



Universidade de Aveiro
2014

Departamento de Ambiente e Ordenamento

Carla Sofia da Silva Monteiro **Estudo de um edifício solar passivo de ganho direto usando um PCM**



Universidade de Aveiro

Departamento de Ambiente e Ordenamento

2014

**Carla Sofia da
Silva Monteiro** **Estudo de um edifício solar passivo de ganho direto
usando um PCM**

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	Professor Doutor Manuel Arlindo Amador de Matos Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro
Arguente	Professora Doutora Maria Fernanda Rodrigues Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro
Orientador	Professor Doutor António José Barbosa Samagaio Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Um sincero agradecimento ao Professor Doutor António Samagaio, orientador da minha dissertação, por toda a disponibilidade, confiança e dedicação a esta dissertação.

À empresa BASF, em particular ao Eng^o Manuel Morgado que tão prontamente nos cedeu o material necessário ao desenvolvimento desta dissertação.

Ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, pela cedência do laboratório.

A todo o apoio concedido pela empresa Weber Saint-Gobain, principalmente nas pessoas do Eng.^o Luís Silva e do Eng.^o Pedro Sequeira, pela disponibilidade e apoio neste percurso. A todos os funcionários, que tão bem me receberam, em especial ao incansável Nuno Vieira, pela paciência, devoção e dedicação constante ao longo de todo trabalho experimental.

Às minhas amigas, Ana Rodrigues, Ana Ferreira, Diana Braga, Eugénia Poças, Mariana Pinto, Tânia Salgueiro, Sara Alves e Sara Sá que percorreram comigo este percurso académico, nos seus altos e baixos e que para sempre estarão presentes. À querida Lídia Nogueira, companheira desta viagem atribulada e que de forma infatigável sempre soube ultrapassar obstáculos com um sorriso.

Ao Eurico Magalhães, companheiro de anos, amigo e namorado que sempre me compreendeu nas horas difíceis.

Às minhas amigas de sempre, Patrícia Magalhães, Liliana Costa, Verónica Pereira, Soraia Gonçalves e Sílvia Moreira por me tolerarem e auxiliarem no decorrer desta dissertação.

À minha família que possibilitou a serenidade necessária à realização desta dissertação.

Palavras-chave

PCM, materiais de mudança de fase, edifício solar passivo, *Leca*® XS.

Resumo

O presente trabalho teve como principal objetivo estudar o comportamento de um compósito com PCM parafínico microencapsulado numa matriz de argila expandida (LECA®) e cimento, de forma a reduzir os consumos energéticos em climatização e melhorar o conforto térmico. Para tal, produziu-se em laboratório lajetas que foram colocadas no pavimento de uma célula de teste, projetada de acordo com os princípios fundamentais de sistemas solares passivos de ganho direto. Seguidamente, procedeu-se à monitorização do desempenho térmico da célula de teste e os dados assim obtidos foram, comparados com uma simulação utilizando o programa EnergyPlus.

O facto de existir uma grande área de captação solar na célula de teste, sem a existência de capacidade de armazenamento em proporção, conduziu a um sobreaquecimento do PCM nas lajetas chegando o interior da célula de teste a atingir temperaturas máximas de 75 °C. A amplitude térmica diminuiu e verificou-se um decréscimo entre a temperatura experimental e a temperatura de referência. Verificaram-se pequenos desvios entre os dados obtidos por simulação e os obtidos experimentalmente, mas ainda assim estes encontram-se em fase.

Keywords

PCM, phase changing material, passive solar buildings, LECA® XS.

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® XS 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 placed on the floor of a test cell, following the best practices of direct 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 program 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 existence of a large solar area in the test cell without the existence ratio storage capacity has led to a PCM overheating in the slabs. The temperature range decreases and there is a decrease between the experimental temperature and the reference temperature. There are small differences between the data obtained by simulation and obtained experimentally but they are synchronized in fase.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas.....	vii
Lista de abreviaturas	viii
1. Introdução	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Metodologia.....	2
1.4. Estrutura do trabalho	3
2. Edifícios Solares Passivos	4
2.1. Sistema de ganho direto	5
2.2. Sistemas de ganho indireto.....	6
2.2.1. Parede de Trombe.	7
2.3. Sistemas de Ganho Isolado	8
3. Phase Change Material – PCM	9
3.1. Tipos de PCM.....	10
3.2. Incorporação em materiais	12
3.2.1. Incorporação Direta	12
3.2.2. Imersão	13
3.2.3. Macroencapsulamento	13
3.2.4. Microencapsulamento.....	13
3.2.5. Impregnação de matrizes porosas.....	14
3.3. PCM nas construções	14
4. Energyplus	17
5. Análise Experimental.....	18
5.1. Localização	18
5.2. Esquema (Planta e Alçado).....	19
5.3. Caracterização e constituição da célula de teste	19
5.4. Sistema de aquisição de dados	21
5.4.1. Descrição dos equipamentos de medição - Sensores	23
5.5. Argamassa com PCM - Lajetas	28
5.6. Características da Argamassa com PCM	31
5.6.1. Pintura das lajetas.....	32

5.7.	Simulação utilizando o Energyplus	33
6.	Resultados experimentais e discussão	35
6.1.	Avaliação do desempenho térmico experimental – Célula de teste	35
6.1.1.	Monitorização de 23 de Setembro a 7 de Outubro.....	37
6.2.	Avaliação do desempenho térmico – Simulação com o Energyplus.....	43
7.	Conclusão	46
7.1.	Conclusões gerais	46
7.2.	Sugestões para trabalhos futuros	46
	Referências Bibliográficas	47
	Anexo	51

Índice de Figuras

Fig. 1. Diagrama da Metodologia.....	2
Fig. 2. Ilustração de um edifício solar passivo de ganho direto.....	5
Fig. 3. Ilustração de um edifício solar passivo de ganho indireto.....	7
Fig. 4. Ilustração de um edifício solar passivo de ganho isolado.....	8
Fig. 5. Esquema representativo do mecanismo de funcionamento de um PCM.	10
Fig. 6. Organigrama dos tipos de PCM existentes, adaptado.....	10
Fig. 7. Material de mudança de fase - Micronal® em pó.	15
Fig. 8. Representação esquemática de capacidade de armazenamento igual para espessuras diferentes nos vários materiais.....	16
Fig. 9. Exemplo de um edifício concebido (a) em SketchUp e (b) editor de texto em formato IDF.	17
Fig. 10. Localização da célula de teste.	18
Fig. 11. Célula de teste.	18
Fig. 12. Planta da célula de teste.	19
Fig. 13. Esquema representativo do sistema de aquisição de dados.	21
Fig. 14. Sistema de monitorização no compartimento de referência.	22
Fig. 15. Software EZ Data Logger Basic.	23
Fig. 16. Piranómetro LP PYRA 03 de 2ª classe da Delta Ohm.	24
Fig. 17. Sonda HD 9008 TR.	25
Fig. 18. Sonda Jumo 907021/21.....	26
Fig. 19. Fluxímetro - Hukseflux HFP01.	26
Fig. 20. Conjunto operativo de 12 sondas PT100.	27
Fig. 21. Posicionamento da sonda de temperatura e humidade relativa interior JUMO 907021/21 e de sondas PT100 no compartimento de experimental.	27
Fig. 22. Sondas PT100 a realizar monitorização de temperatura inferior.	28
Fig. 23. Molde utilizado para o fabrico das lajetas.	29
Fig. 24. PCM <i>Micronal DS5040 X</i> (a); Leca® XS e cimento CZ,I, 42.5R (b); mistura dos materiais (c).	30
Fig. 25. Mistura dos materiais constituintes da argamassa (a); preenchimento do molde com a argamassa (b).	30
Fig. 26. Aspeto final do fabrico das lajetas (a) com molde; (b) sem molde.	30

Fig. 27. Entalpia de fusão da argamassa (produto não amassado).	32
Fig. 28. Lajeta de argamassa com PCM pintada de preto para maximizar absorção da radiação solar.....	33
Fig. 29. Exemplo esquemático da célula de teste através do SketchUp – vista frontal.....	33
Fig. 30. Exemplo esquemático da célula de teste através do SketchUp – vista traseira.	34
Fig. 31. Delimitação de zonas – ZNT1.1 (à esquerda) e ZNT2.1 (à direita).	34
Fig. 32. Comparação entre as temperaturas registadas pela sonda HD 9008TR instalada no exterior da célula de teste e os dados cedidos pelo CESAM.	35
Fig. 33. Comparação entre a radiação registada pelo piranómetro LP PYRA 03 instalado no exterior da célula de teste e os dados cedidos pelo CESAM.	36
Fig. 34. Resultado da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada de dia 23 setembro a 7 de outubro.	37
Fig. 35. Resultado da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada de dia 1 de outubro a 3 de outubro.....	38
Fig. 36. Fluxo de calor medido sobre o pavimento no compartimento de referência e do compartimento experimental.....	38
Fig. 37. Resultado da medição da humidade interior (compartimento de referência e compartimento experimental) e exterior efetuada no dia 23 de setembro a 7 de outubro.	39
Fig. 38. Resultado da medição da temperatura interior no compartimento de referência e no compartimento experimental efetuada entre 23 de setembro e 28 de setembro.....	40
Fig. 39. Gráfico representativo da medição do fluxo de calor na lajeta e da temperatura na parte inferior e superior da lajeta.....	42
Fig. 40. Gráfico representativo da temperatura no compartimento de referência e no compartimento experimental utilizando o EnergyPlus.	43
Fig. 41. Gráfico representativo da simulação utilizando o EnergyPlus e as medições realizadas no compartimento experimental.....	44
Fig. 42. Relação entre a temperatura simulada para o caso de ganho direto e para o caso indireto.....	45
Fig. 43. Período de simulação utilizado – de 23 setembro a 7 de outubro.	51
Fig. 44. Propriedades da argamassa de Leca®XS e PCM – LXSPCM.....	51
Fig. 45. Dados da entalpia e da temperatura da argamassa com Leca®XS e PCM.	52
Fig. 46. Exemplo para o caso de sistema direto com as zonas ZNT1 e ZNT2.....	52

Índice de Tabelas

Tabela 1. Classificação dos tipos de PCM.	12
Tabela 2. Características do PCM Micronal® DS 5040 X	14
Tabela 3. Legenda do sistema de monitorização representado na Fig. 14.....	22
Tabela 4. Especificações técnicas do piranómetro da marca <i>Delta Ohm</i> e modelo <i>LP PYRA</i> .24	
Tabela 5. Características do sensor de humidade e temperatura, <i>HD 9008 TR</i>	25
Tabela 6. Proporção da mistura em relação à massa (%).	29
Tabela 7. Características da argamassa com PCM.....	31
Tabela 8. Síntese dos resultados da temperatura interior do compartimento de referência e experimental efetuada entre o dia 23 de setembro e 7 de outubro.....	41

Lista de abreviaturas

BASF	<i>Building Loads Analysis and System Thermodynamics</i>
BLAST	Building Loads Analysis and System Thermodynamics
CESAM	Centro de Estudos do Ambiente e do Mar
DOE	Department of Energy (United States)
IDF	<i>Input Data File</i>
MDSC	<i>Modulated Differential Scanning Calorimeter</i>
PCM	<i>Phase Change Materials</i>
PVC	Policloreto de Vinilo
RCCTE	Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

1. Introdução

1.1. Enquadramento

O Homem cada vez mais procura conforto em todas as vertentes e aspetos do seu dia a dia. Seja no seu local de trabalho, em áreas residenciais ou em lazer o Homem procura sentir-se confortável e cómodo nas atividades que pratica.

O estado de equilíbrio térmico e consequente sensação de conforto, frequentemente apelidada de sensação de bem-estar vai de encontro a características intrínsecas ao próprio indivíduo (i.e., fatores não quantificáveis como o estado mental, hábitos, vestuário) e ao ambiente envolvente (i.e., fatores quantificáveis como a temperatura do ar, velocidade do ar, humidade) que este ocupa em determinado espaço de tempo. Assim o conforto térmico pode ser definido como o estado de espírito de um indivíduo que traduz uma aceitação agradável do ambiente térmico que o rodeia [1].

Em Portugal, aspetos relativos ao comportamento térmico de edifícios, consumos energéticos, e, consequentemente benefícios associados ao bem-estar geral de comunidades, têm ganho cada vez mais importância, uma vez que Portugal é um dos países mais dependentes de recursos energéticos, sendo que cerca de 90% da energia total consumida é importada [2].

O consumo de energia no sector doméstico em Portugal, de acordo com o Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010, representava, em 2009, 17,7 % do total do consumo final de energia. De ressaltar ainda que, 21,5 % do consumo energético destina-se ao aquecimento do ambiente e 0,5 % ao seu arrefecimento, aspetos estes que acarretam custos elevados para o utilizador [2]. Como incentivo, foram aplicadas em Portugal e na União Europeia, as denominadas *Políticas Energéticas*, que visam a sustentabilidade do abastecimento energético. Desde 1990 que Portugal detém instrumentos legais que impõem uma qualidade mínima aos edifícios do ponto de vista térmico – Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 de abril (RCCTE) que estabelece requisitos de qualidade para os novos edifícios de habitação e o Decreto-Lei n.º 118/98, de 7 de Maio (RSECE). Estas políticas estão assentes em três eixos estratégicos: a segurança do abastecimento nacional, o fomento do desenvolvimento sustentável e a promoção da competitividade nacional. Os edifícios constituem abrigos contra a ação de agentes exteriores, incluindo as adversidades do clima. A estes são impostas cada vez mais exigências, por um lado para corresponder às crescentes expectativas dos utilizadores e por outro lado no sentido da racionalização dos recursos cada vez mais escassos.

As necessidades de aquecimento de uma habitação são inconstantes tanto ao longo do ano, como ao longo do dia, uma vez que existem fortes oscilações de temperatura diárias não sendo necessária a mesma em todas as divisões. Portanto, é importante ter um sistema que possa regular e estabilizar um intervalo de temperatura de conforto que se adequa às necessidades do indivíduo. O desenvolvimento de novos materiais com melhor desempenho térmico, como é o caso de materiais de mudança de fase (PCMs), contribuem para a estabilização da temperatura do ambiente interior, reduzindo o recurso ao consumo de energia.

1.2. Objetivo

O presente trabalho tem como principal objetivo estudar um edifício solar passivo de ganho direto usando um PCM e comparar os resultados com dados experimentais a obter em ensaios, utilizando o programa *EnergyPlus*.

1.3. Metodologia

De forma a atingir os objetivos propostos foi necessário seguir a metodologia apresentada no diagrama seguinte (v. Fig. 1). Nesse sentido procedeu-se ao fabrico em laboratório de lajetas de uma argamassa constituída por PCM e Leca[®]XS (argila expandida de granulometria entre 1,6 e 2,5 mm) para o preenchimento integral do pavimento de uma célula de teste onde se realizaram várias monitorizações. Posteriormente efetuou-se uma comparação entre os dados experimentais e a simulação no programa *EnergyPlus*.

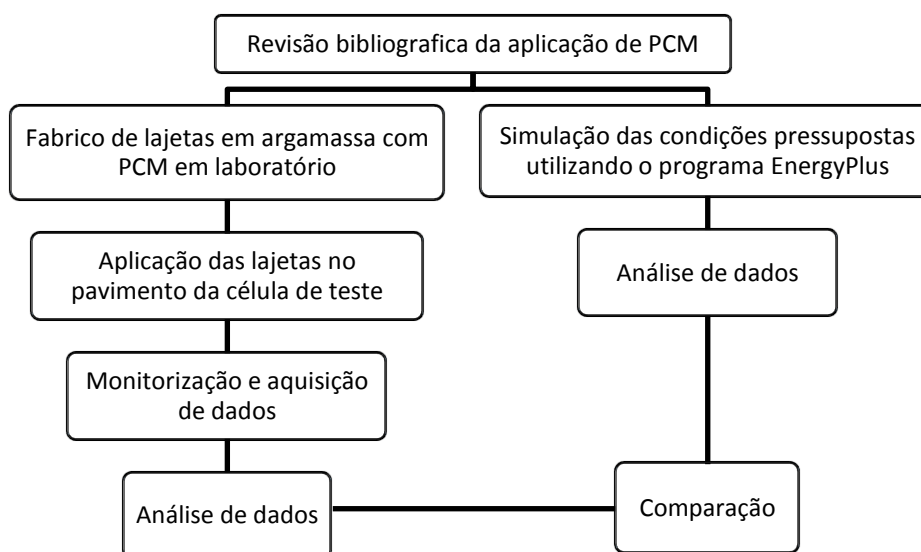


Fig. 1. Diagrama da Metodologia

1.4. Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em sete capítulos. O primeiro capítulo apresenta um breve enquadramento da temática, o objetivo pretendido e a metodologia utilizada. O segundo capítulo aborda o caso dos edifícios solares passivos fazendo realce aos edifícios solares passivos de ganho direto, caso particular desta dissertação. O terceiro capítulo envolve estudo bibliográfico do tema, materiais de mudança de fase (PCM), onde se evidenciam as características, as aplicações e as vantagens e desvantagens deste tipo de material. No quarto capítulo aborda-se o *software Energyplus* e uma breve descrição do mesmo. O quinto capítulo refere-se à análise experimental efetuada, tendo em conta a localização da célula de teste, as suas características e também pelo sistema de monitorização e aquisição de dados. No sexto capítulo, descrevem-se todos os resultados obtidos derivados da monitorização efetuada no interior da célula de teste e da simulação com o programa *Energyplus*. Finaliza o sétimo capítulo onde se expõem as principais conclusões que se retiram do trabalho experimental e sugestões para trabalhos futuros.

2. Edifícios Solares Passivos

Os edifícios solares passivos foram idealizados no sentido de tirar maior proveito da energia solar tendo por base características como a sua conceção, a orientação, o isolamento e também a particularidade dos seus componentes como é o caso das paredes, do solo, do teto e dos vãos envidraçados. Desta forma considera-se que existem dois elementos associados aos edifícios solares passivos: a superfície envidraçada a sul, para que seja captada a radiação solar e a massa térmica, para captação, armazenamento e a distribuição [3].

Um sistema solar passivo pode definir-se como aquele que incorporado no edifício e fazendo parte da sua estrutura construtiva, funciona como coletor e acumulador de energia solar nele incidente, assim como agente de distribuição de energia-calor por meios naturais de transferência [4]. Desta forma o sistema solar passivo consiste basicamente em certos elementos construtivos incorporados no próprio edifício, cujo objetivo é o de contribuir para o seu aquecimento ou arrefecimento natural.

Tome-se como exemplo a estação fria e a estação quente. Os vãos envidraçados orientados a sul aos quais se podem associar elementos massivos, durante a estação fria permitirão o armazenamento da energia solar e a sua utilização posterior pois ocorre uma maximização da captação do sol e conseqüente aquecimento. Durante a estação quente, pretende-se tirar partido de fontes frias que permitirão arrefecer o edifício. Um exemplo de uma fonte fria no Verão é o próprio solo, cujas temperaturas são sempre inferiores à temperatura do ar exterior, sendo uma excelente fonte de arrefecimento dos edifícios. Outra fonte fria a considerar é o ar exterior, que em determinadas horas do dia apresenta uma temperatura inferior à temperatura interior dos próprios edifícios. Tal ocorre devido às grandes amplitudes térmicas diárias no período de Verão verificadas na temperatura do ar, podendo pois ser muito efetiva a estratégia de ventilação nesses períodos, principalmente à noite e início da manhã [5].

Estes dispositivos denominados de sistemas solares passivos são classificados em sistemas de:

- Ganho Direto;
- Ganho Indireto – Parede de Trombe, Parede Massiva, Colunas de água;
- Ganho Isolado – Espaço Estufa ou Coletor de Ar [4].

2.1. Sistema de ganho direto

A grande parte dos edifícios existentes funciona com sistemas de ganho direto. Os ganhos diretos derivam da radiação solar incidente, que depende de fatores como a radiação emitida diretamente pelo sol, a radiação refletida e a radiação difusa. Sendo assim, a radiação global define-se como a quantidade de energia radiante admitida num intervalo de tempo por unidade de área de uma superfície horizontal ($W h m^{-2}$) [6], [7].

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 os paramentos interiores (paredes, lajes de teto e piso) utilizados como armazenamento de calor. Quanto maior for a massa térmica, menor será a variação de temperatura, mas será mais difícil aquecer o edifício. Assim, é necessário um equilíbrio entre massa térmica, isolamento e área de vãos, dependendo muito do tipo de edifício e localização do mesmo [8].

Em todos os sistemas de ganho direto, tal como representado na Fig. 2. as condições mais importantes com respeito aos ganhos solares são as dimensões e a localização dos envidraçados. Qualquer janela, com vidro transparente, orientada a Sul, ou com pequenos desvios a Este ou Oeste, que comuniquem diretamente com um espaço habitado, constitui um captador solar. Note-se que 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 [5], [9].

Este fluxo deve ser mantido dentro dum intervalo tolerável, pois o problema chave do sistema direto é captar o máximo de energia solar necessária no Inverno e paralelamente minimizar os ganhos solares no Verão, quando estes não são desejáveis, com uma oscilação de

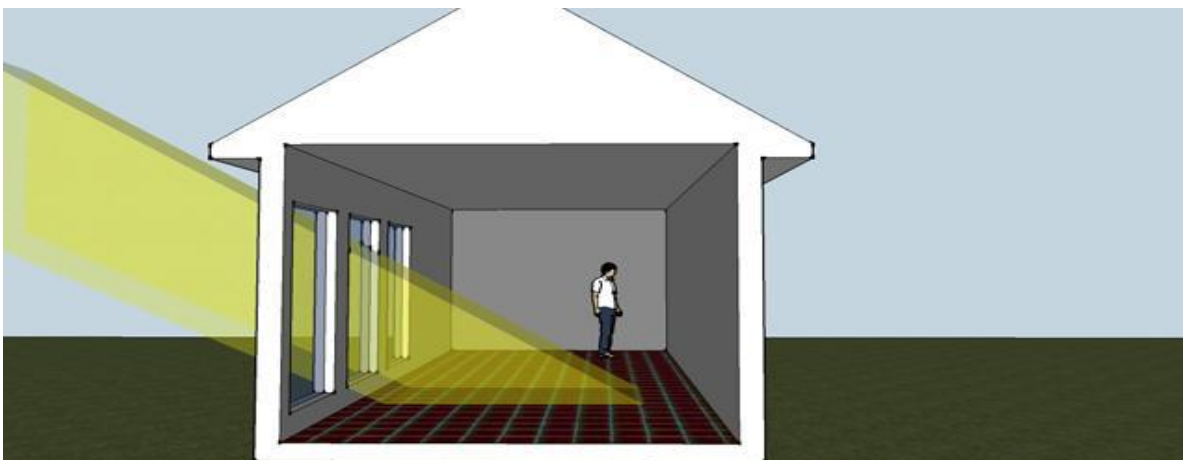


Fig. 2. Ilustração de um edifício solar passivo de ganho direto [41].

temperatura o mais reduzida possível [1].

Assim, resumidamente as pré-condições para um funcionamento eficiente são:

- Correta orientação da janela, preferentemente a Sul, para evitar que as perdas superem os ganhos no Inverno;
- Área transparente da janela em concordância com a capacidade de armazenamento térmico;
- Uso de dispositivos de sombreamento, como forma de 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 principais vantagens do sistema de ganho direto são o de maior rendimento energético tendo em conta que é também o sistema construtivamente mais barato. O facto do vão envidraçado permitir a captação de luz para o interior e a visibilidade para o exterior (se for utilizado vidro ou material translúcido) faz com que o sistema funcione de forma simples, exceto na determinação da oscilação de temperatura dentro do edifício [10]. Como desvantagens têm-se: as grandes superfícies de envidraçado acarretarem alguma falta de privacidade e iluminação excessiva; a radiação solar direta provoca a degradação e descoloração dos materiais localizados no interior; a necessidade de orientação solar favorável (Sul) [11].

2.2. Sistemas de ganho indireto

Nos sistemas de ganho indireto a radiação solar incide sobre uma massa térmica colocada entre o Sol e o espaço a aquecer. A radiação absorvida pela massa transforma-se em energia térmica e é transferida para o interior do edifício. Uma vez que o espaço não recebe diretamente a radiação solar, os sistemas de ganho indireto oferecem mais possibilidade de controlo das oscilações de temperatura, evitando sobreaquecimentos. Os espaços onde estes sistemas se encontram podem tirar partido do desfasamento e receber a energia absorvida durante o dia no final da tarde e início da noite, dependendo muito de cada edifício e da sua utilização.

Os três sistemas base de ganho indireto são: as paredes acumuladoras (paredes de Trombe), 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 [11], [12]. No tópico seguinte aborda-se apenas o caso da Parede de Trombe.

2.2.1. Parede de Trombe.

Este sistema é composto por um vão orientado a sul, no qual se coloca uma parede interior, denominada Parede de Trombe (v. Fig. 3), de espessura que pode variar entre os 10 e os 30 cm. A área exterior e interior da parede é usualmente pintada de cor escura, aumentando assim a captação da radiação solar incidente e posterior emissão da mesma. Com esta estrutura simula-se um comportamento idêntico ao efeito de estufa, atingindo-se temperaturas muito elevadas (30-60 °C) entre o vidro e a parede de armazenamento [10], [13]. O espaço sofrerá um aumento de temperatura por uma corrente de convecção natural entre o espaço interior e o espaço “estufa”. Porém, a energia acumulada na parede é reduzida visto que, maior parte da radiação solar incidente é transferida e utilizada diretamente.

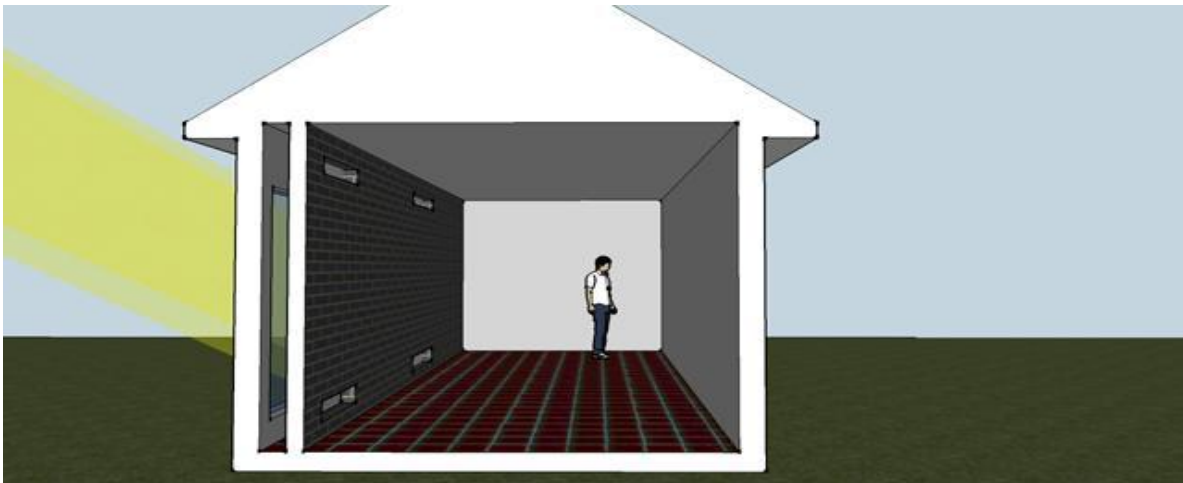


Fig. 3. Ilustração de um edifício solar passivo de ganho indireto [41].

No caso de não se pretender utilizar a estratégia de ventilação natural, a radiação incidente irá sendo acumulada na parede durante o dia, e por condução será transferida para o interior do espaço a aquecer, demorando um tempo que depende da espessura da parede. Este sistema assegura vantagens no sentido em que proporciona calor durante o dia ao compartimento, por convecção de ar quente, e também durante a noite, por radiação da energia armazenada na massa térmica. Desta forma a quantidade de calor cedida à área interior envolvente é mais rigorosa do que no caso do sistema de ganho direto para além de evitar os problemas de degradação dos objetos expostos à radiação solar diretamente pelo vão envidraçado [7].

Os sistemas de ganho indireto deverão incluir dispositivos móveis de sombreamento, de forma a desativá-los no período de Verão e assim permitirem controlar as temperaturas interiores, evitando-se assim condições de sobreaquecimento [1]. Ainda que benéfico em algumas

particularidades existem aspetos a considerar como desvantagens à utilização deste sistema uma vez que as paredes de armazenamento obrigam à orientação Sul e as perdas térmicas noturnas costumam ser elevadas. Num contexto prático a principal desvantagem é o espaço ocupado por estas estruturas que diminuem o espaço habitável e incrementam em grande escala o peso do edifício. Da mesma forma, a parede de Trombe impede a visualização da paisagem exterior acarretando a necessidade da abertura de envidraçados orientados noutra sentido como por exemplo a norte.

2.3. Sistemas de Ganho Isolado

Nos sistemas de ganho isolado (v. Fig. 4), 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. Este sistema utiliza a combinação dos efeitos de ganho direto e indireto.

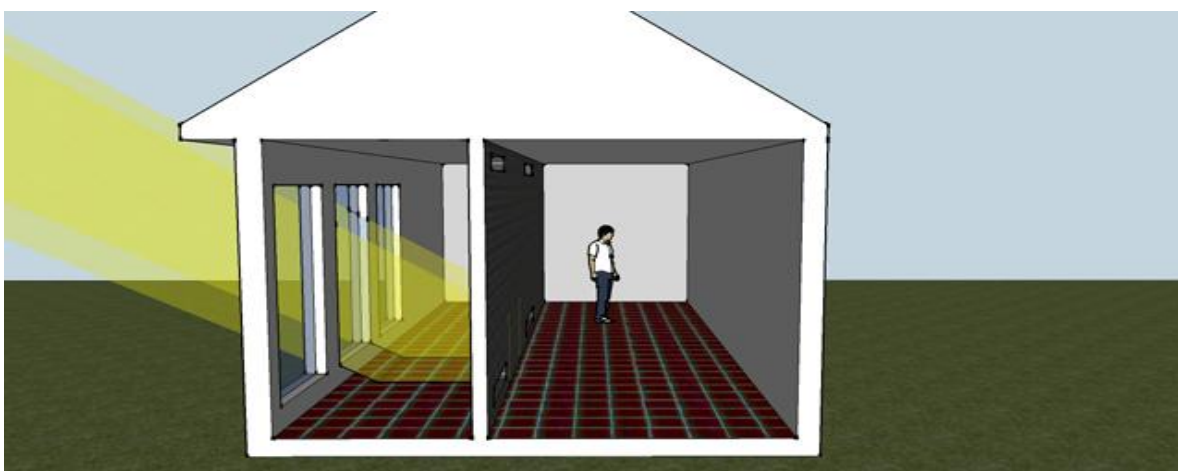


Fig. 4. Ilustração de um edifício solar passivo de ganho isolado [41].

A energia solar é transmitida por condução através da parede de armazenamento e ainda por convecção, no caso de existirem orifícios que permitem a circulação de ar. Também diversos vãos envidraçados podem acarretar um aquecimento excessivo nos meses de verão, por isso o compartimento deve incorporar sistemas de sombreamento passivo ou ativo em janelas verticais e clarabóias operáveis para auxiliar no resfriamento do espaço [7], [8].

3. Phase Change Material – PCM

O termo "material de mudança de fase" utiliza-se para descrever materiais que utilizam as mudanças de fase, para absorver ou libertar grandes quantidades de calor latente a temperatura relativamente constante [14].

Este tipo de material tem um forte impacto sobre oscilações de temperatura e apresenta uma espessura máxima funcional de aproximadamente 10 mm, devido à sua baixa condutividade [15]. A utilização deste tipo de material remonta ao século XIX e inicialmente era utilizado para a conservação de mercadorias durante o seu transporte visto garantir temperaturas adequadas [16].

Para facilitar a compreensão acerca do funcionamento deste tipo de material tome-se como exemplo a água que a pressão constante e a diferentes temperaturas pode encontrar-se no estado sólido, líquido ou gasoso. Considere-se então uma dada massa de gelo, a temperatura e pressão conhecidas. Ao fornecer calor ao gelo, a pressão constante, o volume específico e a temperatura aumentam até atingir 0 °C e o gelo funde permanecendo a temperatura constante. Neste ponto, designado por ponto de fusão, todo o calor fornecido é aproveitado para se dar a mudança de estado, de sólido para líquido. A quantidade total de calor necessário para se dar a fusão completa do gelo é de, aproximadamente, 334 kJ kg⁻¹ [5]. Quando todo o gelo estiver fundido, qualquer transferência de calor adicional causa um aumento da temperatura do líquido. A energia fornecida à água a 0 °C (na temperatura de fusão) só será restituída após a diminuição da temperatura, na fase de solidificação ocorrendo uma reação exotérmica.

O esquema representado na Fig. 5 exemplifica o mecanismo de funcionamento de um PCM. Quando a temperatura aumenta o PCM absorve calor e funde. Durante o processo de mudança de fase o PCM irá absorver grandes quantidades de calor, com mínimas variações de temperatura e neste período de tempo a função do PCM é proporcionar um efeito de arrefecimento. O tempo que o PCM irá fornecer um efeito de arrefecimento é determinado pela entalpia de fusão do PCM, também apelidado de calor latente de fusão. O ciclo inverso ocorre quando a temperatura externa diminui. O PCM liberta o calor absorvido aumentando a temperatura externa. Durante este período de tempo, o PCM solidifica e proporciona um efeito de aquecimento [17].

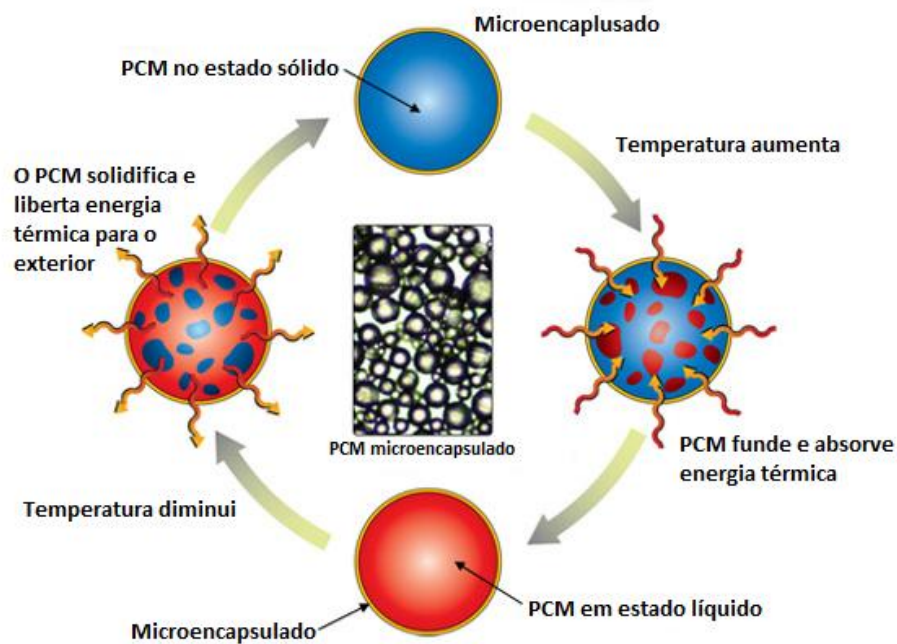


Fig. 5. Esquema representativo do mecanismo de funcionamento de um PCM, adaptado [17].

3.1. Tipos de PCM

Existem vários tipos de PCM e estes podem ser classificados de acordo com o seu processo de mudança de fase (fusão, solidificação, sublimação, vaporização ou condensação) e com base na sua composição química [8]. Na Fig. 6 esquematiza-se uma síntese dos PCM existentes.

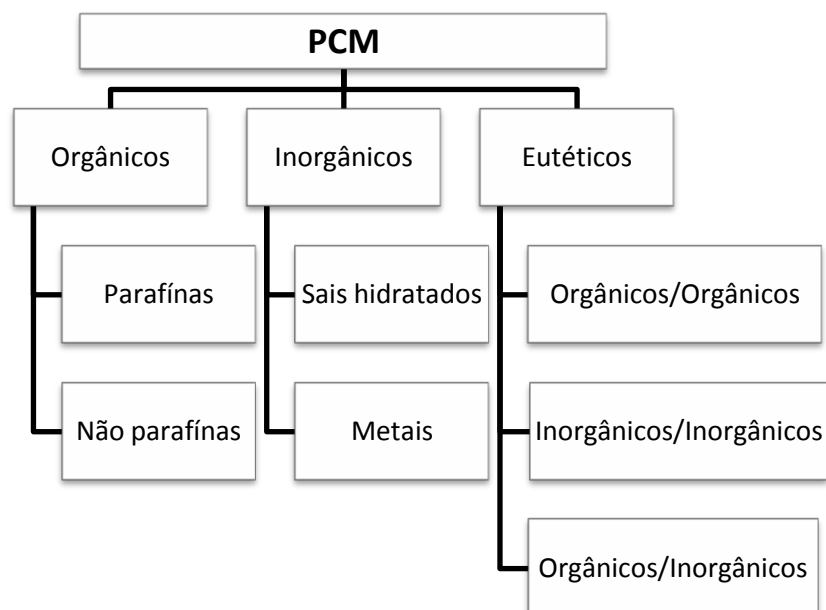


Fig. 6. Organograma dos tipos de PCM existentes, adaptado[18].

Os PCMs orgânicos podem ser divididos em duas categorias: as parafinas e as não-parafinas. As parafinas comerciais são baratas e possuem uma razoável densidade de armazenamento térmico. Os PCMs orgânicos não-parafínicos existem em maior número e apresentam propriedades muito diferentes. Ao contrário das parafinas que possuem propriedades muito semelhantes, as não-parafinas variam muito nas suas características uma vez que incluem grupos como ácidos gordos, ésteres, álcoois e glicóis [19].

Os PCMs inorgânicos mais comuns são os sais hidratados. Estes são materiais bastante atrativos para o armazenamento de energia térmica uma vez que apresentam uma densidade de armazenamento e condutividade térmica elevadas e um custo razoável comparando com as parafinas [19]. Outra categoria importante dos inorgânicos inclui material metálico.

Os PCMs eutéticos resultam da mistura de dois ou mais componentes com um ponto de fusão muito baixo, cada um dos quais fundindo e congelando congruentemente formando uma mistura de componentes cristalinos. Estes materiais estão comumente divididos em três categorias: orgânico-orgânico, orgânico-inorgânico e, inorgânico-inorgânico. O custo elevado destas misturas é uma desvantagem, sendo atualmente cerca de duas ou três vezes superior ao dos compostos orgânicos ou inorgânicos [20].

Na Tabela 1 estão descritas algumas vantagens e desvantagens associadas a cada tipo de PCM.

Tabela 1. Classificação dos tipos de PCM [21], [22].

Classificação	Vantagens	Desvantagens
Orgânicos	Extensa gama de temperaturas	
	Não sofrem segregação de fase	
	Elevado ponto de fusão	Baixa condutividade térmica
	Pequena variação de volume	Inflamável
	Não sofrem sobrearrefecimento	Não compatíveis com
	Quimicamente inerte, estável e reciclável	recipientes de plástico
	Boa compatibilidade com outros materiais	
	Não corrosivos	
Inorgânicos	Elevado ponto de fusão	
	Elevada condutividade térmica	Sobrearrefecimento
	Pequena variação de volume	Corrosão
	Baixo custo	Segregação de fase
	Baixo impacto ambiental	Irritante
	Não inflamáveis	Elevada pressão e vapor
	Potencial reciclável	
	Compatíveis com recipientes de plástico	
Eutéticos	Temperatura de fusão bem definida	
	Elevada capacidade de armazenamento de calor	Sem referências

3.2. Incorporação em materiais

O PCM pode ser incorporado em elementos e materiais de construção por vários métodos, sendo estes: incorporação direta, imersão e encapsulamento [19].

3.2.1. Incorporação Direta

A incorporação direta é o método mais simples, viável e económico no qual PCMs líquidos ou em pó são diretamente adicionados ao material de construção como gesso ou betão durante a produção. Neste método, não existe necessidade de equipamento extra. No entanto, este processo apresenta algumas desvantagens, sendo as principais a incompatibilidade com alguns materiais de construção e fugas [8], [23].

3.2.2. Imersão

No método de imersão, componentes de estruturas de construção como gesso, tijolo ou betão, são mergulhados em PCMs fundidos para depois absorverem os PCMs nos poros internos com ajuda de elevação capilar. Uma desvantagem deste método refere-se ao derrame, principalmente após grande número de ciclos, não sendo adequado para longos períodos. Embora a incorporação direta e a imersão possuam diferentes processos de operação, ambos incorporam os PCMs diretamente nos materiais de construção convencionais [8], [24].

3.2.3. Macroencapsulamento

Na técnica de macroencapsulamento, uma quantidade significativa de PCM pode ser empacotada em recipientes tais como tubos, esferas, painéis ou sem forma definida para serem utilizados em elementos de construção [21]. O macroencapsulamento apresenta vantagens como facilidade de transporte e manuseamento, pode ser projetado para atender uma aplicação pretendida e melhora a compatibilidade de PCM com o ambiente, agindo como uma barreira. No entanto, o recipiente deve ser compatível com o material circundante. É possível ainda, reduzir a variação de volume externo, algo importante para aplicação em edifícios. Esta técnica permite evitar grandes separações de fases, o aumento da taxa de transferência de calor e, por último, proporciona uma estrutura de autorregulação para o PCM. No entanto, esta técnica apresenta também desvantagens como uma baixa condutividade térmica e a necessidade de proteção contra destruição (furos ou pregos nas paredes). Portanto, o encapsulamento deve ser resistente à corrosão, termicamente estável e fiável [23], [24].

3.2.4. Microencapsulamento

No microencapsulamento, pequenas partículas de PCM que variam de 1 μm a 1000 μm são colocadas numa fina película sólida feita normalmente de polímeros naturais e sintéticos. Esta película mantém a sua forma e previne o PCM de fugas. Existem vários métodos de microencapsulamento: físicos, físico-químicos e químicos. O microencapsulamento apresenta várias vantagens como o impedimento de derrame do PCM durante a transição de fases através da construção de uma barreira e, fornecimento de alta taxa de transferência de calor utilizando maior área de superfície por unidade de volume. É resistente à mudança de volume durante a fase de transição sendo térmica e quimicamente estável. No entanto, esta técnica apresenta também alguns problemas como os associados ao facto da rigidez da película impedir a convecção

natural e, portanto, diminuir a taxa de transferência de calor podendo afetar as propriedades mecânicas dos materiais de construção e custo de investimento elevado [18] .

3.2.5. Impregnação de matrizes porosas

É possível provocar o aumento da transferência de calor através da utilização de matrizes porosas impregnadas com PCM. No entanto, o desempenho destes materiais depende diretamente da porosidade e da condutividade térmica. Uma vez que a condutividade térmica diminui com o aumento da porosidade, é possível dizer que existe um valor ótimo de porosidade da matriz que assegura uma boa taxa de impregnação sem comprometer a condutividade [8],[18].

3.3. PCM nas construções

Os PCM têm muitas aplicações na área da construção, muito devido à sua grande compatibilidade com outros materiais. A empresa alemã BASF desenvolveu o seu produto Micronal® com base em microcápsulas que contêm uma cera de parafina no seu interior. O modo de encapsulação deste material é realizado por microencapsulação, na qual a cera de parafina é revestida com polímero acrílico, cuja dimensão não ultrapassa os 5 µm podendo estas microcápsulas ser misturadas com outros materiais criando por exemplo argamassas para rebocos ou painéis [16], [23], [25]. A escolha do processo de fabrico e o material irá determinar as características finais sendo essencial que os materiais sejam elásticos e que consigam suportar as variações de temperatura e volume durante vários ciclos ao longo de anos.

No caso do Micronal® da BASF, uma das soluções alvo de estudo utiliza microcápsulas com uma espessura de 2 a 20 µm para envolver a cera à base de parafina. Quando encapsulado, este material pode ser adicionado ao gesso para fazer placas de gesso com PCM ou misturado com outras argamassas como referido anteriormente [25]. No presente estudo o PCM utilizado foi o Micronal® DS 5040 X, sendo as suas características apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características do PCM Micronal® DS 5040 X [26].

Micronal DS 5040 X	
Tipo	Pó
Ponto de fusão (aproximado) [°C]	23
Faixa de operação [°C]	10 - 30
Capacidade de armazenamento total (aproximado) [kJ kg ⁻¹]	135
Capacidade de calor latente (aproximado) [kJ kg ⁻¹]	100



Fig. 7. Material de mudança de fase - Micronal® em pó [25].

Na construção, a utilização deste material pressupõe que ocorra uma diminuição das oscilações de temperatura ambiente interior sendo a sua função a condução do calor, absorvendo ou restabelecendo o mesmo. As mudanças de fase que envolvam a vaporização, embora envolvam maior calor latente, não são normalmente utilizadas para armazenar energia porque os gases ocupam grande volume à pressão atmosférica logo o PCM mais indicado para a aplicação na construção e consequente armazenamento de energia térmica em edifícios é um PCM que realize a mudança de fase entre sólido e líquido uma vez que envolvem uma pequena mudança de volume (menos que 10 %) [27].

Nas construções, a condutividade térmica vem associada à resistência térmica dos materiais e elementos construtivos. O objetivo inicial é isolar o interior do exterior, de modo a que se mantenha uma temperatura constante no interior do edifício e não sofra as oscilações da temperatura exterior prevenindo ganhos ou perdas térmicas indesejadas. A condutibilidade térmica entra em ação e quanto menor for o seu valor, mais isolador um material se torna e quanto maior for o valor, maior será a sua capacidade de transferência térmica [28].

A inércia térmica de um edifício pode definir-se como a capacidade de diminuir as variações de temperatura no seu interior, ou seja, de reduzir a transferência ou transmissão de calor. Isto acontece devido à sua capacidade de acumular calor nos elementos construtivos. A inércia térmica determina a velocidade de absorção e a quantidade de calor absorvida por parte dos materiais e elementos construtivos. A aplicação de um material de mudança de fase à construção irá seguramente aumentar a inércia térmica do mesmo [29].

Uma das vantagens deste material em comparação com outros materiais de construção com igual capacidade de armazenamento térmico é sem dúvida a espessura (v. Fig. 8), uma vez

que uma parede de gesso com PCM tipo Micronal® ocupa 1,5 cm enquanto uma parede de betão ocupa 9 cm e uma parede de alvenaria convencional, 12 cm [16], [25].

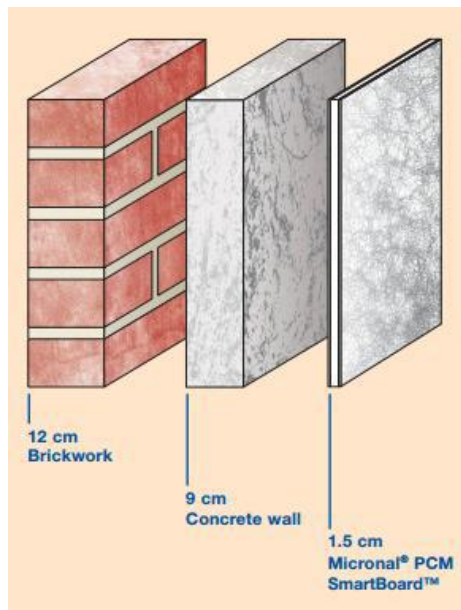


Fig. 8. Representação esquemática de capacidade de armazenamento igual para espessuras diferentes nos vários materiais [25].

O custo dos PCM pode ser visto como uma desvantagem na fase inicial porque as microcápsulas de parafina têm um custo elevado comparado com outros materiais. No entanto este investimento inicial pode ser amortizado entre 5 a 10 anos, dependendo da localização do edifício e preços praticados de energia. A progressiva utilização deste material na construção poderá contribuir para que o preço das microcápsulas venha a diminuir futuramente [30],[25].

4. Energyplus

O Energyplus é um *software* criado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, tendo por base programas como o BLAST e o DOE-2. O programa combina o estudo e análise de edifícios do ponto de vista do comportamento térmico e é composto por três componentes básicos:

- um controlador da simulação;
- um módulo de simulação do balanço de calor e massa;
- um módulo de simulação dos sistemas da edificação.

Este programa efetua a simulação do balanço térmico e de massa de uma determinada zona de um edifício, pelo que é estritamente necessário definir “zonas” e definir todos os aspetos referentes à geometria e materiais existentes para que se consiga caracterizar o edifício. O programa de simulação Energyplus permite uma interface com o Google SketchUp (v. Fig. 9). Este *software* especialmente dirigido para a arquitetura, permite modelar qualquer tipo de edifício e introduzir as coordenadas de forma automática para o Energyplus [31].

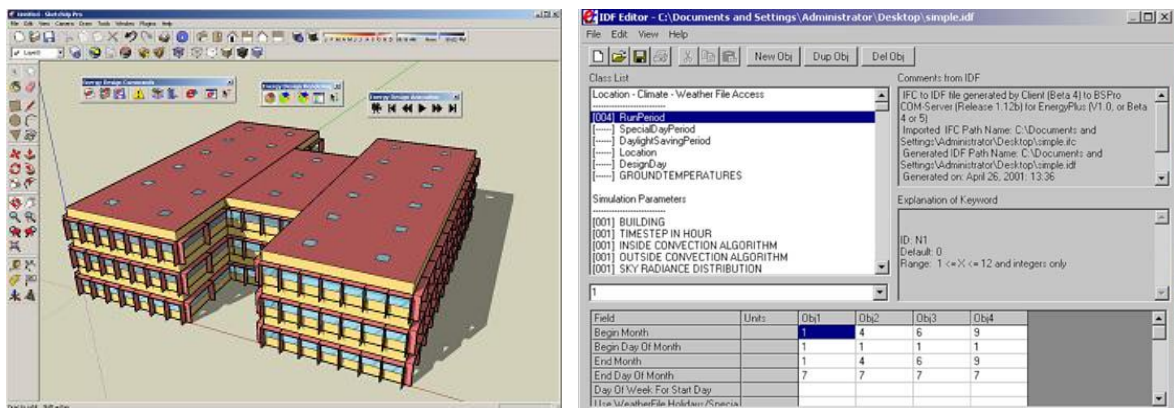


Fig. 9. Exemplo de um edifício concebido (a) em SketchUp e (b) editor de texto em formato IDF[31].

Em alternativa à utilização do Google SketchUp, o EnergyPlus contém um editor de texto (v. Fig. 9), em formato IDF, onde o utilizador pode introduzir parâmetros para a caracterização do edifício.

5. Análise Experimental

5.1. Localização

A célula de teste localiza-se no Campus da Universidade de Aveiro (v. Fig. 10), junto à Ponte Pedonal sobre o Estreito de S. Pedro, com as coordenadas GPS 40° 62.809' N e 8° 65.6594' W orientada a Sul Real.

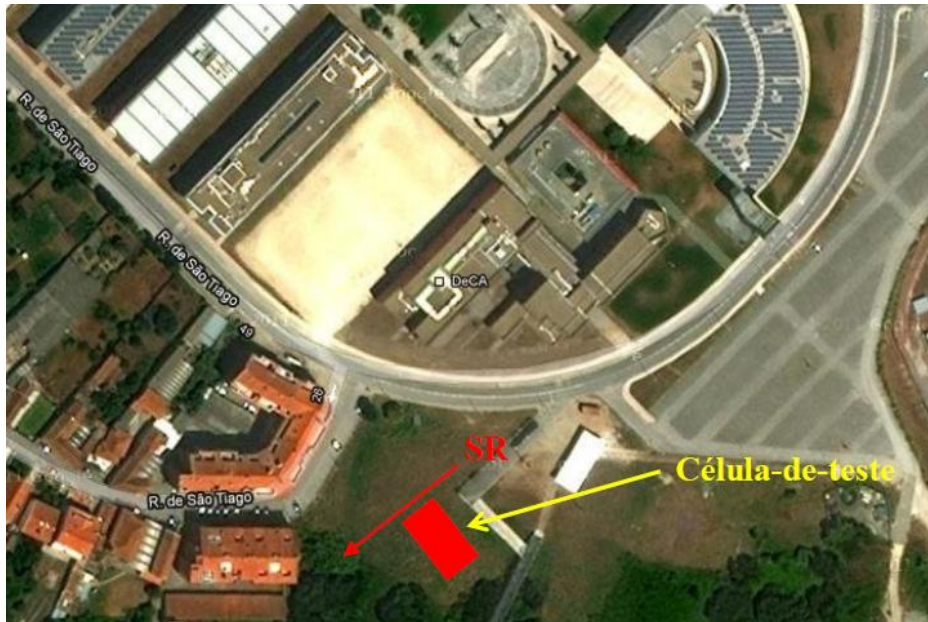


Fig. 10. Localização da célula de teste.



Fig. 11. Célula de teste.

A célula de teste encontra-se dividida em dois compartimentos de igual dimensão, designados posteriormente por compartimento de referência (CREF) e compartimento experimental (CEXP). Na célula de teste não se encontra instalada qualquer pala de sombreamento (proteção solar), tal como se verifica na Fig. 11, nem existe qualquer dispositivo de ventilação natural, ao contrário do que pressupõe um sistema solar passivo de ganho direto, prejudicando assim a otimização de conforto térmico no interior dos compartimentos.

A orientação a Sul Real assenta nos princípios bioclimáticos de um sistema solar passivo que permite à célula de teste no Verão, devido à posição mais elevada do Sol, minimizar os ganhos solares passivos e provocar maiores zonas de sombreamento nos edifícios, enquanto no Inverno, o Sol se encontra mais baixo e assim é potenciada a incidência da radiação solar [7].

5.2. Esquema (Planta e Alçado)

Conforme se constata no esquema da Fig. 12, a base da célula de teste possui uma forma retangular com 7,000 m de comprimento e 2,350 m de largura - perfazendo uma área de 16,5 m² - e apresenta um pé direito interior de 2,275 m e exterior de 2,570 m. O volume útil (interior) é de aproximadamente 37,4 m³ e a espessura da cobertura e do pavimento é de 14,8 cm.

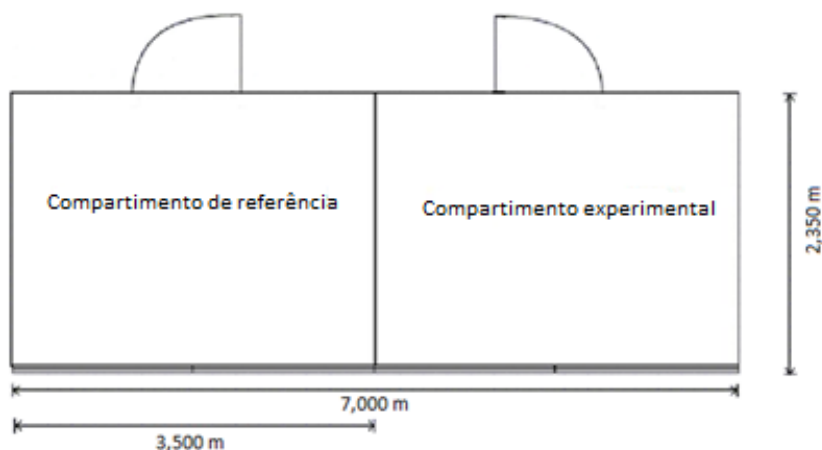


Fig. 12. Planta da célula de teste.

5.3. Caracterização e constituição da célula de teste

O conhecimento dos diferentes materiais constituintes da célula de teste é determinante quanto ao comportamento térmico do mesmo. A nível energético, a escolha de um bom sistema isolante conduz a uma diminuição de perdas de calor para o exterior no Inverno e reduz os ganhos de calor no Verão, podendo diminuir o consumo energético destinado a aquecimento da

residência no Inverno. Nesta secção, é realizada uma caracterização dos elementos estruturais verticais, das paredes, da parede divisória, do pavimento, da fachada norte/sul e da cobertura da célula de teste.

Os pilares da célula de teste são formados por perfis quinados em aço galvanizado de 2 mm de espessura e contêm no interior um tubo redondo em PVC, com 70 mm de diâmetro e 2,5 mm de espessura, destinado ao escoamento das águas da cobertura. No interior da célula, os pilares são rematados por uma chapa lacada.

As paredes da célula de teste são formadas por painel *sandwich* com um coeficiente de transferência térmica de $0,51 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, apresentando uma boa resistência à humidade. O painel apresenta 40 mm de espessura e é formado por chapa de aço pré-lacada sobre base galvanizada em ambas as faces e isolamento intermédio (térmico e acústico) formado à base de resinas de poliuretano auto extingüível.

A composição da parede divisória é igual às restantes paredes da célula de teste. Nesta parede divisória aplicaram-se placas de poliestireno expandido sem encaixe (EPS 100) com 30 mm de espessura, revestindo toda a área da parede. A referida placa de isolamento possui uma condutibilidade térmica de $0,036 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ e resistência térmica de $0,75 \text{ W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. A aplicação deste material assentou no princípio da redução de transmissão térmica entre o compartimento de referência e o compartimento experimental, tendo por objetivo assim resultados mais fiáveis na análise térmica de cada um dos compartimentos. Devido às elevadas temperaturas alcançadas no interior dos compartimentos, foram colocadas folhas de alumínio nas bordas das placas de isolamento junto ao vão envidraçado.

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

A face da célula de teste orientada a norte é constituída por um painel *sandwich*, que inclui duas portas em aço lacado a branco, de dimensões $0,900 \text{ m} \times 2,010 \text{ m}$, que dão acesso a cada um dos compartimentos. A face da célula de teste orientada a Sul é composta por duas montras de caixilharia em alumínio lacado a branco ($1,800 \text{ m} \times 2,280 \text{ m}$) com vidro duplo incolor, sem proteção solar.

A cobertura da célula de teste é formada 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 da cobertura é de chapa galvanizada com perfis conformados a frio sobre a qual está sobreposto 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. Estas duas camadas estão separadas por fibra de vidro com lâmina anti humidade (espessura de 80 mm) de forma a aumentar a capacidade de isolamento da cobertura.

5.4. Sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados foi realizada através de equipamentos de medição da temperatura, humidade relativa, radiação solar e fluxo de calor. Todos os aparelhos utilizados para realizar as medições pretendidas foram colocados de forma estratégica tanto no interior como no exterior da célula de teste. A Fig. 13 descreve de forma simplista o esquema do sistema de aquisição de dados.

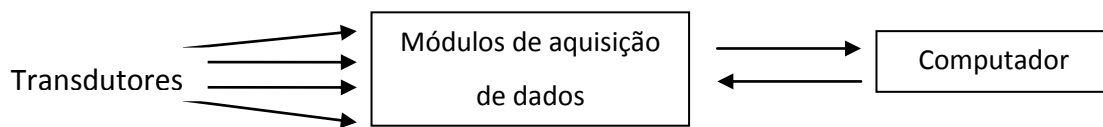


Fig. 13. Esquema representativo do sistema de aquisição de dados.

O sistema de monitorização, representado na Fig. 14, encontra-se no interior do compartimento de referência, numa caixa metálica, que foi isolada com placas de poliestireno expandido de 3 cm a fim de absorver radiação solar e, desta forma, não influenciar os resultados da temperatura interior. Este sistema possibilita a aquisição em tempo real de dados das sondas de medição através de módulos de aquisição de dados que processam e convertem a informação proveniente das sondas e regista-os num portátil através de um *software* dedicado denominado *EZ Data Logger Basic* (v. Fig. 15).

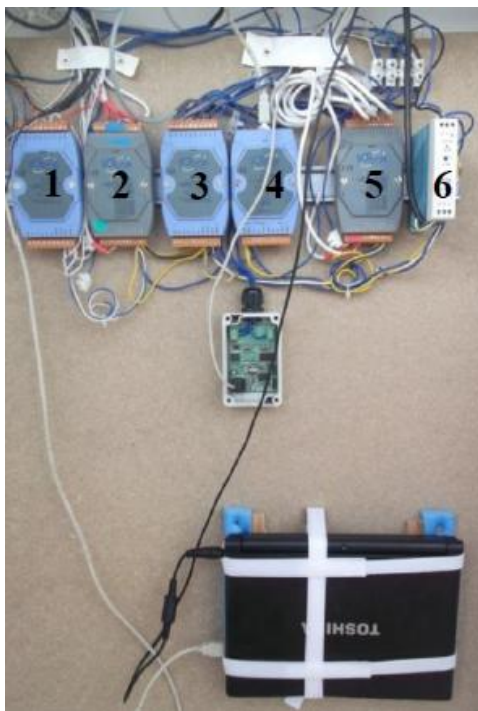


Fig. 14. Sistema de monitorização no compartimento de referência.

Tabela 3. Legenda do sistema de monitorização representado na Fig. 14.

Nr.	Componentes
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 das sondas <i>PT100</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 conversor <i>USB</i> para <i>RS485</i> da <i>ICPDAS</i> modelo <i>I-7561-CR</i>
5	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>
6	Fonte de alimentação de 24v da <i>MeanWell</i> modelo <i>MDR-20-24</i>

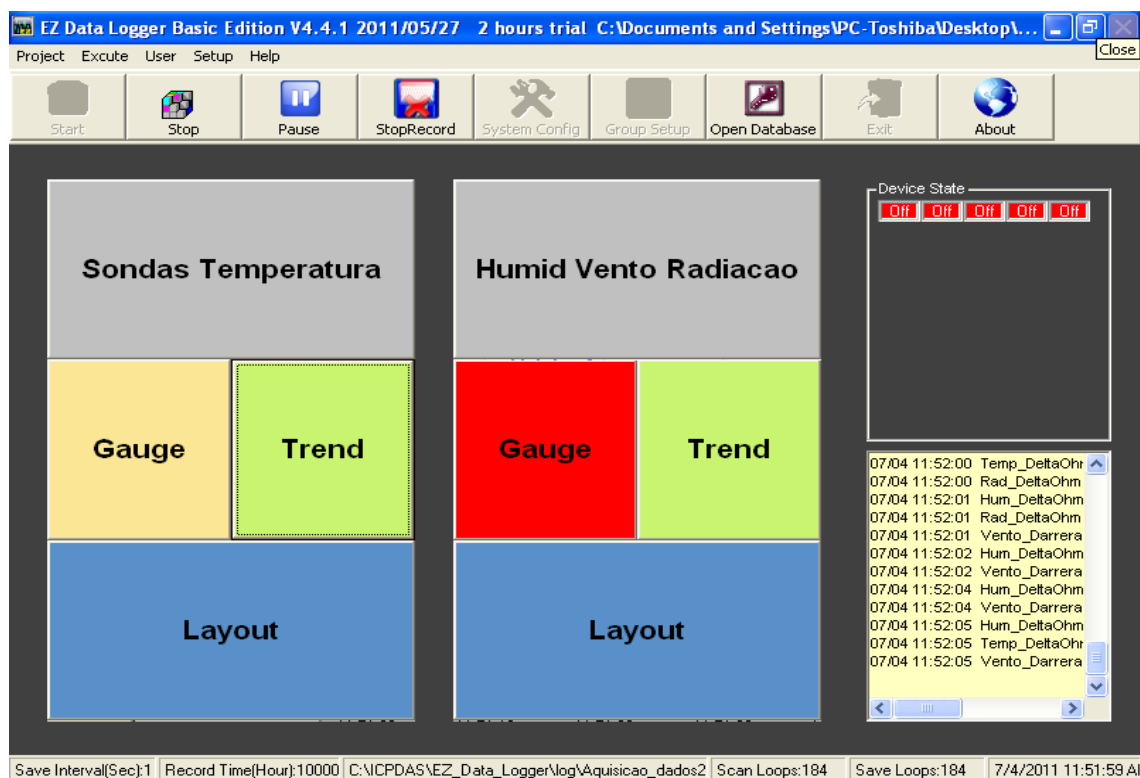


Fig. 15. Software EZ Data Logger Basic.

Segue-se uma descrição mais detalhada do mesmo e, em Anexo as características mais específicas.

5.4.1. Descrição dos equipamentos de medição - Sensores

5.4.1.1. Radiação solar - Piranómetro

O equipamento utilizado na medição da radiação solar global (em $W m^{-2}$) foi o piranómetro LP PYRA 03 de 2ª classe da Delta Ohm representado na Fig. 16. Este equipamento cumpre os padrões ISO 9060 e atende aos requisitos definidos pela *World Meteorological Organization (WMO)* e encontra-se instalado sobre a cobertura da célula de teste. Na Tabela 4 encontram-se descritas as características do piranómetro.



Fig. 16. Piranómetro LP PYRA 03 de 2ª classe da Delta Ohm.

Tabela 4. Especificações técnicas do piranómetro da marca *Delta Ohm* e modelo *LP PYRA*[32].

Parâmetro	Especificações Técnicas
Sensibilidade Típica	4..20 mA (0-2000 W m ⁻²)
Impedância	33 Ω ÷ 45 Ω
Faixa de medição	0-2000 W m ⁻²
Ângulo de visão	2πsr
Faixa espectral	305 nm ÷ 2800 nm (50%)
Temperatura operação:	-40 °C ÷ 80°C
Dimensões	
Peso	0,45 Kg

5.4.1.2. Temperatura e humidade relativa exterior – Sonda HD 9008 TR

As medições da temperatura e humidade relativa exteriores foram realizadas através da sonda *HD 9008 TR* que possui um sensor capacitivo de humidade do tipo *H6100* e um sensor de temperatura (*PT100*), montados na extremidade de um tubo plástico (v. Fig. 17) [33]. A sonda foi colocada no exterior numa estrutura metálica sobre a cobertura da célula de teste e de forma a evitar que as correntes de ar, radiação solar e chuva interfiram nos resultados foi instalado um suporte com 12 anéis da *Delta Ohm*. A humidade relativa, em percentagem, é dada pela razão entre a pressão de vapor e a pressão de vapor de saturação à mesma temperatura e pressão. Tendo em conta que a temperatura varia durante o dia a humidade relativa também irá variar inversamente, uma vez que quando a temperatura aumenta, é necessária uma quantidade maior de moléculas de vapor de água para saturar o ambiente envolvente.



Fig. 17. Sonda HD 9008 TR.

Tabela 5. Características do sensor de humidade e temperatura, *HD 9008 TR* [34].

	Parâmetro	Valores característicos
	Temperatura de trabalho da parte eletrónica	-40... +80°C
	Temperatura de trabalho do sensor	-40... +80°C
	Alimentação do transmissor	7... 30 Vcc (4... 20mA)
	Capacidade	300 pF typ.
	Faixa de medição	5...98 %UR
Humidade	Precisão à 20°C	±2 % RH (5...90 %RH); ±2,5 % RH (para os demais valores da faixa)
	Tempo de resposta à 63 % da variação final	3 minutos com filtro; 6 segundos sem filtro
	Sinal de saída	0 % UR = 4,0 mA; 100% UR = 20,0 mA
	Resistência com carga	$R_{lmax} = (V_{cc}-7) / 22 \text{ mA}$
	Faixa de medição – Configuração padrão	-40...+80°C
Temperatura	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	$R_{lmax} = (V_{cc}-7) / 22 \text{ mA}$
	Dimensões	26 x 225 mm
	Comprimento máximo	200 m
	Secção mínima do fio	20AWG - 0,5 mm ²
	Diâmetro máximo do cabo	5 mm

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

A sonda JUMO 907021/21 é um transdutor desenvolvido especialmente para aplicações AVAC e possui um sensor de humidade e um sensor de temperatura PT100. Na parede norte de cada compartimento foi colocada uma sonda JUMO 907021/21, sendo este aparelho responsável pela determinação da humidade relativa e da temperatura, interior[35].



Fig. 18. Sonda Jumo 907021/21.

5.4.1.4. Fluxo de calor - Hukseflux HFP01

O fluxímetro Hukseflux HFP01, representado na Fig. 19, foi utilizado na determinação do fluxo de calor de superfície e foram colocados no pavimento da célula de teste. O fluxo de calor é definido como a taxa de transferência de calor que atravessa um determinado material por unidade de área. Este fluxímetro possui um corpo de cerâmica-plástico que mantém a resistência térmica baixa. A margem de erro é de $\pm 20\%$ em relação a uma gama de condutibilidade térmica de $0,1 - 1,7 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ (de areia seca para areia saturada de água) no intervalo de temperatura de $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ [36]. Os fluxímetros foram colocados no pavimento de cada um dos compartimentos da célula de teste.



Fig. 19. Fluxímetro - Hukseflux HFP01.

5.4.1.5. Medição de temperatura em pontos estratégicos - Sondas PT100

Para a obtenção de dados de temperatura em pontos estratégicos da célula de teste utilizaram-se 12 sondas PT100 (6 no compartimento experimental e 6 no compartimento de referência). As PT100 são também designadas por termoressistências e determinam a temperatura do meio ambiente através da variação da resistência elétrica da platina em relação à sua temperatura. As PT100 utilizadas possuem bolbos de classe de tolerância “A” e de forma a minimizar os erros de medição é utilizado o método de medição de três fios (compensação simples). A sua composição de três fios destina-se a compensar a sensibilidade dessas resistências relativamente ao comprimento do cabo. O próprio cabo tem uma resistência proporcional ao seu comprimento que poderia, sobretudo para cabos extensos, alterar as medidas fornecidas pela sonda. O uso de três fios permite compensar este efeito, garantindo às sondas a precisão necessária. Por outras palavras, as ligações por três fios nas sondas PT100 têm como função “anular” a resistência do cabo de modo a evitar os erros de medição de temperatura [37].



Fig. 20. Conjunto operativo de 12 sondas PT100.



Fig. 21. Posicionamento da sonda de temperatura e humidade relativa interior JUMO 907021/21 e de sondas PT100 no compartimento experimental.

A medição da temperatura interior no compartimento experimental foi efetuada a partir de 4 sondas PT100, colocadas no teto, na parte superior e inferior da parede Norte e na parede divisória tal como se verifica na Fig. 21. As pontas das sondas PT100 não foram colocadas em contacto com a superfície, mas dobradas para o interior da célula de teste. Na Fig. 22 é possível verificar a sonda PT100 colocada na parte inferior da lajeta de argamassa com PCM no compartimento experimental.



Fig. 22. Sondas PT100 a realizar monitorização de temperatura inferior.

5.5. Argamassa com PCM - Lajetas

A produção da argamassa com PCM foi realizada no laboratório da Weber Saint-Gobain, localizada na Zona Industrial de Taboeira no distrito de Aveiro e obedece aos requisitos da normalização europeia vigente EN998-1 [38].

A argamassa de revestimento interior com PCM foi previamente desenvolvida pela Tânia Salgueiro. Nesse trabalho foram elaboradas várias formulações de argamassa com PCM incorporado, até à obtenção de uma formulação sem fissuração aparente. Na Tabela 6 encontram-se discriminadas as proporções da mistura de Leca® XS, cimento e PCM utilizadas para a produção das lajetas em laboratório [39]. A quantidade de água adicionada a esta mistura foi numa proporção de 0,85 l kg⁻¹ de argamassa.

Tabela 6. Proporção da mistura em relação à massa (%).

Material	Proporção da mistura em relação à massa (%)
Cim CZ,I, 42.5R	15
LECA® XS	60
PCM – Micronal DS 5040 X	25

Para a execução do trabalho experimental foram produzidas várias lajetas com a dimensão de 30 cm x 30 cm x 2 cm de forma a ser possível uma fácil aplicação das mesmas no pavimento da célula de teste. Neste sentido foram construídos moldes desmontáveis com ripas de madeira que facilitaram quer o preenchimento da lajeta quer o posterior desmanche. A Fig. 23 evidencia o molde já aparafusado e também revestido interiormente com fita adesiva para que o desmanche da mesma seja facilitado.



Fig. 23. Molde utilizado para o fabrico das lajetas.

O método de ensaio define o modo de mistura para obter-se uma boa homogeneização, tendo como referência a EN NP 196-1. Tendo por base o método, amassou-se durante 30 s em marcha lenta com ajuda da misturadora e de seguida, com uma espátula, envolveu-se o produto que se encontrava nas paredes e no fundo do recipiente. Posteriormente, amassou-se novamente durante 1 minuto na amassadora e aplicou-se diretamente nos moldes (v. Fig. 24 e Fig. 25).

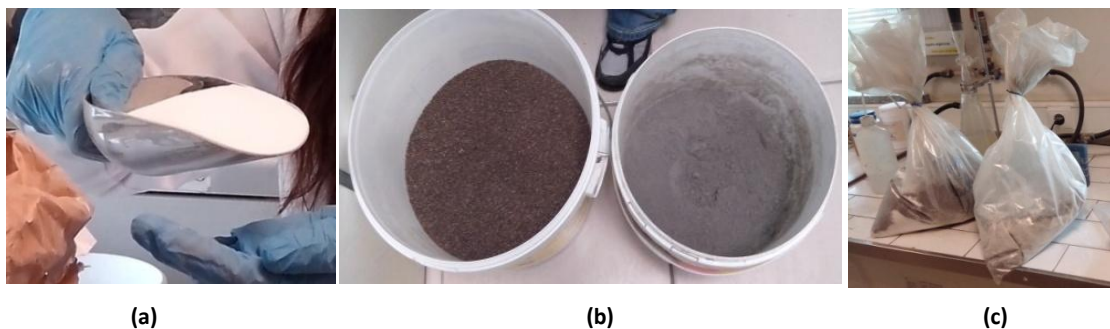


Fig. 24. PCM *Micronal DS5040 X* (a); Leca® XS e cimento CZ,I, 42.5R (b); mistura dos materiais (c).

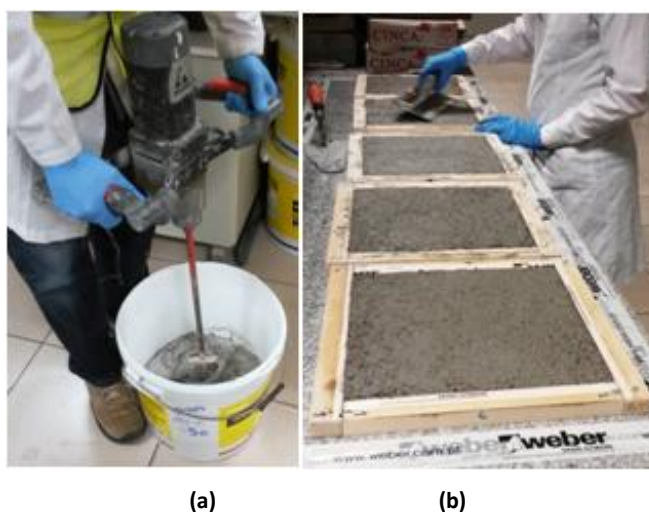


Fig. 25. Mistura dos materiais constituintes da argamassa (a); preenchimento do molde com a argamassa (b).

As lajetas repousaram cerca de 24 a 48 horas até serem desmoldadas. Verificou-se que ao fim de alguns dias as lajetas continham pequenas fissuras que podem derivar de um período de secagem insuficiente, uma vez que após retirar o molde (v. Fig. 26) estas ainda se apresentavam húmidas no centro.

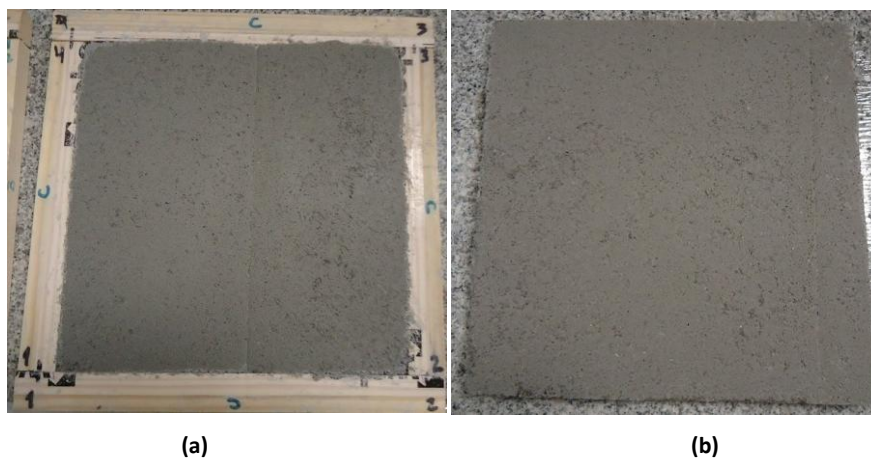


Fig. 26. Aspeto final do fabrico das lajetas (a) com molde; (b) sem molde.

5.6. Características da Argamassa com PCM

Em concordância com o estudo realizado pela Tânia Salgueiro, foi possível organizar uma síntese de resultados derivados de testes efetuados à argamassa com PCM [39].

Tabela 7. Características da argamassa com PCM.

Propriedade	Argamassa com PCM
Pico de Fusão / °C	20,58
Pico de Solidificação / °C	17,83
Pico de Fusão / J g ⁻¹ °C ⁻¹	1,31
Pico de Solidificação / J g ⁻¹ °C ⁻¹	1,35
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 / J g ⁻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
R_f / MPa	1,21
R_c / 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

No gráfico da Fig. 27 é possível observar a evolução da entalpia de fusão para a mistura de argamassa elaborada em laboratório. A entalpia de fusão foi obtida pela integração do c_p ($\text{J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) em função da temperatura.

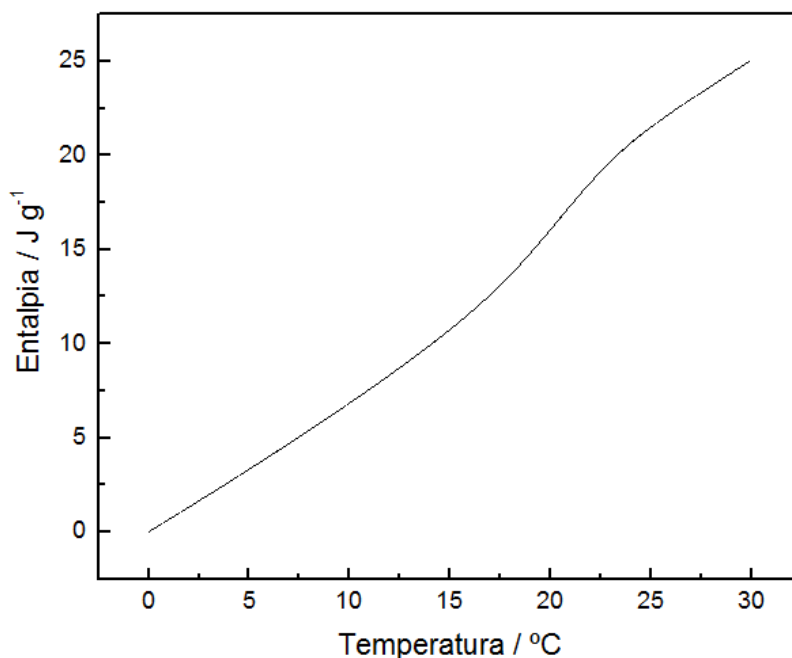


Fig. 27. Entalpia de fusão da argamassa (produto não amassado)[39].

5.6.1. Pintura das lajetas

Com o objetivo de maximizar a absorção solar, todas as lajetas produzidas foram pintadas com tinta preta da marca CIN da gama Vinylmatt. Esta tinta aquosa de aspeto mate profundo, que recentemente obteve a classificação A+ na qualidade do ar interior, é formulada à base de dispersão vinílica, vulgarmente utilizada na construção civil nomeadamente em estuques sintéticos, estanhados, reboco, betão, tijolo entre outros. A tinta CIN Vinylmatt apresenta um rendimento prático de $11\text{-}15 \text{ m}^2 \text{ L}^{-1}$ por demão, devendo ser aplicada através de rolo anti-gota, trincha ou pistola *airless*. O tempo de secagem deverá compreender um período entre 3 a 4 horas a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ e $60 \text{ } ^\circ\text{C}$ de humidade relativa inferior a 80 % [40].

A aplicação da tinta realizou-se na cave do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro antes de serem transportadas para a célula de teste. Inicialmente a superfície da lajeta foi limpa e logo depois a tinta impregnada diretamente com uma trincha, sem qualquer lixagem sobre as superfícies e sem colocação de primário. A aplicação decorreu com

uma demão lenta de forma a preencher toda a superfície superior e lateral da lajeta. Após a secagem da parte superior, realizou-se o mesmo procedimento na parte inferior.

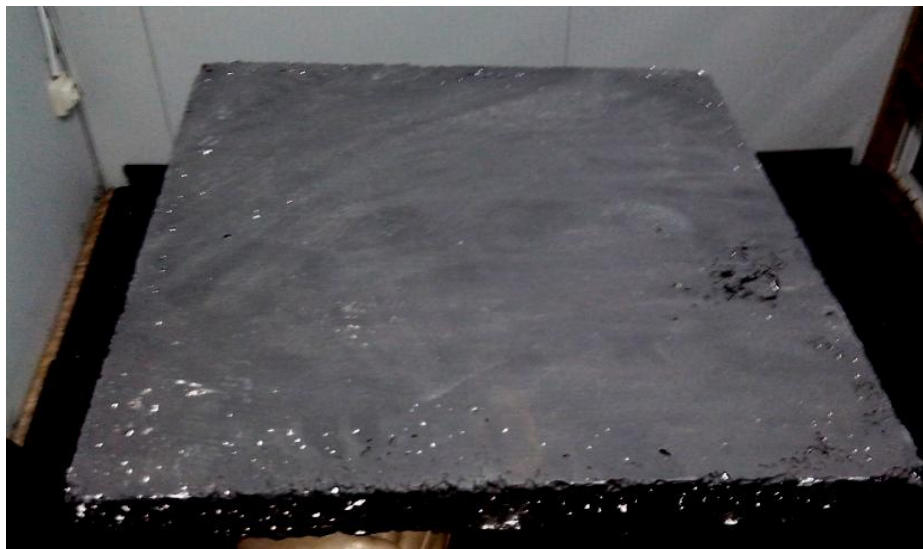


Fig. 28. Lajeta de argamassa com PCM pintada de preto para maximizar absorção da radiação solar.

5.7. Simulação utilizando o Energyplus

As Fig. 29, Fig. 30 e Fig. 31 apresentam a modelização efetuada no caso para a célula de teste em estudo.

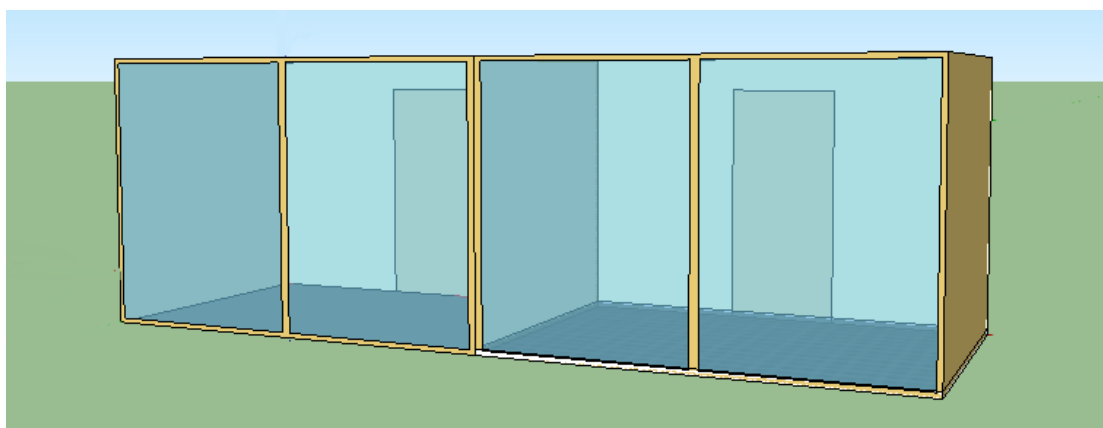


Fig. 29. Exemplo esquemático da célula de teste através do SketchUp – vista frontal.

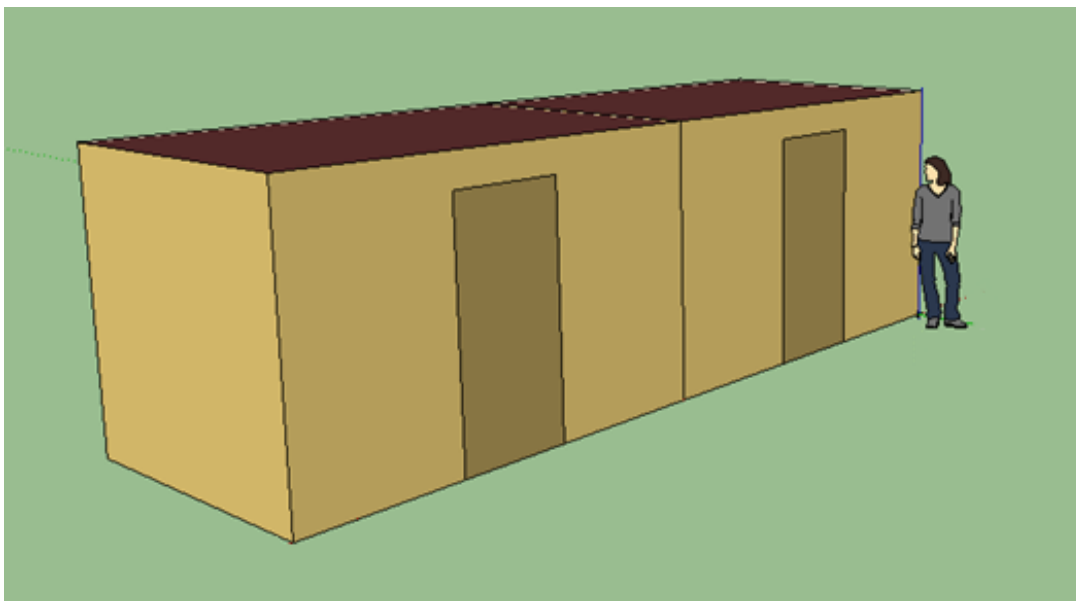


Fig. 30. Exemplo esquemático da célula de teste através do SketchUp – vista traseira.

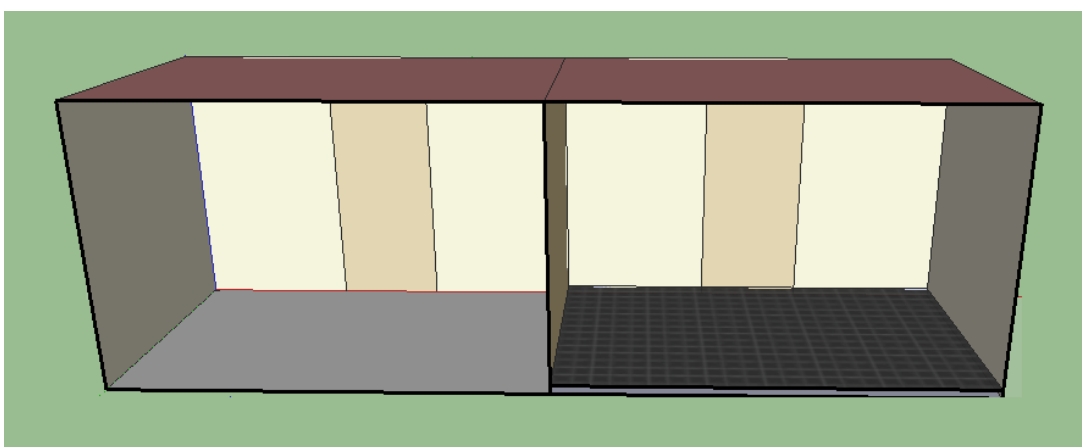


Fig. 31. Delimitação de zonas – ZNT1.1 (à esquerda) e ZNT2.1 (à direita).

Após a modelização da célula de teste no *SketchUp*, foi possível no editor *IDF* conjugar todas as características necessárias à execução da simulação com o *Energyplus*. Nesse sentido delimitaram-se “zonas” (v. Fig. 31) e introduziram-se os dados referentes à argamassa utilizada no pavimento da zona 2 (ZNT2.1). Em anexo encontram-se as linhas de comando em *IDF* editor para a realização da simulação. Para que a simulação se aproximasse o mais possível da realidade, o ficheiro *Weather file* denominado *PRT_AVEIRO_INETI.epw* foi alterado de forma a seguir os dados recolhidos da estação metrológica da Universidade de Aveiro. Os dados alterados no ficheiro foram a humidade relativa, a temperatura e a radiação global direta.

6. Resultados experimentais e discussão

6.1. Avaliação do desempenho térmico experimental – Célula de teste

A avaliação do desempenho térmico realizada com auxílio de instrumentos localizados na célula de teste é de grande interesse, daí que seja importante que todos os instrumentos se encontrem a funcionar corretamente. Nesse sentido, decidiu apurar-se se os dados recolhidos estariam em concordância com aparelhos de maior precisão e rigor como é o caso dos dados recolhidos pelo Grupo de Meteorologia e Climatologia da Universidade de Aveiro (CliM@UA®) [42]. O CliM@UA® encontra-se integrado na linha de investigação da Qualidade da Atmosfera do Laboratório Associado CESAM que constitui uma unidade de investigação da Universidade de Aveiro.

Os dados cedidos pelo CESAM foram a radiação solar global e a temperatura. Estes serão comparados com os dados recolhidos pelos instrumentos instalados na célula de teste.

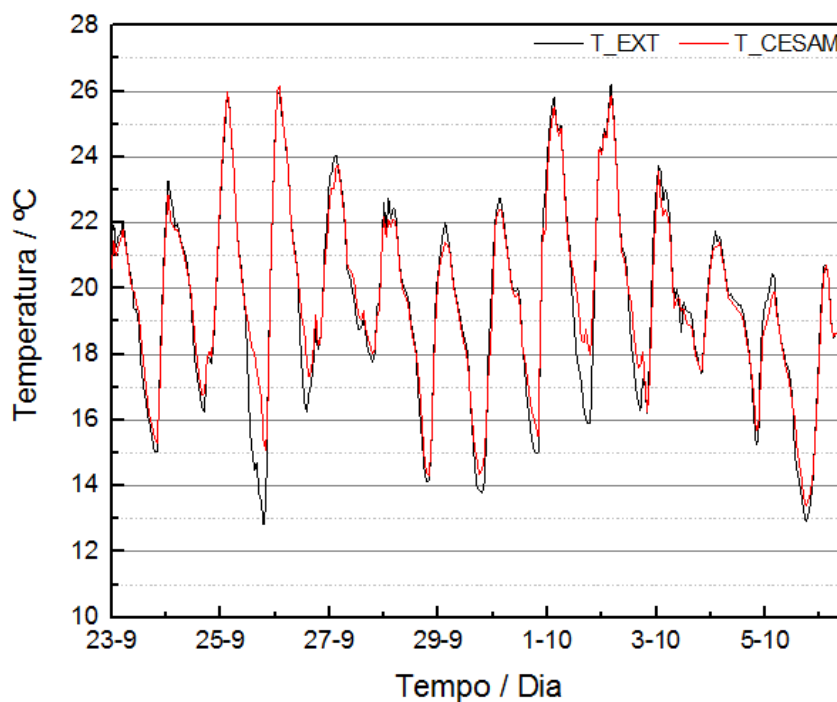


Fig. 32. Comparação entre as temperaturas registadas pela sonda HD 9008TR instalada no exterior da célula de teste e os dados cedidos pelo CESAM.

O gráfico representado na Fig. 32 revela que os dados relativos à temperatura medida pela sonda HD 9008TR no exterior da célula de teste e os dados cedidos pelo CESAM são idênticos apesar de existirem pequenos desfasamentos no que diz respeito aos picos mínimos de

temperatura registados nomeadamente nos dias 25 de setembro e 1 de outubro. Ainda assim pode afirmar-se que a sonda HD 9008TR se encontra a funcionar corretamente.

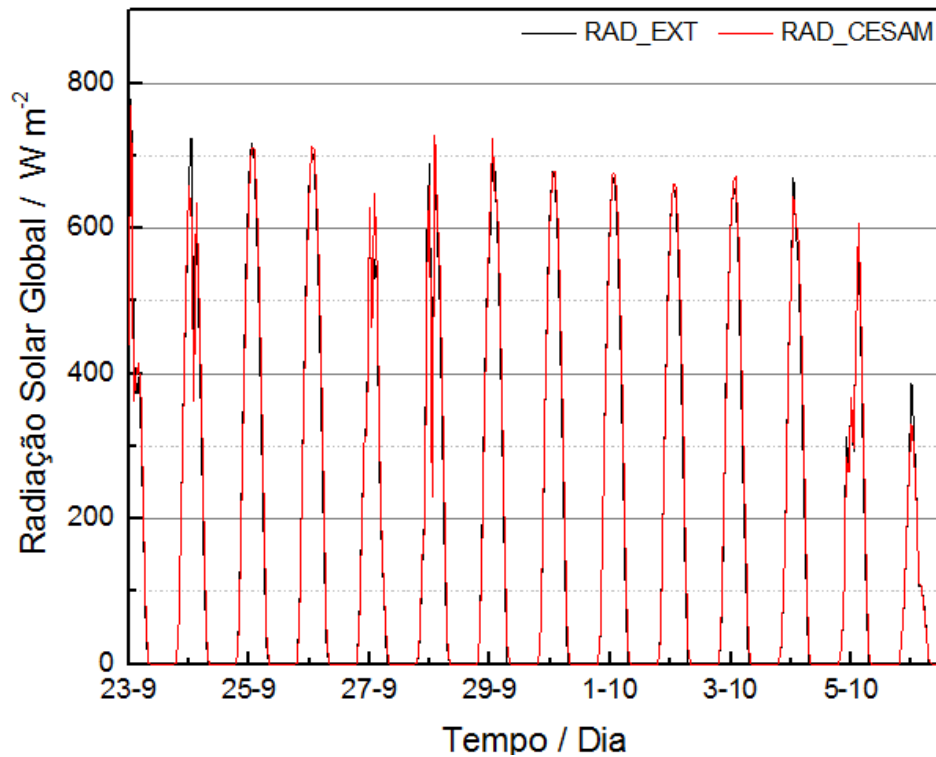


Fig. 33. Comparação entre a radiação registada pelo piranómetro LP PYRA 03 instalado no exterior da célula de teste e os dados cedidos pelo CESAM.

A radiação solar global registada pelo CESAM e pelo piranómetro LP PYRA 03 instalado na célula de teste são muito idênticos. Os picos máximos de radiação solar (v. Fig. 33) encontram-se em concordância e desta forma podemos afirmar que o aparelho LP PYRA 03 se encontra a operar em conformidade.

Para avaliar o desempenho térmico das lajetas de argamassa com PCM colocaram-se as mesmas no pavimento do compartimento experimental. O compartimento de referência possui apenas cartolina preta como componente adicional ao pavimento e o sistema de aquisição de dados devidamente isolado junto à parede Norte. As medições foram realizadas entre o dia 23 de setembro e 7 de outubro de 2014

6.1.1. Monitorização de 23 de Setembro a 7 de Outubro.

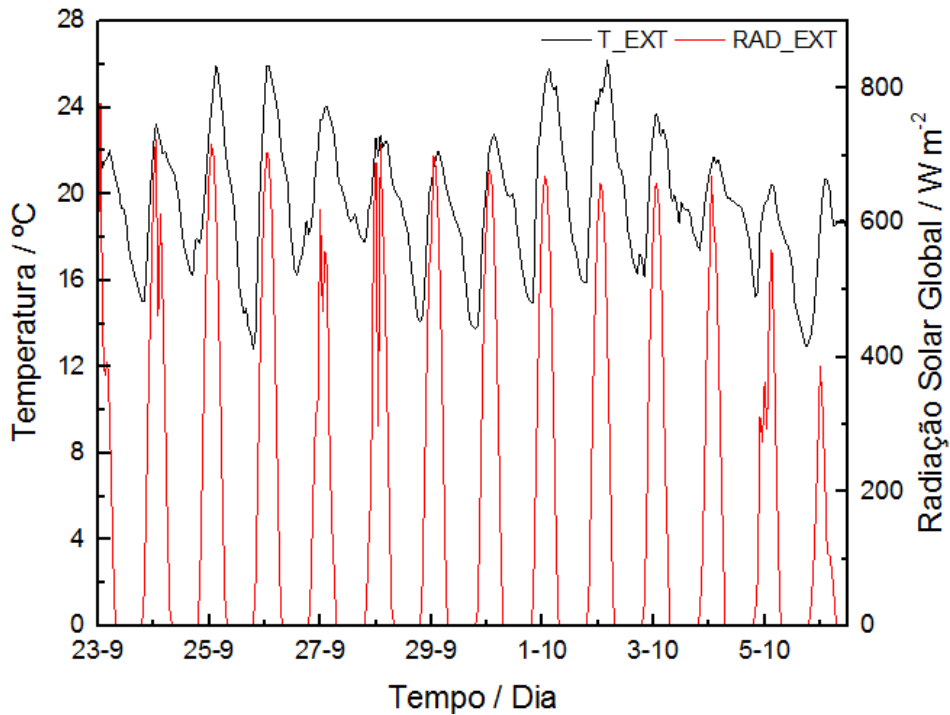


Fig. 34. Resultado da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada de dia 23 setembro a 7 de outubro.

Nos 15 dias de monitorização, (v.

Fig. 34) a temperatura exterior variou entre o valor mínimo de 12,8 °C no dia 26 de setembro e o valor máximo de 26,2 °C no dia 2 de outubro. Os valores máximos de radiação solar ocorrem sempre perto das 12 h uma vez que esta é a hora em que os raios solares incidem verticalmente sobre a superfície terrestre. Após a incidência dos raios solares a superfície terrestre aquece e a temperatura máxima verifica-se após o máximo de radiação ser atingido. No gráfico da Fig. 35 verifica-se que os picos máximos de temperatura são atingidos sempre 2 a 3 horas após o pico de radiação solar.

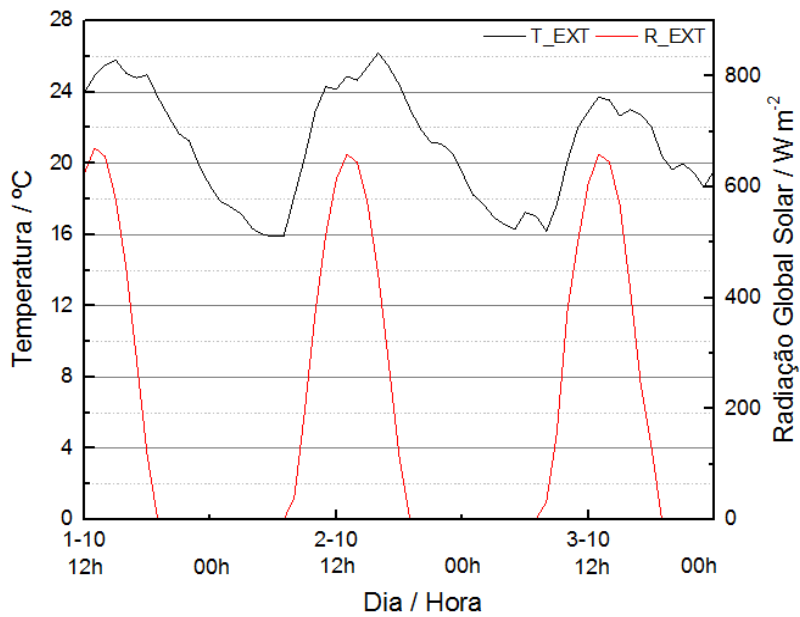


Fig. 35. Resultado da medição da temperatura exterior e radiação solar global efetuada de dia 1 de outubro a 3 de outubro.

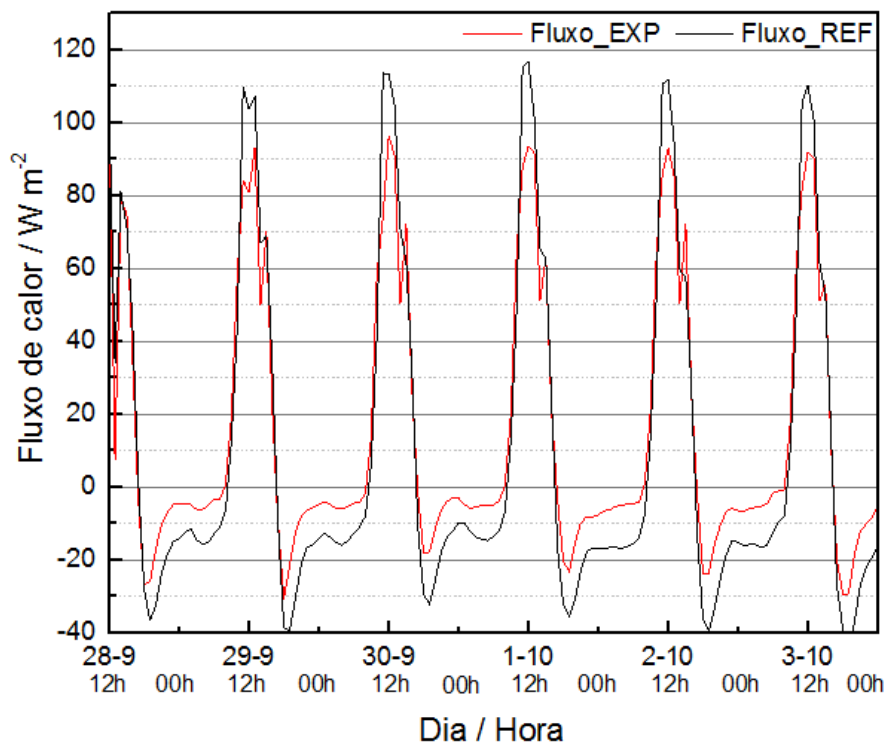


Fig. 36. Fluxo de calor medido sobre o pavimento no compartimento de referência e do compartimento experimental.

Os resultados obtidos pelos fluxímetros colocados no pavimento da célula de teste revelam uma diferença significativa quer nos valores máximos atingidos quer nos mínimos. A taxa de transferência de calor é menor no CEXP. O aumento da inércia associada à existência de uma

massa térmica superior faz com que a amplitude do fluxo de calor diminua, como seria de esperar.

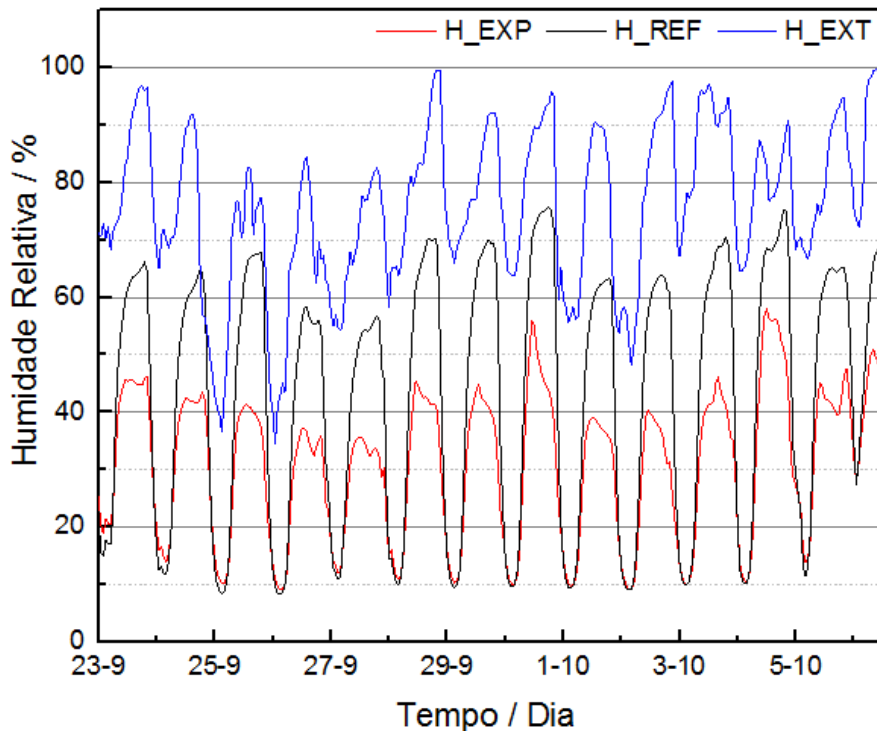


Fig. 37. Resultado da medição da humidade interior (compartimento de referência e compartimento experimental) e exterior efetuado no dia 23 de setembro a 7 de outubro.

O gráfico que ilustra a Fig. 37 revela que a humidade relativa exterior atinge valores muito superiores à humidade no interior dos compartimentos tal como seria de esperar. No exterior a temperatura é inferior principalmente de madrugada quando a temperatura é mínima e o ar fica saturado. Durante o dia a temperatura aumenta gradualmente e a humidade relativa diminui.

No interior dos compartimentos não existe ventilação natural ou artificial e este facto leva a que toda a radiação incidente no vão envidraçado fique retida no interior e a temperatura aumente tendo como consequência um decréscimo da humidade relativa. Os picos máximos da humidade relativa no interior do CREF (H_REF) atingem sempre valores superiores aos valores do CEXP. Este acontecimento pode ser explicado pelo facto da temperatura no CEXP ser inferior ao CREF uma vez que a argamassa com PCM irá absolver uma quantidade de energia térmica.

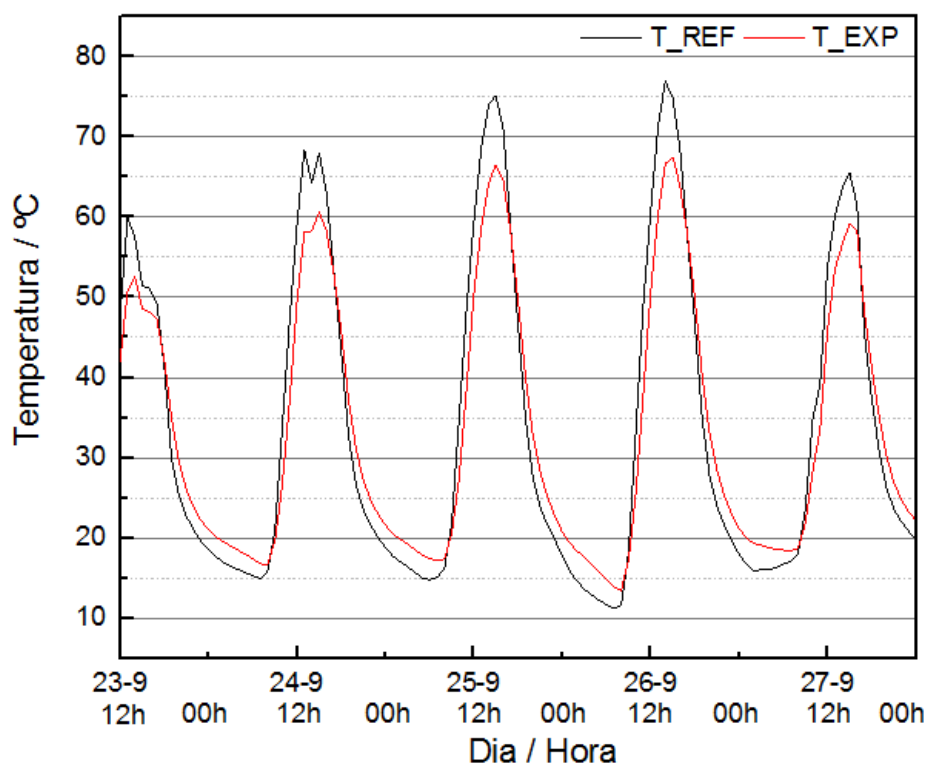


Fig. 38. Resultado da medição da temperatura interior no compartimento de referência e no compartimento experimental efetuada entre 23 de setembro e 28 de setembro.

No gráfico representado na Fig. 38 é possível verificar que os picos mínimos de temperatura no compartimento de referência (T_{REF}) ocorrem primeiro que os picos mínimos de temperatura no compartimento experimental (T_{EXP}). Esta diferença pode estar relacionada com a diferença de inércia térmica associada a cada compartimento. No que diz respeito aos picos máximos de temperatura verifica-se uma diferença de amplitude térmica na ordem dos 10 °C entre os dois compartimentos, chegando o CREF atingir temperaturas acima dos 75 °C como se verifica no dia 26 de setembro. A amplitude das temperaturas diminui e verifica-se um desfasamento das mesmas. No dia 26 de setembro verifica-se um decréscimo de 9,4 °C entre a T_{EXP} e a T_{REF} no pico máximo de temperatura e um decréscimo de 2,3 °C no pico mínimo de temperatura (v. Tabela 8). Quando a radiação solar incide no vão envidraçado o compartimento sofre um aumento de temperatura e absorve energia térmica passando o PCM presente nas lajetas do estado sólido ao estado líquido ao ultrapassar a sua temperatura de fusão. Esta energia é temporariamente armazenada, sendo libertada gradualmente durante o arrefecimento até que seja atingida a temperatura de solidificação do PCM.

Tabela 8. Síntese dos resultados da temperatura interior do compartimento de referência e experimental efetuada entre o dia 23 de setembro e 7 de outubro.

		Temperatura Máxima / °C	ΔT (T_EXP-T_REF)	Temperatura Mínima / °C	ΔT (T_EXP-T_REF)
23-11-2014	T_REF	60,0	-7,3	17,1	1,0
	T_EXP	52,6		18,2	
24-11-2014	T_REF	68,4	-7,9	15,0	1,7
	T_EXP	60,6		16,6	
25-11-2014	T_REF	75,2	-8,7	14,8	2,4
	T_EXP	66,5		17,2	
26-11-2014	T_REF	77,0	-9,4	11,2	2,3
	T_EXP	67,5		13,5	
27-11-2014	T_REF	65,5	-6,3	15,9	2,4
	T_EXP	59,2		18,4	
28-11-2014	T_REF	70,5	-7,8	17,8	1,3
	T_EXP	62,7		19,0	
29-11-2014	T_REF	73,5	-6,2	13,1	1,6
	T_EXP	67,4		14,7	
30-11-2014	T_REF	72,6	-5,6	13,1	1,6
	T_EXP	67,0		14,7	
01-12-2014	T_REF	76,8	-4,8	14,1	2,1
	T_EXP	72,0		16,2	
02-12-2014	T_REF	75,4	-4,2	14,2	2,6
	T_EXP	71,2		16,8	
03-12-2014	T_REF	76,4	-4,4	15,3	2,4
	T_EXP	72,0		17,7	
04-12-2014	T_REF	66,5	-4,1	17,7	1,3
	T_EXP	62,5		19,0	
05-12-2014	T_REF	62,8	-6,9	14,9	2,2
	T_EXP	55,9		17,1	
06-12-2014	T_REF	38,2	-5,4	12,6	1,4
	T_EXP	32,8		14,0	
07-12-2014	T_REF	55,1	-7,6	15,9	0,5
	T_EXP	47,5		16,3	

Com o intuito de avaliar a diferença de temperatura na lajeta colocou-se uma PT100 na parte inferior da lajeta e outra PT100 na parte superior da lajeta. O fluxímetro foi colocado na parte superior da lajeta de forma a obter a taxa de transferência de calor.

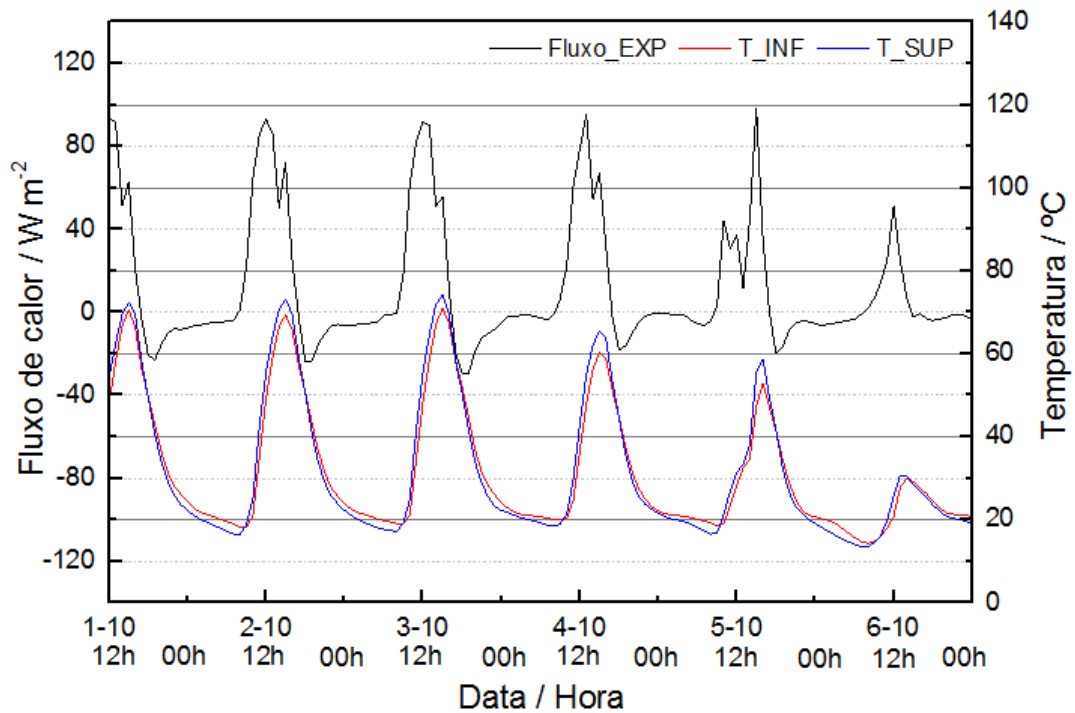


Fig. 39. Gráfico representativo da medição do fluxo de calor na lajeta e da temperatura na parte inferior e superior da lajeta.

Os picos de temperatura inferior e superior acompanham os picos de fluxo de calor. O valor do fluxo de calor atinge o valor máximo de transferência de calor quando a amplitude térmica entre a parte superior e inferior da lajeta é maior. Como a temperatura na parte inferior da lajeta é menor do que na parte superior significa que ocorreu absorção da energia térmica por parte da lajeta de argamassa com PCM, daí que a taxa de transferência de calor seja maior.

6.2. Avaliação do desempenho térmico – Simulação com o Energyplus

Com auxílio do EnergyPlus foi possível simular em condições idênticas o comportamento do material em estudo com os dados obtidos experimentalmente. Seguem os gráficos relativos às diferenças entre os dois compartimentos simulados.

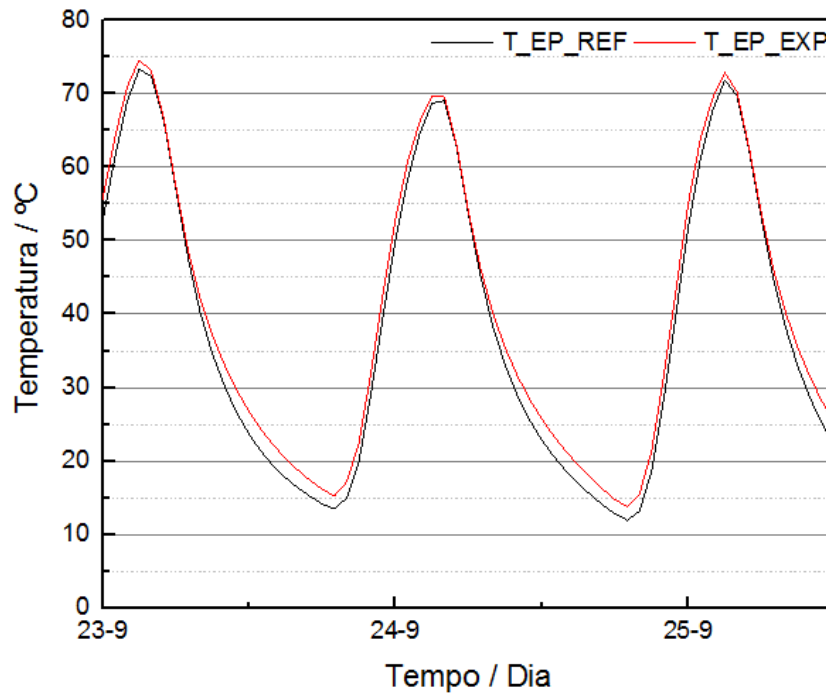


Fig. 40. Gráfico representativo da temperatura no compartimento de referência e no compartimento experimental utilizando o EnergyPlus.

A simulação demonstra diferenças ligeiras entre os dois compartimentos. No entanto consegue identificar-se temperaturas ligeiramente inferiores no que diz respeito ao pico mínimo de temperatura.

O gráfico da Fig. 41 representa a diferença entre os dados de temperatura obtidos experimentalmente no compartimento experimental (T_{EXP}) e os dados obtidos na simulação para o compartimento experimentalmente contendo a argamassa com PCM (T_{EP_EXP}).

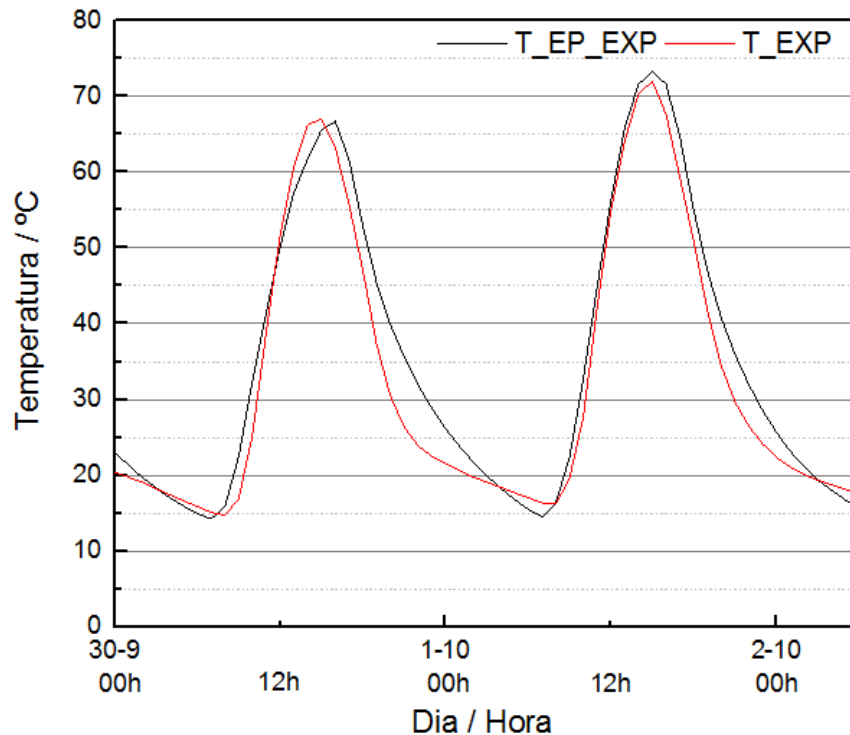


Fig. 41. Gráfico representativo da simulação utilizando o EnergyPlus e as medições realizadas no compartimento experimental.

Apesar de os dados não se encontrarem em perfeita concordância é possível observar que seguem de forma sincronizada ao longo do tempo.

Tendo em conta a versatilidade do programa de simulação, optou-se por simular em concordância com o espaço temporal utilizado, que diferenças existiriam se o caso de estudo se aplicasse a um sistema solar passivo de ganho indireto (Parede de Trombe) equivalente, isto é, se as lajetas que colocamos no pavimento da célula de teste estivessem posicionadas de forma a criar uma parede entre o vão envidraçado e o espaço interior. O gráfico da Fig. 42 evidencia a comparação entre a simulação da aplicação das lajetas em concordância com um sistema solar passivo de ganho direto e um sistema solar passivo de ganho indireto (Parede de Trombe)

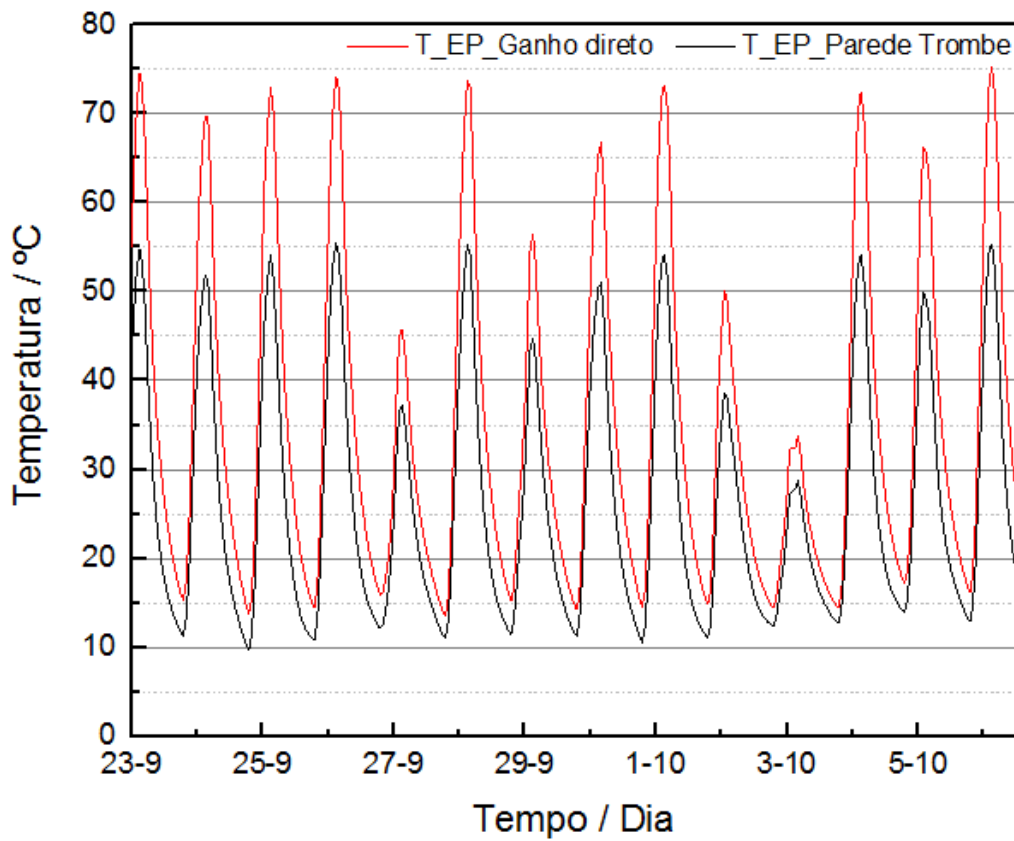


Fig. 42. Relação entre a temperatura simulada para o caso de ganho direto e para o caso indireto (Parede de Trombe).

Ao analisar o gráfico da Fig. 42 verifica-se que a amplitude de temperatura é muito inferior no caso da utilização da Parede de Trombe principalmente nos picos máximos de temperatura. Esta solução seria, de acordo com a simulação efetuada, benéfica a nível energético uma vez que diminui bastante a amplitude de temperatura. Esta diferença pode ser explicada pelo facto da radiação solar estar em contacto direto com uma das faces da parede de Trombe. Assim o interior do compartimento nunca recebe raios solares diretos, ao contrário do sistema de ganho direto que recebe a radiação solar diretamente.

7. Conclusão

7.1. Conclusões gerais

O facto de existir uma grande área de captação solar na célula de teste, sem existir uma correspondente capacidade de armazenamento térmico, conduziu a um sobreaquecimento, chegando o interior da célula de teste a atingir temperaturas máximas de 75 °C. A monitorização realizada na célula demonstrou que existe uma capacidade efetiva de armazenamento, reduzindo os picos máximos e mínimos de temperatura, embora estes de forma menos pronunciada, atenuando o efeito do aquecimento/arrefecimento em função da temperatura exterior. A amplitude das temperaturas interiores diminuiu e verificou-se um desfasamento, ainda que diminuto, das mesmas tal como seria de esperar.

Os resultados obtidos são fiáveis, visto que os dados obtidos pelo sistema de aquisição de dados existente na célula de teste se encontram muito próximos dos dados medidos pelo Grupo de Meteorologia e Climatologia (CliM@UA®) do Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Concluiu-se assim que o sistema de aquisição de dados se encontra a funcionar corretamente. A simulação efetuada com o programa EnergyPlus forneceu resultados próximos dos dados obtidos experimentalmente para as temperaturas. Recorrendo a simulações, verificou-se que a utilização de uma parede de Trombe surtiria efeitos muito mais significativos na diminuição das amplitudes térmicas no interior da célula de teste

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

No futuro, seria importante a colocação de uma pala de sombreamento na célula de teste para que menores amplitudes térmicas no interior sejam registadas. Para evitar situações de fissuração resultantes da retração plástica, as lajetas deverão incorporar uma malha de rede e/ou adicionar material fibroso na fase plástica. Sugere-se a incorporação de um sistema de ventilação natural ou artificial na célula de teste.

Referências Bibliográficas

- [1] E. Standard, “Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and int,” 2006.
- [2] INE, “Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010.” Instituto Nacional de Estatística, 2011.
- [3] H. Gonçalves, “Comportamento de Sistemas Solares Passivos em Edifícios,” Universidade do Porto, 1986.
- [4] H. Gonçalves and M. Graça, “Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal,” Lisboa, 2004.
- [5] A. Vaz, “SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO Comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase,” PORTO, 2012.
- [6] A. Monteiro, “A Arquitectura Bioclimática,” FCTUC, 2011.
- [7] H. Physics, “Passive Solar Design for the Home,” 2001.
- [8] I. Cerón, J. Neila, and M. Khayet, “Experimental tile with phase change materials (PCM) for building use,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 8, pp. 1869–1874, 2011.
- [9] P. Silva, “Térmica dos Edifícios,” Universidade do Minho, 2000.
- [10] L. Nunes, “Eficiência energética de edifícios: Contributo dos PCMs e Parede Trombe,” Universidade de Aveiro, 2011.
- [11] P. Mendonça, “Habitar sob uma segunda pele,” Universidade do Minho, 2005.
- [12] F. Moita, *Energia Solar Passiva*. Lisboa: Imprensa Nacional-Casa da Moeda, 1987, pp. 33–86.

- [13] H. Gonçalves, S. Camelo, and S. Germano, "Ganhos Solares nos Edifícios em Portugal e Implicações nas Necessidades de Energia para Conforto Térmico," in *IX Congresso Ibérico de Energia Solar III Jornadas Técnicas sobre Biomassa*, 2000, no. 1990, p. 10.
- [14] N. A. M. Amin, M. Belusko, F. Bruno, and M. Liu, "Optimising PCM thermal storage systems for maximum energy storage effectiveness," *Sol. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2263–2272, 2012.
- [15] S. Raoux and M. Wuttig, "Phase change materials," 2009.
- [16] P. D. E. Jesus, S. Pedroso, D. A. Silva, E. Civil, D. Maria, S. Franco, and H. Isel, "Materiais de Mudança de Fase em Revestimentos GRADE," Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013.
- [17] Microtek, "How do PCMs work?," 2013. [Online]. Available: <http://www.microteklabs.com/how-do-pcms-work.html>. [Accessed: 21-Nov-2014].
- [18] P. Lukic, J. Tamburic, and D. Stojic, "Energy efficiency of buildings with phase-change materials," *Facta Univ. - Ser. Archit. Civ. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 343–352, 2012.
- [19] W. R. Sutterlin, "Phase Change Materials – A Brief Comparison of Ice Packs , Salts , Paraffins , and Vegetable Derived Phase Change Materials," 2011.
- [20] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, Feb. 2009.
- [21] D. David, K. Johannes, and J. Roux, "A review on Phase Change Materials Integrated in Building Walls," 2012.
- [22] Y. Zhang, K. Lin, Y. Jiang, and G. Zhou, "Thermal storage and nonlinear heat-transfer characteristics of PCM wallboard," *Energy Build.*, vol. 40, no. 9, pp. 1771–1779, 2008.
- [23] C. Böhme, "Science around us." BASF, 2009.
- [24] B. M. Oliver, J. R. Pierce, and C. E. Shannon, "The Philosophy of PCM," *Proc. IRE*, vol. 36, no. 11, 1948.

- [25] BASF, "Micronal PCM," *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki*. 2010.
- [26] P. Presentation, "DTS Product Overview," *IFS, Apr*, 2006.
- [27] H. Nunes, "Comportamento térmico de uma argamassa com PCM numa célula-de-teste," 2013.
- [28] Karthik Muruganantha, "Application of Phase Change Material in Buildings: Field Data vs EnergyPlus Simulation," Arizona State University, 2010.
- [29] F. Duarte, "Contributo para o estudo de um patamar mínimo de inércia térmica em edifícios em reabilitação," Universidade do Porto, 2013.
- [30] J. Vieira, "Funcionalização de argamassas para controlo das condições ambiente," Universidade de Aveiro, 2012.
- [31] U.S.Department of Energy, "EnergyPlus Energy Simulation Software: Legacy OpenStudio Plug-in," 2014. [Online]. Available: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/openstudio.cfm>. [Accessed: 06-Nov-2014].
- [32] D. OHM, "LP PYRA 02 LP PYRA 03 LP PYRA 12." [Online]. Available: http://www.deltaohm.com/ver2012/download/LP_PYRA02_03_12_it.pdf. [Accessed: 01-Dec-2014].
- [33] D. OHM, "Hd 9008tr hd 9009tr hd 9007" .
- [34] D. OHM, "HD 9008TRR HD 9009TRR HD 9007." [Online]. Available: http://www.deltaohm.com/ver2012/download/HD9008TRR_uk.pdf. [Accessed: 01-Dec-2014].
- [35] FFonseca, "Promoção sondas de humidade - Jumo | FFonseca." [Online]. Available: http://www.ffonseca.com/artigo.aspx?lang=pt&id_object=288823&name=Promocao-Sondas-de-Humidade---Jumo. [Accessed: 01-Dec-2014].

- [36] Hukseflux, "Hukseflux - Thermal Sensors." [Online]. Available: http://www.hukseflux.com/sites/default/files/product_brochure/HFP01_v1003.pdf. [Accessed: 01-Dec-2014].
- [37] Ffonseca, "Guia técnico de sondas de temperatura." [Online]. Available: http://www.ffonseca.com/cache/bin/Guia_Tecnico_Sondas_Temperatura_F.Fonseca-14490.pdf. [Accessed: 01-Dec-2014].
- [38] D. E. Norm, "En 998-1," 2003.
- [39] T. Salgueiro, "Desenvolvimento de argamassas com PCM em matriz de argila expandida," Universidade de Aveiro, 2014.
- [40] CIN, "10-250 VINYL MATT." Corporação Industrial do Norte, Maia, 2012.
- [41] Extension, "Passive Solar Heating for Homes," 2013. [Online]. Available: <https://www.extension.org/pages/30863/passive-solar-heating-for-homes#.VFERRPmsX0w>. [Accessed: 03-Nov-2014].
- [42] Alfredo Rocha e Tiago Luna, Equipa CESAM, "Comunicação pessoal".

Anexo

```

IDF_MODELO - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
!- ===== ALL OBJECTS IN CLASS: RUNPERIOD =====
RunPeriod,
    9,                !- Name
    23,              !- Begin Month
    10,              !- Begin Day of Month
    7,               !- End Month
    UseweatherFile, !- End Day of Month
    Yes,             !- Day of week for Start Day
    Yes,             !- Use weather File Holidays and Special Days
    No,              !- Use weather File Daylight Saving Period
    Yes,             !- 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

```

Fig. 43. Período de simulação utilizado – de 23 setembro a 7 de outubro.

```

IDF_MODELO - Bloco de notas
Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda
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}

```

Fig. 44. Propriedades da argamassa de Leca[®]XS e PCM – LXSPCM.

```

IDF_MODELO - Bloco de notas
Ficheiro  Editar  Formatar  Ver  Ajuda

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}
  27,         !- Temperature 16 {C}

```

Fig. 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

```

Fig. 46. Exemplo para o caso de sistema direto com as zonas ZNT1 e ZNT2.