Terra indiretamente; 31 % reflectida por poeiras e partículas existentes na atmosfera terrestre; 19 % absorvida pelas nuvens e atmosfera.

A energia solar é utilizada nos edifícios de formas distintas, diferenciando-se entre sistemas passivos e activos. Esta é a fonte da maioria das energias renováveis, em que a sua base da captação ocorre na totalidade dos sistemas passivos e alguns ativos, sendo para o efeito utilizados principalmente vãos envidraçados. O vidro possibilita a passagem da radiação solar nos comprimentos de onda de luz visível e infra-vermelhos próximos (cerca de 40 a 45 % da radiação total emitida pelo sol), então permitem a passagem de infravermelhos de comprimento de onda larga a partir de 3,5 μm , sendo praticamente opacos aos comprimentos de onda superiores a 5 μm .

O edifício solar passivo provém do conceito de edifício bioclimático. A arquitetura bioclimática compreende a construção no seu ambiente natural, a partir das suas características de localização e da topologia de edifício (inclinação, vegetação, sol, vento, etc.), de modo a diminuir o consumo de energia e fomentar o conforto e iluminação natural. Este conceito assenta nos preceitos de que primeiro é necessário receber o calor, transformá-lo e distribuir e de seguida mantê-lo (v. Figura 2). Os edifícios solares passivos foram estudados para aumentar a eficiência energética através do aproveitamento da energia solar devido à sua conceção (forma, orientação, isolamento, etc.); à qualidade das suas componentes (parede, pavimento, cobertura, janelas, etc.); e ao seu desempenho ao nível da ventilação. Estas edificações apresentam características típicas, como vãos envidraçados de grandes dimensões a abranger a maioria das fachadas, rara vegetação envolvente das mesmas fachadas e sombreamento podendo este valer-se de palas, pois funcionam na perfeição como protetor à luz solar, especialmente nos meses de Verão. Os edifícios solares passivos apoiam-se em seis princípios essenciais [8]:

1. Isolamento térmica reforçada com vãos envidraçados de boa qualidade;
2. Eliminação de pontes térmicas;
3. Excelente impermeabilização ao ar;
4. Ventilação com duplo fluxo (com recuperador de calor);
5. Captura ideal, mas passiva da energia solar e do calor vindo do solo;
6. Limitação dos consumos de energia dos aparelhos eletrodomésticos.

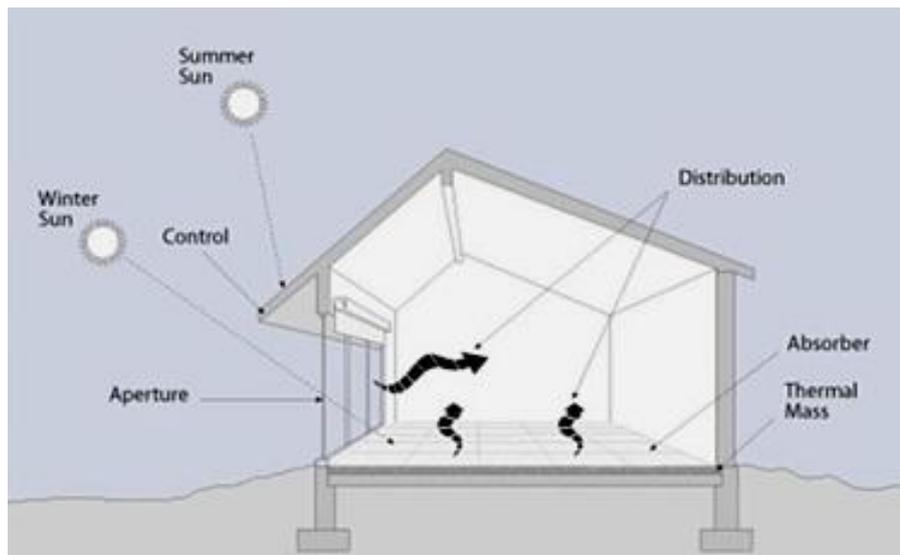


Figura 2 – Elementos chave de um edifício solar passivo [9]

O Edifício Solar XXI (v. Figura 3) construído pelo Laboratório Nacional de Energia e Geologia é um exemplo, ao mais alto nível, da implementação dos conceitos anteriores referidos. Segundo a Diretiva do desempenho energético dos edifícios (EPBD), um edifício com necessidade de energia quase-nula (nZEB) é um edifício com desempenho energético muito elevado. As necessidades de energia são quase nulas ou muito pequenas e deverão ser cobertas em grande medida por energia proveniente de fontes renováveis. A construção deste edifício integrou as seguintes estratégias: otimização térmica da envolvente; aumento da área de captação de ganhos solares – fachada solar a sul, como um sistema de ganho direto para aquecimento; dispositivos de sombreamento exteriores nos vãos orientados a sul; fachada fotovoltaica, para aproveitamento elétrico (100 m² e 12 kWp); recuperação de calor por convecção natural na fachada fotovoltaica para aquecimento ambiente; coletores solares para aquecimento ambiente; sistema de arrefecimento passivo por tubos enterrados; e iluminação natural. Os Estados Membros da UE prevêem que até 2020 todos os edifícios novos sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia, principalmente os das autoridades públicas. Planos nacionais são elaborados para aumentar o número de nZEB e a transformar todos os edifícios remodelados em nZEB [10].



Figura 3 – Edifício Solar XXI – Edifício com necessidade de energia quase-nula (nZEB), (Fonte: LNEG)

O Edifício Solar XXI concentra no seu edificado conceitos de um sistema solar passivo para aquecimento ou arrefecimento, através de trocas de energia térmica por intermédio de meios naturais. Os sistemas solares passivos para aquecimento são classificados segundo três conceitos, assentes na junção de sistemas de ganho, ligação armazenamento e transmissão de energia térmica [11]:

- Ganho direto;
- Ganho indireto;
- Ganho Isolado.

2.2.1 Edifício solar passivo de ganho direto

Sistema de ganho direto é o mais simples e mais utilizado (v. Figura 4). A absorção, armazenamento e libertação de energia acontece diretamente no compartimento. Este sistema tem como requisitos: existência de parede ou janelas orientadas a sul (no Verão) para que as perdas não sejam maiores do que os ganhos no Inverno; sombreadores para prevenir o sobreaquecimento no Verão; redução das perdas de calor, com a aplicação de isolamento térmico eficiente dos elementos opacos, isolamento noturno móvel e posicionamento de zonas tampão. As características básicas dos edifícios que utilizam o ganho direto são: uma área de captação a sul, com os espaços a aquecer diretamente expostos à radiação solar e as paredes, lajes de teto e piso, utilizados como armazenamento de calor. A redistribuição do calor armazenado realiza-se por radiação e convecção natural, regulada principalmente pela posição da massa térmica relativamente aos espaços habitáveis. As perdas de calor podem ser diminuídas

através da aplicação de vidros duplos de baixa emissividade e/ou isolando os vidros durante a noite ou em dias encobertos, sendo os mais comuns os estores de PVC exteriores e as portadas de madeira interiores ou exteriores. O fluxo de calor criado, como resultado das diferenças de temperatura, além do processo de acumulação e libertação de calor, é acompanhado pela variação da temperatura interior. Este deve ser mantido dentro dum intervalo tolerável, pois este sistema capta o máximo de energia solar necessária no Inverno e paralelamente minimiza os ganhos solares no Verão, quando estes não são desejáveis, com uma oscilação de temperatura o mais reduzida possível[12].

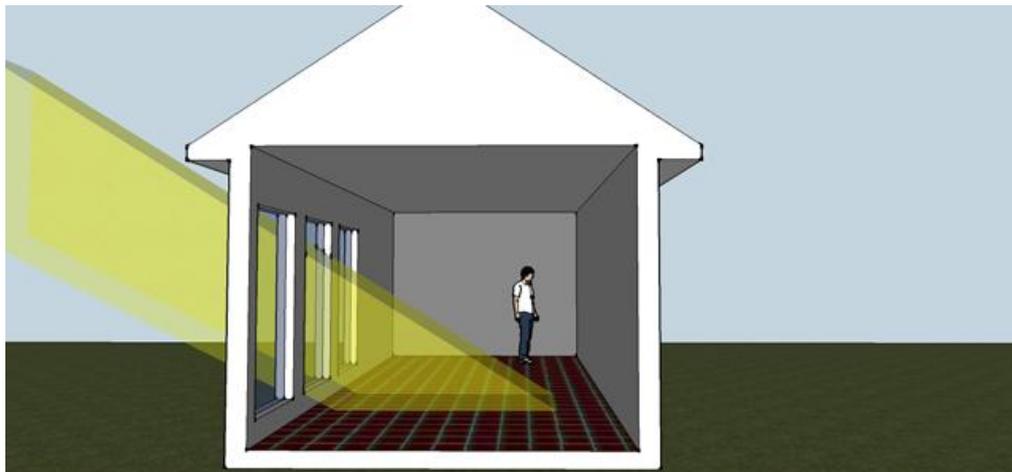


Figura 4 – Exemplo de uma ilustração de um edifício solar passivo de ganho direto [13]

2.2.2 Edifício solar passivo de ganho indireto

O edifício solar passivo armazena a energia térmica numa parede entre as janelas viradas a sul e os espaços a aquecer. Um vidro, normalmente duplo, é colocado a alguns centímetros ou menos à frente da superfície da parede. A radiação absorvida pela massa transforma-se em energia térmica e é transferida para o interior do edifício ao longo de um período de várias horas, normalmente durante a tarde e anoitecer. Alguns edifícios com parede de Trombe possuem aberturas nos pontos altos e baixos da parede, que permitem criar o movimento do ar no compartimento, sendo o ar frio impelido para a abertura inferior da parede de Trombe nas aberturas inferiores e depois de aquecido no interior do espaço entre a parede e o vidro, o ar quente é então libertado nas aberturas da parte superior da parede. Este efeito cria uma circulação de ar natural na divisão. Visto que o espaço a regular não recebe diretamente a radiação solar, estes sistemas de ganho indireto oferecem mais possibilidade de controlo das oscilações de temperatura, evitando sobreaquecimentos. Os três sistemas base de ganho indireto são: as paredes acumuladoras de armazenamento térmico (parede acumuladora não ventilada,

parede de Trombe e Parede dinâmica), as paredes e coberturas de água e o ganho separado. A diferença principal entre os três sistemas é a localização da massa térmica, no primeiro caso na superfície lateral, no segundo caso na cobertura e no último caso encontra-se por baixo do espaço a climatizar [14].

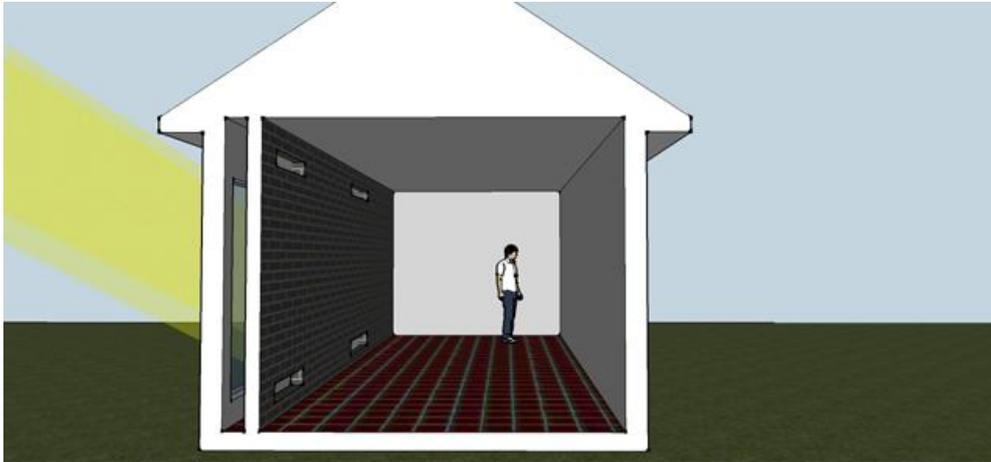


Figura 5 – Exemplo de uma ilustração de um edifício solar passivo de ganho indireto com parede de Trombe [13]

2.2.2.1 Paredes de Trombe

As paredes acumuladoras de energia térmica, localizadas em fachada são chamadas de parede Trombe num sentido geral, mas existem vários tipos:

- a) Parede acumuladora (Parede de Trombe não ventilada);
- b) Parede dinâmica;
- c) Parede de Trombe;
- d) Parede de água.

a) Parede acumuladora: a parede de armazenamento térmico sem aberturas para que possa ocorrer circulação térmica é denominada parede acumuladora ou parede Trombe não ventilada. Esta apresenta um rendimento menor que o de uma parede Trombe ventilada porque, ainda que a temperatura do ar entre o vidro e a parede de armazenamento de energia seja muito superior, a distribuição do calor para o interior é menos uniforme.

Em Portugal, a parede Trombe é uma técnica pouco utilizada. Ainda assim, a sua maior contribuição acontece através da transferência de calor por condução, convecção e radiação [15].

2.2.3 Edifício solar passivo de ganho isolado

Nos sistemas de ganho isolado, a captação dos ganhos solares e o armazenamento da energia captada não se encontram nas áreas ocupadas dos edifícios, pelo que operam independentemente do edifício (v. Figura 6). Esta estrutura separada do restante edifício funciona especificamente para efeitos de recolha de energia térmica. Devido ao sobreaquecimento provocado nos meses de maior calor, o edifício deve possuir saliências nas janelas verticais e evitar clarabóias sem sombra. Este edificado combina normalmente o sistema de ganhos indiretos (parede Trombe) com janelas convencionais e ganhos diretos para as horas do dia (o que permite igualmente a entrada de luz natural, arrefecimento por ventilação natural no Verão e eventual acesso ou vistas ao exterior) [14].

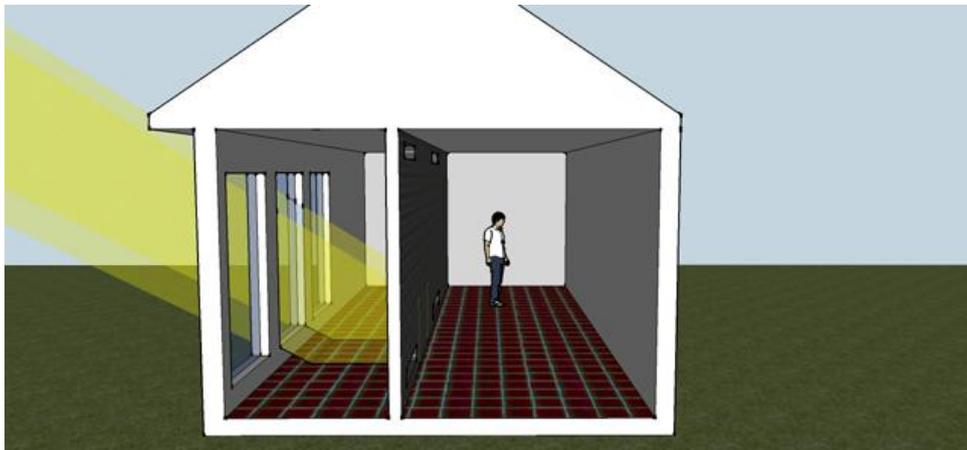


Figura 6 – Exemplo de uma ilustração de um edifício solar passivo de ganho isolado [13]

2.3 Phase Change Materials

A utilização de materiais de mudança de fase (*Phase Change Material, PCM*) apresenta uma elevada capacidade de armazenamento de energia térmica na forma de calor latente, permitindo um armazenamento de calor por unidade de volume superior aos materiais aplicados em soluções construtivas convencionais alterando os picos de aquecimento e arrefecimento e a melhoria do ambiente interno [5]. Estes materiais têm a capacidade de alterar o seu estado físico num determinado intervalo de temperaturas através da absorção ou libertação de energia. Durante este processo endotérmico a temperatura do material mantém-se aproximadamente constante. Este fenómeno apresenta-se numa fase inicial (estado sólido), em que o *PCM* absorve energia na forma de calor sensível, chegando à temperatura de fusão este passa a absorver calor

latente[16]. Quando o limite é atingido, a capacidade de armazenamento de calor latente funde-se por completo e passa armazenar apenas calor sensível novamente (v. Figura 7).

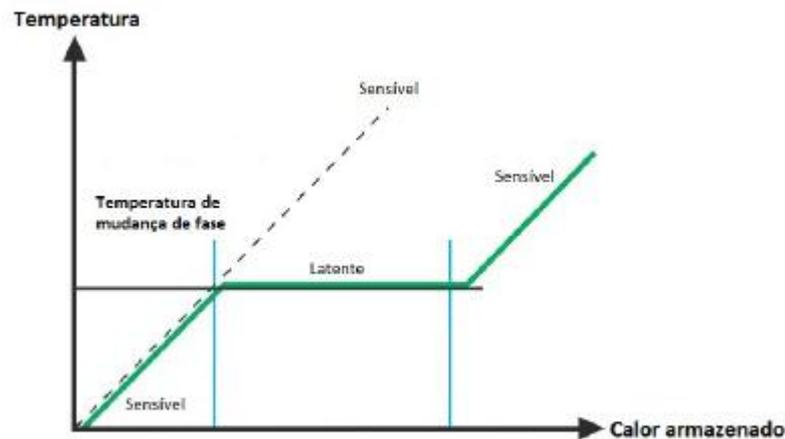


Figura 7 - Comportamento dos PCM em termos de calor sensível e latente armazenado [17]

2.4 Programas de simulação dinâmica

A simulação dinâmica detalhada permite uma análise multizona do desempenho energético do edifício, isto é, permite que sejam consideradas e simuladas simultaneamente múltiplas zonas do edifício.

2.4.1 *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é um programa de simulação dinâmica energética em edifícios, direcionado para a modelação de sistemas de aquecimento, arrefecimento, iluminação, ventilação e outros fluxos energéticos. É uma ferramenta desenvolvida pelo Departamento de Energia dos EUA (DOE) e este foi desenvolvido à medida que a necessidade de ter um programa que proporcionasse soluções integradas ao nível do cálculo de cargas térmicas e do estudo mais detalhado do impacto dos sistemas de climatização e ventilação nos consumos energéticos totais de um edifício. O método de cálculo fundamental do programa baseia-se no balanço de energia no qual a temperatura do ar contido dentro dos espaços é considerada uniforme.

O *EnergyPlus* permite simular a geometria, os elementos da envolvente e os sistemas de climatização que são incorporados nos edifícios. Este programa permite obter soluções favoráveis para o estudo de isolamento de zonas. As capacidades que o torna numa ferramenta útil, partem do existente sistema modular que permite definir várias zonas e, de forma diferenciada, a infiltração ou os ganhos internos para cada zona.

O cálculo das necessidades energéticas de um dado edifício é executado pelo *EnergyPlus* a partir dos dados inseridos pelo utilizador (geometria, materiais da envolvente, sistemas de climatização), recorrendo a um ficheiro de dados climáticos do local de implantação do edifício e gerando o balanço energético com recursos aos diferentes módulos que compõem o programa.

3 Procedimentos de estudo da célula de teste e do material compósito

O trabalho experimental consiste na avaliação do desempenho térmico de lajetas de cimento, Leca® com PCM (parafínico microencapsulado), aplicado numa estrutura de madeira construída para instalar uma parede de Trombe numa célula de teste.

3.1 Caracterização da argamassa com PCM

A formulação de uma argamassa deve considerar a regulamentação presente na Norma Europeia EN 998-1 [18], específica para argamassas de revestimento (reboco) exterior e interior, fabricadas industrialmente. A configuração da argamassa de revestimento interior utilizada neste trabalho experimental, desenvolvida pela Tânia Salgueiro [19], segue a norma acima referida considerando os seus regulamentos com rigor. A composição de Leca® XS com cimento e PCM nas proporções apresentadas na Tabela 1, apresenta características superiores às restantes testadas, visto que oferece melhores resultados mecânica e termicamente e maior condutividade e inércia.

Tabela 1 - Composição da argamassa com PCM utilizada no trabalho experimental (% em massa).

Material	Proporção da mistura em relação à massa (%)
Cimento CZ,I, 42.5R	15
Leca® XS	60
PCM (Micronal DS5040 X)	25

O PCM *Micronal DS 5040 XDBASF* é uma versão em pó seco de uma mistura de cera de parafina refinada e encapsulado feito depolimetil-metacrilato, mais conhecido por acrílico (plástico), altamente reticulado esem formaldeído. Ele armazena o calor latente que é absorvido quando a cera nas microcápsulas muda de fase, de sólido para líquido. O calor é de novo libertado quando a cera solidifica.

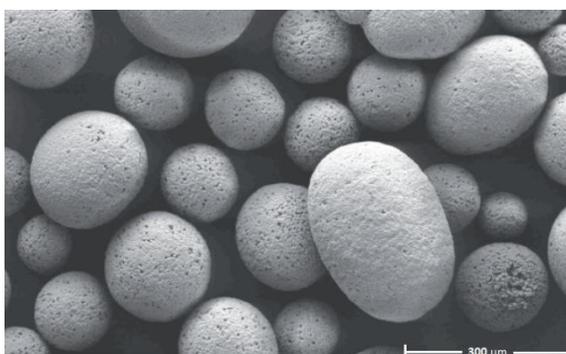


Figura 8 - Micrografia eletrónica do PCM *Micronal DS 5040 X*, as partículas de pó consistem em aglomerados de microcápsulas (Fonte: BASF)

Em aplicações de revestimento interior, o objectivo do *PCM Micronal DS 5040 X* é estabilizar a temperatura interior, a 23 °C durante a maior parte do ano, a fim de melhorar o conforto e reduzir os picos de temperatura para aquecimento e arrefecimento. Este material pode ser empregue de forma passiva ou em combinação com um sistema de arrefecimento ativo e é compatível com a maioria dos materiais de revestimento interior, como cimentos ou madeira, ou incorporação em tintas acrílicas para aumentar a sua capacidade térmica.

Tabela 2 - Propriedades do *PCM MicronalDS5040 X* [20].

Formato físico	Pó
Tamanho das partículas (aproximadamente) / μm	50 - 300
Densidade aparente / kg m^{-3}	300 - 400
Ponto de fusão (aproximadamente) / °C	23
Entalpia de fusão (aproximadamente) / kJ kg^{-1}	96
Faixa de operação / °C	10 - 30
Capacidade térmica (aproximadamente) / kJ kg^{-1}	136
Capacidade de calor na fase fusão (aproximadamente) / kJ kg^{-1}	100

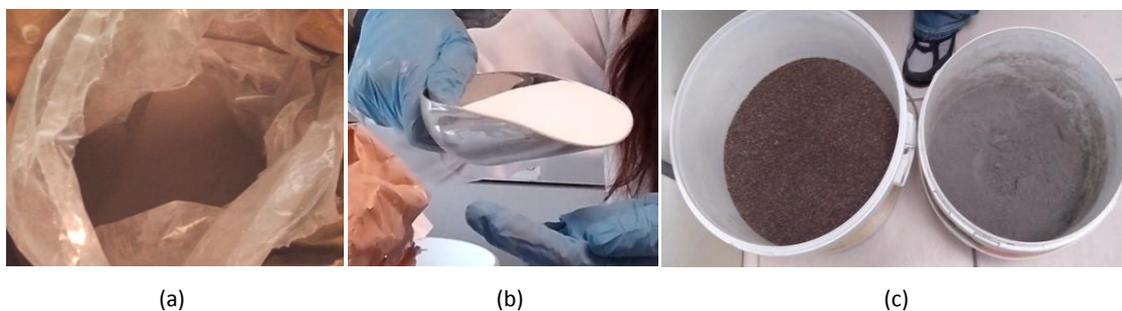


Figura 9 – *PCM Micronal DS5040 X* (a) no saco de 30kg; (b) a ser pesado para a mistura; (c) Leca® XS e cimento

Esta microcápsula contém no seu núcleo uma mistura especial de parafínicos e permite a alteração de 10% do seu volume durante a transição de fase da parafina sem qualquer perda ou vazamento de material. A durabilidade é assegurada pelo produtor, *BASF*. Foram realizados testes de 10.000 ciclos verificando-se que o material cumpre o seu propósito num período de longo prazo, ou seja, a impenetrabilidade e capacidade de calor de fusão permaneceram com a sua constituição inicial. Se 300 ciclos por ano forem considerados como realísticos, os 10.000 ciclos resultam numa durabilidade de mais de 30 anos[20].

A composição da mistura de Leca®, cimento e *PCM* (Tabela 1), surgiu depois de vários estudos terem sido realizados para determinar a melhor formulação, com o intuito de posteriormente caracterizar a argamassa e conseqüentemente avaliar o respetivo desempenho

em termos de propriedades de interesse do produto endurecido (propriedades físicas como densidade e capilaridade, propriedades mecânicas como resistência à flexão, resistência à compressão e módulo de elasticidade e, por último, propriedades térmicas como a condutividade e difusividade térmicas, calor específico e entalpias de fusão e solidificação), Tabela 3.

Tabela 3 – Características da argamassa com *PCM* [19].

Propriedade	Argamassa com PCM
Pico de Fusão / °C	20,58
Pico de Solidificação / °C	17,83
Condutividade Térmica / W m ⁻¹ K ⁻¹	0,20
Calor Específico / kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	1,40
Difusividade Térmica / m ² s ⁻¹	1,68E-07
Inércia Térmica / J m ⁻² K ⁻¹ s ⁻¹	488
ΔT de Fusão / °C	10,26 - 24,85
ΔT de Solidificação / °C	9,33 - 23,16
Entalpia de Fusão / kJ kg ⁻¹	12,73
Entalpia de Solidificação / kJ kg ⁻¹	13,12
MVAed / kg m ⁻³	750
Retração / mm m ⁻¹ (7-28 dias)	1,96
Rf / MPa	1,21
Rc / MPa	3,11
E / GPa	2,1
Coeficiente de capilaridade / g dm ⁻² min ^{-1/2}	1,87
Aderência / N mm ⁻²	-
Configuração da rotura – FP: (A,B ou C)	-
Coeficiente de difusão ao vapor / μ	-
Reação ao fogo (classe)	F

Os resultados do comportamento do fluxo de calor, calor específico, entalpia de fusão e solidificação e a determinação dos intervalos de mudança de fase do *PCM* puro e de uma amostra do compósito da argamassa amassada encontram-se no Anexo A [19].

3.2 Produção das lajetas de argamassa com PCM

A produção da argamassa com *PCM* foi realizada num laboratório em ambiente com condições controladas (temperatura de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ e humidade relativa de $50\% \pm 5\%$) da *Weber Saint-Gobain*, empresa dedicada ao desenvolvimento de argamassas industriais para o mercado da construção e renovação, localizada na Zona Industrial de Taboeira em Aveiro. A formação deste material em lajetas com dimensões de $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ possibilita a colocação das mesmas em forma de parede de Trombe na célula de teste.



Figura 10 – (a) Mistura dos materiais constituintes da argamassa; (b) amassadura da argamassa com PCM através da misturadora

Cada constituinte foi pesado e bem misturado com os restantes e depois colocados num recipiente para serem amassados. A amassadura inicial dura 30 s em marcha lenta na misturadora e de seguida, com uma espátula, elimina-se o produto que se encontra nas paredes do recipiente e envolve-se todo o material para se obter uma boa homogeneização. Por fim, a mistura é novamente amassada durante 1 min e aplicada imediatamente nos moldes, sem repouso. Este método de ensaio de amassado tem como referência a EN NP 196-1 [21]. A quantidade de água adicionada a esta mistura foi numa proporção de $0,85\text{ L kg}^{-1}$ de compósito.

3.2.1 Molde

A criação de lajetas de $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ foi possível através da construção de dez moldes de madeira com as mesmas dimensões.

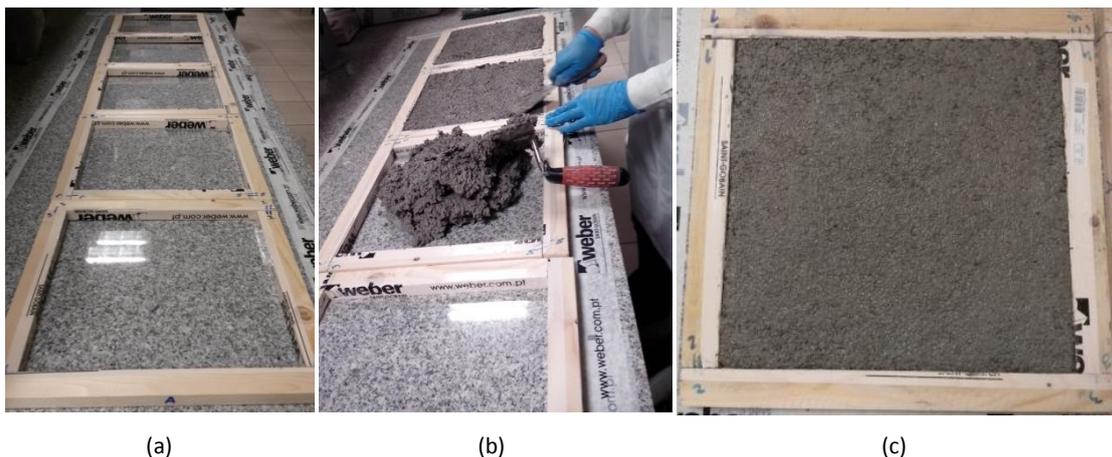


Figura 11 – Moldes construídos para produção das lajetas (a) por encher (b) enchimento e (c) após preenchimento com argamassa

Os moldes e as bancadas foram revestidos de película (Figura 11) para evitar contaminações e possíveis situações que findassem em deformações nas lajetas. O objetivo foi cumprido, as lajetas apresentam as faces lisas ou pouco rugosas e a área do molde completamente preenchida e compactada (Figura 12), após 24 a 48 horas depois de serem desmoldadas. Por fim as lajetas são pesadas e colocadas numa câmara climatizada com temperatura 23 ± 2 °C e humidade 50 ± 5 % HR até às seguintes pesagens, 7 e 28 dias após a primeira pesagem. Como resultado, verificou-se variação da massa e portanto, também da densidade. Ao fim de alguns dias, as lajetas apresentaram pequenas fissuras devido retração existente resultante da perda de água.

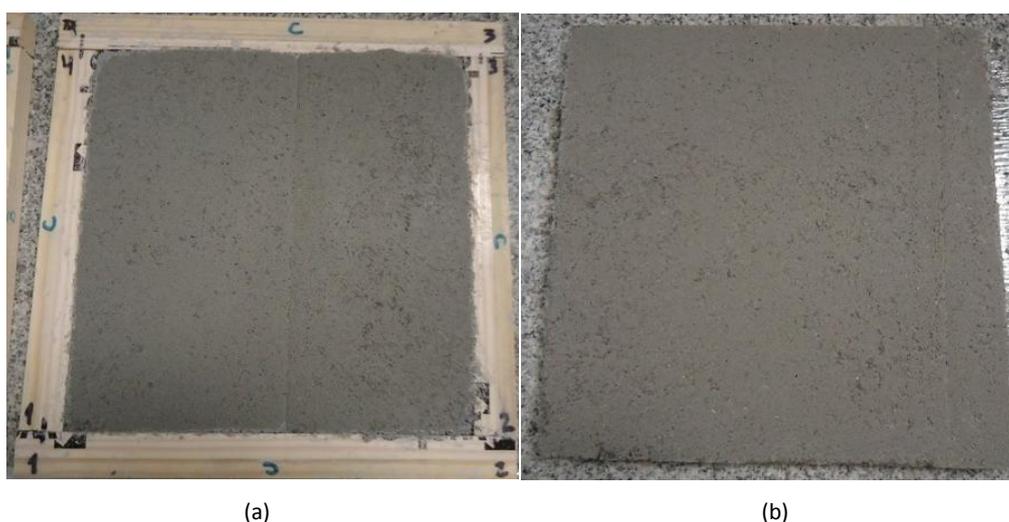


Figura 12 - Aspeto final da produção das lajetas (a) no molde; (b) fora do molde

3.2.2 Pintura das lajetas

De forma a maximizar a absorção da radiação solar foi utilizada tinta de cor preta com o objectivo de absorver a maior quantidade de radiação solar possível. A tinta empregada para o efeito foi a tinta preta CIN *Vinylmatt* utilizada e provado o seu propósito, com este tipo de material, pelo Hélder Nunes [22].

A tinta aquosa *Vinylmatt* tem um aspecto mate profundo com um acabamento acetinado que permite disfarçar imperfeições como é o caso das faces ligeiramente rugosas das lajetas. Esta tinta de grande qualidade e classificação A+ Qualidade do Ar Interior, é constituída à base de dispersão vinílica, comumente utilizada na construção civil, tal como em estuques sintéticos, estanhados, reboco, betão, tijolo, pedra e outros. De fácil aplicação, através de rolo anti-gota, trincha ou pistola *airless*, esta tinta apresenta um rendimento prático de $11-15 \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$ por demão. O tempo de secagem (a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e 60 % de humidade relativa) é de 3 a 4 horas [23].



Figura 13 – Lajetas com tinta preta CIN *Vinylmatt* (a) durante a pintura e (b) após a pintura

A pintura das lajetas foi realizada na cave do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Depois da superfície limpa, uma trincha foi embebida com tinta sobre as faces superior e laterais com uma demão lenta e precisa, de forma a preencher toda a área. Após as lajetas estarem secas o mesmo processo foi repetido na face inferior das mesmas. Não se verificou nenhum comportamento irregular de aderência da tinta durante a pintura e depois desta, aquando das lajetas secas.

3.3 Célula de teste

A estrutura da célula de teste encontra-se instalada no Campus da Universidade de Aveiro, junto da Ponte Pedonal sobre o Estreito de S. Pedro, com as coordenadas GPS 40° 62.809' N e 8° 65.6594' W, orientada a sul, tal como é previsto num edifício solar passivo.



Figura 14 – Localização da célula de teste [Fonte: Google Earth]

A célula de teste tem 7 m de comprimento, 2,35 m de largura e 2,57 m de altura, perfazendo uma área total de 16,45 m². A estrutura possui dois compartimentos de iguais dimensões, nomeadamente os compartimentos de referência e experimental. Ao contrário do que é verificado num sistema solar passivo, esta estrutura não possui uma pala de sombreamento nem se verifica a ventilação natural, prejudicando assim a otimização de conforto ambiente no interior dos compartimentos.

3.3.1 Caracterização da célula de teste

A caracterização dos elementos construtivos da célula de teste é relevante no sentido de contribuir para uma melhor perceção do seu efeito no conforto térmico do interior da estrutura. Os elementos construtivos passam pelos elementos de fachada (Norte, Este e Oeste), fachada divisória, pavimento, cobertura exterior e vão envidraçado.

3.3.1.1 Fachadas Norte, Este e Oeste

A face da célula de teste orientada a Norte contém duas portas em aço lacado a branco, de dimensões 900 mm × 2010 mm, permitindo o acesso a cada um dos compartimentos. As paredes da estrutura são formadas por painel sandwich com 40 mm de espessura, formado por chapa de aço pré-lacada sobre base galvanizada e isolamento intermédio (térmico e acústico) formado à base de resinas de poliuretano auto-extinguível. O painel sandwich apresenta um coeficiente de transferência térmica de $0,51 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e boa resistência à humidade.

3.3.1.2 Fachada divisória

A constituição da parede divisória dos dois compartimentos é igual às paredes acima mencionadas. Aqui foram colocadas placas de poliestireno expandido sem encaixe (EPS 100), com 30 mm de espessura, revestindo toda a área da parede. A condutibilidade térmica de $0,036 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e resistência térmica de $0,75 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C W}^{-1}$ deste material de isolamento permite a redução da transmissão térmica entre compartimentos, a fim de se obter resultados mais fiáveis na análise do comportamento térmico de cada compartimento.

3.3.1.3 Pavimento

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

3.3.1.4 Cobertura

A cobertura da estrutura é constituída por uma camada inferior em teto falso constituído por chapa perfilada galvanizada em poliéster e silicone branco pirinéu 1006 com 0,05 mm de espessura. A camada superior é de chapa galvanizada com perfis conformados a frio sobre a qual está acumulado um conjunto de tubos galvanizados com dimensões de 40 mm × 30 mm × 1,5 mm e onde está fixada uma chapa perfilada do tipo HT-30 com 0,6 mm de espessura. Com vista a aumentar a capacidade de isolamento da cobertura, estas duas camadas estão separadas por fibra de vidro com lâmina anti-humidade, com espessura de 80 mm.

3.3.1.5 Vão envidraçado

A fachada da célula de teste orientada a Sul é constituída por duas vitrinas de caixilharia em alumínio lacado a branco (1800 mm × 2280 mm) com vidro duplo incolor e sem proteção solar de 5 mm + (12 mm) + 5 mm. O vão envidraçado apresenta uma transmissão luminosa de 80 %, fator solar de 0,75 %, coeficiente de transmissão térmica (U) de 2,8 e coeficiente de sombreamento de 0,85 %.

3.3.2 Parede de Trombe

A parede de Trombe foi construída no interior do compartimento experimental no início do mês de Agosto, na face Sul, apenas a 5 cm do vão envidraçado, criando assim uma caixa de ar entre o vão envidraçado e a parede, não sendo este sistema ventilado. A escolha do material da estrutura passou por várias opções, tendo sido a madeira a eleita. Na tomada desta decisão surgiram alguns aspetos a ter em conta:

- a estrutura deveria suportar o peso das lajetas e garantir a respetiva segurança e dos intervenientes;
- a mobilidade das lajetas ser assegurada, no caso destas poderem ser retiradas e voltar a ser colocadas;
- a certificação de que o material da estrutura não é bom condutor térmico para a absorção da radiação solar não ser influenciada e desta forma não comprometer os dados monitorizados;
- o material e construção não serem excessivamente dispendiosos.

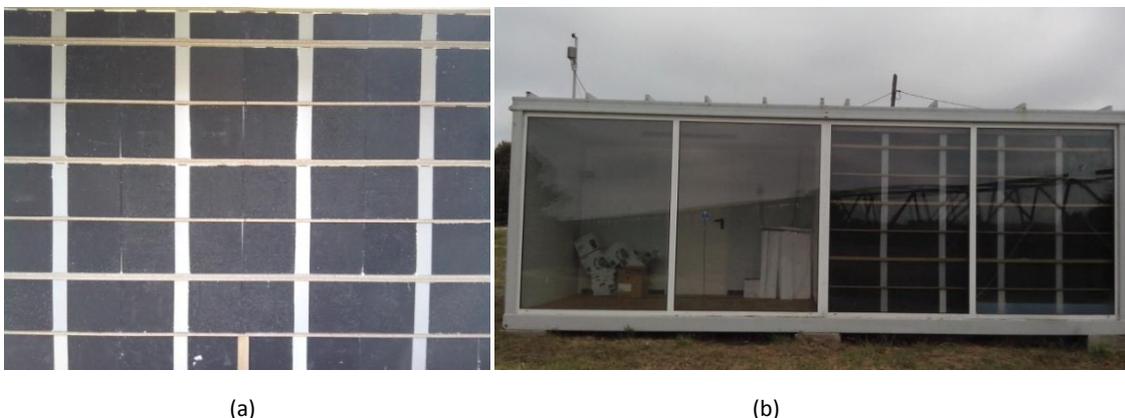


Figura 15 – Parede de Trombe erigida depois da construção da estrutura em madeira (a) dentro do compartimento experimental; (b) parte exterior da célula de teste

As ripas de madeira de pinho utilizadas na construção da estrutura possuem dureza e durabilidade médias, trabalhabilidade fácil com ferramentas manuais ou máquinas e boa resistência. A área total preenchida pelas lajetas é de 5,625 m² e a área da estrutura de madeira ocupa aproximadamente 2 m² (v. Figura 15). Apesar de não constar na Figura 15, o vão envidraçado na célula de referência foi forrado a cartolina preta aquando da monitorização.

3.4 Sistema de aquisição de dados

A célula de teste está equipada com sensores colocados no exterior e interior da estrutura, que medem a temperatura e humidade relativa externas e internas, a radiação solar global e o fluxo de calor. O sistema de aquisição de dados monitorizados é realizado por um *software* que recebe e armazena os dados.

3.4.1 Sensores

Tabela 4 - Referências das sondas de instrumentação.

Referência	Designação	Localização	Detalhes
ID1CH0	Hygro_Jumo0	Célula de referência	Humidade relativa
ID1CH1	Hum_DeltaOhm1	Exterior	Humidade relativa
ID1CH2	Temp_DeltaOhm2	Exterior	Temperatura
ID1CH3	Rad_DeltaOhm3	Exterior	Rad. Ext. Piranómetro
ID1CH4	Vento_Darrera4	Exterior	Anemómetro
ID2CH0	Temp_1	Exterior	Temperatura Exterior
ID2CH1	Temp_2	Célula de referência	Vidro
ID2CH2	Temp_3	Célula de referência	Face Norte
ID2CH3	Temp_4	Exterior	Temperatura Exterior
ID2CH4	Temp_5	Exterior	Temperatura Exterior
ID2CH5	Temp_6	Célula de referência	Parede divisória
ID3CH0	Temp_7	Célula experimental	Parte inferior Sul
ID3CH1	Temp_8	Célula experimental	Parede de Trombe
ID3CH2	Temp_9	Célula experimental	Face Norte

Referência	Designação	Localização	Detalhes
ID3CH3	Temp_10	Célula experimental	Parte superior Norte
ID3CH4	Temp_11	Célula experimental	Parede divisória
ID3CH5	Temp_12	Célula experimental	Parte inferior
ID4CH0	Temp_Jumo2	Célula experimental	Temp. Face Norte
ID4CH1	Hygro_Jumo2	Célula experimental	Humidade relativa
ID4CH2	FluxoCalor1	Célula de referência	Vidro
ID4CH3	FluxoCalor2	Célula experimental	Parede deTrombe

3.4.1.1 Temperatura e humidade relativa (interior) – Sonda JUMO 907021/21

As sondas *JUMO 907021/21* medem a temperatura e humidade relativa interiores, estão colocadas junto da parede interior Norte, em cada um dos compartimentos e funcionam numa gama de medição de 0 a 100 % HR (0 a 50 °C). Estas sondas são particularmente utilizadas para aplicações AVAC e como acessórios possuem dois sensores, um de temperatura interior (*PT100* de classe tolerância A da *Delta Ohm*) e outro de humidade capacitivo (erro de medição a 45 % de HR é tipicamente de $\pm 0,5$ % HR °C⁻¹) [24] e [25].

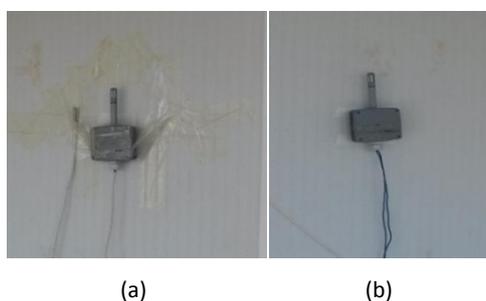


Figura 16 - Sondas *JUMO 907021/21* na parede interior Norte (a) célula experimental e (b) célula de referência

3.4.1.2 Temperatura e humidade relativa exterior – Sonda HD 9008 TR

A sonda *HD 9008 TR* mede a temperatura e humidade relativa exteriores e está colocada na cobertura da célula de teste, numa estrutura metálica instalada num suporte com 12 anéis da *Delta Ohm*, de forma a evitar as correntes de ar, a radiação solar e a precipitação. Este aparelho funciona através do sensor de temperatura (*PT100*) e de um sensor capacitivo de humidade do tipo H6100 [26].

Tabela 5 -Características do sensor de humidade e temperatura, HD 9008 TR[26].

Parâmetro	Valores característicos	
Temperatura de trabalho da parte eletrónica	-40a +80°C	
Temperatura de trabalho do senso	-40a +80°C	
Alimentação do transmissor	7a 30 Vdc (4 a 20mA)	
Capacidade	300 pFtyp.	
Humidade	Faixa de medição	5a100 % HR
	Precisão à 20°C	±2%HR (5 a 90%RH); ±2,5%HR (para os demais valores da faixa)
	Tempo de resposta à 63% da variação final	3 min. com filtro; 6 seg sem filtro
	Sinal de saída	0%HR = 4,0 mA; 100% UR = 20,0 mA
	Resistência com carga	$R_{Lmax} = (Vdc-7) / 22 \text{ mA}$
Temperatura	Faixa de medição – configuração padrão	-40 a +80°C
	Precisão	±0,1°C ± 0,1% da medição
	Tempo de resposta à 63% da variação final	3 minutos com filtro 6 segundos sem filtro
	Sinal de saída	-40°C = 4,0 mA; +80°C = 20,0 mA
	Resistência com carga	$R_{lmax} = (Vdc-7) / 22 \text{ mA}$
Dimensões	26 x 225 mm	
Comprimento máximo	200 m	
Secção mínima do fio	20AWG - 0,5 mm ²	
Diâmetro máximo do cabo	5 mm	



Figura 17 - Sonda *HD 9008 TR* na célula de teste

3.4.1.3 Radiação global – piranómetro

O piranómetro *LP PYRA 03* de 2ª classe da *Delta Ohm* mede a radiação solar global (W m^{-2}) segundo padrões da ISO 9060. A sensibilidade típica é de $10 \mu\text{V} (\text{W m}^{-2})^{-1}$, o intervalo de medição acontece entre 0 W m^{-2} e 2000 W m^{-2} , o campo espectral entre 305 nm e 2800 nm (50 %), ângulo de visão de $2 \pi \text{sr}$ e a temperatura de funcionamento entre $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ e $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Este piranómetro está colocado sobre a cobertura da célula de teste [27].



Figura 18 - Piranómetro *LP PYRA* da *Delta Ohm* na cobertura da célula de teste

3.4.1.4 Fluxo de calor - fluxímetros Hukseflux HFP01

Os fluxímetros *Hukseflux HFP01* foram utilizados nas medições da taxa de transferência de calor que flui através da parede de Trombe e do vidro coberto de cartolina de cor preta, no interior dos compartimentos da célula experimental e de referência, respectivamente. Estes fluxímetros são compostos de um material de cerâmica-plástico, resultando numa baixa resistência térmica total. A gama de medição deste aparelho é de -2000 W m^{-2} a 2000 W m^{-2} , a gama de temperatura é de -30 °C a 70 °C , a sensibilidade nominal de $50 \mu\text{V (W m}^{-2})^{-1}$ e a precisão típica esperada (12h totais) de $-15 / + 5 \%$ nos solos mais comuns e $-5 / + 5 \%$ nas paredes[28].

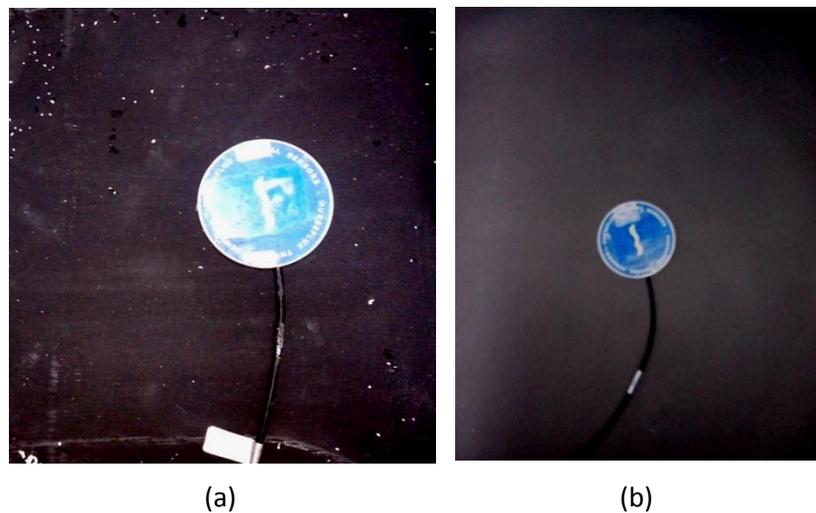


Figura 19 -Fluxímetro *Hukseflux HFP01*(a) na parede de Trombe da célula experimental; (b) no vidro com cartolina preta da célula de referência.

3.4.1.5 Temperatura interior - sondas *PT100*

As sondas *PT100* são termorresistências ou RTD (*Resistive Temperature Detectors*), sensores de temperatura constituídos por metais de resistência elétrica com elevado coeficiente de temperatura. O material mais utilizado nestas sondas é a platina por ser mais estável e linear, com resistência de 100Ω a 0 °C . O método de medição é a três fios (compensação simples), método mais comum na indústria, que determina com alguma exatidão a resistência dos fios de ligação e o equipamento de medição fazendo a compensação da resistência e minimizando desta forma os erros [29]. A partir da determinação da média das temperaturas das sondas *PT100* na

célula de referência e na célula experimental (Tabela 4), foi possível medir e comparar as temperaturas atingidas em cada compartimento.

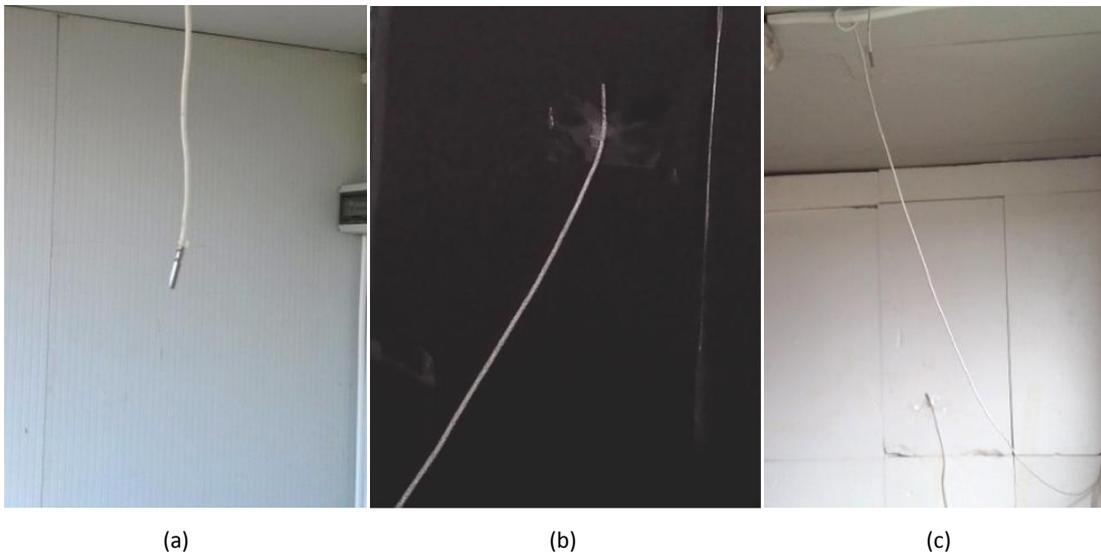


Figura 20 – Exemplo de colocação de sondas de temperatura *PT100* (a) na parte superior da célula de referência; (b) vidro com cartolina na célula de referência; (c) parte superior e parede divisória da célula experimental

3.4.2 Sistema de monitorização

O sistema de monitorização construído no interior da célula de referência, junto da parede Norte, dentro de uma caixa metálica forrada com placas de poliestireno expandido sem encaixe (EPS 100), para sua proteção visto que a estrutura atinge temperaturas muito elevadas. Este sistema de monitorização possibilita a aquisição em tempo real de registos das sondas de medição e é realizado através de módulos recetores, que por sua vez processam e convertem em informação e por último é registado num portátil através do software *EZ Data Logger Basic*.

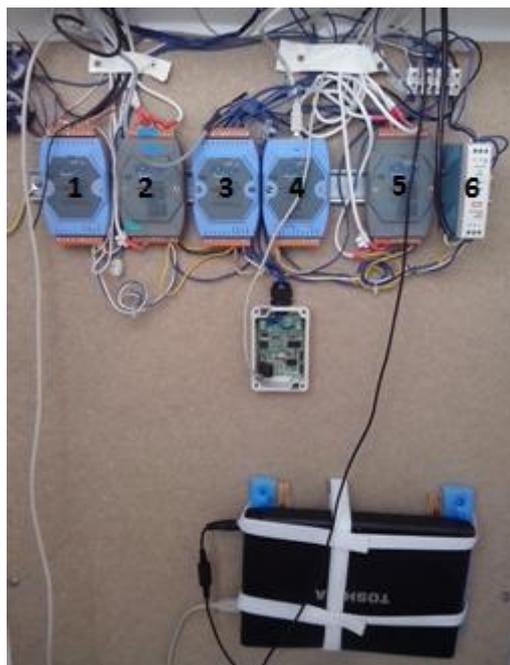


Figura 21 -Sistema de monitorização na célula de referência

Tabela 6 – Identificação dos módulos recetores a partir da Figura 21

Nº	Elemento
1	Módulo de aquisição de dados das sondas <i>HD9008 RT</i> e <i>907021/21</i> da <i>ICPDAS</i> modelo <i>I-7017C-CR</i> ;
2	Módulo de aquisição de dados dos fluxímetros <i>Hukseflux HFP01</i> com 6 entradas <i>RTD</i> (3 fios) da <i>ICPDAS</i> modelo <i>I-7015P-G-CR</i> ;
3	Módulo de aquisição de dados dos fluxímetros <i>Hukseflux HFP01</i> com 6 entradas <i>RTD</i> (3 fios) da <i>ICPDAS</i> modelo <i>I-7015P-G-CR</i> ;
4	Módulo de aquisição de dados das sondas <i>PT100</i> com 6 entradas <i>RTD</i> (3 fios) da <i>ICPDAS</i> modelo <i>I-7015P-G-CR</i> ;
5	Módulo conversor <i>USB</i> para <i>RS485</i> da <i>ICPDAS</i> modelo <i>I-7561-CR</i> ;
6	Fonte de alimentação de 24v da <i>Mean Well</i> modelo <i>MDR-20-24</i> .

O *software EZ Data Logger Basic* regista a informação pretendida em intervalos de 5 minutos, neste caso, através dos módulos recetores.

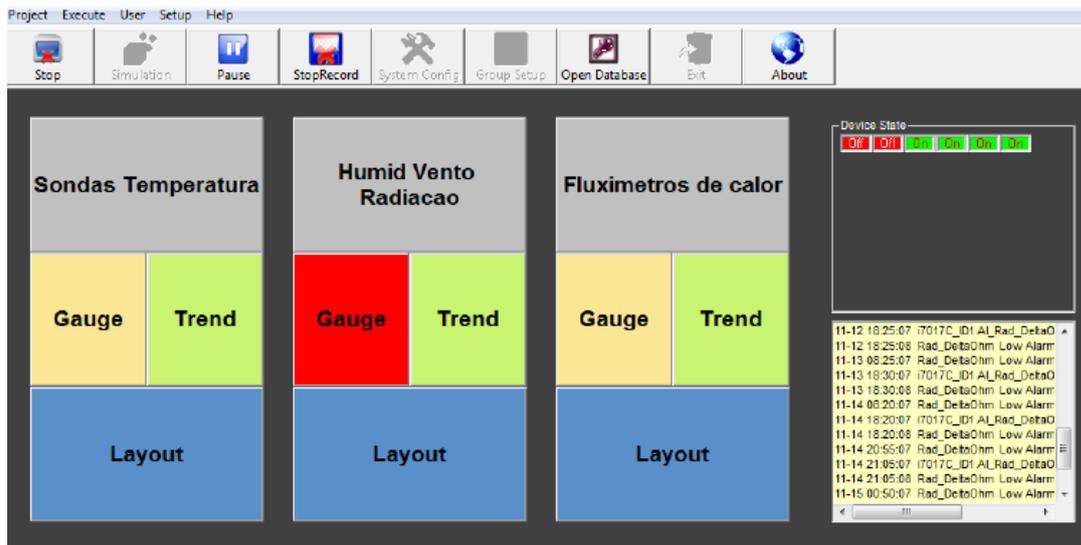
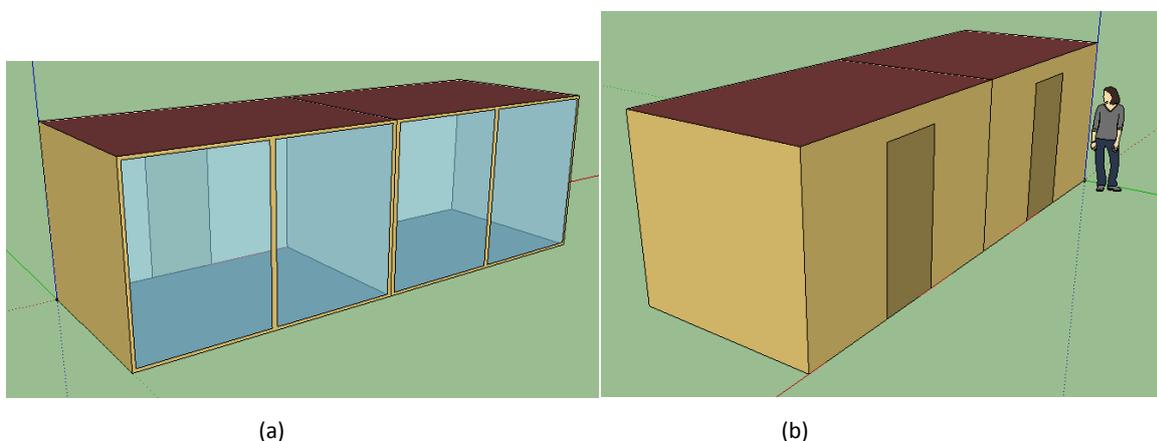


Figura22 - Software EZ Data Logger Basic

3.5 Modelação (*Google SketchUp*) e simulação (*EnergyPlus*)

O *Google SketchUp* é um software da empresa *Google* que permite aos utilizadores realizarem modelação 3D, destinado essencialmente a arquitetos, engenheiros civis, *game developers* e *motion designers*. O formato da modelização em 3D de um edifício no *Google SketchUp* pode ser importado para o programa de simulação *EnergyPlus*. A Figura 23 representa a modelização realizada no contexto deste trabalho, para a célula de teste em estudo, sendo possível observar em diversos ângulos e com ou ainda sem a parede de Trombe.



(a)

(b)

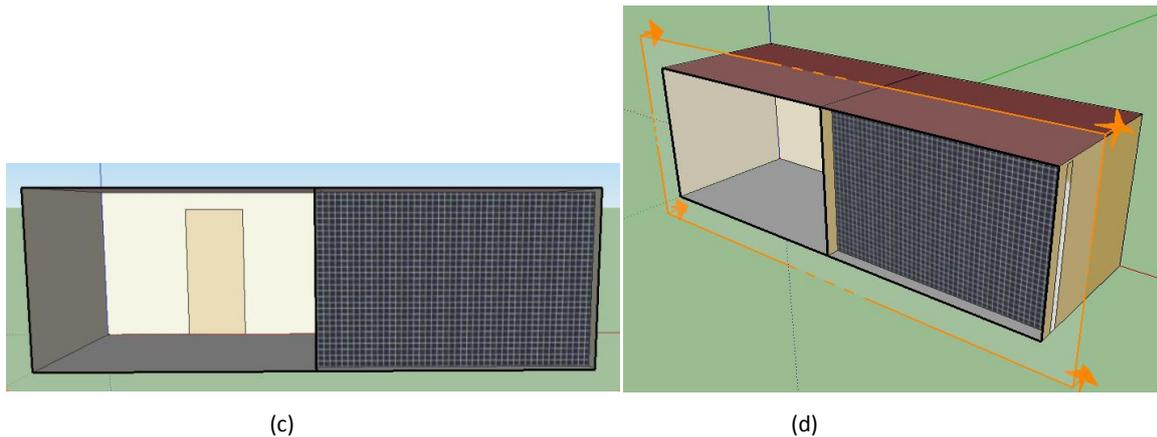


Figura 23 - Modelização da célula de teste no *Google SketchUp* (a) fachada Poente-Sul, sem parede de Trombe; (b) fachada Nascente-Norte com as estradas nos compartimentos; (c) e (d) fachada Sul e Sudeste, respetivamente, com parede de Trombe

Os compartimentos são delimitados separadamente após a modelação em zonas, ZNT1.1 (compartimento de referência) e ZNT2.1 (compartimento experimental com as características do material compósito incorporado na parede de Trombe) no ficheiro *IDF* executado pelo *EnergyPlus* (Anexo B). Os dados meteorológicos referentes à radiação solar global, temperatura e humidade relativa exteriores, fornecidos pelo CESAM, foram incluídos no ficheiro *Weather file data* denominado *PRT_AVEIRO_INET1.epw*, de forma a recolher os resultados pretendidos da simulação.

4 Resultados e discussão

As medições apresentadas neste capítulo são referentes à temperatura e humidade relativa exteriores e interiores, radiação solar global, e fluxo de calor nas lajetas, calculadas sempre pelas médias horárias. Os resultados das medições monitorizadas entre os dias 5 e 21 de Agosto de 2014 nos compartimentos da célula de teste, compartimento experimental (C_EXP) e compartimento de referência (C_REF) têm como propósito avaliar o desempenho térmico das lajetas de cimento, Leca® e PCM, colocadas como parede de Trombe no compartimento experimental. O compartimento de referência apenas possui o sistema de aquisição de dados instalado e isolado junto à parede Norte. O comportamento térmico da parede de Trombe é analisado segundo os dias em que as temperaturas atingem valores máximos, mínimos e no intervalo de operação do PCM.

De forma a validar as medições recolhidas pelas sondas da célula de teste, os resultados da radiação solar global, temperatura e humidade relativa exterior da mesma são comparados com as medições fornecidas pelo Grupo de Meteorologia e Climatologia da Universidade de Aveiro (CliM@UA®) do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, integrado na linha de investigação Qualidade da Atmosfera do Laboratório Associado CESAM (Centro de Estudos do Ambiente e do Mar).

As datas representadas nas figuras das secções 4.1, 4.2 e 4.3 encontram-se definidas da seguinte forma: dia-mês-ano. Estas mesmas figuras quando apresentadas de modo pormenorizado compreendem o intervalo de 12 a 16 de Agosto, pois esse espaço de tempo é o mais longo em toda a monitorização que não sofre qualquer perturbação humana na célula de teste. A nomenclatura utilizada neste capítulo para apresentação dos resultados está definida na Tabela 7.

Tabela 7 – Nomenclatura definida para apresentação dos resultados

Sigla	Significado
C_EXP	Compartimento experimental
C_REF	Compartimento de referência
TI C_EXP	Temperatura interior do compartimento experimental
TI C_REF	Temperatura interior do compartimento de referência
HR	Humidade relativa

4.1 Monitorização das variáveis externas pelo CESAM e célula de teste

As medições efetuadas e fornecidas pelo CESAM [30] no período de 5 a 21 de Agosto permitiram determinar a radiação solar global (v. Figura 24), a temperatura (v. Figura 25) e a humidade relativa exterior (v. Figura 26) e comparar com as medições recolhidas pela célula de teste, de forma a validar as medições recolhidas por esta última.

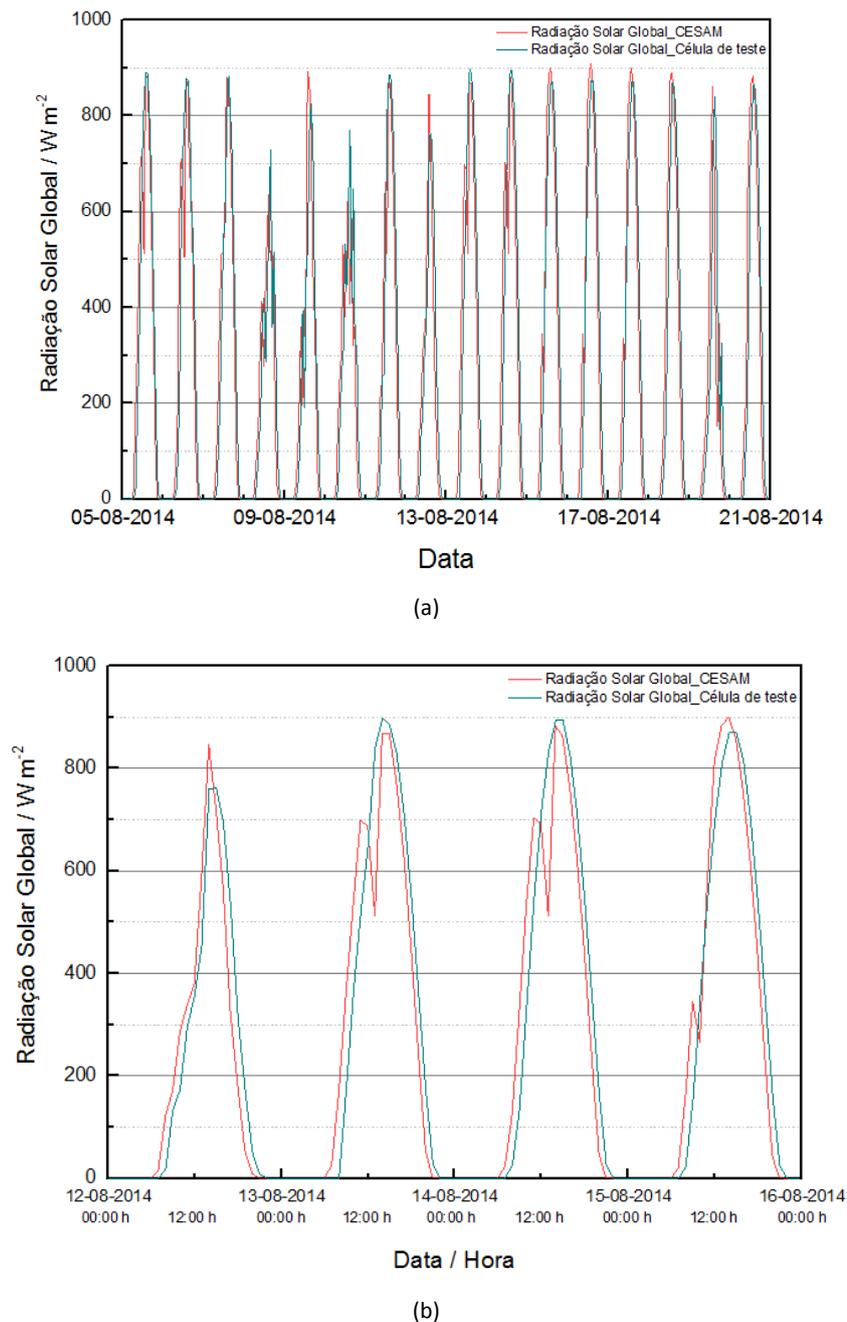
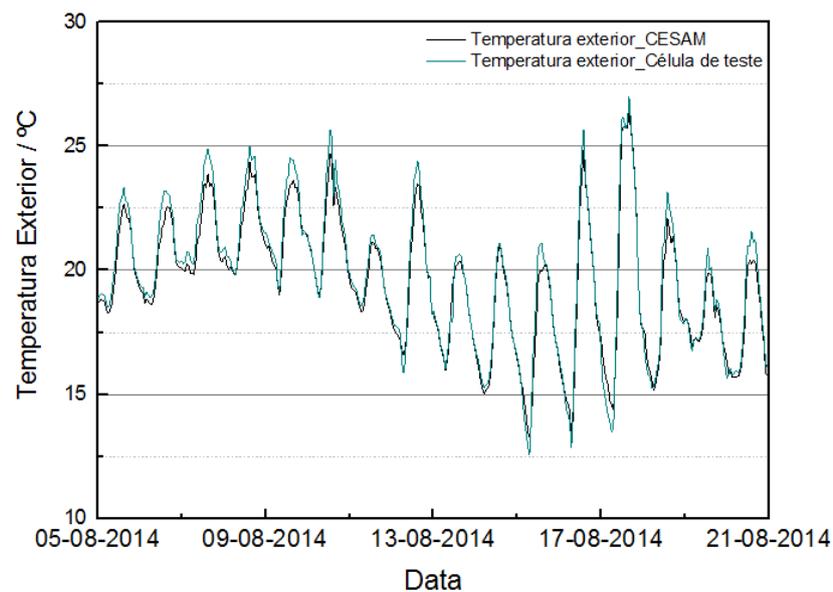
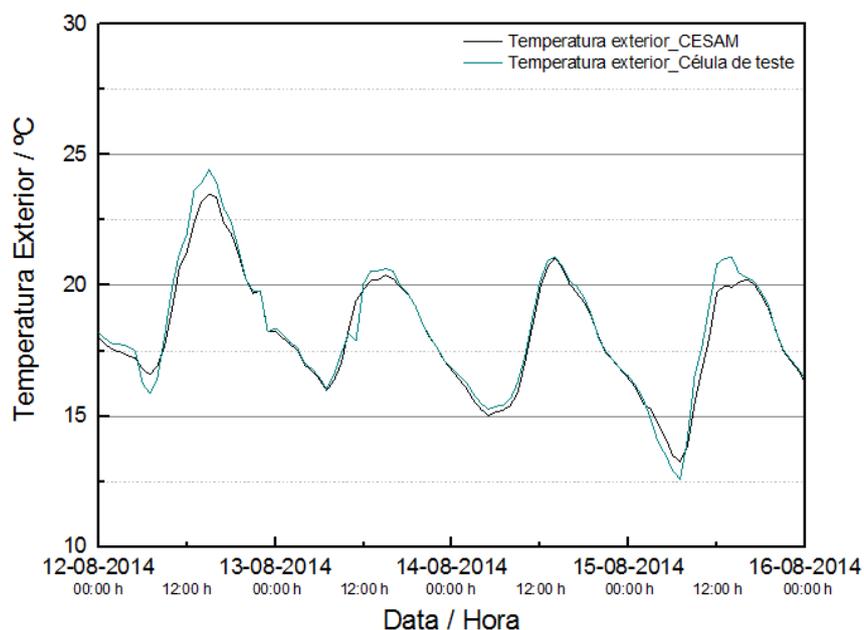


Figura 24 - Radiação solar global efetuadas pelo CESAM e pela célula de teste (a) entre 4 e 22 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor



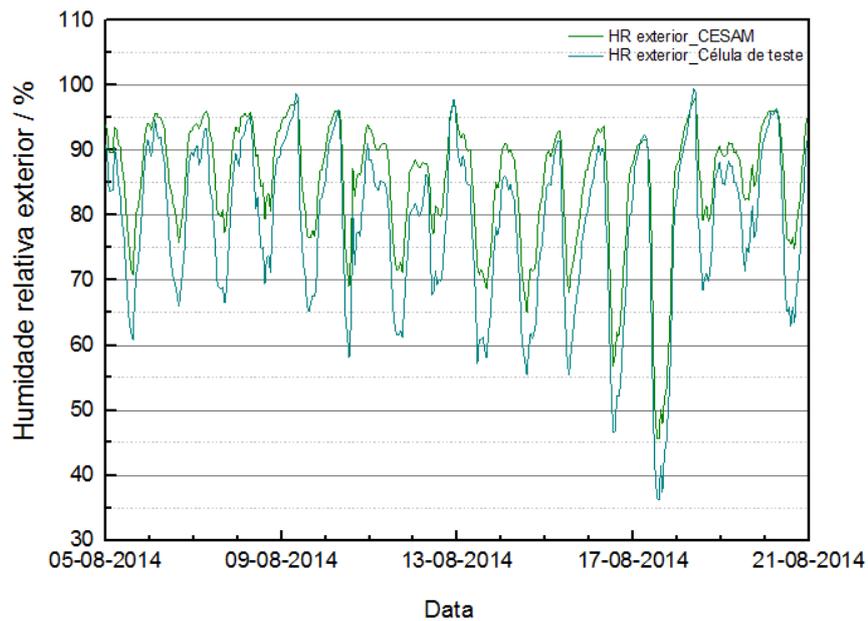
(a)



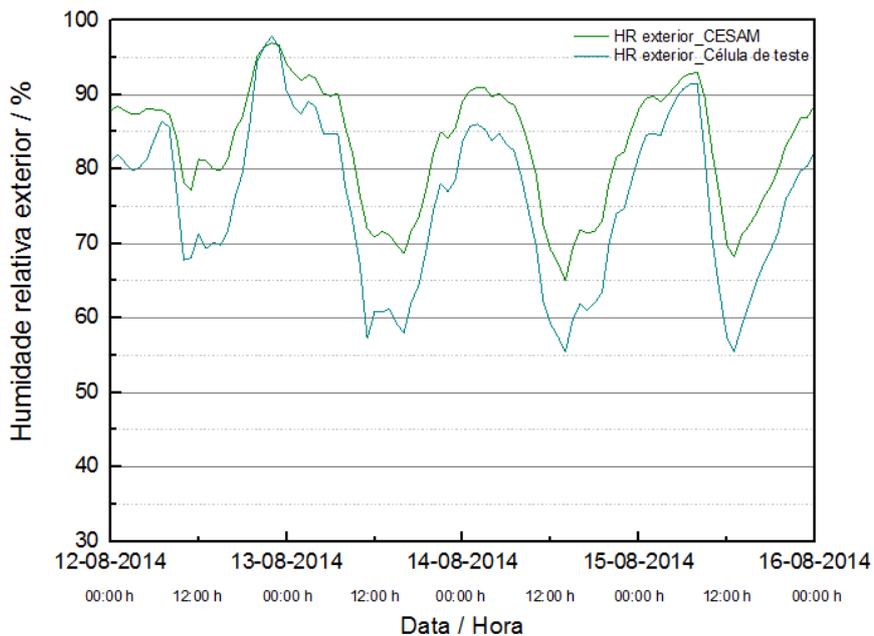
(b)

Figura 25 - Temperatura exterior efetuada pelo CESAM e pela célula de teste (a) entre 5 e 21 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor

A partir da observação dos dados da monitorização da radiação solar global (v. Figura 24) e da temperatura exterior (v. Figura 25) realizadas pelo CESAM e pela célula de teste é possível concluir que os resultados estão concordantes, havendo apenas ligeiros picos mais acentuados de temperatura máxima e mínima, e também um ténue atraso nas medições da radiação solar global, medidos pela célula de teste.



(a)



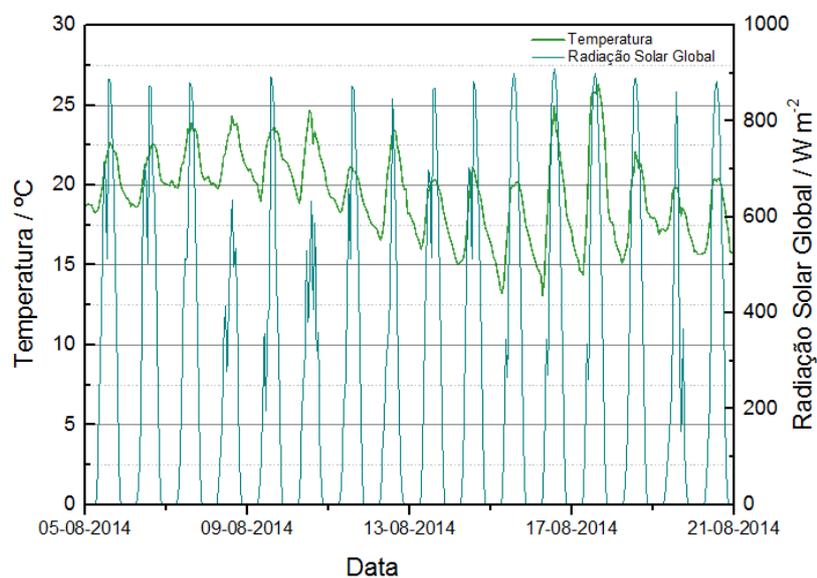
(b)

Figura 26 - Humidade relativa exterior efetuadas pelo CESAM e pela célula de teste (a) entre 5 e 21 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor

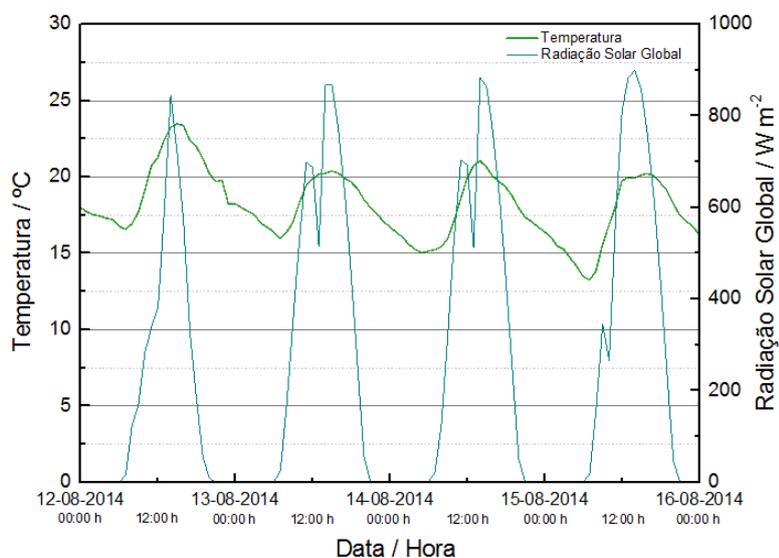
As medições da humidade relativa externa levantam questões sobre quais os resultados mais fiáveis, visto que apesar das curvas de variação e os valores dos picos máximos figurarem comportamento coincidente, os valores mínimos apresentam-se díspares na ordem dos 10 % (v. Figura 26). Na secção 4.2 será relacionada a humidade relativa externa medida pelo CESAM com a humidade relativa interna dos dois compartimentos da célula de teste.

4.2 Avaliação do desempenho térmico – Ensaios experimentais

A avaliação do comportamento térmico da parede de Trombe no compartimento experimental resulta da sua comparação com o compartimento de referência, ambos sob influência das condições verificadas em 4.1.



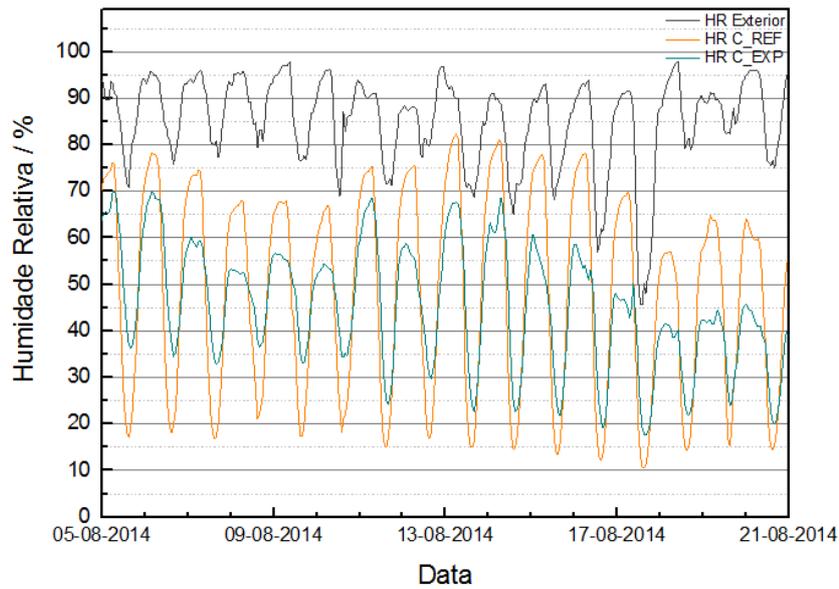
(a)



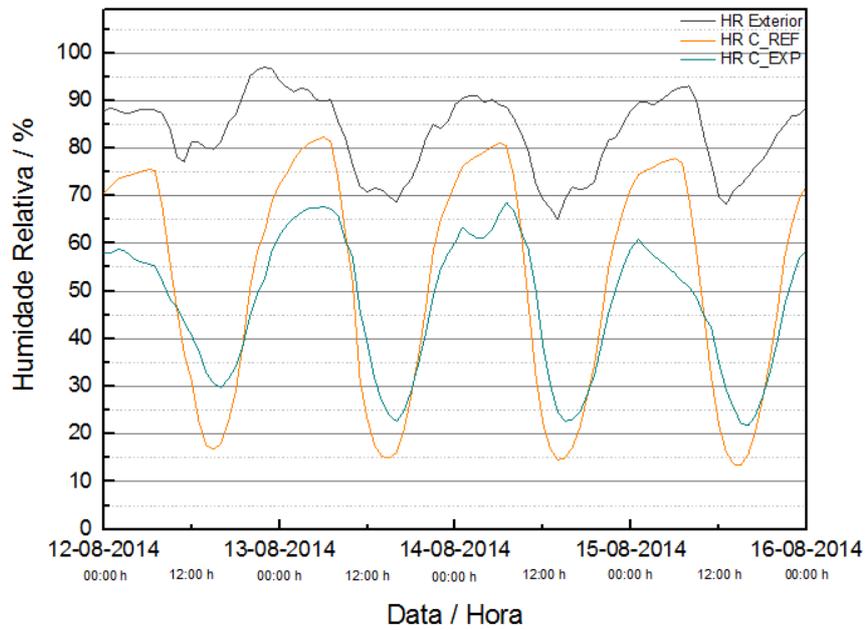
(b)

Figura 27 - Temperatura exterior e radiação solar global efetuadas (a) entre 5 e 21 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor

A temperatura da superfície da Terra sobe quando esta absorve a radiação solar global. Nestes dezoito dias de monitorização, o dia 17 apresenta a temperatura exterior mais elevada com $26,32\text{ }^{\circ}\text{C}$, assim como a maior amplitude térmica exterior com $11,92\text{ }^{\circ}\text{C}$ enquanto o dia 16 manifesta a temperatura mais baixa com $13,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a maior radiação solar global máxima foi alcançada no dia 16, enquanto o dia 10 alcançou a menor radiação solar global máxima.



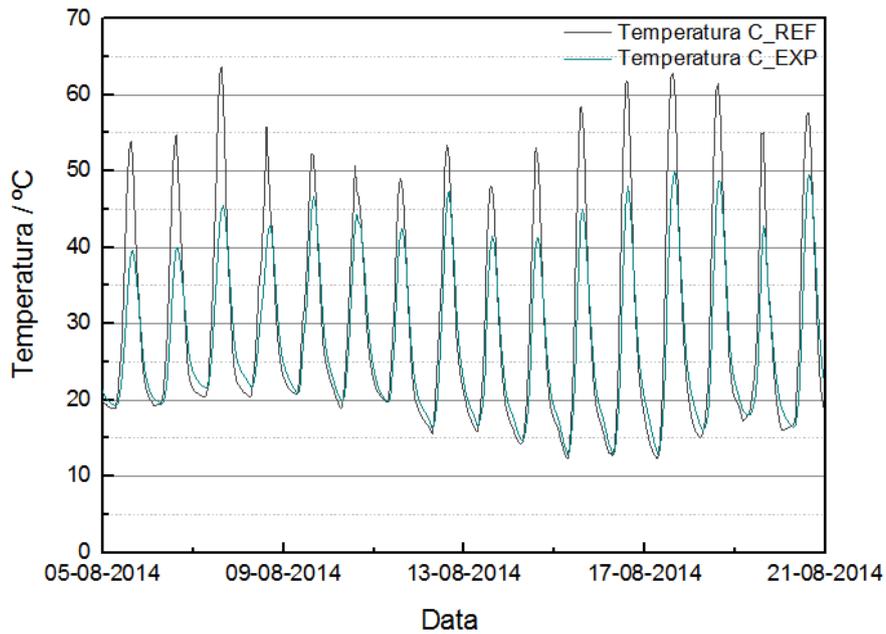
(a)



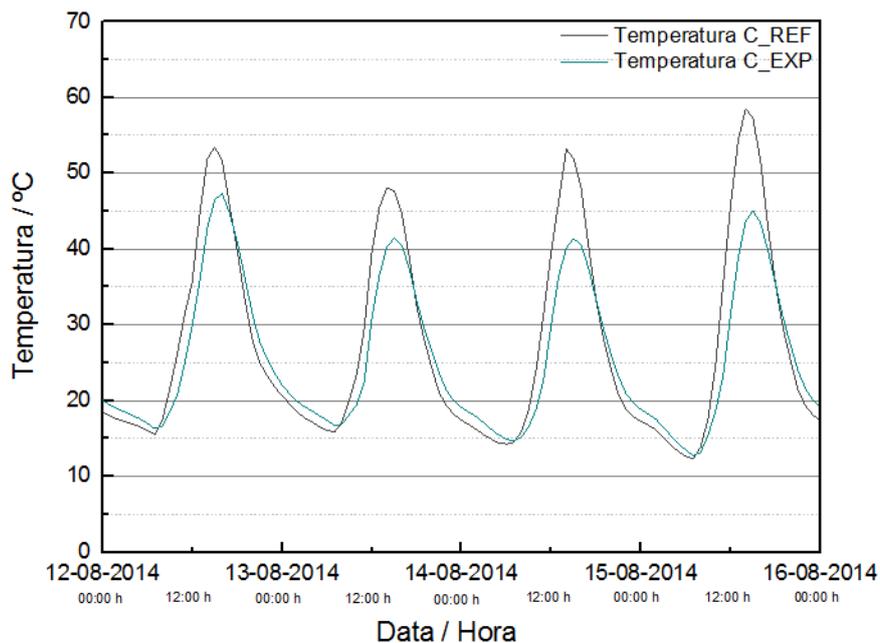
(b)

Figura 28 -Humidade relativa exterior, na célula de referência e célula experimental efetuadas (a) entre 5 e 21 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor

Nos dezoito dias monitorizados, os resultados da HR média exterior apresentam-se maiores do que as médias interiores da célula de teste. Os valores mínimos da HR registados devem-se às elevadas temperaturas interiores alcançadas nos compartimentos. Os compartimentos de referência e experimental também registam diferenças entre si, sendo as médias da primeira superiores à da segunda, registando-se maiores diferenças na HR máxima.



(a)



(b)

Figura 29 - Medição da temperatura interior, na célula de referência e célula experimental efetuadas (a) entre 5 e 21 de Agosto; (b) entre 12 e 16 de Agosto, em pormenor

No intervalo de tempo monitorizado verificou-se o efeito de sobrecarga da capacidade de armazenamento térmico das lajetas de argamassa com *PCM*. Desta forma, para que a acumulação de calor no seu interior fosse reduzida, a estrutura da célula de teste deveria possuir uma pala de sombreamento para proteção solar, utilizado exemplarmente nos edifícios solares passivos.

A diferença da temperatura atingida entre compartimentos explica a funcionalidade da utilização do *PCM* em material de construção e por consequência a diferença nas medições da HR

interior entre compartimentos evidenciada na Figura 28. Apesar dos picos de temperatura mínimos dos dois compartimentos serem muito próximos, estes tornam-se bastante díspares nas temperaturas máximas atingidas, originando grandes diferenças nas amplitudes térmicas nos picos máximos de temperatura entre os compartimentos experimental e de referência (Figura 29). Nos períodos de arrefecimento e aquecimento, em todos os dias monitorizados, os picos máximos e mínimos no compartimento experimental ocorrem 1h (em média) depois dos respetivos picos no compartimento de referência. Esta diferença temporal pode esclarecer a diferença de inércia térmica entre os compartimentos.

No período de aquecimento, o dia 7 de Agosto apresenta a maior amplitude térmica alcançada entre compartimentos, +18,1 °C no C_REF em comparação com o C_EXP. Durante toda a monitorização os picos de temperatura máxima foram reduzidos em média +10,9 °C no C_EXP em relação ao C_REF. Por sua vez, o período de arrefecimento regista amplitudes térmicas diminutas, sendo o dia 18 de Agosto o que assinala a maior amplitude térmica com +1,8 °C no C_EXP em comparação com o C_REF e a média geral regista +0,7 °C (v. Tabela 8).

Em suma, a diferença das médias de temperatura diárias apontam para uma efetiva redução das mesmas no C_EXP em relação ao C_REF, em média +2,1 °C, atingindo o máximo nos dias 5 e 7 de Agosto com +3,5 °C.

Tabela 8 - Síntese dos resultados da temperatura interior do compartimento de referência e experimental efetuados entre o dia 5 e 21 de Agosto

Temperatura / °C		Máxima	ΔT (C_EXP-C_REF)	Mínima	ΔT (C_EXP-C_REF)	Média	ΔT (C_EXP-C_REF)
5 Agosto	C_REF	54,0	-14,3	18,9	0,3	30,0	-3,5
	C_EXP	39,7		19,2		26,5	
6 Agosto	C_REF	54,7	-14,8	19,3	0,3	30,3	-3,3
	C_EXP	39,9		19,6		27,0	
7 Agosto	C_REF	63,7	-18,1	20,4	1,2	33,8	-3,5
	C_EXP	45,5		21,5		30,3	
8 Agosto	C_REF	55,9	-13,0	20,4	1,2	31,2	-1,6
	C_EXP	42,9		21,6		29,6	
9 Agosto	C_REF	52,3	-5,7	20,7	0,2	31,1	-1,0
	C_EXP	46,7		20,9		30,1	
10 Agosto	C_REF	50,7	-6,3	19,0	0,8	30,4	-0,8
	C_EXP	44,4		19,7		29,6	
11 Agosto	C_REF	49,1	-6,6	19,6	0,2	28,7	-1,3
	C_EXP	42,5		19,8		27,4	
12 Agosto	C_REF	53,5	-6,1	15,6	0,7	28,7	-1,2
	C_EXP	47,4		16,3		27,5	
13 Agosto	C_REF	48,1	-6,7	15,9	0,9	26,7	-1,2
	C_EXP	41,5		16,7		25,5	
14 Agosto	C_REF	53,2	-11,8	14,3	0,4	26,5	-2,1
	C_EXP	41,4		14,6		24,4	
15 Agosto	C_REF	58,6	-13,5	12,3	0,4	27,9	-2,9
	C_EXP	45,0		12,7		25,0	
16 Agosto	C_REF	61,8	-13,8	12,6	0,3	29,1	-3,1
	C_EXP	48,0		12,9		26,0	
17 Agosto	C_REF	62,8	-12,8	12,3	0,5	30,9	-3,2
	C_EXP	50,0		12,8		27,7	
18 Agosto	C_REF	61,4	-12,7	15,1	1,2	30,8	-2,7
	C_EXP	48,7		16,3		28,1	
19 Agosto	C_REF	55,1	-12,2	17,3	0,7	27,2	-1,8
	C_EXP	42,9		18,0		25,3	
20 Agosto	C_REF	57,7	-8,1	16,0	0,4	29,9	-1,7
	C_EXP	49,6		16,5		28,2	
21 Agosto	C_REF	58,8	-8,0	15,6	1,8	30,0	-0,8
	C_EXP	50,8		17,5		29,2	
MÉDIA			-10,9		0,7		-2,1

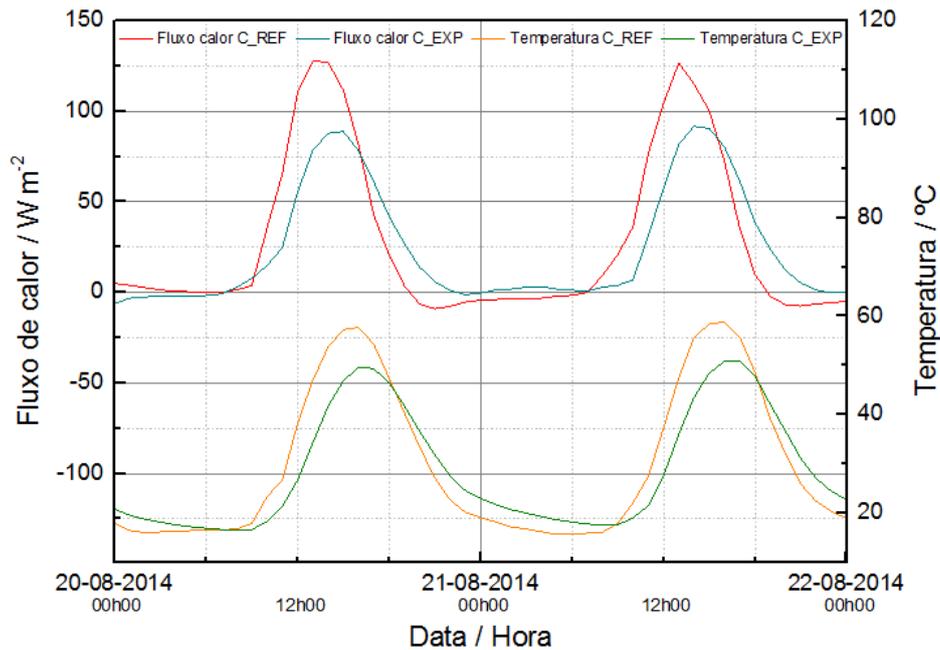


Figura 30 – Relação entre o fluxo de calor e a temperatura, na célula de referência e célula experimental realizada nos dias 20 e 21 de Agosto

Os picos do fluxo de calor obtidos acompanham os picos das temperaturas como é possível observar no gráfico (v. Figura 30), nos dias 20 e 21 de Agosto. Esta figura apenas apresenta resultados de dois dias para uma melhor observação da relação entre o fluxo de calor e a temperatura. Também se verifica uma diferença temporal entre os picos máximos e mínimos de fluxo como já havia sido examinado na análise da temperatura, o que esclarece a diferença de inércia térmica presente entre compartimentos. Os valores do fluxo de calor atingem os picos no momento de maior amplitude térmica entre a parte interior da parede de Trombe e a temperatura circundante no C_EXP e a parte interior do vidro com cartolina e a temperatura circundante no C_REF.

4.3 Avaliação do desempenho térmico – Simulação com *EnergyPlus*

O programa *EnergyPlus* simulou o comportamento térmico dos dois compartimentos depois de introduzidas as características da célula de teste, do material constituinte e dos dados meteorológicos. As simulações efetuadas no período de 5 a 21 de Agosto estão representadas na Tabela 9 e na Figura 31. A comparação entre os resultados simulados e as medições monitorizadas na célula de teste está apresentada na Figura 32 e Figura 33. O intervalo de tempo utilizado nos gráficos nesta subsecção apresentados é o mesmo dos resultados experimentais em pormenor (dia 12 a 16) para melhor observação, pois de um modo geral o comportamento térmico obtido experimentalmente e por simulação é semelhante.

4.3.1 Verificação da aplicação do modelo de simulação na célula de teste

De modo a testar o modelo no programa *EnergyPlus* verifica-se que as temperaturas atingidas pelos diferentes compartimentos da célula de teste evidenciam um desempenho térmico aceitável.

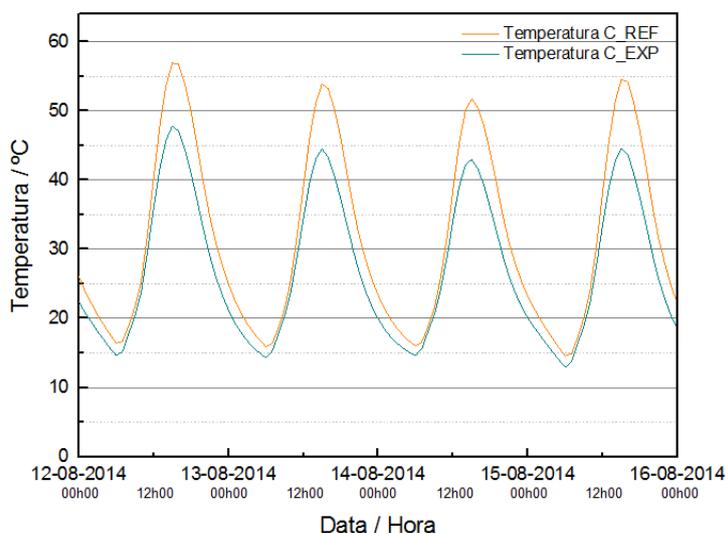


Figura 31–Simulação da temperatura interior, nas células de referência e experimental, efetuada entre 12 e 16 de Agosto

No período de aquecimento, o dia 13 de Agosto apresenta a maior amplitude térmica alcançada entre compartimentos, +10,8 °C no C_REF em comparação com o C_EXP. Durante toda a monitorização os picos de temperatura máxima foram reduzidos em média +8,3 °C no C_EXP em relação ao C_REF. Por sua vez, o período de arrefecimento regista amplitudes térmicas diminutas, sendo o dia 12 de Agosto o que assinala a maior amplitude térmica com +1,8 °C no C_REF em comparação com o C_EXP e a média geral regista +1,3 °C. Em suma, a diferença das

médias de temperatura diárias apontam para uma efetiva redução das mesmas no C_EXP em relação ao C_REF, em média +4,1 °C, atingindo o máximo nos dias 11 e 16 de Agosto com +4,7 °C (v. Tabela 8). A partir desta análise, procede-se o estudo à comparação do comportamento térmico dos resultados experimentais e simulados em ambos compartimentos.

Tabela 9 - Síntese da simulação da temperatura interior do compartimento de referência e experimental efetuada entre o dia 5 e 21 de Agosto

Temperatura / °C		Máxima	ΔT (C_EXP - C_REF)	Mínima	ΔT (C_EXP - C_REF)	Média	ΔT (C_EXP - C_REF)
5 Agosto	C_REF	45,7	-7,6	16,3	-1,4	28,2	-3,9
	C_EXP	38,0		14,9		24,3	
6 Agosto	C_REF	35,3	-4,2	14,5	-1,3	24,6	-2,6
	C_EXP	31,1		13,2		22,0	
7 Agosto	C_REF	46,4	-6,6	13,3	-1,1	27,8	-3,3
	C_EXP	39,8		12,1		24,5	
8 Agosto	C_REF	48,8	-6,5	14,9	-1,3	29,5	-3,5
	C_EXP	42,3		13,6		26,0	
9 Agosto	C_REF	49,3	-7,1	15,7	-1,5	30,2	-3,8
	C_EXP	42,2		14,2		26,4	
10 Agosto	C_REF	57,3	-9,7	15,7	-1,4	32,9	-4,6
	C_EXP	47,5		14,3		28,2	
11 Agosto	C_REF	57,9	-9,9	17,2	-1,4	33,8	-4,7
	C_EXP	48,0		15,7		29,1	
12 Agosto	C_REF	56,9	-9,1	16,4	-1,8	33,2	-4,6
	C_EXP	47,8		14,6		28,6	
13 Agosto	C_REF	53,9	-10,8	15,9	-1,6	31,5	-4,6
	C_EXP	43,1		14,3		26,9	
14 Agosto	C_REF	51,8	-8,8	16,0	-1,4	30,6	-4,2
	C_EXP	43,0		14,6		26,4	
15 Agosto	C_REF	54,5	-9,9	14,6	-0,8	30,9	-4,8
	C_EXP	44,6		13,8		26,1	
16 Agosto	C_REF	55,3	-9,7	13,6	-1,6	30,7	-4,7
	C_EXP	45,6		11,9		26,0	
17 Agosto	C_REF	40,4	-5,4	14,3	-1,3	25,0	-2,9
	C_EXP	35,0		13,0		22,1	
18 Agosto	C_REF	46,0	-6,8	15,2	-0,8	27,3	-3,2
	C_EXP	39,2		14,4		24,1	
19 Agosto	C_REF	55,8	-10,3	16,9	-1,1	32,3	-4,6
	C_EXP	45,5		15,8		27,7	
20 Agosto	C_REF	54,0	-9,3	16,6	-1,5	31,8	-4,5
	C_EXP	44,7		15,1		27,2	
21 Agosto	C_REF	53,1	-9,5	15,9	-1,5	30,8	-4,5
	C_EXP	43,7		14,5		26,4	
MÉDIA			-8,3		-1,3		-4,1

4.3.2 Conformidade entre os ensaios experimentais e o modelo de simulação

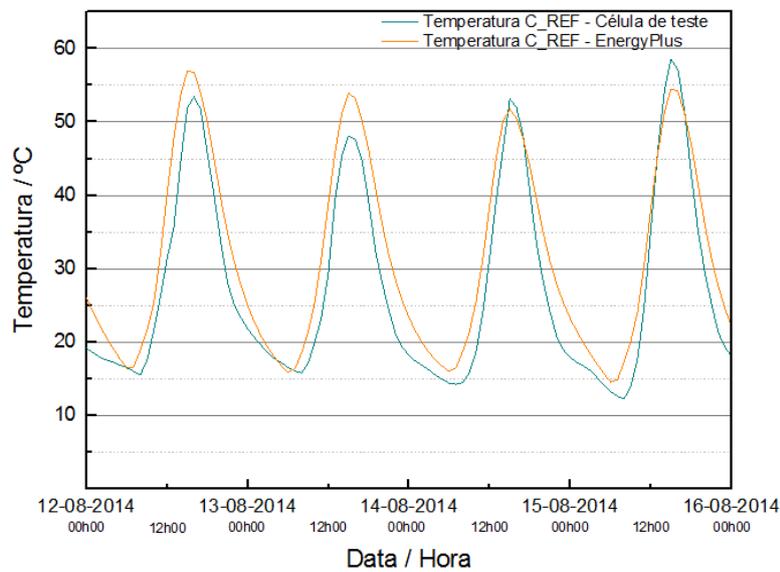


Figura 32 – Comparação entre as temperaturas obtidas na célula de referência por simulação e pelas sondas entre 12 e 16 de Agosto

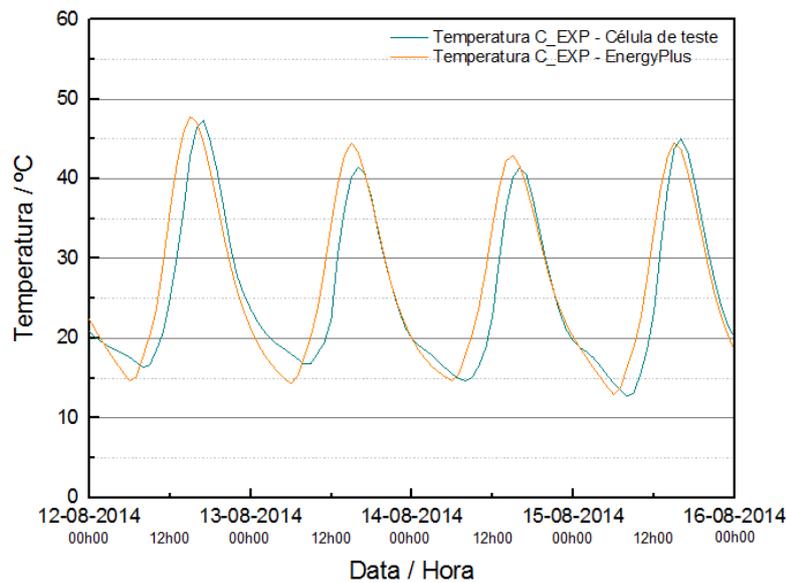


Figura 33 – Comparação entre as temperaturas obtidas na célula experimental por simulação e pelas sondas, entre 12 e 16 de Agosto

Os gráficos interpretados na Figura 32 e Figura 33 caracterizam o desempenho térmico dos resultados experimentais em relação aos dados obtidos no modelo de simulação, nos compartimentos de referência e experimental, respetivamente. Estes manifestam comportamento semelhante, apesar da evidência de algumas discrepâncias visíveis, especialmente nos picos de temperatura atingidos.

4.3.3 Relação entre o estudo de ganho indireto e direto obtido por simulação

Com o intuito de analisar qual o melhor sistema, ganho direto ou indireto (parede de Trombe), o primeiro método foi simulado em conformidade com os princípios assentes num sistema solar passivo de ganho direto. Desta forma as informações introduzidas no programa adotam a colocação das lajetas no pavimento do compartimento experimental da célula de teste e restantes características climáticas, temporais e afins conformes às utilizadas no estudo do desempenho da parede de Trombe.

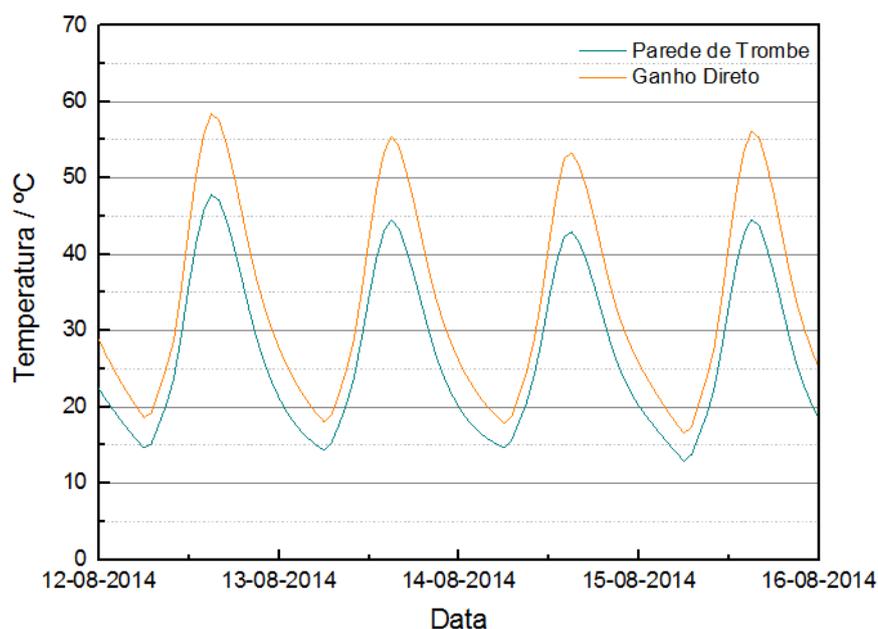


Figura 34 – Desempenho térmico do estudo de ganho indireto (Parede de Trombe) e para o caso de ganho direto, simulados

Através da Figura 34 realiza-se que o sistema da parede de Trombe é mais eficiente e próximo do pretendido do que o de ganho direto, pois as amplitudes e sobretudo os picos de temperatura máxima atingidos pelo primeiro são visivelmente mais reduzidos. Este acontecimento deve-se sobretudo à força motriz, radiação solar, em contacto direto com uma das faces da parede de Trombe e a convecção existente entre a outra face e o ar envolvente, existindo assim transferência de calor por radiação e convecção. Visto que no sistema de parede Trombe, o interior do compartimento nunca recebe raios solares, ao contrário do sistema de ganho direto que recebe ganhos solares colossais.

4.4 Síntese dos resultados gerais

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

4.4.1 Considerações finais

As medições apresentadas neste estudo, através dos resultados do desempenho térmico da monitorização e da simulação realizadas encontram-se sintetizadas na Tabela 10.

Tabela 10 - Síntese dos principais resultados da monitorização e simulação realizadas

Parâmetro	Ensaios experimentais	Modelo de simulação
Maior redução dos picos de temperatura máxima / °C	18,1	10,8
Redução média dos picos de temperatura máxima / °C	10,9	8,3
Maior aumento dos picos de temperatura mínima / °C	1,8	1,8
Aumento médio dos picos de temperatura mínima / °C	0,7	1,3
Temperatura média C_REF / °C	29,6	30,1
Temperatura média C_EXP / °C	27,5	26,0

4.4.2 Economia de energia

A entalpia de fusão da argamassa endurecida com *PCM* é de 12,73 kJ kg⁻¹(v. Tabela 3) e a massa total das lajetas colocadas como parede de Trombe no compartimento experimental na célula de teste é 96,88 kg. A energia armazenada ou libertada durante a mudança de fase pelo *PCM* pode ser calculada pela Equação 4.1. O resultado respetivo é 1233 kJ, ou 0,34 kWh. Este valor representa a energia necessária para evitar o aquecimento brutal verificado no compartimento de referência, em cada processo de mudança de fase realizado pelo material.

$$Q = mL \quad (4.1)$$

Onde,

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

m = Massa do material / kg

L = Calor latente do material / kJ kg⁻¹

5 Conclusão e desenvolvimentos futuros

5.1 Conclusões gerais

Os resultados obtidos experimentalmente são fiáveis, pois os valores exteriores medidos pela célula de teste encontram-se muito próximos dos dados obtidos pelo Grupo de Meteorologia e Climatologia (CliM@UA[®]) do Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Assim, pode-se inferir com um elevado grau de confiança que o sistema de monitorização interior da célula de teste também funciona de forma correta. Também é possível concluir que os resultados numéricos obtidos através do programa de cálculo *EnergyPlus* são igualmente fiáveis, dado que, no caso das temperaturas interiores, se encontram muito próximos dos experimentais.

O presente estudo permitiu verificar que as elevadas temperaturas atingidas no interior da célula de teste, resultantes da transferência de calor por radiação solar incidente na parede de Trombe, sobrecarregaram a capacidade de armazenamento térmico das lajetas. As elevadas amplitudes térmicas interiores que foram obtidas prejudicaram a ação do *PCM*, dado que o compósito foi utilizado sobretudo como fonte de calor sensível e não latente, na maior parte do tempo, uma vez que o armazenamento e libertação de calor das lajetas do compósito com *PCM* apenas ocorrem numa gama de temperaturas limitada.

Através do desempenho térmico apurado quer nos resultados monitorizados, quer nos resultados provenientes da simulação, apresentam o que se esperava, ou seja, a redução dos picos, sobretudo das temperaturas máximas. Os resultados das medições permitem verificar uma redução média nos picos de temperatura máxima de 10,9 °C com a aplicação das lajetas de argamassa com *PCM*, sendo a maior redução de 18,1 °C. Os resultados da simulação possibilitaram averiguar uma redução média nos picos de temperatura máxima de 8,3 °C com a aplicação das lajetas do compósito com *PCM*, sendo que a maior redução foi de 10,8 °C.

A comparação entre um sistema de ganho direto e indireto simulados indica que o último é mais eficiente neste estudo, pois apresenta amplitudes e picos térmicos mais reduzidos. A parede de Trombe contribui assim para uma maior redução de consumos energéticos e aumento do conforto térmico, em relação ao sistema de ganho direto.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Nos próximos trabalhos experimentais a serem realizados com lajetas do mesmo tipo das utilizadas neste projeto, deverão incorporar uma malha de rede e/ou adicionar material fibroso na fase plástica de forma a evitar situações de fissuração resultantes da retração plástica. Seria

também interessante a construção de uma parede na célula de referência constituída de lajetas de argamassa sem *PCM* com inércia térmica equivalente, tendo em vista um melhor conhecimento do comportamento do *PCM* na temperatura interior e na inércia térmica presente nos compartimentos. A colocação do fluxímetro na parte exterior da parede, poderia contribuir para um melhor entendimento do comportamento do *PCM* e da parede de Trombe na inércia térmica.

Na utilização da célula de teste como edifício solar passivo, dever-se-á colocar uma pala de sombreamento solar para que seja possível alcançar menores amplitudes térmicas do que as verificadas em toda a monitorização do presente trabalho experimental e sugere-se a incorporação de um sistema de ventilação natural ou artificial.

Referências Bibliográficas

- [1] U. N. Department, “World Energy Assessment,” 2004.
- [2] T. P. Isolani, R. C. Adiconsum, F. C. Ademe, F. P. Escan, A. O. Adiconsum, and I. O. Deco, “Eficiência energética nos edifícios residenciais,” 2008.
- [3] S. Dom, *Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010*. 2010.
- [4] M. Pomianowski, P. Heiselberg, and Y. Zhang, “Review of thermal energy storage technologies based on PCM application in buildings,” *Energy Build.*, vol. 67, pp. 56–69, Dec. 2013.
- [5] F. Kuznik and J. Virgone, “Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling,” *Energy Build.*, vol. 41, no. 5, pp. 561–570, May 2009.
- [6] H. Zhao and F. Magoulès, “A review on the prediction of building energy consumption,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 3586–3592, Aug. 2012.
- [7] D. B. Crawley, J. W. Hand, M. Kummert, and B. T. Griffith, “Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs,” *Build. Environ.*, vol. 43, no. 4, pp. 661–673, Apr. 2008.
- [8] T. (França) : L. E. I. Du, “IMMOBILIER MODE D’EMPLOI - Bbc et Bepos : L’Habitat Nouvelle Génération.” [Online]. Available: <http://immobiliermodedemploi.fr/dossiers/bbc-et-bepos-l-habitat-nouvelle-generation/>.
- [9] National Institute of Building Sciences, “Whole Building Design Design Guide,” 2012. [Online]. Available: <http://www.wbdg.org/resources/psheating.php>.
- [10] INETI, “Edifício Solar XXI,” 2005.
- [11] Caroline Hachem, Paul Fazio, Andreas Athienitis, “Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 1864–1877, Sep. 2011.
- [12] A. Mitjà, C. Torra, and P. Valent, “ACTUAL IMPLANTATION AND MONITORING PROGRAMME OF LOW TEMPERATURE SOLAR HEATING INSTALLATIONS IN CATALUNYA (SPAIN),” *Intersol Eighty Five*, pp. 2390–2394, 1986.
- [13] Extension, “Passive Solar Heating for Homes,” 2013. [Online]. Available: <http://www.extension.org/pages/30863/passive-solar-heating-for-homes#.VH14CzGsUvC>.
- [14] P. J. F. de A. U. de Mendonça, “Habitar sob uma segunda pele,” Universidade do Minho, 2005.

- [15] A. Briga-Sá, A. Martins, J. Boaventura-Cunha, J. C. Lanzinha, and A. Paiva, "Energy performance of Trombe walls: Adaptation of ISO 13790:2008(E) to the Portuguese reality," *Energy Build.*, vol. 74, pp. 111–119, May 2014.
- [16] . Ruben Baetens, Bjorn Petter Jelle, Arild Gustavsen, "Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review.," *Energy Build.*, pp. 1361–1368, 2010.
- [17] SaveENR, "Phase change energy storage technology: sensible heat vs latent heat." [Online]. Available: <http://rgees.com/technology.php>.
- [18] CEN, "EN 998-1: Specification for mortar masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar," Brussels: CEN (European Committee for Standardization), 2010.
- [19] T. Salgueiro, "Desenvolvimento de argamassas com PCM em matriz de argila expandida," Universidade de Aveiro, 2014.
- [20] BASF, "Micronal® PCM Intelligent Temperature Management for Buildings," 2012. [Online]. Available: http://www.micronal.de/portal/load/fid774774/Catalogue_Micronal_PCM.pdf.
- [21] ATIC, "Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas." 2006.
- [22] H. Nunes, "Comportamento térmico de uma argamassa com PCM numa célula-de-teste," Universidade de Aveiro, 2013.
- [23] CIN, "Boletim Técnico 10-250 VINYL MATT," 2014.
- [24] F Fonseca, "Sondas de humidade - Jumo." [Online]. Available: http://www.ffonseca.com/artigo.aspx?lang=pt&id_object=288823&name=Promocao-Sondas-de-Humidade---Jumo.
- [25] M. K. JUCHHEIM, "Igrometro e termoigrometro (capacitivo) per controllo nella climatizzazione Dati tecnici." .
- [26] Delta Ohm, "HD 9008TRR HD 9009TRR HD 9007 Analisi ambientali." [Online]. Available: http://www.deltaohm.com/ver2012/download/HD9008TRR_it.pdf.
- [27] Delta OHM, "LP PYRA 02 LP PYRA 03 LP PYRA 12 PIRANOMETRI." [Online]. Available: http://www.deltaohm.com/ver2012/download/LP_PYRA02_03_12_it.pdf.
- [28] Hukseflux, "Thermal Sensores." [Online]. Available: http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_brochure/HFP01_v1003.pdf.
- [29] F Fonseca, "Guia técnico de sondas de temperatura." [Online]. Available: http://www.ffonseca.com/cache/bin/Guia_Tecnico_Sondas_Temperatura_F.Fonseca-14490.pdf.
- [30] Alfredo Rocha, Tiago Luna, Equipa CESAM, "Comunicação pessoal." .

Anexos

A - Características do comportamento térmico da argamassa

A.1 - Fluxo de Calor

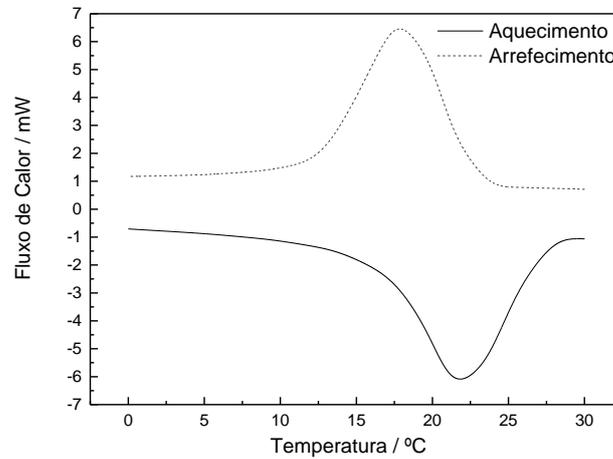


Figura 35 - Fluxo de calor no PCM puro

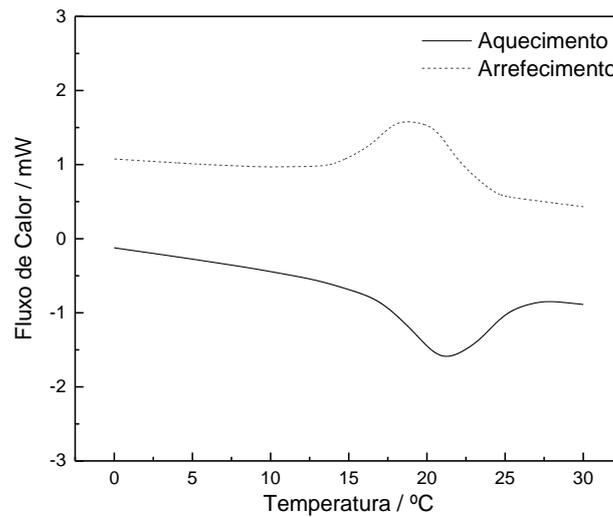


Figura 36 - Fluxo de calor na amostra amassada.

As variações no fluxo de calor, quer no aquecimento quer no arrefecimento verificam-se na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**35 (PCM) e Figura 366 (amostra amassada). A curva de aquecimento é uma curva típica de um processo endotérmico, absorvendo calor e a curva de arrefecimento apresenta uma curva comum para um processo exotérmico, libertando calor. A amostra amassada apresenta picos de intensidade menores quando comparados com os do PCM puro, podendo este resultado justificar-se pela aglomeração das cápsulas de PCM.

A.2 - Calor específico

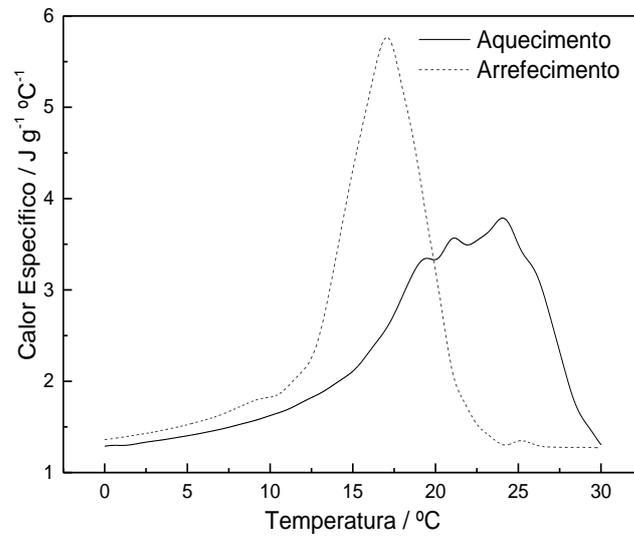


Figura 37 - Calor específico de *PCM* puro

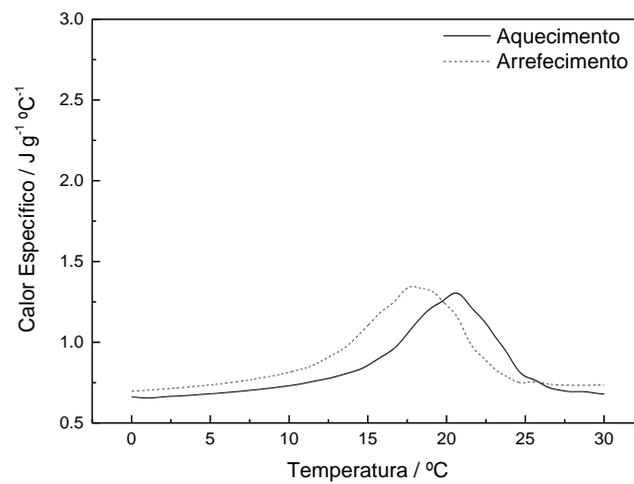


Figura 38 - Calor específico da amostra amassada

O pico referente ao aquecimento é de intensidade menor que o pico de solidificação. A curva díspar no aquecimento explica-se, pelas misturas de parafínicos de elevada pureza que o PCM possui, levando à separação de picos (Figura 37).

Na Figura 388 verifica-se que as intensidades de picos são inferiores ao *PCM* puro, pela provável razão da presença de outros componentes porosos e a aglomeração das cápsulas do *PCM*.

A.3 - Entalpia de fusão e solidificação

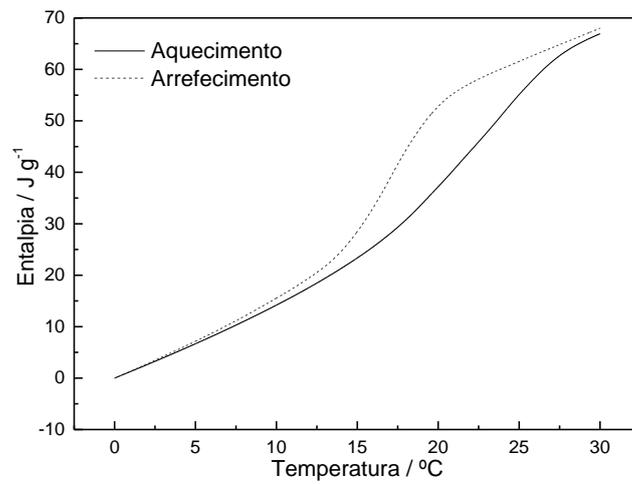


Figura 39 - Entalpia do PCM puro

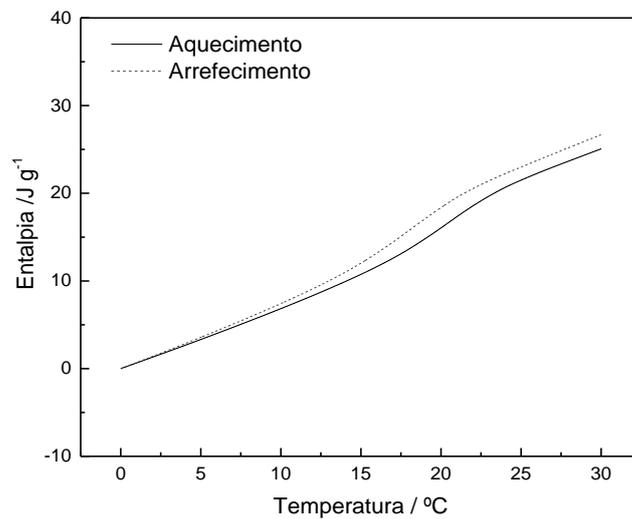


Figura 40 - Entalpia da amostra amassada

A amostra amassada apresenta valores de entalpia menores que o *PCM* puro. As gamas de fusão e solidificação desta amostra são 10,26 $^{\circ}\text{C}$ - 24,85 $^{\circ}\text{C}$ e 9,33 $^{\circ}\text{C}$ - 23,16 $^{\circ}\text{C}$, respetivamente.

A.4 - Determinação dos intervalos de mudança de fase

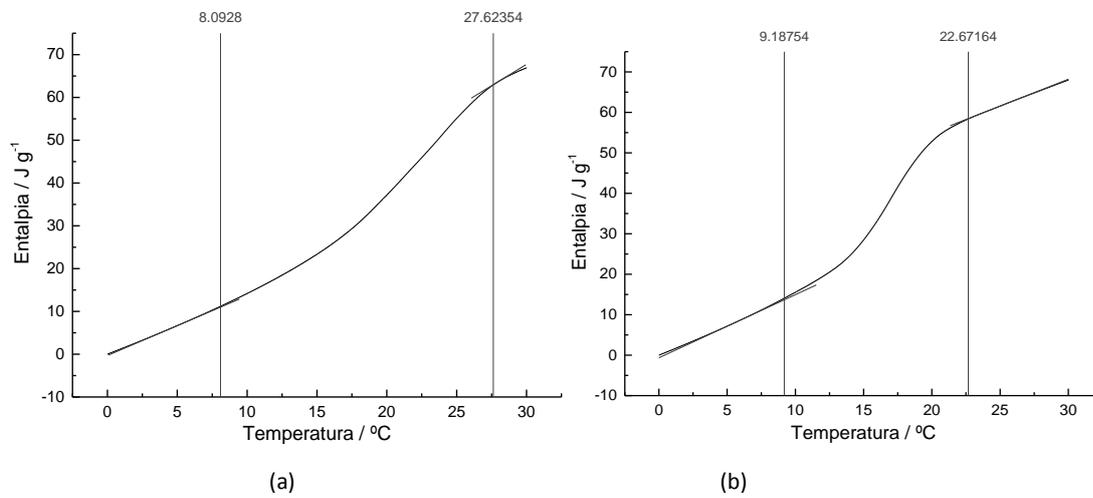


Figura 41 - Entalpia da amostra de PCM puro, em função de temperatura, (a) fusão; (b) solidificação

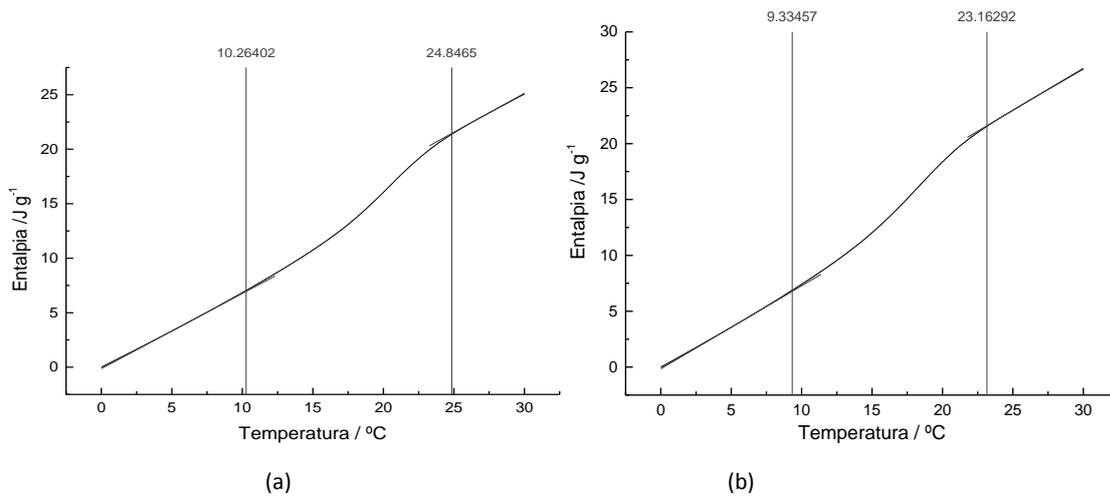


Figura 42 - Entalpia da amostra amassada em função de temperatura, (a) fusão; (b) solidificação

Na Tabela 11 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos a partir dos ensaios MDSC.

Tabela 11 - Resultado dos ensaios MDSC

Propriedade	ΔT de Fusão $^{\circ}\text{C}$	ΔT de Solidificação $^{\circ}\text{C}$	Entalpia de Fusão J g^{-1}	Entalpia de Solidificação kJ kg^{-1}
PCM Puro	8,09 - 27,62	9,19 - 22,67	91,22	88,31
Amostra amassada	10,26 - 24,85	9,33 - 23,16	12,73	13,12

B - Linhas de comando do ficheiro IDF editor do *EnergyPlus*

```

IDF_Modelo - Bloco de notas
Ficheiro  Editar  Formatar  Ver  Ajuda

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: RUNPERIOD =====
RunPeriod,
    8,          !- Name
    4,          !- Begin Month
    8,          !- Begin Day of Month
    8,          !- End Month
    22,         !- End Day of Month
    UseweatherFile, !- Day of week for Start Day
    Yes,        !- Use weather File Holidays and Special Days
    Yes,        !- Use weather File Daylight Saving Period
    No,         !- Apply weekend Holiday Rule
    Yes,        !- Use weather File Rain Indicators
    Yes,        !- Use weather File Snow Indicators
    1;         !- Number of Times Runperiod to be Repeated

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SCHEDULETYPELIMITS =====
ScheduleTypeLimits,
    Gama 0 a 1, !- Name
    0,          !- Lower Limit Value
    1,          !- Upper Limit Value
    Continuous, !- Numeric Type
    Dimensionless; !- Unit Type

!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: SCHEDULE:COMPACT =====
Schedule:Compact,
    Sempre Ligado, !- Name
    Gama 0 a 1,    !- Schedule Type Limits Name
    Through:12/31, !- Field 1
    For:alldays,  !- Field 2
    Until:24:00,  !- Field 3
    1;            !- Field 4
  
```

Figura 43 - Período de tempo simulado, de 5 a 21 de Agosto

```

IDF_Modelo - Bloco de notas
Ficheiro  Editar  Formatar  Ver  Ajuda

    0.6, !- Solar Absorptance
    0.6; !- Visible Absorptance

Material,
    LXSPCM, !- Name
    Rough,  !- Roughness
    0.02,   !- Thickness {m}
    0.20,   !- Conductivity {w/m-K}
    850,    !- Density {kg/m3}
    1400,   !- Specific Heat {J/kg-K}
    0.9,    !- Thermal Absorptance
    0.6,    !- Solar Absorptance
    0.6;    !- Visible Absorptance

! ***** TIJOLOS CERÂMICOS FURADOS *****
Material,
    1903 - Tijolo Furado 70mm, !- Name
    Rough, !- Roughness
    0.070, !- Thickness {m}
    0.36,  !- Conductivity {w/m-K}
    943,   !- Density {kg/m3}
    840,   !- Specific Heat {J/kg-K}
    0.9,   !- Thermal Absorptance
    0.7,   !- Solar Absorptance
    0.7;   !- Visible Absorptance

Material,
    1905 - Tijolo Furado 110mm, !- Name
    Rough, !- Roughness
    0.110, !- Thickness {m}
  
```

Figura 44 - Propriedades da argamassa de Leca® XS e PCM

```

IDF_Modelo - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: MATERIALPROPERTY:PHASECHANGE =====
MaterialProperty:PhaseChange,
  LXSPCM,      !- Name
  17,          !- Temperature Coefficient for Thermal Conductivity {w/m-K2}
  12558,       !- Temperature 1 {C}
  18,          !- Enthalpy 1 {J/kg}
  13642,       !- Temperature 2 {C}
  19,          !- Enthalpy 2 {J/kg}
  14814,       !- Temperature 3 {C}
  20,          !- Enthalpy 3 {J/kg}
  16045,       !- Temperature 4 {C}
  20.5,        !- Enthalpy 4 {J/kg}
  16716,       !- Temperature 5 {C}
  21,          !- Enthalpy 5 {J/kg}
  17343,       !- Temperature 6 {C}
  21.5,        !- Enthalpy 6 {J/kg}
  17968,       !- Temperature 7 {C}
  22,          !- Enthalpy 7 {J/kg}
  18567,       !- Temperature 8 {C}
  22.5,        !- Enthalpy 8 {J/kg}
  19164,       !- Temperature 9 {C}
  23,          !- Enthalpy 9 {J/kg}
  19679,       !- Temperature 10 {C}
  23.5,        !- Enthalpy 10 {J/kg}
  20189,       !- Temperature 11 {C}
  24,          !- Enthalpy 11 {J/kg}
  20661,       !- Temperature 12 {C}
  24.5,        !- Enthalpy 12 {J/kg}
  21094,       !- Temperature 13 {C}
  25,          !- Enthalpy 13 {J/kg}
  21496,       !- Temperature 14 {C}
  26,          !- Enthalpy 14 {J/kg}
  22264,       !- Temperature 15 {C}
  27,          !- Enthalpy 15 {J/kg}
  22987;       !- Temperature 16 {C}
  
```

Figura 45 - Dados da entalpia e da temperatura da argamassa com Leca[®]XS e PCM

```

IDF_Modelo - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONE =====
Zone,
  ZNT1.1,      !- Name
  -0,          !- Direction of Relative North {deg}
  0,           !- X origin {m}
  0,           !- Y origin {m}
  0;           !- Z origin {m}
Zone,
  ZNT2.1,      !- Name
  -0,          !- Direction of Relative North {deg}
  0,           !- X origin {m}
  0,           !- Y origin {m}
  0;           !- Z origin {m}
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: ZONELIST =====
ZoneList,
  Zonas,       !- Name
  ZNT1.1,     !- Zone 1 Name
  ZNT2.1;     !- Zone 2 Name
  
```

Figura 46 - Exemplo para o caso de sistema direto com as zonas ZNT1 e ZNT2