



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Avaliação experimental do comportamento dinâmico
de paredes de alvenaria de tijolo térmico***

Gisela Mendes Pereira

Leiria, *Novembro* de 2013



Dissertação

Mestrado em Engenharia Civil – Construções Civas

***Avaliação experimental do comportamento dinâmico
de paredes de alvenaria de tijolo térmico***

Gisela Mendes Pereira

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Doutor João Ramos, Professor
Coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

Leiria, *Novembro* de 2013

Agradecimentos

É com grande satisfação que assim termino mais um capítulo da minha vida, resultante de um esforço pessoal que não seria possível sem a colaboração e o empenho de um conjunto de pessoas que sempre me apoiou.

Em primeiro, gostaria de agradecer ao meu orientador Professor Doutor João Ramos, por acreditar em mim e me mostrar sempre o melhor caminho em todas as fases desta dissertação, pela partilha de conhecimentos e por ser um exemplo de profissionalismo.

À empresa PRELIS ^{Lda.} e seus colaboradores por acreditarem no projeto e contribuírem para o meu crescimento e futuro profissional, pelo tempo e material dispensado, sendo a sua participação sido imprescindível para a realização deste estudo.

À empresa Umbelino Monteiro S.A. pela disponibilidade imediata e ajuda na realização do projeto.

Aos amigos que fizeram parte desde capítulo e me ajudaram e incentivaram sempre.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria pela disponibilidade demonstrada, o espaço cedido para a realização dos ensaios, bem como aos seus colaboradores por toda a ajuda e tempo dispensado com este estudo.

À minha família pelo apoio sempre demonstrado, em especial aos meus pais, irmão e cunhada.

Por fim, ao meu namorado pelo carinho, compreensão, paciência e incentivo neste que foi um momento bastante importante e decisivo para o meu futuro.

A todos, Muito Obrigada!

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Marthin Luther King

Resumo

Compete aos agentes que concebem os edifícios, bem como aos legisladores e aos promotores, dotá-los com o máximo possível de tecnologias passivas que permitam ao utilizador economizar, sem no entanto perder conforto nem salubridade.

O presente estudo consiste num trabalho de revisão bibliográfica e de investigação experimental com vista à avaliação do comportamento dinâmico de paredes de alvenaria de tijolo térmico. Aferiu-se o desempenho térmico deste tipo de paredes e a viabilidade da sua utilização essencialmente numa perspetiva da redução dos consumos energéticos e de garantia do conforto térmico e salubridade nos edifícios. Os tijolos térmicos estão cada vez mais a ser introduzidos na construção devido ainda à simplicidade na construção e a possível eliminação/redução do material isolante. Neste trabalho construiu-se uma célula de teste com paredes constituídas por este tipo de tijolo, o Bloco ThermoPrélis, cedido pela empresa PRELIS L^{da}. Assim, mediu-se o desempenho térmico do mesmo em condições reais, em períodos nas estações de primavera e do verão.

Os resultados experimentais mostram claramente as vantagens da construção com este tipo de tijolo, que apresenta um atraso térmico de 7 a 8 horas e um amortecimento da amplitude térmica no ambiente interior bastante significativo, tirando partido do mecanismo físico associado à inércia térmica. Em termos de custos, a construção com tijolo térmico apresenta vantagens, quando comparado com a construção típica em parede dupla com isolamento térmico na caixa-de-ar.

Palavras-chave: Térmica de edifícios, Tijolo térmico, Conforto térmico, Inércia térmica, Construção sustentável

Abstract

It is responsibility of the agents who design the buildings, as well as legislators and prosecutors, providing them with the greatest possible passive technologies that allow the user to save, without losing comfort or health.

This study is the work of bibliographic review and experimental investigation for the evaluation of the dynamic behavior of alveolar bricks. It was measured on the thermal performance of these walls, and the feasibility of using them in a perspective of reducing energy consumption and ensuring thermal comfort and health. The alveolar bricks are increasingly being introduced into the construction due to the simplicity in construction and possible elimination of the insulation material. In this work we constructed a test cell with this type of bricks, Block ThermoPrélis, given by PRELIS Lda, and so was measured thermal performance of them in real conditions, in periods of spring and summer season.

The experimental results clearly show the advantages of building with this type of brick, which has a thermal lag of 7 to 8 hours, and a temperature range of damping quite significant. In terms of costs, building with alveolar bricks has advantages when compared it with the typical double wall construction with insulation in air -box.

Keywords: Thermal characteristics of buildings, Alveolar brick, Thermal Comfort, Thermal inertia, Sustainable Construction

Índice de Figuras

FIG. 1.1 - TAXA DE IMPORTAÇÃO DE ENERGIA EM PORTUGAL (2000-2009)	2
FIG. 2.1 - EVOLUÇÃO DAS FACHADAS EM PORTUGAL.....	7
FIG. 2.2 – PAREDE DUPLA COM ISOLAMENTO	10
FIG. 2.3 – INTERRUÇÃO DA JUNTA; ASSENTAMENTO DOS TIJOLOS; VERIFICAÇÃO DA JUNTA	12
FIG. 2.4 – COMPARAÇÃO DA FURAÇÃO DO TIJOLO TÉRMICO COM O TIJOLO TRADICIONAL (ESQUERDA), PORMENOR DA JUNTA INTERROMPIDA CRIANDO O EFEITO DE FACHADA VENTILADA E APLICAÇÃO DO TIJOLO ENCAIXE VERTICAL (DIREITA).....	13
FIG. 2.5 – GEOMETRIA DOS BLOCOS ESTUDADOS E RESPETIVAS DIMENSÕES (CM): A) TIJOLO CERÂMICO FURADO 30X20X15; B) BLOCO 27; C) BLOCO TERMOACÚSTICO	14
FIG. 2.6 – EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS EXTERIORES E INTERIORES DE UM EDIFÍCIO EM FUNÇÃO DA INÉRCIA TÉRMICA.....	15
FIG. 2.7 - INFLUÊNCIA DO TIPO DE INÉRCIA EM FUNÇÃO DO NÍVEL DE ISOLAMENTO DOS ELEMENTOS	17
FIG. 2.8 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR INTERIOR E DESFASAMENTO AO LONGO DE UM DIA COM UMA SOLUÇÃO DE PAREDE COM FRACA INÉRCIA TÉRMICA (LADO ESQUERDO) EM COMPARAÇÃO DE UMA OUTRA COM FORTE INÉRCIA TÉRMICA (LADO DIREITO)	19
FIG. 2.9 - TEMPERATURAS MEDIDAS NOS COMPARTIMENTOS EM CONDIÇÕES NORMAIS, 15 E 16 DE JULHO DE 2009.....	21
FIG. 2.10 - DEFINIÇÃO DA “ENVOLVENTE” DAS CÉLULAS DE TESTE	23
FIG. 2.11 – DIFERENÇA HORARIA ENTRE A TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE INTERNA E O AR INTERIOR, EM RELAÇÃO À TEMPERATURA EXTERIOR SOL-AR NUM DIA DE INVERNO E NUM DIA DE VERÃO, RESPECTIVAMENTE	24
FIG. 2.12 – POPULAÇÃO MUNDIAL, 1950-2050, COM AS VÁRIAS PROJEÇÕES FUTURAS	26
FIG. 2.13 – FORMAS DE TRANSMISSÃO DE CALOR, CONDUÇÃO, CONVECÇÃO E RADIAÇÃO, RESPECTIVAMENTE	29
FIG. 3.1 - SENSOR DE FLUXO DE CALOR E <i>DATALOGGER HUKSEFLUX</i> , REGISTADOR DE TEMPERATURA E HUMIDADE LOGTAG, RESPECTIVAMENTE	32
FIG. 3.2 – MEDIÇÃO DO FLUXO DE CALOR COM TERMOFLUXÍMETRO NO ENVIDRAÇADO E DA TEMPERATURA DO AR NO INTERIOR COM PLACA LOGTAG (ESQ.), MEDIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR NO EXTERIOR COM PLACA LOGTAG (DIR.).....	33
FIG. 3.3 – VARIAÇÃO DO Q AO LONGO DO DIA NO ENVIDRAÇADO	34
FIG. 3.4 – VARIAÇÃO DO U AO LONGO DO DIA NO ENVIDRAÇADO	34
FIG. 3.5 – DESENHOS DO PROTÓTIPO DA CÉLULA DE TESTES.....	36
FIG. 3.6 – LOCALIZAÇÃO DA CÉLULA DE TESTE.....	37

FIG. 3.7 – DEFINIÇÃO DA ORIENTAÇÃO DA CÉLULA DE TESTE	37
FIG. 3.8 – CONSTRUÇÃO DA CÉLULA DE TESTE COM TIJOLO TÉRMICO (A) ENCAIXE VERTICAL DOS TIJOLOS; B) E C) PORMENOR DO CANTO; D) COLOCAÇÃO DO TIJOLO-PROVETE DE TESTE; E) E F) INCLINAÇÃO PARA A COBERTURA	38
FIG. 3.8.1 – CONSTRUÇÃO DA CÉLULA DE TESTE COM TIJOLO TÉRMICO: APLICAÇÃO DO REBOCO.....	39
FIG. 3.9 – COLOCAÇÃO DA COBERTURA	39
FIG. 3.10 – ACABAMENTOS DA CÉLULA DE TESTE A) E B) FIXAÇÃO DO ARO DA PORTA; C) E D) DIVISÃO DA CÉLULA DE TESTE COM ISOLAMENTO TÉRMICO XPS DE 4 CM; E) COLOCAÇÃO DA PORTA, JÁ FORRADA COM ISOLAMENTO TÉRMICO XPS DE 4 CM.....	40
FIG. 3.11 – ABERTURA DOS RASGÕES PARA COLOCAÇÃO DAS PLACAS LOGTAG.	40
FIG. 3.12 – COLOCAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS PARA MONITORIZAÇÃO A) PLACA LOGTAG COLOCADA NA RANHURA DO LADO INTERIOR DO TIJOLO; B) TERMOFLUXÍMETRO DA PAREDE INTERIOR DA CÉLULA DE TESTE; C) PLACA LOGTAG PENDURADA NO CENTRO DA CÉLULA DE TESTE; D) PLACA LOGTAG COLOCADA NA RANHURA DO LADO EXTERIOR DO TIJOLO E PROTEGIDA.	41
FIG. 3.13 – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA WIRELESS VANTAGE PRO2™ A) CONSOLA DATALOGGER WIRELESS; B) SENSORES METEOROLÓGICOS	42
FIG. 3.14 – SENSORES DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA WIRELESS VANTAGE PRO2™ A) SENSOR DE VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO; B) SENSOR DE PRECIPITAÇÃO; C) SENSORES DE RADIAÇÃO SOLAR E UV; D) SENSORES DE TEMPERATURA E HUMIDADE EXTERNOS	42
FIG. 3.15 – FIXAÇÃO DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA	43
FIG. 3.16 – TROCA DE CALOR EM PAREDE OPACA.	44
FIG. 4.1 – DESEMPENHO TÉRMICO DA PAREDE DA CÉLULA DE TESTE, DE 11 A 14 DE MAIO	50
FIG. 4.2 – DESEMPENHO TÉRMICO DA PAREDE DA CÉLULA DE TESTE, DE 16 A 19 DE MAIO	51
FIG. 4.3 – COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA SOL-AR COM AS TEMPERATURAS REGISTADAS.....	52
FIG. 4.4 – DESEMPENHO TÉRMICO DA PAREDE DA CÉLULA DE TESTE, DE 15 A 18 DE JUNHO	53
FIG. 4.5 – DESEMPENHO TÉRMICO DA PAREDE DA CÉLULA DE TESTE, DE 19 A 22 DE JUNHO	54
FIG. 4.6 – DESEMPENHO TÉRMICO DA PAREDE DA CÉLULA DE TESTE, DE 02 A 05 DE JULHO	56
FIG. 4.7 – DESEMPENHO TÉRMICO DA PAREDE DA CÉLULA DE TESTE, DE 06 A 09 DE JULHO	57
FIG. 4.8 – HUMIDADE RELATIVA NO PERÍODO DE 02 A 05 DE JULHO E TEMPERATURA EXTERIOR.....	58
FIG. 4.9 – HUMIDADE RELATIVA NO PERÍODO DE 06 A 09 DE JULHO E TEMPERATURA INTERIOR	59
FIG. 4.10 – COMPARAÇÃO ENTRE O FLUXO DE CALOR QUE ENTRA E QUE SAI DO TIJOLO E A RADIAÇÃO SOLAR	60
FIG. 4.11 – COMPARAÇÃO ENTRE O FLUXO DE CALOR QUE ENTRA E QUE SAI DO TIJOLO E A RADIAÇÃO SOLAR	61

Índice de Quadros

QUADRO I – CARACTERISTICAS DOS TIJOLOS	11
QUADRO II – COEFICIENTE DE TRANSMISSÃO TÉRMICA VÃOS ENVIDRAÇADOS E CAIXILHARIA METÁLICA	35
QUADRO III – DADOS CLIMÁTICOS DE REFERÊNCIA DA CIDADE DE LEIRIA.....	35
QUADRO IV – CARACTERISTICAS DO BLOCO THERMOPRÉLIS	36
QUADRO V – RESULTADOS DO ENSAIO DE 11 A 14 DE MAIO	51
QUADRO VI – RESULTADOS DO ENSAIO DE 16 A 19 DE MAIO	52
QUADRO VII – RESULTADOS DO ENSAIO DE 15 A 18 DE JUNHO	54
QUADRO VIII – RESULTADOS DO ENSAIO DE 19 A 22 DE JUNHO	55
QUADRO IX – RESULTADOS DO ENSAIO DE 02 A 05 DE JULHO	56
QUADRO X – RESULTADOS DO ENSAIO DE 06 A 09 DE JULHO	57

Lista de Símbolos

q	Fluxo de calor [W/m^2]
Q_{cond}	Perda de calor por condução [W]
R	Resistência térmica [$(m^2 \cdot ^\circ C)/W$]
T_i	Temperatura do ar interior [$^\circ C$]
T_e	Temperatura do ar exterior [$^\circ C$]
Q_{conv}	Perda de calor por convecção [W]
h_c	Coefficiente de transmissão térmica de calor por convecção [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$]
A_s	Área da superfície [m^2]
T_s	Temperatura superficial do sólido [$^\circ C$]
T_f	Temperatura do fluido [$^\circ C$]
x	Comprimento ou espessura [m]
θ	Tempo [s]
α	Difusividade térmica [m^2/s]
K	Condutibilidade térmica do material [$W/m \cdot ^\circ C$]
A	Área da secção transversal à direcção atravessada pelo calor [m^2]
Δ_x	Distancia percorrida pelo calor [m]
h_c	Condutância térmica superficial por convecção [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, que toma o valor de $5,67 \times 10^{-8} Wm^{-2} K^{-4}$
dT/de	Gradiente de temperatura [$^\circ C/m$]
λ	Condutividade térmica [$W/m \cdot K$]
U_i	Coefficiente de condutibilidade térmica do elemento i [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]
A_i	Área do elemento i [m^2]
α	Coefficiente de absorção da superfície exterior
G	Radiação solar [W/m^2]

ε	Emissividade
h_a	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² K]
T_{we}	Temperatura na superfície exterior [°C]
h_w	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² K]
T_{wi}	Temperatura na superfície interior [°C]
Q	Taxa de fluxo de calor [W]
R_{si}	Resistência térmica superficial interior [m ² .°C/W]
R_{se}	Resistência térmica superficial exterior [m ² .°C/W]
R_j	Resistência térmica da camada j [m ² .°C/W]
R_{ar}	Resistência térmica de espaços de ar [m ² .°C/W]
M_{si}	Massa superficial útil do elemento i [kg/m ²]
S_i	Área superficial interior do elemento i [m ²]
A_p	Área útil de pavimento [m ²]
T_{Sol_ar}	Temperatura Sol-ar [°C]
I_δ	Radiação solar difusa [W/m ²]
I_s	Radiação solar direta [W/m ²]
h_{so}	Coefficiente de transferência de calor por convecção da superfície exterior [W/m ² .°C].

Índice

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE QUADROS	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
ÍNDICE	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DA TESE	5
2. REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 EVOLUÇÃO DA CONSTRUÇÃO DE ALVENARIA.....	7
2.2 CONSTRUÇÃO PESADA VS. CONSTRUÇÃO LEVE	15
2.3 CASOS DE ESTUDO	17
2.4 CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL E CONFORTO TÉRMICO	25
2.5 OS MECANISMOS DE TRANSMISSÃO DE CALOR.....	27
3. METODOLOGIA	31
3.1 INSTRUMENTAÇÃO	31
3.1.1 Metodologia para a medição do fluxo de calor num vão envidraçado	33
3.1.2 Apresentação e Análise de resultados.....	33
3.2 CONSTRUÇÃO DA CÉLULA DE TESTE	35
3.2.1 Colocação da instrumentação	40
3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR PELA ENVOLVENTE	43
4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS	49
4.1 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	49
4.2 COMPARAÇÃO DE CUSTOS	62
5. CONCLUSÃO	67
5.1 TRABALHOS FUTUROS	69
REFERÊNCIAS	71

1. Introdução

Hoje em dia, e cada vez mais, a qualidade dos edifícios não está apenas relacionada com a sua qualidade estrutural e arquitetónica. O conforto térmico e as condições da qualidade do ar interior, nos mais variados níveis, são exigências impostas pelos utilizadores e organismos competentes, nomeadamente através de legislação [1].

Segundo a notícia publicada no *Journal of Epidemiology Community Health*, Portugal é o país da Europa que tem uma das maiores taxas de mortalidade (28%) devido ao frio, estudo este realizado na Universidade de Dublin, que comparou 14 países europeus [2]. Este facto deve-se à fraca qualidade térmica da envolvente dos edifícios e à reduzida massa dos elementos construtivos e é justificada, sendo as habitações o local onde a população passa mais tempo da sua vida, motivo pelo qual assumem uma grande influência na sua saúde.

1.1 Enquadramento

De acordo com os balanços energéticos, publicados pela DGEG, em Portugal o consumo de energia final aumentou 55%, entre 1990 e 2007 no período de dezassete anos [3].

A Europa, por sua vez, tem vindo a importar uma média de 50% da energia total consumida. Estima-se ainda que este valor irá aumentar nos próximos 30 anos para cerca de 70% (dados da união europeia de 2006). Em Portugal, a importação de energia assume valores ainda mais altos do que a média da união europeia, cerca de 81% no ano de 2009 [4], como se pode verificar na Figura 1.1, apresentada a seguir.

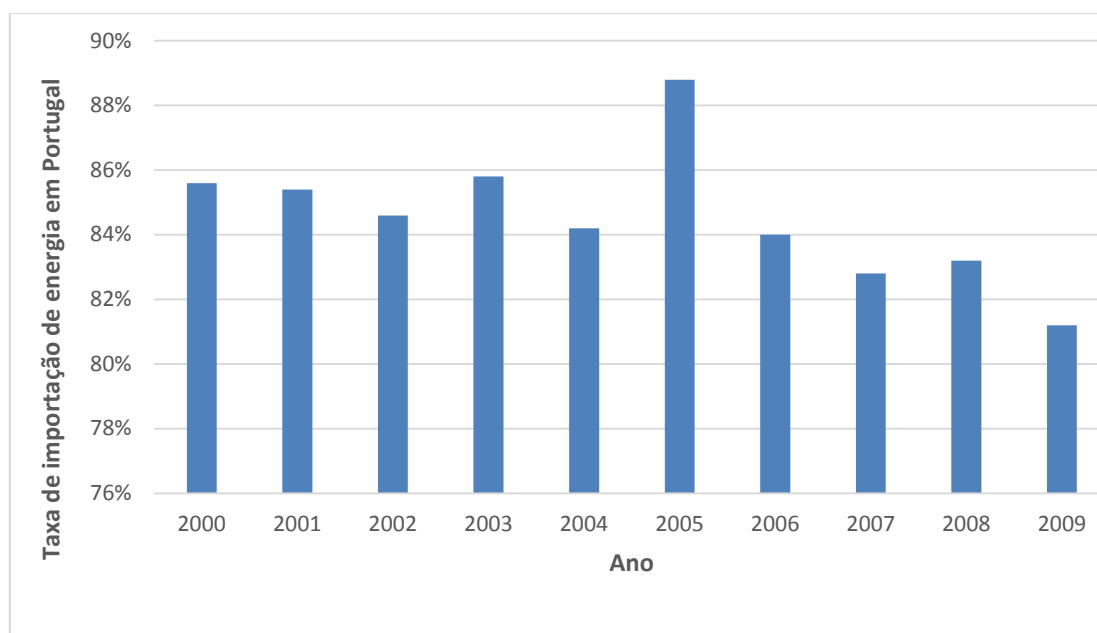


Fig. 1.1 - Taxa de importação de energia em Portugal (2000-2009) (Fonte: Adaptado de [4])

O consumo de energia nos edifícios ronda os 22% do consumo de energia final do país, com um consumo de 3,5Mtep (milhões de toneladas equivalente de petróleo). As fontes de energia correspondentes são variadas, no entanto nota-se uma predominância nos consumos de eletricidade, representando nos edifícios cerca de 58% dos consumos nacionais [5]. Como forma de minimizar o grande consumo energético verificado é essencial criar ambientes interiores saudáveis e confortáveis, onde seja possível a harmonia entre o edifício, o clima e o contexto físico em que está inserido.

A primeira legislação no âmbito da térmica de edifícios surgiu em Portugal no ano 1990, e constitui o primeiro Regulamento para o Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE) [6]. Mesmo sendo pouco exigente, este primeiro regulamento levou ao início da utilização do isolamento térmico na construção. Este regulamento acabou por ser substituído na íntegra por um novo RCCTE (D.L. 80/2006 de 4 de Abril), que integra um grupo legislativo composto pelo Sistema Nacional de Certificação e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios – SCE e por um Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios – RSECE [7].

O RCCTE é um regulamento de carácter técnico, cujo objetivo é a regulamentação das características térmicas dos edifícios de habitação e serviços cuja sua dimensão não obrigue a grandes sistemas de climatização (com potência instalada inferior a 24 kW), situação a partir

da qual se aplica o RSECE. De acordo com o Instituto Nacional de Estatística (INE), 80% dos edifícios em Portugal foram construídos antes da entrada em vigor do primeiro regulamento térmico, 1990 [8].

De uma forma geral o RCCTE verifica se as necessidades energéticas de um dado edifício são menores do que as necessidades energéticas de referência, em função do tipo de construção e da zona climática. Impõe limites ao consumo energético para a climatização e produção de água quente, num incentivo à utilização de sistemas eficientes e de fontes energéticas com menos impacto nas energias primárias. Esta legislação impõe ainda a instalação de painéis solares térmicos e valoriza a utilização de outras fontes de energias renováveis.

O artigo 1º do RCCTE menciona que os edifícios devem ser construídos de modo a que as condições de conforto térmico possam ser asseguradas com o mínimo de energia despendida. As alvenarias de tijolo contribuem para este objetivo, quer pelo grau de isolamento conferido a envolvente vertical quer pelo contributo para uma melhor inércia térmica [6].

Entrará em vigor no próximo dia 1 de dezembro de 2013, a nova regulamentação térmica, o Decreto-lei 118/2013 de 20 de agosto. Este DL aprova o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios, o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação e o Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços, e transpõe a Diretiva n.º 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010.

Os regulamentos, reunidos agora num único documento revogam o Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (DL 78/2006), Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (DL 79/2006) e o Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (DL 80/2006), todos datados de 4 de abril e ainda em vigor aquando da realização desta dissertação [9].

O protocolo de Quioto impõe reduções dos seis principais Gases de Efeito de Estufa (GEE): dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorcarbonetos, hidrocarbonetos perfluorados e hexafluoreto de enxofre. Este protocolo entrou em vigor em 2005, após a ratificação pela Rússia, sucedeu à Convenção-Quadro das Nações Unidas, foi ratificado por 156 países e é um dos instrumentos jurídicos internacionais mais importantes na luta contra as alterações climáticas. As emissões de gases totais dos países desenvolvidos deveriam ser reduzidas em, pelo menos 5 % em relação aos níveis de 1990, no período 2008-2012 [10].

Portugal ficou vinculado ao protocolo em Abril de 1998, aquando da adesão da União Europeia, em que foi assumido o compromisso de reduzir as emissões dos seis GEE's em 8%

relativamente a 1990, durante o mesmo período [10]. Este protocolo previa metas de redução de emissão de gases do efeito de estufa nos países industrializados, sendo o único instrumento jurídico referente ao clima. Assim criava-se “créditos de carbono” para as empresas e os países pela redução das emissões de dióxido de carbono e de outros gases. O rápido crescimento do aumento do efeito de estufa poderá ser minimizado utilizando de forma mais intensiva as energias renováveis e também aumentando a eficiência dos processos de produção, distribuição e transformação da energia. Assim, poderemos obter um menor consumo energético e conseqüente menor emissões com o mesmo resultado final.

O protocolo de Quioto referido terminou em 2012, sendo criado um segundo período que passou a vigorar em 1 de Janeiro de 2013 e previsão de término em 2020, com um aumento da redução imposta para 18% [11].

1.2 Objetivos

Os tijolos térmicos, devido à simplicidade da construção da alvenaria, elevada massa, e eliminação do material isolante na caixa-de-ar na solução de parede dupla usual, potenciam uma boa solução para a construção de paredes da envolvente exterior. No entanto, ainda não se encontra bem caracterizado o seu funcionamento energético e higrométrico, ou seja, se o seu comportamento térmico, essencialmente associado ao mecanismo da inércia térmica, é eficiente do ponto de vista do conforto térmico, energético e da salubridade do ambiente interior, contribuindo decisivamente para uma construção sustentável económica.

Um dos objetivos principais deste trabalho de investigação consistiu em avaliar o desempenho de soluções de paredes de alvenaria inovadoras, incorporando tijolo térmico produzido pela empresa PRELIS, L^{da}, o Bloco ThermoPrelis. Para tal, recorreu-se à construção de uma célula experimental com paredes simples de alvenaria de tijolo térmico, em que foi analisado o comportamento dinâmico da parede de teste, quando sujeita a ciclos diários de ganhos solares e trocas de calor com o ambiente exterior, revelado pelo fluxo de calor e pelo perfil de temperatura no interior das furações junto às superfícies interior e exterior dos tijolos, ao longo do tempo. Desta forma, é caracterizado o regime transiente da transmissão de calor na parede, podendo-se verificar a sua capacidade de acumulação e libertação de calor ao longo do tempo, de forma a alcançar desempenhos mais favoráveis no interior do edifício, com a

consequente redução do consumo energético e melhoria do conforto térmico de forma passiva (sem recurso a sistemas energéticos).

Pretende-se, ainda, que este estudo seja visto como um contributo para o trabalho já desenvolvido na área da física das construções, da térmica dos edifícios e da construção sustentável. Para além disso, pretende-se que este trabalho possa proporcionar alguma informação útil para aplicação de forma preventiva ou corretiva no processo construtivo de edifícios novos ou em edifícios existentes, reabilitando-os e reduzindo, quer as necessidades energéticas de aquecimento e arrefecimento dos edifícios, quer as patologias na construção decorrentes do deficiente isolamento térmico da envolvente e da presença de humidade.

Face ao escasso trabalho experimental existente neste domínio, sentiu-se a importância de desenvolver a fim de estudar a transmissão de calor em regime dinâmico nas paredes, bem como implementar correções específicas para a transmissão de calor por convecção e por radiação térmica nas superfícies.

Outro objetivo deste trabalho incluiu quantificar as trocas energéticas entre o elemento de construção e o ar no interior do edifício, bem como a energia armazenada nesse mesmo elemento em termos dinâmicos. Em suma, é importante conhecer a resposta às variações de temperatura e humidade no interior e nas superfícies exteriores das paredes de forma detalhada e rigorosa.

1.3 Organização da tese

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos.

No primeiro capítulo definiu-se o enquadramento do tema, os objetivos do trabalho e ainda a própria organização desta dissertação.

O segundo capítulo aborda a revisão da literatura efetuada, que serviu de base para o trabalho.

No terceiro capítulo apresenta-se a metodologia do trabalho experimental efetuado bem como toda a instrumentação utilizada para tal e ainda a construção da própria célula de ensaio.

O quarto capítulo corresponde à análise dos resultados obtidos em termos de desempenho energético e ainda uma análise de custo-benefício da utilização de tijolo térmico.

No quinto e último capítulo apresentam-se as conclusões gerais do trabalho e propõe-se o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. Revisão da literatura

Neste capítulo é apresentada a evolução da construção das fachadas em Portugal, bem como os diferentes materiais utilizados. Aborda-se ainda vários casos de estudo, permitindo conhecer e fundamentar o trabalho desenvolvido.

2.1 Evolução da construção de Alvenaria

O homem desde sempre construiu abrigos com objetivo de se proteger e as fachadas dos edifícios têm essa mesma função, a separação do interior para o exterior dos edifícios, protegendo assim os habitantes das condições climáticas, do ruído e de intrusos. As paredes exteriores têm como função proporcionar boas condições de habitabilidade interiores. A construção foi evoluindo ao longo dos tempos à medida das necessidades de cada época e acompanhando também a evolução dos materiais. Assim sendo, pôde estabelecer-se uma divisão ao nível das tipologias construtivas, como se pode verificar na Figura 2.1, de acordo com as suas características estruturais e arquitetónicas relacionadas com a época de construção em que estão inseridas.

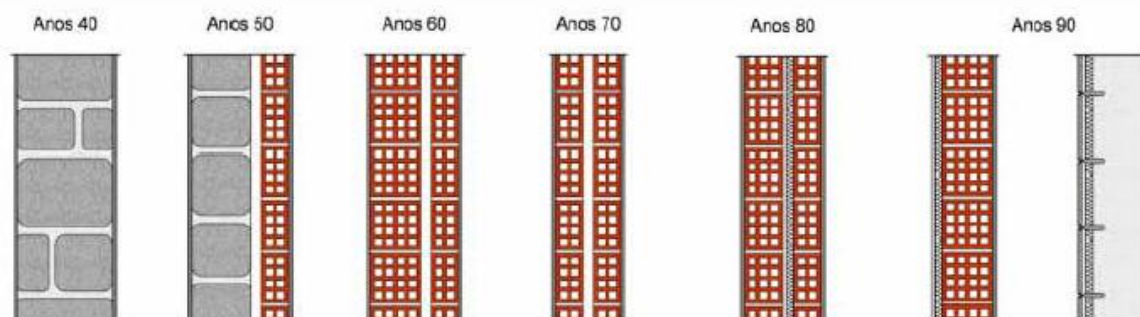


Fig. 2.1 - Evolução das fachadas em Portugal (Fonte: [12])

Nos anos 40 as fachadas eram principalmente constituídas por um pano de elevada espessura, em alvenaria de pedra ou tijolo maciço, funcionando também como estruturas de suporte da cobertura e conservando o calor no seu interior. À medida que as fachadas se tornavam independentes da sua função estrutural deixando de ser necessárias como paredes portantes e que a produção do vidro se foi desenvolvendo, observou-se um incremento do uso de vãos envidraçados com o interesse na iluminação dos espaços interiores. Na década seguinte surgiram as paredes duplas, um pano exterior de alvenaria de pedra e um pano interior em alvenaria de tijolo. Nos anos 60, começando a pôr-se de parte a alvenaria de pedra, a construção tornou-se mais ligeira, com menor inércia, utilizando com maior frequência a alvenaria de tijolo furado em ambos os panos, sendo o pano exterior substancialmente mais espesso que o interior, tendo-se notado uma redução da sua espessura até à década de 70, apresentando os panos uma espessura semelhante e relativamente reduzida. A subida dos custos energéticos e a consciencialização dos problemas ambientais associados a produção de energia veio alterar a forma de pensar e de construir, sentindo-se necessidade de pensar nas implicações energéticas das paredes exteriores surgiram inovações para melhoria também do conforto térmico no interior. Nos anos 80 começaram a utilizar-se materiais de isolamento térmico para preenchimento total ou parcial da caixa-de-ar das paredes.

A evolução das soluções construtivas de fachadas aconteceu como resposta às crescentes exigências e a regulamentação sobre o conforto no interior das habitações, a evolução tecnológica e a criatividade foram um grande passo para esta evolução. Em Portugal, nos anos 90, apareceram sistemas de isolamento pelo exterior e pelo interior, sendo que os últimos são geralmente aplicados apenas na reabilitação dos edifícios [13].

Existem vários fatores a ter em conta na evolução dos aspetos construtivos de uma parede, como o aligeiramento das paredes de alvenaria, regularidade de dimensões dos blocos de alvenaria, utilização de elementos pré-fabricados e ainda dimensão dos mesmos elementos.

A procura pela eficiência energética é cada vez maior e tem levado a um grande desenvolvimento dos sistemas de fachadas, havendo um equilíbrio entre as condições climatéricas exteriores e conforto interior com recurso ao mínimo gasto energéticos possível. Essa procura influencia a maior utilização das energias renováveis como o sol, o vento e a movimentação das águas na arquitetura dos edifícios.

Além das mencionadas, existem ainda outras soluções para paredes exteriores, como alvenarias resistentes de furação vertical, alvenarias armadas, alvenarias de montagem

simplificada, alvenarias executadas por autómatos e alvenarias com peças complementares. Estas criam soluções construtivas globais para as paredes, capazes de contribuir para a eficiência energética esperada, mas no entanto não possuem ainda a necessária divulgação.

Hoje em dia as fachadas são concebidas tendo em conta vários fatores, a sua Função: para que será desenhada e a que solicitações vai estar sujeita; a Construção em si: que materiais serão utilizados; a Forma: qual será o seu aspeto e por fim Energia: qual o consumo energético do edifício e da própria construção da fachada. A energia que é o fator que tem ganho maior importância atualmente está diretamente relacionada com a função e a forma sendo estes os que condicionam o desempenho energético do edifício, devendo no entanto considerar todos os fatores em simultâneo.

O tijolo de argila é o material mais utilizado na edificação das nossas construções, ganhando assim, rapidez e economia na obra. Sendo uma pedra artificial, este processo era feito de forma manual no séc. XIX, no entanto com o aumento da população e a industrialização este produto rapidamente passou a ser produzido a larga escala. Além da rapidez de construção evidente, outra vantagem é a de não necessitar de abertura de roços, as instalações elétricas bem como a canalização para águas pode ser feita durante o processo de construção.

A combinação deste material com outros perfaz um aumento das propriedades térmicas e acústicas. Podem ser usados vários materiais para o efeito como o poliestireno expandido, extrudido, aglomerado de cortiça, lã rocha entre outros.

A normalização portuguesa existente para o tijolo cerâmico data dos anos sessenta e setenta: NP 80 e NP 834. Foram e continuam a ser dois importantes documentos normativos que estabelecem as características físicas e dimensionais para os tijolos cerâmicos de alvenarias.

A norma NP 80 define as características e os ensaios aplicáveis, enquanto a NP 834 define os formatos e as tolerâncias dimensionais. A partir de 01/04/2005 entrou em vigor a marcação CE, tornando-se obrigatória um ano depois. As normas europeias para tijolos de alvenaria estiveram em elaboração durante mais de 10 anos, devido à dificuldade de conciliar as opiniões dos diversos países bem como às alterações necessárias para ir ao encontro da Diretiva Europeia Produtos da Construção 89/106/CEE.

Na europa verifica-se um incremento de novos produtos de alvenaria cerâmica nas técnicas de construção, com excelentes ganhos de produtividade, custo, e melhoria da construção,

nomeadamente os tijolos de furação vertical, que permitem uma construção rápida e com grande conforto associado [14].

A solução tipicamente utilizada para fachadas é aquela em que se utiliza dois panos de alvenaria de tijolo, caixa-de-ar e isolamento, sendo a espessura deste tipo de fachadas bastantes variável, Figura 2.2. Na construção as fiadas devem ficar perfeitamente horizontais e retas e a espessura da argamassa não deve exceder 1,5 cm preenchendo a totalidade do intervalo dos tijolos. É ainda importante assegurar que a caixa-de-ar se encontra desobstruída, e o isolamento deve ser fixo à superfície interior para que o mesmo não se desloque ou caia com o passar do tempo.



Fig. 2.2 – Parede dupla com isolamento (Fonte: [15])

No cálculo da inércia térmica é levado em consideração a massa do elemento mais exterior após o isolamento térmico, constituído por elementos de pouca massa, o que significa pouca inércia térmica ou seja as paredes têm pouca capacidade de reter calor.

Os tijolos de furação horizontal apresentam uma geometria de septos lineares com alvéolos alinhados de uma face a outra, assim é favorecida a passagem de calor do interior para o exterior no inverno, sendo os septos do tijolo as pontes térmicas.

Com o **tijolo térmico** desalinhou-se os septos e os alvéolos, desta forma o caminho que o calor tem de percorrer de uma face a outra é muito maior. Estes alvéolos são mais estreitos e alongados o que permite reduzir a transmissão de calor por convecção.

Esta geometria foi analisada pelo método dos elementos finitos, revelando-se uma ótima geometria para otimização da capacidade de isolamento térmico [14].

Outra vantagem da furação vertical em comparação com a furação horizontal do tijolo tradicional é que esta confere uma maior resistência mecânica, sendo estruturalmente mais resistente em cerca de três vezes. O tijolo térmico possui dois orifícios maiores para facilitar seu o manuseamento. No quadro I, pode-se observar as principais características do tijolo corrente no fabrico das típicas paredes duplas em comparação com o tijolo térmico utilizado neste estudo.

Quadro I – Características dos tijolos [Adpatado de fichas técnicas da Prelis L^{da}] [16]

Designação	Tijolo térmico 30x19x29	Tijolo corrente (furado) 30x20x22	Tijolo corrente (furado) 30x20x15	Tijolo corrente (furado) 30x20x11
Dimensões	294x189x289 mm	300x200x220 mm	300x200x150 mm	300x200x110 mm
Resistência à compressão	$\geq 3,0 \text{ N/mm}^2$ Categoria II	$\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ Categoria II	$\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ Categoria II	$\geq 1,5 \text{ N/mm}^2$ Categoria II
Reação ao fogo	Incombustível Euroclasse A1	Incombustível Euroclasse A1	Incombustível Euroclasse A1	Incombustível Euroclasse A1
Absorção de água	Não destinado a ser exposto	Não destinado a ser exposto	Não destinado a ser exposto	Não destinado a ser exposto
Isolm. Acústico / Massa Volúmica Bruta	$R_w = 51 \text{ dB} *$ 860 kg/m^3	633 kg/m^3	650 kg/m^3	670 kg/m^3
Resist. Térmica	$1,43 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	$0,58 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	$0,42 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$	$0,29 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$

*Considerando reboco nas duas faces e junta horizontal interrompida.

A aplicação do tijolo térmico permite que a construção seja feita num só pano, simplifica a execução, e a configuração do mesmo garante uma construção rápida e simples. Os tijolos têm furação vertical e encaixam lateralmente uns nos outros evitando as juntas de argamassa vertical, favorecendo o alinhamento e o prumo da parede reduzindo o tempo de execução e o consumo de argamassa de assentamento. O tijolo deve ser aplicado humedecido tal como o tijolo furado de forma a evitar a desidratação da argamassa. Se utilizar tijolos de 24 e 29 a

junta horizontal deve ser interrompida, colocando uma régua de 3x5 cm no centro da fiada, esta interrupção serve para criar uma caixa de ar ao longo de toda a parede e assim aumentar quer o isolamento térmico, evitando as pontes térmicas, quer as infiltrações de humidade. Nas paredes interiores não se deve interromper a junta. Depois de retirar a régua é só encaixar os tijolos verticalmente, sem arrastar. A argamassa deve penetrar nos alvéolos dos tijolos, permitindo uma melhor fixação dos mesmos (Figura 2.3).



Fig. 2.3 – Interrupção da junta; Assentamento dos tijolos; Verificação da junta (Fonte: [17])

Com um martelo e um nível ajusta-se os tijolos até ficarem nivelados e alinhados. A espessura na junta horizontal, depois dos tijolos assentes deve ser de cerca de 1,5 cm.

A interrupção da junta horizontal descrita anteriormente é de extrema importância e assume um papel fundamental quer no corte à entrada de humidade, quer aumentando a resistência térmica, diminuindo o valor do coeficiente global de transferência de calor.

Este coeficiente global de transferência de calor pode ainda ser diminuído, aumentando a espessura das paredes, no entanto a tendência não é essa, porque quanto mais espessura as paredes tiverem, menor as áreas dos espaços, menos as áreas dos espaços interiores.

As fachadas exteriores são as mais fustigadas pelas intempéries. Estas têm como função principal proteger o interior do edifício contra a ação da água da chuva. Devem, contudo, ter capacidade de drenar as águas infiltradas e as provocadas por condensação que resulta do vapor de água que passa do interior para o exterior da parede, e só assim cumprem a sua ação contra a humidade. Sendo a aplicação do tijolo térmico bem executada, este garante a drenagem e a ventilação da fachada com caixa-de-ar criada entre os alvéolos na secção media da espessura do tijolo (Fig. 2.4). A água que afluí ao interior do tijolo deve ser eliminada de forma controlada e mesmo pequenas quantidades de água que lá circulem não devem ser

desprezadas. A utilização de tijolo térmico, pelo simples facto de a furação ser na vertical, e pela quantidade de alvéolos quando comparado com o tijolo tradicional (Fig. 2.12), dificulta a propagação da humidade do exterior para dentro da habitação. Estes canais verticais permitem o escoamento da água, sendo o processo apenas cortado pela massa de assentamento na periferia do tijolo, ficando assim com uma caixa-de-ar continua no meio do mesmo. Assentar o tijolo apenas na periferia evita o choque térmico, aumentando o isolamento térmico (Fig. 2.4, foto central).



Fig. 2.4 – Comparação da furação do tijolo térmico com o tijolo tradicional (esquerda), pormenor da junta interrompida criando o efeito de fachada ventilada e aplicação do tijolo encaixe vertical (direita).

As juntas de argamassa são de grande influência no desempenho térmico das paredes de alvenaria. O seu efeito depende das suas características térmicas, que normalmente são de pior qualidade térmica que a alvenaria. É preferível a utilização de juntas horizontais reduzidas e se possível a ausência de juntas verticais.

Em Coimbra, Nuno Simões *et al.* [18] realizaram um estudo com o objetivo de quantificar essa influência para 3 tipos de materiais diferentes. Procedeu-se ao cálculo do coeficiente de transmissão térmica de três tipos de parede diferentes, variando a espessura, a interrupção da junta horizontal e o coeficiente de condutibilidade térmica. Os cálculos para este estudo foram feitos com base na norma ISO 6946 [19].

Para cada tipo de parede composta por materiais diferentes, tijolo 30x20x15, Bloco 27 e bloco termoacústico (Artebel) como se pode ver na Figura 2.5, foram estudadas três soluções para as juntas de assentamento horizontais: Junta continua, junta descontínua por cordões de argamassa criando uma caixa-de-ar e junta descontínua constituída por cordões de argamassa intercalados por um cordão de isolamento térmico.

No estudo, as dimensões máximas para a descontinuidade entre os cordões de argamassa são inferiores a metade da dimensão disponível. Assumiu-se que o material cerâmico, o bloco 27 e o bloco Termoacústico tem condutividade térmica de $0,6 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, $1,52 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ e $0,46 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ respetivamente.

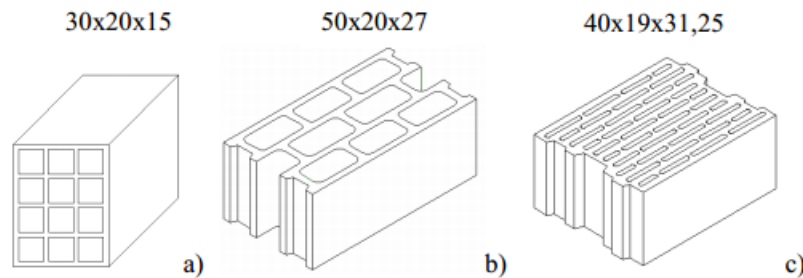


Fig. 2.5 – Geometria dos blocos estudados e respetivas dimensões (cm): a) Tijolo cerâmico furado 30x20x15; b) Bloco 27; c) Bloco Termoacústico. (Fonte: [18])

Para os tipos de parede nas condições estudadas, as juntas possuem grande influência na melhoria do desempenho térmico, sendo esta melhoria de 32% para paredes compostas por tijolo cerâmico 30x20x15, de 13% para Bloco 27 e de 44% para as paredes constituídas pelo bloco Termoacústico. Conclui-se vantajosa a existência de juntas de argamassa descontínuas. De referir ainda que a espessura de caixa-de-ar com melhores resultado tem 2 cm [18].

A condutibilidade térmica é uma propriedade típica de um material homogéneo, ou seja é a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma determinada espessura e área por unidade de diferença de temperatura entre as duas faces, é a maior ou menor facilidade do calor atravessar o material por condução. Quanto menor este valor de condutibilidade, menor é a perda energética, e maior a capacidade de isolamento térmico.

Quantificar a condutibilidade térmica não é fácil, visto que as fachadas não são constituídas por um único material, no caso de paredes de pano duplo há que contar com os tijolos furados, a argamassa que os une a caixa-de-ar e ainda o material isolante. No entanto como dito anteriormente, quanto menor o coeficiente de transmissão térmica, maior a capacidade isolante.

2.2 Construção pesada vs. Construção leve

Em pleno Verão todos conhecemos a sensação de frescura quando entramos numa igreja construída com paredes maciças em granito e no Inverno em que o interior da mesma está a uma temperatura superior à que se faz sentir no exterior. Este é o efeito da inércia térmica em pleno funcionamento. A inércia térmica dos edifícios é classificada segundo o RCCTE em fraca, média ou forte consoante a massa superficial útil por unidade de área útil de pavimento [6], por outras palavras, é a maior ou menor capacidade de amortecer e desfazar no tempo, as variações de temperatura interiores comparativamente com as temperaturas exteriores.

Claro que a solução não passa por construirmos edifícios habitacionais, com a inércia térmica de igrejas. As tecnologias e os materiais disponíveis para construção dispõem de soluções construtivas que otimizam o efeito da inércia térmica, positivamente com o clima em questão. Na Figura 2.6 apresenta-se a evolução das temperaturas num edifício em função da sua inércia.

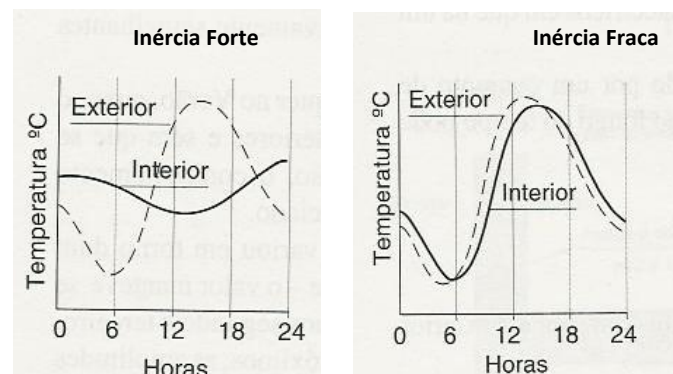


Fig. 2.6 – Evolução das temperaturas exteriores e interiores de um edifício em função da inércia térmica.
(Fonte: [20])

Em Portugal esta questão torna-se bastante relevante visto a grande amplitude térmica em tão curto espaço de tempo. A temperatura média do nosso clima mantém-se entre os 18 e os 26 graus Celsius, uma boa inércia térmica contribuiria para estabilidade da temperatura e conforto no interior dos edifícios.

No entanto, na ótica do curto prazo, em que a pressão financeira é grande para o produto imobiliário ser rapidamente comercializado, os tempos de construção tornam-se uma importante condicionante. E por sua vez torna-se irresistível a tentação de construir edifícios

leves e rápidos (essencialmente com estruturas metálicas). É de extrema importância que sejam otimizados os prazos de execução em obra para soluções construtivas que ofereçam a inércia térmica adequada e necessária ao clima [21].

Existem certos dispositivos construtivos que integrados nos edifícios têm o objetivo de contribuir para o aquecimento ou arrefecimento natural do mesmo, chamados de sistemas passivos. Na estação fria, para aquecimento do edifício, pretende-se captar o máximo de sol possível orientando e dimensionando bem os vãos envidraçados, aos quais se pode associar elementos mássicos e assim permitir o armazenamento da energia solar para posterior utilização. A parede de trombe é uma das soluções mais utilizadas na arquitetura bioclimática, permitindo um ótimo aproveitamento dos recursos endógenos, potenciando a diminuição do consumo de energia convencional e com vantagens económicas e ambientais. Trata-se assim de um sistema capaz de absorver a energia do sol, armazená-la (no interior da parede, devido à inércia térmica da mesma) e irradiar calor para dentro da divisão quando for mais necessário, funcionando como um radiador gratuito no inverno [20,21].

Um estudo conclui que numa região fria da Turquia haverá um potencial de conservação de energia até 3312 kWh / ano e redução das emissões de CO₂ associadas, cerca de 33 ton/ano através da incorporação de paredes de Trombe. E o período de retorno do investimento foi assumido como sendo cerca de 7 meses. [22]

Segundo o Professor Nick Baker [16], a propagação da transferência de calor por uma parede de trombe é de cerca de 18min por cada 10 mm de espessura. Numa parede de 200mm de betão, a parede retardará em 6 horas a irradiação do calor armazenado. Com o início da absorção da radiação solar no Inverno por volta das 12h , a parede começará a irradiar calor para o espaço interior por volta as 18h (fim de tarde, início de noite).

A eficiência média da parede ao longo da estação de aquecimento entre 2001-2002, definida como o calor transmitido e acumulado na parede de trombe dividido pelo total de radiação solar incidente na superfície exterior da parede foi de 13% [23].

Através da análise da Figura 2.7 pode-se verificar que quanto maior for a inércia da envolvente de um espaço, menor são as necessidades requeridas para o seu aquecimento.

De facto, observa-se que mesmo para um baixo nível de isolamento térmico se consegue através de uma inércia forte uma maior redução das necessidades energéticas de aquecimento

em contraponto com uma fraca inércia, mesmo que inerente a um elevado nível de isolamento dos elementos [24].

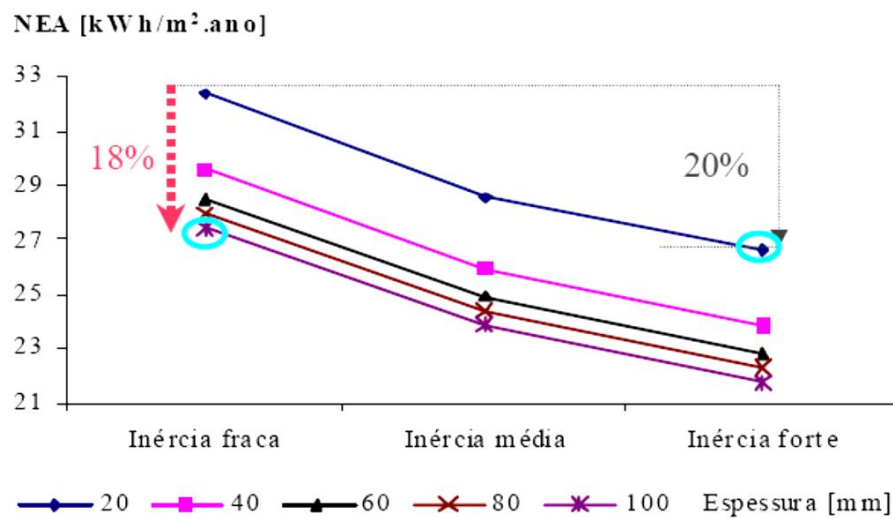


Fig. 2.7 - Influência do tipo de inércia em função do nível de isolamento dos elementos. (Fonte: [24])

Dimensionar corretamente a massa térmica dos elementos permite reduzir as flutuações de temperatura no interior dos espaços, conservando o calor durante o Inverno e o fresco durante o Verão. As áreas com exposição direta ao Sol são as que têm maior capacidade para reter a radiação solar, transmitindo-as depois para o interior. A cor das superfícies exteriores representa também uma grande influência neste efeito térmico de captação do calor: cores claras refletem mais radiação e cores mais escuras absorvem-na, ideais para localizações frias. Quando os edifícios têm uma inércia térmica forte, são termicamente bem isolados e protegidos de radiações diretas durante o dia, ocorre uma diminuição de 35% a 45% na temperatura interior comparativamente à temperatura exterior [25].

2.3 Casos de Estudo

A transferência de calor nas paredes de tijolo furado, devido aos espaços de ar existentes no interior dos blocos, é um fenómeno um pouco complexo. Segundo, M. Guedes de Almeida e E. Maldonado, este fenómeno deve ser considerado bidimensional [26]. Estes autores construíram três paredes de teste distintas: uma parede maciça de blocos de betão, uma parede simples de tijolo furado e uma parede dupla de tijolo furado com uma caixa-de-ar de 4 cm de

espessura. Estas paredes foram monitorizadas, sabendo-se assim as diferentes temperaturas a que estavam sujeitas. Este ambiente foi criado com o auxílio de um compartimento de madeira, fechado e isolado e criando 2 zonas de temperaturas diferentes, uma a 35°C e outra a 10°C. Com a parede maciça de blocos de betão, com propriedades térmicas bem conhecidas de estudos anteriores, foi possível calibrar a zona experimental e determinar os coeficientes de convecção nas câmaras reduzindo assim o número de variáveis para as simulações seguintes. De modo a saber a distribuição de temperaturas ao longo de toda a parede, estas foram bastante instrumentadas, sendo depois simuladas com um programa numérico. O modelo que conduziu a melhores resultados foi sempre aquele que apenas considerava a transferência de calor no interior dos alvéolos dos tijolos, ou seja apenas por condução. A radiação térmica não tem um papel significativo na transferência de calor nos alvéolos porque as diferenças de temperatura entre os nós dos tijolos são muito pequenas. Como os alvéolos são espaços fechados e estanques, as correntes de convecção são consideradas nulas.

A capacidade de alguns materiais acumularem e libertarem calor não pode ser esquecida, como estratégia para a economia de energia. O uso de isolamento térmico tem privilegiado o uso de materiais com baixa condutividade térmica e reduzida massa, em oposição à utilização de soluções construtivas pesadas em que o desempenho térmico depende da utilização de materiais com grande massa. A acumulação de calor na envolvente do edifício é uma das formas mais eficazes para a redução do uso de sistemas ativos de climatização, quer no verão quer no inverno. No verão, o calor acumulado nas paredes é libertado com atraso reduzindo o pico de calor e no inverno, o calor acumulado durante o dia é retornado ao ambiente ao final da tarde tornando o ambiente confortável. A massa do edifício atua como um sistema de termorregulação, evitando as oscilações de temperatura, garantindo o conforto e limitando os consumos de energia [26], que dependem do processo de acumulação e libertação de calor da parede. Por exemplo, numa parede de alvenaria de tijolo e num painel de isolamento de lã de vidro com coeficiente de transmissão térmica igual, em condições estacionárias, os fluxos de calor são idênticos, no entanto, na realidade estes dois elementos apresentam um comportamento muito diferente, o tijolo tem maior capacidade térmica. Na parede de tijolo cada camada absorve uma quantidade de calor aumentando a sua temperatura e passando-a à camada seguinte. O calor armazenado é assim transferido com um atraso considerável de tempo. Pode acontecer que apenas uma parte desse calor chegue ao outro lado da parede, atingindo a superfície.

É possível caracterizar o desempenho térmico da parede através da definição do desvio de fase, o qual representa o tempo de atraso do pico de fluxo de calor da parede. Este depende da capacidade térmica da parede e da sua massa. Os efeitos da inércia são essencialmente notados quando em tempo quente ou frio o consumo de energia de um edifício pesado pode ser menor do que numa construção mais leve. Além disso a acumulação de energia na massa do edifício “move-se” para o interior deste, havendo assim um desfasamento do pico de calor e sendo este desfasamento maior quanto maior for a inércia [27]. A inércia térmica é proporcional ao peso específico e à espessura da envolvente do edifício.

Como se pode ver na Figura 2.8, numa parede com fraca inércia térmica o desfasamento é pequeno, enquanto com uma grande inércia térmica este desfasamento pode atingir varias horas. Desta forma consegue-se que a temperatura dentro da habitação seja mais constante, ou seja, quando já esta a anoitecer e a ficar mais frio no exterior, é então que a parede faz o seu papel de “aquecer” o interior do edifício. Assim, em princípio, o conceito de inércia térmica contrasta com soluções que visam o isolamento térmico com baixa densidade dos materiais utilizados. Claro que na prática é importante considerar a presença de ambos, isolamento térmico e a capacidade de armazenamento de calor, ajudando a criar estruturas com elevado desempenho.

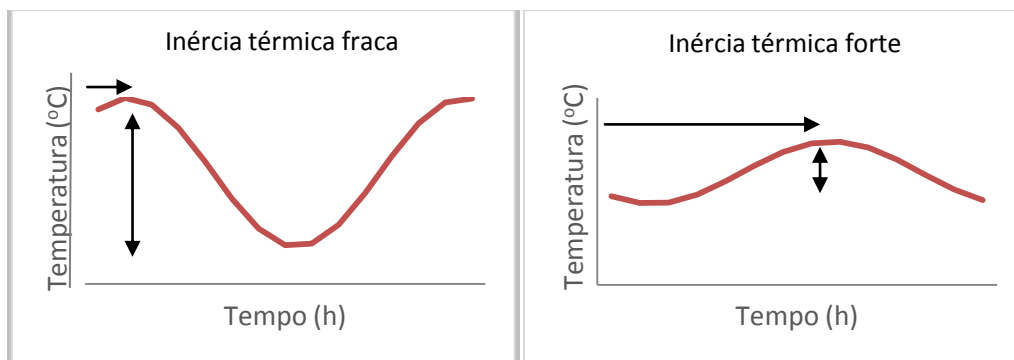


Fig. 2.8 – Variação da temperatura do ar interior e desfasamento ao longo de um dia com uma solução de parede com fraca inércia térmica (lado esquerdo) em comparação de uma outra com forte inércia térmica (lado direito). (Fonte: Adaptado de [27])

Os tijolos térmicos, devido a sua simplicidade na construção e eliminação/redução do material isolante, são uma boa solução para construção de paredes exteriores. No entanto, ainda não está bem claro que este material funcione energeticamente, ou seja, que o seu comportamento

térmico seja totalmente eficiente. A. de Gracia *et al.* [28] pretendeu avaliar o comportamento térmico de um sistema de tijolo térmico, em comparação com um sistema tradicional de tijolo com isolamento. Este estudo experimental consistiu em medir o desempenho térmico de 4 compartimentos. O coeficiente de transmissão térmica U foi calculado teórica e experimentalmente para todos os compartimentos. De notar que o valor do U não contabiliza a inércia térmica, tornando-se esta análise do edifício redutora.

Os quatro compartimentos têm as mesmas dimensões interiores, apresentando apenas diferenças nos materiais que os constituem:

O Compartimento de referência é constituído por gesso, tijolo perfurado e uma caixa-de-ar de 5 cm, tijolos ocos e um acabamento com argamassa de cimento. A estrutura foi feita com 4 pilares reforçados com aço, um em cada extremidade.

O Compartimento de Poliuretano possui uma estrutura igual à estrutura de referência, no entanto tem uma camada de isolante de 5 cm de poliuretano.

O Compartimento de lã mineral possui uma estrutura igual ao de referência, no entanto tem uma camada de isolante de 5 cm de lã mineral.

O Compartimento de tijolo térmico, é constituído por gesso, tijolo térmico e um acabamento de argamassa de cimento. A estrutura é ligeiramente diferente, sem pilares e não tem qualquer isolamento adicional.

A cobertura foi feita com recurso a vigas de betão pré-fabricado e 5 cm de laje de betão sobre o qual foi colocado o material isolante, protegido com argamassa de cimento e uma membrana de asfalto dupla.

Na Figura 2.9 apresentam-se as temperaturas medidas nos compartimentos durante 2 dias consecutivos. Como esperado, o compartimento da solução de referência (tijolo furado sem isolamento térmico) apresenta o pior desempenho térmico.

Por outro lado, o compartimento de tijolo térmico (*Alveolar*) apresenta os resultados mais favoráveis do atraso térmico, atingindo um incremento de quase 1 h em comparação com os isolados, e mais 1,5 h em relação ao de referência.

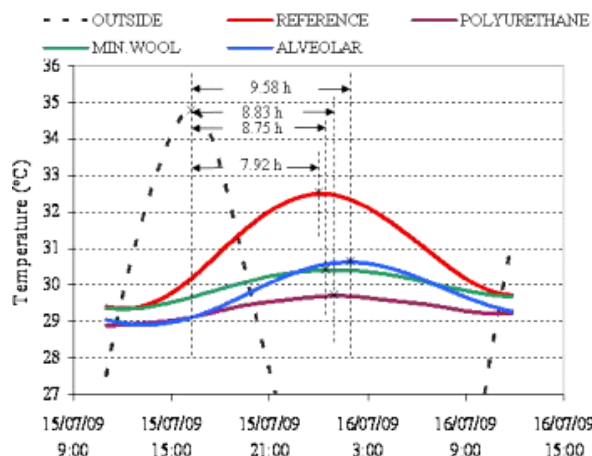


Fig. 2.9 - Temperaturas medidas nos compartimentos em condições normais, 15 e 16 de Julho de 2009. (Fonte: [28])

Além disso o atraso térmico dos tijolos térmicos apresentam um desfasamento de 9,58 h entre a temperatura exterior e o pico do calor para o interior do tijolo, sendo 1,63 vezes maior do que o compartimento de referência e 1,34 vezes maior que os isolados.

As características dinâmicas dos tijolos térmicos indicam um melhor comportamento térmico transiente, atraso térmico e fator de amortecimento em comparação com os isolados.

O valor de U é o parâmetro mais utilizado, geralmente requisitado num projeto, no entanto para avaliar o desempenho térmico de um componente da construção deve-se incluir a avaliação de parâmetros transientes [28].

As emissões de CO₂ estão a promover uma política de edifícios mais sustentáveis e os materiais de mudança de fase são cada vez mais uma aposta, que tem sido estudada para armazenamento térmico em edifícios. Assim, Albert Castell *et al* [29] realizaram um estudo experimental onde construíram e compararam diferentes compartimentos com diferentes materiais.

Com tijolo alveolar (tijolo térmico), foram construídos 2 compartimentos diferentes:

Compartimento de referência (alveolar), sem isolamento;

Compartimento com material de mudança de fase (sal hidratado) entre o tijolo e o reboco de gesso.

De modo a avaliar os perfis de temperatura de cada material, foram registados para cada compartimento: Temperatura das paredes, cobertura, pavimento e interior; fluxo de calor da parede a sul, consumo elétrico da bomba de calor, radiação solar e temperatura e humidade exterior. No verão, relativamente aos consumos de energia nos diferentes compartimentos

foram utilizadas como temperatura de referência 16°C, 20°C e 24°C.

Com a temperatura de referência nos 16°C o compartimento com material de mudança de fase não tem vantagens relativamente ao que não tem isolamento, sendo que o consumo de energia é significativamente mais elevado do que o do compartimento de referência.

Nos resultados das experiências com a temperatura de referência nos 20°C, também o compartimento com material de mudança de fase mostra um maior consumo de energia quando comparado com o compartimento sem isolamento. Embora menos significativo apenas de 5%.

A temperatura de referência nos 24°C favorece as condições para o funcionamento da mudança de fase, estando a temperatura perto da temperatura de mudança de fase. Assim houve uma redução significativa do consumo de energia no compartimento com este material comparativamente ao compartimento apenas de tijolo alveolar.

Como verificado a temperatura de referência desempenha um papel fundamental nas condições de trabalho dos materiais de mudança de fase. Sendo este desempenho melhor quanto mais próxima é a temperatura ambiente da temperatura a que os materiais funcionam.

Na universidade do Minho foi feito um estudo que permitiu comparar a construção leve com recurso a grandes espessuras de isolamentos e a construção pesada feita com paredes de terra compactada, esta com capacidade de armazenamento térmico maior que o anterior. Este estudo foi complementado com recurso ao programa de simulação térmica – VisualDOE, simulando o comportamento térmico das 2 soluções. A célula de testes foi construída no Campus da Universidade do Minho em Guimarães. [30]

A célula de testes foi dividida em 3 independentes.

- Célula de teste convencional (CTC) – Paredes exteriores duplas com tijolo furado de 11 cm, caixa de ar de 4 cm, isolamento poliestireno extrudido de 4 cm e tijolo furado de 15 cm e ainda uma camada de reboco em ambas as faces, de 2 cm. As paredes interiores são de tijolo furado de 11 cm também com reboco de 2 cm. O pavimento é revestido com placas de lamparquet e a cobertura é em laje de betão aligeirada. Esta célula foi dividida em 3 pretendendo simular diferentes divisões.

- Célula de não convencional (CTnC) – Dividida em 2 compartimentos, um de massa térmica elevada com uma fachada envidraçada virada a sul e sombreadores de forma a evitar sobreaquecimento no verão, utilizando um material existente na região, a terra para construir a parede sul e oeste do compartimento e ainda uma estufa como estratégia de ganho indireto, e

um compartimento de baixa massa térmica com um grande envidraçado aproveitando a iluminação natural (2);

- Célula de teste tipo Passys (CTP) – Dividida em 2 compartimentos, um espaço de teste dos elementos construtivos feito com uma parede simples de placa de policarbonato alveolar a sul e um outro para alojar os equipamentos.

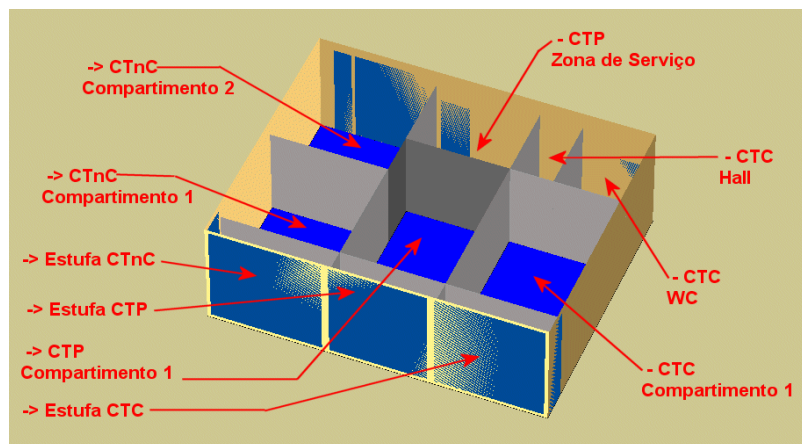


Fig. 2.10 - Definição da “envolvente” das Células de Teste (Fonte: [30])

Estas células de teste foram avaliadas tendo como base o RCCTE e assim foi calculada a inércia dos compartimentos, ambos (CTnC e CTC) com inércia forte.

Para calibração da aplicação VisualDOE, utilizou-se a comparação da temperatura interior dos compartimentos medida “*in situ*” e a medição do fluxo de calor, entre outros. Assim a simulação ficou o mais próximo possível do caso real.

Assim e em forma de conclusão foi demonstrado que a solução integrando materiais com menor impacto ambiental utilizados nas células de teste é energeticamente mais eficiente. Quanto as necessidades de aquecimento/arrefecimento os resultados são muito semelhantes [30].

Simone Ferrari *et al* [31], realizaram, em Itália, um estudo em que compararam quatro soluções de paredes diferentes, com o objetivo de avaliar as características térmicas de materiais simples e de estruturas multi camada. Este estudo foi realizado numa camara climática e as paredes foram monitorizadas com termopares.

As soluções de paredes escolhidas para analisar possuem diferente massa, mas com o valor de U da mesma ordem, inferior a $0,33 \text{ W(m}^2\text{K)}$.

As soluções escolhidas foram:

A - Parede de alvenaria pesada composta por uma parede simples de tijolos ocos de alta densidade;

B – Parede dupla composta por tijolos de exterior, por 17 cm de tijolos ocos e isolamento no interior;

C – Parede simples de tijolo oco e isolamento pelo exterior;

D – Parede composta por um isolamento painel sanduíche.

Os termopares foram colocados na face exterior, interior e entre camadas. Além disso a temperatura foi monitorizada dentro e fora da camara climática. De forma a minimizar as pontes térmicas, as amostras foram ainda isoladas pelo exterior com uma camada de polietileno.

Os testes foram realizados tendo como base ciclos diários de dois dias típicos de Roma, um dia de muito frio de inverno e um dia de verão de muito calor.

Analisados os resultados, a solução D (parede leve) mostrou uma capacidade de atenuação da temperatura extremamente baixa. Relativamente ao atraso térmico, na parede D este é ligeiro quando existe, enquanto nas outras soluções estudadas de paredes maciças este atraso é sempre de pelo menos 13 horas.

Quando comparadas as temperaturas na superfície interior com a temperatura do ar interior e a temperatura Sol-ar externa (Figura 2.11), é evidente que a parede leve (D) tende a repetir a tendência das solicitações externas, enquanto nas paredes de maior massa essa tendência é a de inverter o máximo e mínimo ao longo das 24 horas, como se pode verificar nos gráficos a seguir apresentados [31].

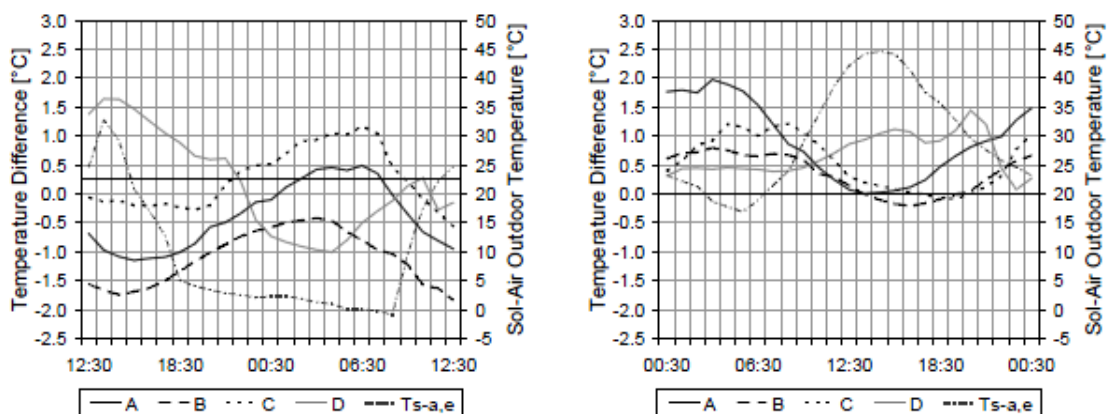


Fig. 2.11 – Diferença horaria entre a temperatura da superfície interna e o ar interior, em relação à temperatura exterior Sol-ar num dia de inverno e num dia de verão, respetivamente. (Fonte: [31])

2.4 Construção Sustentável e Conforto térmico

A construção sustentável provém de um conceito que envolve o ambiente, a cultura e a economia. Em 1980 a ONU a debateu-se com as várias questões ambientais. Foi então criada uma Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento para estudar o assunto, decorria o ano de 1983. O documento final é o Relatório Brundtland ou Nosso Futuro Comum, apresentado em 1987 o desenvolvimento sustentável como sendo “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas necessidades” [32]. Neste seguimento existe ainda o conceito de construção sustentável com o objetivo de dar uma resposta à crise instalada neste sector no que diz respeito a poupança de energia e dos recursos naturais, bem como a utilização de novos materiais que o permitem e assim diminuir o impacto causado pela construção civil ao meio ambiente.

A comissão que gerou o Relatório *Brundtland* teve como função principal a proteção do planeta e assim promover o desenvolvimento sustentável assente em varias medidas como a limitação do crescimento populacional, a garantia dos recursos básicos a longo prazo, a diminuição do consumo de energia e desenvolvimento para o uso de energias renováveis, controlo da urbanização e desta forma também atender as necessidades básicas da população [32].

Para que a construção seja feita de forma mais sustentável há vários fatores a ter em conta como seja uma visão do desempenho e potencial climático do local em causa. É preciso contabilizar os custos imediatos e os custos a longo prazo, ou seja, durante toda a vida útil da construção em si. Por fim, saber que para uma boa sustentabilidade é fundamental boas técnicas construtivas e a gestão das mesmas.

O aumento da população impõe grandes alterações, como maior utilização de recursos naturais, mais habitações, entre outros, que assim criam impactes ambientais que se deve ter em consideração. O sector da construção é fundamental para um aumento da qualidade de vida e para o desenvolvimento económico, devendo ser feito de forma sustentável e tendo em atenção o consumo dos recursos naturais.

A população tem vindo a crescer consideravelmente e assim prevê-se que em 2050 atinga cerca de 9,150 milhões de habitantes, como se pode ver no gráfico a seguir representado, Figura 2.12 [33].

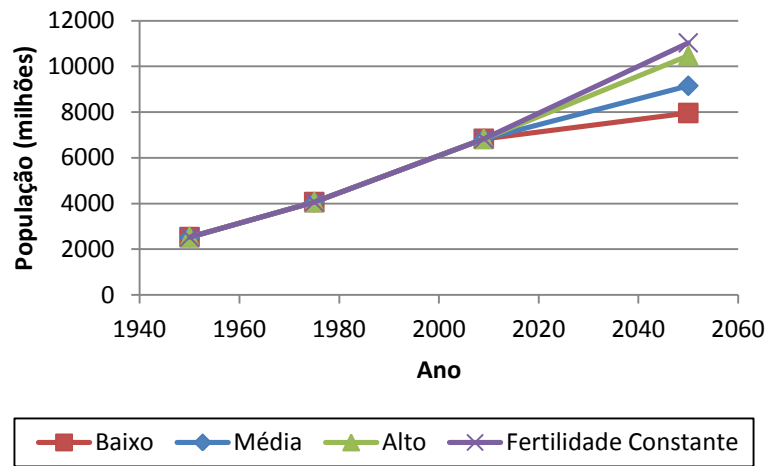


Fig. 2.12 – População mundial, 1950-2050, com as várias projeções futuras. (Fonte: [33])

O homem beneficia do clima para obter conforto no interior das suas habitações desde há muito tempo. Por exemplo em climas muito quente o homem construía em zonas arborizadas, ou com material de grande inércia térmica com poucas aberturas para o exterior para que estas se conservassem frescas.

O conforto térmico depende de vários fatores quantificáveis ou não, como a temperatura do ar, humidade, etc. estado mental, hábitos, entre outros. Assim, o conforto térmico não é exato, não existe uma temperatura exata de conforto. No entanto existem normas a seguir para que se obtenha um ambiente dentro dos edifícios termicamente confortável. Antigamente estas normas tinham como único objetivo definir as condições de conforto térmico, ficando assim esquecido os consumos energéticos necessários para o obter. Hoje em dia, e devido aos problemas ambientais, deve-se considerar sim o conforto térmico no edifício mas com o menor consumo energético possível. Existe ainda uma utilização excessiva e preocupante dos equipamentos para arrefecimento, estes contribuem bastante para o excesso de emissões de CO₂ e assim para o aquecimento global.

A climatização dos espaços deve ser reservada a climas extremos e não para melhorar um fraco *design* climático dos edifícios. Estes devem ser projetados e construídos utilizando dados realísticos de conforto térmico, bem como devem ter em atenção a orientação solar e os

materiais a utilizar [34].

Do ponto de vista da sustentabilidade as matérias-primas usadas para o fabrico do tijolo são argilas naturais. A porosidade do tijolo é criada por materiais orgânicos que sendo queimados durante a fase de cozedura do tijolo permite a redução do consumo de combustíveis fósseis. A ausência de materiais sintéticos, prejudiciais ao ambiente, utilizados como isolamento facilita a reciclabilidade dos materiais de construção.

O tijolo apresenta uma boa durabilidade, garante a homogeneidade e a simplicidade da construção [34].

2.5 Os mecanismos de transmissão de calor

Representando o Sol um papel crucial no conforto dos espaços, é necessário conhecer a sua relação com o ambiente, não só em termos de contributo energético, mas também a sua posição ao longo do dia e do ano [35]. A orientação de cada envolvente de um edifício e as soluções construtivas que as compõem são um dado fundamental na otimização de ganhos e/ou perdas de calor.

Através das envolventes do edifício podem ocorrer três processos físicos de transmissão de calor, condução, convecção e radiação.

A transmissão de calor por **condução** corresponde a um fenómeno de transferência de calor entre duas zonas, por contacto direto e com temperaturas diferentes sem que se verifiquem movimentos internos ou emissões de radiações. A Lei de Fourier (Equação 1) rege os fenómenos de transferência de calor por condução. Esta permite determinar, em regime transiente, o fluxo de calor unidimensional entre duas superfícies através da condutibilidade térmica, da área e do gradiente de temperatura [35].

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \quad (1)$$

Em que:

T – Temperatura do meio [°C]

x – comprimento ou espessura [m]

θ – Tempo [s]

α – Difusidade térmica [m²/s]

Sendo a difusividade térmica igual a:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (2)$$

Em que:

k – Condutividade térmica [W/mK]

ρ - Massa específica do material [kg/m³]

C_p - Calor específico [J/kg.K]

A transmissão de calor por **convecção**, pode ser traduzida como sendo a transferência de calor de uma forma específica, ou seja, as alterações de temperatura implicam o posicionamento das moléculas e uma alteração na sua massa volúmica, resultando assim no movimento de convecção, mecanismo típico dos fluidos, uma vez que incompatível com corpos sólidos.

Newton formulou, a Lei da convecção (Equação 3), que permite determinar o fluxo de calor, por convecção, entre uma superfície sólida e um fluido num determinado instante. No caso de um edifício, corresponde à interação entre uma das superfícies da envolvente e o ar [35].

$$Q_{conv} = h_c \cdot A_s \cdot (T_s - T_f) \quad (3)$$

Em que:

Q_{conv} – quantidade de calor transmitida [W]

h_c – condutância térmica superficial por convecção [W/m².°C]

A_s – área superficial do sólido [m²]

T_s – temperatura superficial do sólido [°C]

T_f – temperatura do fluido [°C]

A transmissão de calor por **radiação térmica** pode definir-se como a forma de emissão de radiação eletromagnética de diferentes comprimentos de onda e intensidades fundamentalmente na banda do infravermelho, em função da temperatura absoluta a que se encontra e do estado da sua superfície.

Este fenómeno de transmissão de calor distingue-se dos dois anteriores pelo facto de não necessitar de qualquer meio material para que a transferência de energia ocorra, uma vez que esta transmissão tem a capacidade de propagação no vácuo.

Stefan e Boltzman demonstraram (Equação 4) que a energia total emitida por um corpo radiante puro – que toma a designação de corpo negro e que se caracteriza, por um lado, por absorver toda a radiação nela incidente e, por outro, por radiar com intensidade igual em todas as direções (emissão difusa), corresponde ao máximo de energia que pode ser emitida e que é dada pela seguinte expressão [35]:

$$Q_{m\acute{a}x} = \sigma \cdot A_s \cdot T^4 (W) \quad (4)$$

Em que:

σ – Constante de Stefan-Boltzmann, que toma o valor de $5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

T – temperatura absoluta [K]

A – área superficial do corpo [m^2]

No estudo da transferência de calor entre um meio externo e outro interno, há que se considerar dois fatores importantes: a incidência de radiação solar na superfície externa da parede, que contribui para aumentar a sua temperatura superficial, tornando o fenómeno da transferência de calor por radiação bem mais intenso. Por outro lado, como a velocidade do ar no meio exterior, é normalmente maior que no meio interior, faz com que a convecção no exterior também ocorra com maior intensidade.

Sempre que num sistema existem gradientes térmicos há fenómenos de transferência de calor com o objetivo de atingir o equilíbrio térmico, ou seja, a temperatura de todos os corpos tornar-se a mesma. Na Figura 2.14 pode ver-se as diferentes formas de transmissão de calor.

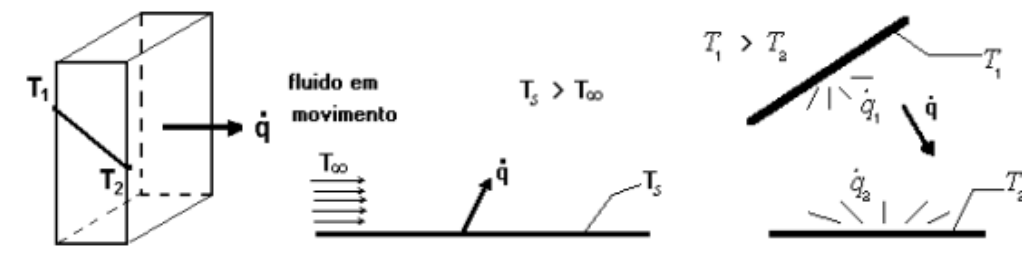


Fig. 2.13 – Formas de transmissão de calor, condução, convecção e radiação, respetivamente. (Fonte: [35])

Existindo diferenças de temperatura entre o exterior e o interior, o calor flui assim através dos elementos existentes, da maior para a menor temperatura, e o cálculo do coeficiente de transmissão térmica U , valido em regime estacionário, é determinado da seguinte forma, Equação 5:

$$U = \frac{q}{T_i - T_e} \quad [W/(m^2 \cdot ^\circ C)] \quad (5)$$

Em que:

q – Fluxo de calor [W/m^2]

T_i – Temperatura do ar interior [$^\circ C$]

T_e – Temperatura do ar exterior [$^\circ C$]

3. Metodologia

No estudo do comportamento dinâmico da parede envolvente da célula de teste serão utilizados um conjunto de instrumentação que permite o registo em contínuo dos dados necessários ao estudo. De entre as variadas vantagens em avaliar o comportamento térmico de edifícios em regime dinâmico ou transiente, destaca-se o facto de ser mais realístico utilizando as condições atmosféricas reais do local.

Para validação da instrumentação e aferir o seu bom funcionamento foram efetuados testes num envidraçado da envolvente externa de um edifício. A transferência de calor ocorre por condução, convecção e radiação de calor. Aqui vai ser estudado o fluxo de calor por condução e por convecção na superfície interior do vidro. Visto que a parede com o envidraçado está virada a norte não há grande influência da radiação solar.

3.1 Instrumentação

Para a determinação dos fluxos de calor nos elementos estudados, utilizou-se Termofluxímetros HFP01 da marca *Hukseflux*. De entre as vantagens que justificam a sua utilização existe o fator económico e a grande gama de temperaturas de trabalho. Este fluxímetro apresenta uma espessura de cerca de 5mm, o que não perturba a medição do fluxo de calor. Esse sensor é dos mais utilizados para medição de fluxo de calor nas paredes e diferentes envolventes da construção [36]. Ao utilizar um composto de cerâmica e plástico no corpo do mesmo, a resistência térmica mantém-se pequena. São leves e facilmente são colocados na parede com recurso a fita-cola.

Este sensor permitiu medir o fluxo de calor que flui através da superfície interior da parede. Sendo uma termopilha que trabalha passivamente, apenas gera uma pequena tensão à saída,

proporcional ao fluxo de calor no local. Usar este sensor é prático, basta um microvoltímetro na gama de milivolts e, assim para calcular o fluxo de calor basta dividir pela sensibilidade do sensor, considerando que não ocorrem fugas laterais, sendo o fluxo de calor que atravessa a placa, o mesmo que atravessou o elemento. Pode ser usado para medição da resistência térmica da envolvente e valores do coeficiente de transmissão térmica (U) de acordo com a ISO 8302 e ASTM C177. O voltímetro utilizado da marca LI-19 é um modelo de baixo custo com alto desempenho e com um *datalogger* integrado. A sensibilidade do sensor pode ser programada, para que o *datalogger* mostre leituras calibradas.

Para medição da temperatura e humidade relativa do ar utilizou-se sistemas LogTag. O LogTag é um registador de temperatura e humidade relativa, robusto, de pequena dimensão e auto-suficiente, desenvolvido especificamente para ser sensível à temperatura e a humidade do ar, que combina todas as características necessárias e ainda tem uma grande capacidade de memória, a um preço relativamente acessível. Os registos podem ser efetuados em intervalos configuráveis de 30 segundos até varias horas.

As leituras efetuadas podem ser facilmente transferidas ligando-se um cabo entre o *datalogger* e o computador [37, 38].



Fig. 3.1 - Sensor de fluxo de calor e *datalogger* Hukseflux, registador de temperatura e humidade LOGTAG, respetivamente. (Fonte: [37,38])

3.1.1 Metodologia para a medição do fluxo de calor num vão envidraçado

Para estudo da interpretação e verificação da sua calibração foi escolhido um envidraçado do laboratório de materiais de construção do edifício D da ESTG, virado a norte. Os ensaios foram feitos durante o mês de Janeiro e Fevereiro 2013, normalmente com a duração de 2 dias, em intervalos de amostragem de 5 minutos

O termofluxímetro foi colocado no vidro fixo com fita-cola, e as LogTag colocadas no parapeito da janela interior e exterior como se mostra na Figura 3.2.



Fig. 3.2 – Medição do fluxo de calor com termofluxímetro no envidraçado e da temperatura do ar no interior com placa LogTag (esq.), medição da temperatura do ar no exterior com placa LogTag (dir.)

3.1.2 Apresentação e Análise de resultados

Os resultados do fluxo de calor obtidos no ensaio do envidraçado atrás referido, são apresentados graficamente na Figura 3.3, mostrando assim as variações ao longo do período noturno sem radiação solar direta e difusa. De seguida faz-se uma análise do desempenho térmico do vidro, calculando o coeficiente de transmissão térmica, U , (Figura 3.4), dividindo em cada instante da amostragem o valor do fluxo de calor pela diferença de temperatura do ar no interior e exterior, conforme metodologia referida. Por fim, compara-se o resultado obtido com o de referência indicado no ITE 50 [39]. Assim verificar-se a validade da instrumentação.

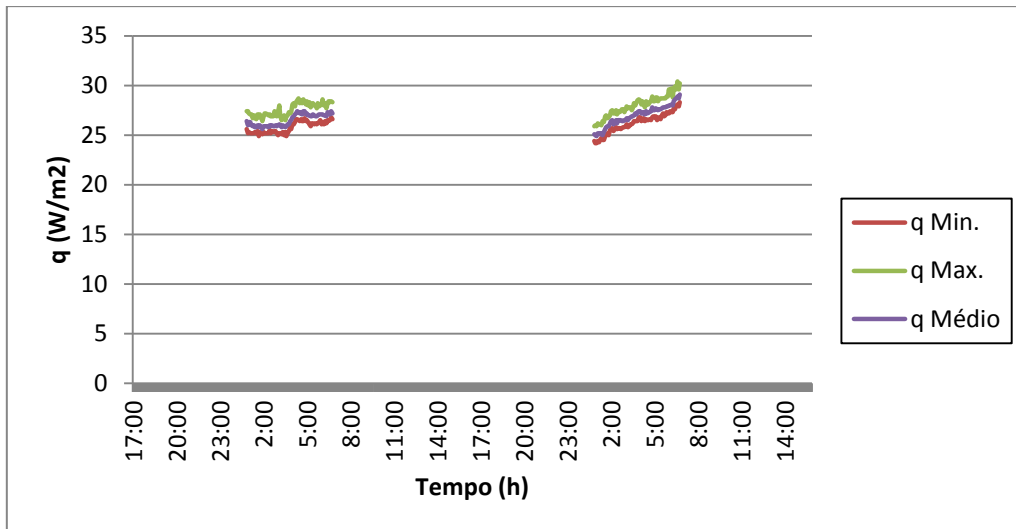


Fig. 3.3 – Variação do q ao longo do dia no envidraçado

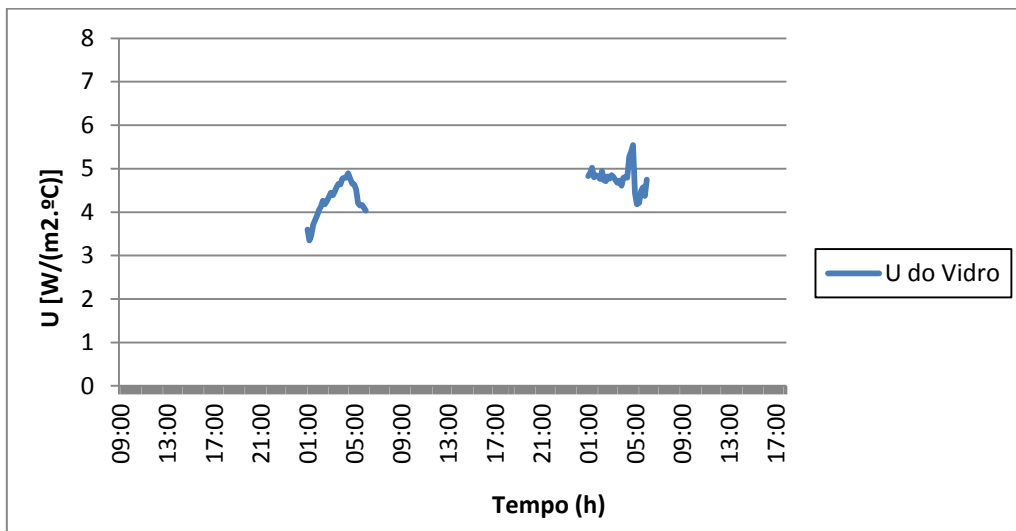


Fig. 3.4 – Variação do U ao longo do dia no envidraçado

Apenas no período noturno entre as 1:00 e as 6:00 as medições são consideradas validas, embora estas tenham sido contínuas, isto porque durante o dia o coeficiente de transmissão térmica varia bastante devido as trocas de calor existentes no vão envidraçado pela radiação solar difusa. Assim sendo, a média do o coeficiente de transmissão térmica U, durante a noite, é **4,5 W/(m²·°C)**. Considerando o ITE 50 como o valor de referência **4,3 W/(m²·°C)** e considerando este tipo de vidro como vidro duplo de janela giratória com espaçamento de lamina de ar de 6mm, obtém-se um desvio de 4,6%.

Quadro II – Coeficiente de Transmissão Térmica vãos envidraçados e caixilharia metálica. (Adaptado de [39])

Tipo de vão envidraçado	Número de vidros	Tipo de Janela	Esp. da lâmina de ar [mm]	U_w [W/m ² .°C]	
Simples (1 janela)	1 (vidro simples)	fixa		6,0	
		giratória		6,2	
		de correr		6,5	
	2 (vidro duplo)	fixa		6	3,9
				16	3,5
				16 <i>low ε</i>	3,1
		giratória		6	4,3
				16	3,8
				16 <i>low ε</i>	3,6
		de correr		6	4,5
				16	4,0
				16 <i>low ε</i>	3,7

Como se mostra anteriormente, existe uma aproximação significativa dos valores obtidos experimentalmente com os valores de referência do ITE 50 [39], apenas com um desvio na ordem de 5%, podendo, assim, a instrumentação ser utilizada no futuro, na célula de teste.

3.2 Construção da célula de teste

A célula de testes é um protótipo de uma pequena habitação construída na Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Leiria, *Campus 2* do Instituto Politécnico de Leiria, localizada por traz do edifício D, sobre a placa de betão onde está também instalado um *chiller*, Figura3.6. Tendo em conta o RCCTE, a cidade de Leiria tem como dados climáticos de referência os valores apresentados a seguir.

Quadro III – Dados climáticos de referência da cidade de Leiria [6]

Concelho	Zona Climática de Inverno	Número de graus-dia (GD) (°C.dias)	Duração da estação de aquecimento (meses)	Zona Climática de Verão	Temperatura externa do projeto (°C)	Amplitude térmica (°C)
Leiria	I ₂	1610	6	V ₁	31	12

A célula de testes é constituída por uma parede simples de alvenaria de tijolo térmico de 30x29x19 com área de pavimento de cerca de 4,60 m², e altura de 1,66 m. Foi construída pelos colaboradores da empresa PRELIS L^{da} que executaram as paredes e pela empresa Umbelino Monteiro S.A. que executou a cobertura em telha cerâmica com beiral ventilado e dois painéis Subtelha Naturtherm, com 2,5 m de comprimento e 30% de inclinação.

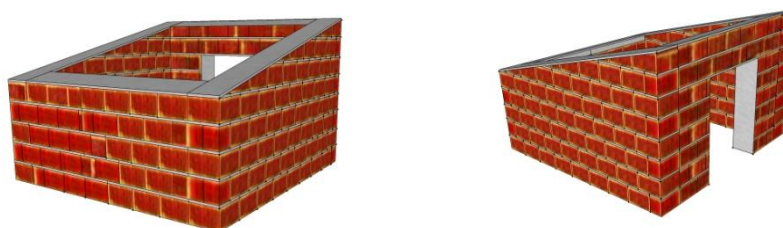


Fig. 3.5 – Desenhos do protótipo da célula de testes

O tijolo térmico fabricado na empresa Prelis L^{da} tem a designação de Bloco ThermoPrélis e tem como principais características técnicas as apresentadas no quadro seguinte.

Quadro IV – Características do Bloco ThermoPrélis [16]

Ref.	Transmissão térmica (Kcal/hm ²)	Resistência à compressão (N/mm ²)	Isolamento acústico ao ruído aéreo (dB)	Massa (Unidade)
30x19x29	0,70	Mínima > 7,0	49	15,5Kg

A escolha da orientação da célula de teste foi influenciada por diversos fatores. O Sol, durante o Inverno, percorre uma trajetória com menor altura solar, com uma incidência praticamente perpendicular à fachada, havendo assim maiores ganhos solares. No Verão, a proximidade do zénite no percurso solar diário, reduz significativamente a radiação na fachada Sul durante todo o dia. Assim pode concluir-se que a orientação Sul deve privilegiar os vãos envidraçados para captar a maior radiação de Inverno e deverá ser devidamente sombreada, para evitar a radiação de Verão.

Posto isto, e embora não haja vãos envidraçados na nossa célula de teste, mas de modo a tirar

todo o partido do sol, a parede com o provete de ensaio (tijolo teste), foi orientada a sul, sendo esta a que tem maior incidência solar, Figura 3.7.



Fig. 3.6 – Localização da Célula de teste. (Fonte: a) Google Earth)

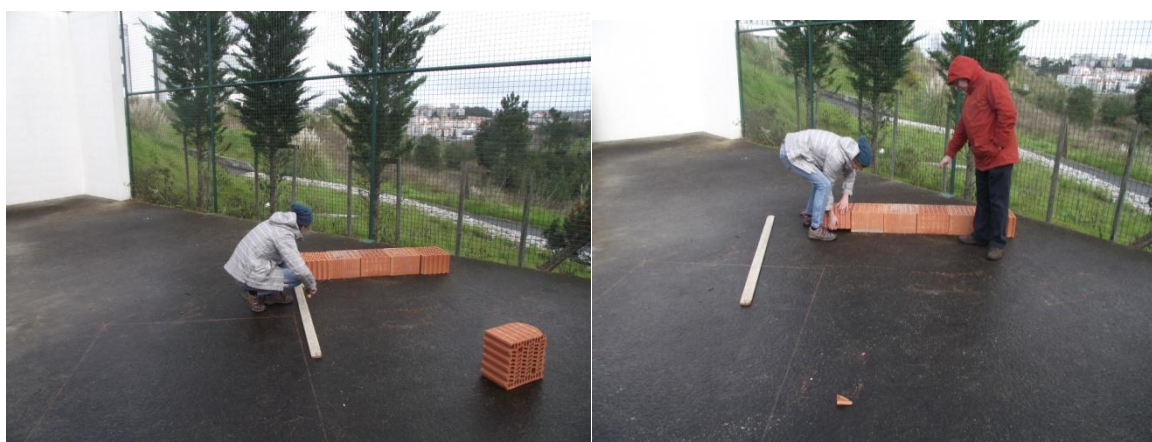


Fig. 3.7 – Definição da orientação da célula de teste

A aplicação dos tijolos térmicos deve ser feita seguindo a metodologia referida anteriormente. Começa-se por humedecer os tijolos antes da sua colocação e sendo tijolos de 29 cm de espessura, a junta horizontal foi interrompida colocando uma régua de 3x5 cm no centro da fiada, aumentando assim o isolamento térmico.

Depois de retirada a régua, encaixaram-se os tijolos verticalmente deixando a argamassa penetrar um pouco nos alvéolos dos tijolos. Por fim nivelaram-se e alinharam-se os tijolos. A espessura da junta horizontal ficou com 1,5 cm, sensivelmente, Figuras 3.8. O provete de ensaio foi introduzido no ponto central a meio da parede, para que houvesse simetria e o mínimo de interferências com as zonas periféricas da parede e as pontes térmicas existentes.



Fig. 3.8 – Construção da célula de teste com Tijolo Térmico

(a) Encaixe vertical dos tijolos; b) e c) Pormenor do canto; d) Colocação do tijolo-provete de teste; e) e f) Inclinação para a cobertura



Fig. 3.8.1 – Construção da célula de Teste com Tijolo Térmico: Aplicação do reboco

Finalizada a construção das paredes da célula de teste, seguiu-se a fase da colocação da cobertura em telha cerâmica com beiral ventilado com painel Subtelha Naturtherm, sendo a estrutura de suporte constituída por ripas metálicas perfuradas (Figura 3.9).



Fig. 3.9 – Colocação da cobertura

A célula de teste foi dividida com isolamento térmico poliestireno extrudado XPS de 4 cm de espessura de modo que minimizasse a influência da cobertura no ar ambiente interior da célula de teste. A porta foi colocada na fachada norte com área de $1,36 \text{ m}^2$. Também a porta foi forrada com o mesmo tipo de isolamento e desde modo a que não houve qualquer influência do exterior, Figura 3.10, esta considerou-se como se de uma zona de parede se tratasse.



Fig. 3.10 – Acabamentos da célula de teste

a) e b) Fixação do aro da porta; c) e d) Divisão da célula de teste com isolamento térmico xps de 4 cm;
e) Colocação da porta, já forrada com isolamento térmico xps de 4 cm.

3.2.1 Colocação da instrumentação

Validados os métodos de medida, como mostrado anteriormente, a célula de teste foi então monitorizada com o termofluxímetro e com as placas LogTag. Para tal foram abertos rasgos num tijolo (proвете de ensaio) com um berbequim (Figura 3.12), em ambas as faces, de modo a introduzir as placas LogTag no seu interior, junto às superfícies interior e exterior, sem prejudicar o bom funcionamento do tijolo.

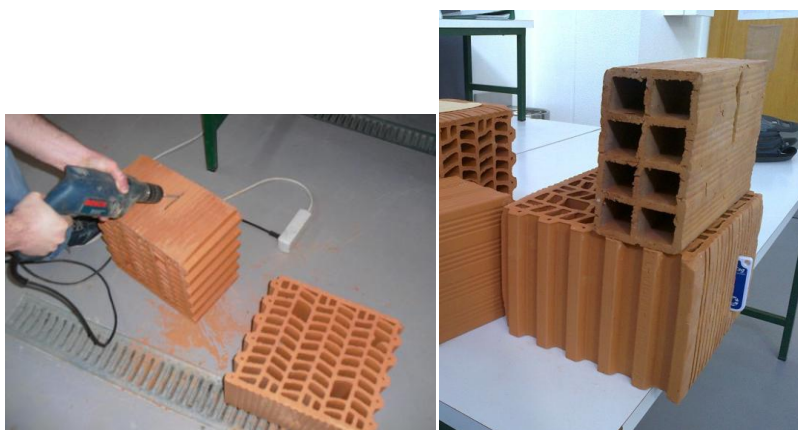


Fig. 3.11 – Abertura dos rasgões para colocação das placas LogTag.

Além das placas LogTag colocadas no interior do tijolo do lado exterior e interior, ambas com os sensores próximos da superfície, foi colocada uma placa LogTag pendurada no teto da sala, para monitorização da temperatura e humidade relativa do ar no interior da célula de teste. O termofluxímetro foi colocado na parede interior da célula na face do tijolo provete de ensaio, fixo com fita-cola tendo o cuidado de apenas segurar os cantos da placa e assim evitar alterações, (Fig. 3.12).

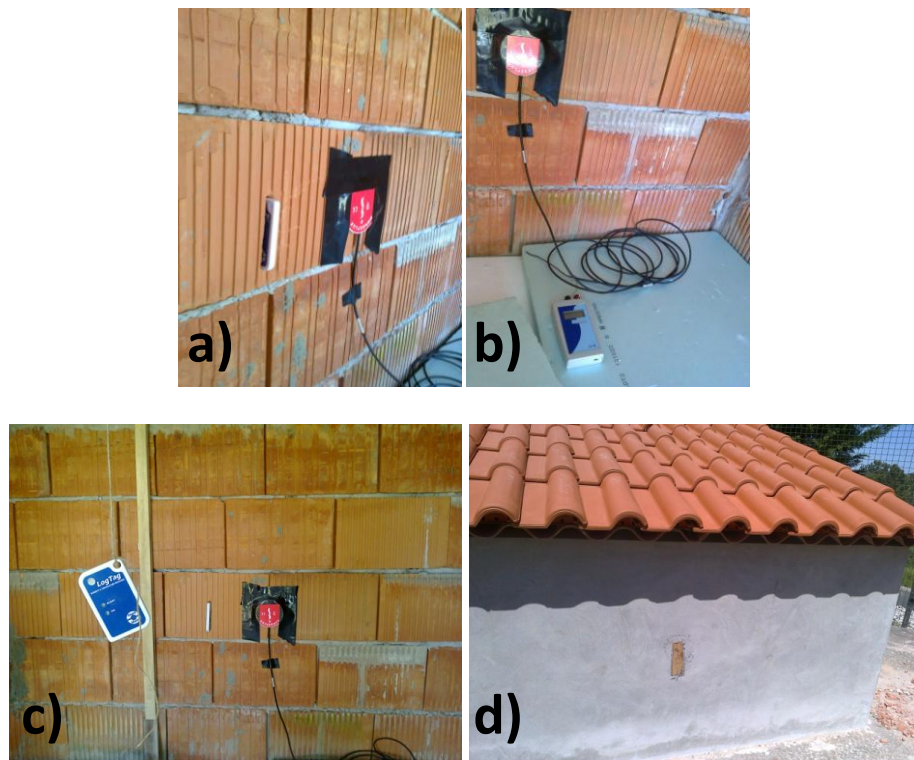


Fig. 3.12 – Colocação dos equipamentos para monitorização

a) Placa *Logtag* colocada na ranhura do lado interior do tijolo; b) Termofluxímetro da parede interior da célula de teste; c) Placa *Logtag* pendurada no centro da célula de teste; d) Placa *Logtag* colocada na ranhura do lado exterior do tijolo e protegida.

O voltímetro para medições do termofluxímetro utilizado é da marca LI-19 com um *datalogger* integrado, o mesmo utilizado anteriormente e a sensibilidade foi programada para que este mostre leituras calibradas, (Figura 3.12 b)). No chão foram colocadas placas de esferovite para diminuição das pontes térmicas pela placa de betão.

Foi também instalada uma estação meteorológica automática *Wireless Vantage Pro2™* da marca Davis (Figura 3.13), equipada com sensores e um painel solar que alimenta os sensores

durante o dia e carrega uma bateria interna que proporciona energia para toda a noite. Possui ainda uma consola *datalogger* que funciona a pilhas ou alimentada por corrente elétrica. A transmissão de dados é feita por *wireless* para distâncias até 300 m ao ar livre, e cerca de 60 a 120 m através de paredes. A consola permite visualizar todas as variáveis meteorológicas de forma simultânea. A estação possui sensores de temperatura, humidade, direção e velocidade do vento, precipitação, sensor de radiação solar, sensor de radiação ultravioleta (UV), sensor de pressão atmosférica entre outros, como se mostra na Figura 3.14 [40]. O registo deste tipo de estações meteorológicas automáticas depende muito do local onde é colocada e das interações dos seus sensores com o meio que os rodeia. A estação foi colocada no local estrategicamente de modo a não sofrer demasiadas influências dos edifícios que a rodeia e estando sujeita ao mesmo ambiente que a célula de teste.



Fig. 3.13 – Estação meteorológica automática *Wireless Vantage Pro2™*
a) Consola *datalogger Wireless*; b) Sensores meteorológicos

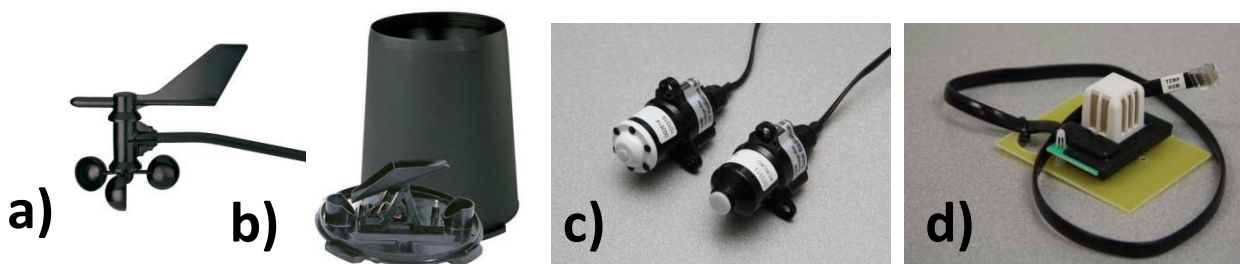


Fig. 3.14 – Sensores da Estação meteorológica automática *Wireless Vantage Pro2™*
a) Sensor de velocidade e direção do vento; b) Sensor de precipitação; c) Sensores de radiação solar e UV; d) Sensores de temperatura e humidade externos

A estação meteorológica prevê a ligação ao computador para descarregar dados através do programa WeatherLink. As medições foram também efetuadas com uma amostragem de 5 minutos [40].

Os sensores de temperatura externa estão juntamente com o sensor de humidade, envolvido por um filtro poroso que, por sua vez está no interior de um anteparo de plástico branco concebido para proteger o conjunto de sensores, em especial, da exposição direta à radiação solar, como se pode observar na Figura 3.15. Observa-se ainda que a estação meteorológica foi fixa à placa de betão com recurso a buchas e parafusos de modo a manter-se na posição correta e a não sofrer influência de ventos e/ou outras condições atmosféricas adversas. A consola ficou dentro da célula de teste.



Fig. 3.15 – Fixação da estação meteorológica

A partir da observação de alguns gráficos na consola *datalogger* da estação meteorológica e em comparação com outros equipamentos colocados na célula de teste, podemos constatar que esta fornece dados fiáveis. Os dados meteorológicos recolhidos apresentam continuidade, não havendo mudanças abruptas de valores, sendo estes os valores esperados para a altura do ano. As leituras foram efetuadas em contínuo entre Maio e Julho, assim com diferentes condições climatéricas para analisar, primavera e verão.

3.3 Transferência de calor pela envolvente

Num edifício os mecanismos de transmissão de calor acontecem por condução, convecção e radiação, como se mostra na Figura 3.16, e já anteriormente referido.

A condução é a forma típica de transmissão de calor nos corpos sólidos. A convecção é a transmissão de calor no interior de um fluido ou entre este e uma superfície sólida. A radiação térmica que se dá em todos os corpos, todos emitem e recebem, é a quantidade de energia emitida em função da temperatura absoluta e do estado da superfície, conforme referido anteriormente.

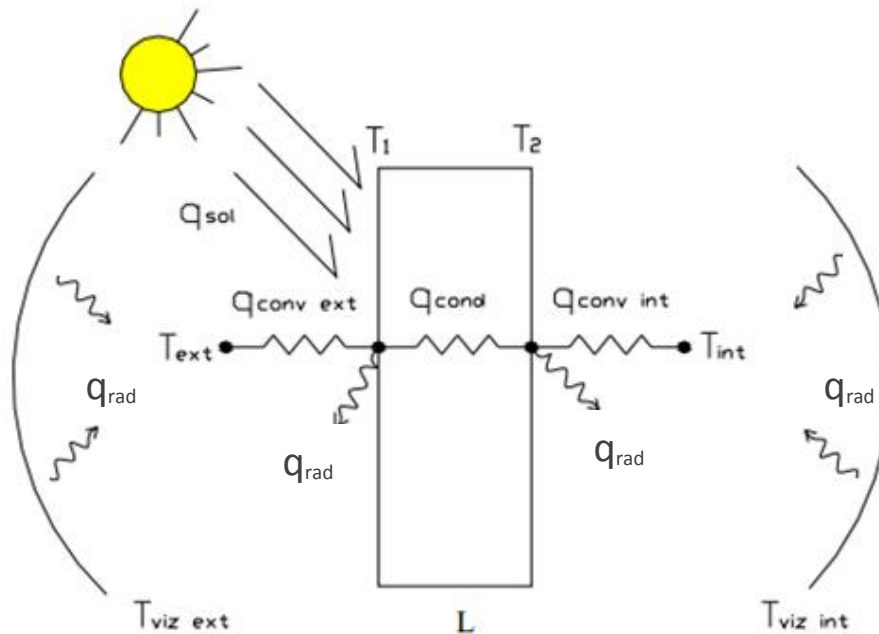


Fig. 3.16 – Troca de calor em parede opaca.

A célula de teste tem uma geometria simples, uma configuração geométrica paralelepípedica, considerando um único compartimento, em que a envolvente é constituída por quatro paredes, cobertura e pavimento. Não havendo qualquer ganho interno, a temperatura interior é o resultado do balanço energético nas paredes por condução dos elementos opacos. A capacidade térmica efetiva é uma variável relacionada com a quantidade de massa presente e capacidade térmica do material e assim com a inércia do espaço.

Sempre que há uma diferença de temperatura dá-se uma transferência de calor, no sentido da maior temperatura para a menor. Esta troca de calor, Q , num elemento da envolvente da

espessura elementar δ , pode ser calculada da seguinte forma, anteriormente indicada, Lei de Fourier [41]:

$$\dot{Q} = -(k \cdot A) \cdot \frac{dT}{d\delta} \quad [w] \quad (6)$$

Em que:

A – Área do elemento [m^2];

$dT/d\delta$ – gradiente de temperatura [$^{\circ}C/m$];

k - Condutividade térmica [$W/m.K$]

O Fluxo de calor que entra para o tijolo na superfície exterior, pode ser apresentado pela seguinte expressão:

$$q_{in} = \alpha G - \varepsilon \sigma T_e^4 + h_a(T_e - T_{we}) \quad [w/m^2] \quad (7)$$

Em que:

α - Coeficiente de absorção da superfície exterior;

G – Radiação solar [W/m^2];

ε - Emissividade;

σ – Constante de Stefan-Boltzmann $5,710^{-8} W/(m^2.K^4)$;

h_a - Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2K];

T_{we} - Temperatura na superfície exterior [$^{\circ}C$];

T_e - Temperatura do ar exterior [$^{\circ}C$]

A emissividade é uma medida de capacidade de emissão de energia de uma superfície em relação a um corpo negro, com valores entre $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

A emissividade e a absorção são propriedades da superfície e ambas se consideraram com um valor 0,8 (fachada de cor escura, rebocada). Pela Lei de Kirchhoff a capacidade de uma superfície absorver determinada energia é igual a sua capacidade de emitir a mesma energia. O coeficiente de transferência de calor por convecção no exterior foi admitido igual a 25 W/m^2K [6].

O Fluxo de calor que através da superfície interior do tijolo para a célula de teste é definido pela seguinte expressão:

$$q_{out} = h_w(T_{wi} - T_i) + \varepsilon_2 \sigma T_{wi}^4 - \varepsilon_2 \sigma T_i \quad [w/m^2] \quad (8)$$

Em que:

h_w – Coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2K];

T_{wi} – Temperatura na superfície interior [$^{\circ}C$];

T_i – Temperatura do ar interior, aproximadamente semelhante à temperatura das superfícies interiores das restantes paredes [$^{\circ}C$];

ε_2 – Emissividade da superfície interior do tijolo (0,85);

σ - Constante de Stefan-Boltzmann $5,710^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$

A emissividade considerou-se ser de 0,85, (tijolo à vista, sem reboco) e o coeficiente de transferência de calor por convecção interior igual a $1/0,13 W/m^2K$ [6].

O calor acumulado no interior da parede em cada instante q_{ac} resulta da diferença entre a quantidade de fluxo de calor que entra e a quantidade de fluxo de calor que sai para o interior da célula de teste.

$$q_{ac} = q_{in} - q_{out} \quad (9)$$

O coeficiente de transmissão térmica U é a quantidade de calor que atravessa perpendicularmente por unidade de tempo e superfície quando sujeito a uma diferença de temperatura entre os ambientes que os separa, em regime estacionário.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum_j R_j + R_{ar} + R_{se}} \quad (10)$$

Em que:

U – Coeficiente de transmissão térmica [$W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$];

R_{si}, R_{se} - Resistência térmica superficial interior e exterior, respetivamente [$m^2 \cdot ^{\circ}C/W$];

R_j - Resistência térmica da camada j [$m^2 \cdot ^{\circ}C/W$];

R_{ar} - Resistência térmica de espaços de ar [$m^2 \cdot ^{\circ}C/W$]

A inércia térmica é um parâmetro muito importante para o balanço térmico do edifício. Este fenómeno amortece as variações térmicas exteriores e interiores do mesmo. Tendo em conta as variações térmicas exteriores como a temperatura e a radiação solar, a inércia térmica é dada em função da massa térmica do edifício, ou seja, do calor armazenado. Segundo o RCCTE sugere o seguinte procedimento para cálculo da inércia térmica [6]:

$$I = \frac{\sum_i M_{si} \cdot S_i}{A_p} \quad (11)$$

Em que:

M_{si} – Massa superficial útil do elemento i [kg/m^2]

S_i – Área superficial interior do elemento i [m^2]

A_p – Área útil de pavimento [m^2]

Então, um corpo de maior massa acumula e liberta a mesma quantidade de energia com menor variação.

A temperatura Sol-ar é caracterizada por ser a temperatura fictícia do ar junto à superfície exterior, sendo esta temperatura sol-ar maior que a temperatura real visto considerar o efeito do ganho de energia devido à radiação solar incidente, às condições de absorção da radiação solar (α) e às condições de convecção externas (h_{so}), sendo calculada da seguinte forma:

$$t_{\text{sol-ar}} = t_e + \frac{\alpha (I_\delta + I_s)}{h_{so}} \quad (12)$$

Em que:

t_e – Temperatura do ar exterior [$^{\circ}\text{C}$];

α - Coeficiente de absorção da superfície exterior;

I_δ - Radiação solar difusa [W/m^2];

I_s - Radiação solar direta [W/m^2];

h_{so} – Coeficiente de transferência de calor por convecção da superfície exterior [$\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$].

É desejável que o ar interior de uma habitação seja fresco e agradável, sem impacto negativo na saúde e que estimule as atividades. Assim a humidade relativa deve ser controlada de forma a que não influencie, direta ou indiretamente os ocupantes.

Baixos valores de humidade relativa provocam sensações de secura, irritação na pele, infeções das vias respiratórias e desconforto. Um valor alto de humidade relativa origina também desconforto e o aparecimento de bolores e ácaros causadores de alergias e irritações. Os valores de humidade relativa devem estar entre 30 e 70% [42].

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE) [6], estabelece uma humidade relativa interior de referência de 50% para a estação de arrefecimento. A ocorrência de condensações superficiais depende ainda da temperatura interior e exterior das superfícies bem como do coeficiente de transmissão térmica U [$W/m^2 \cdot ^\circ C$].

4. Discussão de Resultados

Neste capítulo apresenta-se e discute-se os resultados obtidos e avalia-se a potencialidade da solução construtiva na melhoria do comportamento térmico de um edifício para as diferentes flutuações térmicas diárias.

4.1 Apresentação e Análise de resultados

Foi analisado o comportamento dinâmico da parede quando sujeita a ciclos diários de ganhos solares, revelado pelo perfil de temperatura nas superfícies e no interior das furações dos tijolos ao longo do tempo. Desta forma, foi caracterizado o regime transiente de transmissão de calor nas paredes, podendo-se concluir a sua capacidade de acumulação e libertação de calor ao longo do tempo de forma a alcançar desempenhos mais favoráveis no interior do edifício, a redução do consumo energético e melhoria do conforto térmico de forma passiva, sem o recurso a sistemas energéticos.

A célula de teste foi monitorizada de forma continua durante um período de cerca de 3 meses: Maio, Junho e Julho de 2013, durante o qual se recolheram os dados na parede vertical orientada a sul. Os resultados obtidos podem ser observados nos gráficos a seguir apresentados, sendo graficamente a forma mais eficaz de verificar o desempenho térmico da parede.

De 11 a 14 de Maio:

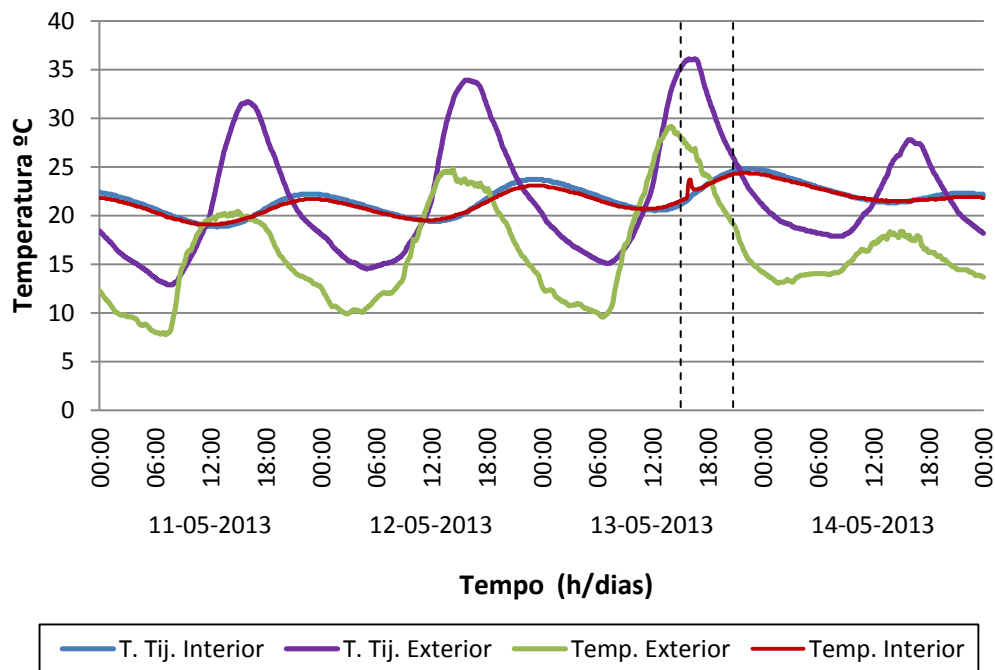


Fig. 4.1 – Desempenho térmico da parede da célula de teste, de 11 a 14 de Maio

Como se pode verificar graficamente o pico de temperatura no ar exterior atinge valores entre 20°C e 30°C e a temperatura na superfície exterior do tijolo (T. Tij. Exterior) atinge valores entre 30°C e 35°C. Este incremento deve-se à radiação solar direta na parede a sul, que faz aumentar em alguns graus a temperatura da parede, e que fundamenta a temperatura sol-ar. É de notar que o sensor que mede o valor da temperatura na superfície da parede (T. Tij. Exterior) se encontra dentro do tijolo embora junto à superfície e protegido com silicone, o que poderá provocar um ligeiro efeito de sobreaquecimento e assim aumentar a temperatura deste.

Na primavera nota-se temperaturas amenas durante o dia, mas ainda com forte arrefecimento durante a noite, por exemplo no dia 13 de Maio existe uma elevada amplitude térmica de quase 20°C, e interior da célula de teste esta amplitude não se verificou. O atraso térmico do tijolo apresenta um desfaseamento médio de cerca de 8:30 horas entre o pico da temperatura exterior, sol-ar e o pico de temperatura no interior do tijolo.

No quadro seguinte apresentam-se as temperaturas máximas registadas no exterior e interior da célula de teste bem como o atraso térmico da resposta da parede registado.

Quadro V – Resultados do ensaio de 11 a 14 de Maio

Data	Temp. Exterior		Temp. Interior		Atraso (h)
	T. Máx. (°C)	Registo (h)	T. Máx. (°C)	Registo (h)	
11-05-2013	20,44	15:00	21,80	00:00	9:00
12-05-2013	24,78	14:20	23,10	22:30	8:10
13-05-2013	29,17	14:05	24,40	21:45	7:40
14-05-2013	18,39	15:00	24,20	00:00	9:00

De 16 a 19 de Maio:

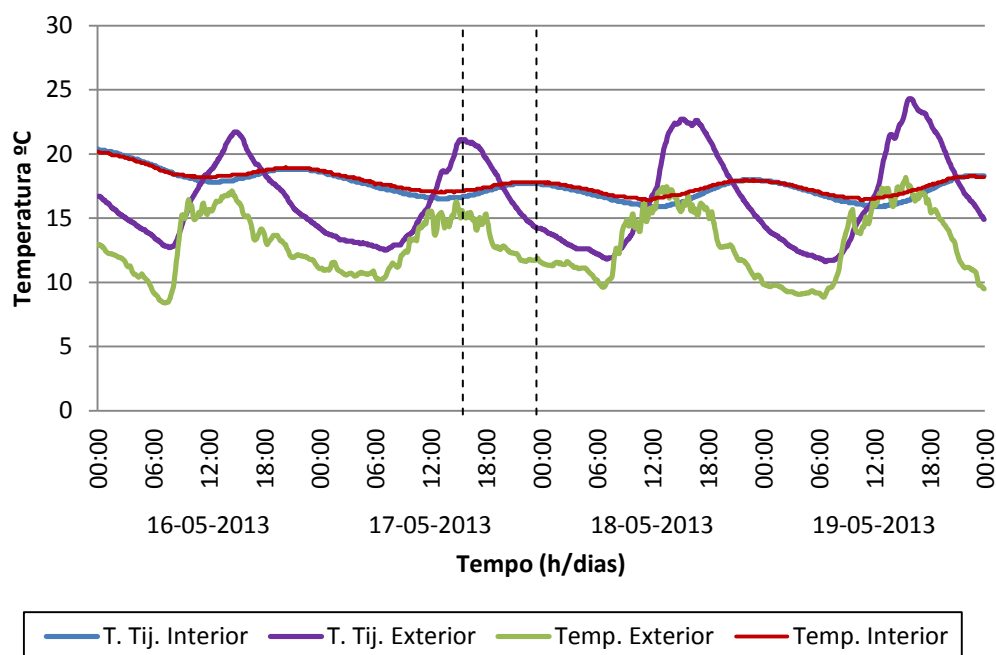


Fig. 4.2 – Desempenho térmico da parede da célula de teste, de 16 a 19 de Maio

Neste período de monitorização (16 a 19 de Maio) verificou-se alguma nebulosidade e temperaturas do ar exterior mais baixas registadas pela estação meteorológica. A temperatura no interior da célula de testes mantém-se praticamente constante ao longo dos dias. Os ganhos térmicos obtidos pelo tijolo durante o dia e a inércia térmica da parede contribuem para que a temperatura se mantenha constante no interior, mesmo com grandes oscilações térmicas exteriores. Embora as temperaturas sejam inferiores às registadas no período de

monitorização anterior, o atraso térmico apresenta-se em média sensivelmente o mesmo, na ordem das 8 horas, como se pode verificar no quadro seguinte, Quadro VI.

Quadro VI – Resultados do ensaio de 16 a 19 de Maio

Data	Temp. Exterior		Temp. Interior		Atraso (h)
	T. Máx. (°C)	Registo (h)	T. Máx. (°C)	Registo (h)	
16-05-2013	17,11	14:30	20,20	00:00	9:30
17-05-2013	16,28	14:45	18,70	00:00	9:15
18-05-2013	17,44	13:30	18,00	21:55	8:25
19-05-2013	18,17	15:25	18,30	22:15	6:45

Como já referido anteriormente, a temperatura Sol-ar, define-se como sendo uma temperatura “equivalente” do ar exterior, que contabilizando o efeito da radiação solar, se traduz num ganho de calor na parede correspondente à diferença entre a temperatura sol-ar e a temperatura da face exterior da parede. Experimentalmente, como se pode ver no gráfico apresentado (Figura 4.3) esse valor de Temperatura Sol-ar é superior ao valor da temperatura registado na parte exterior do tijolo.

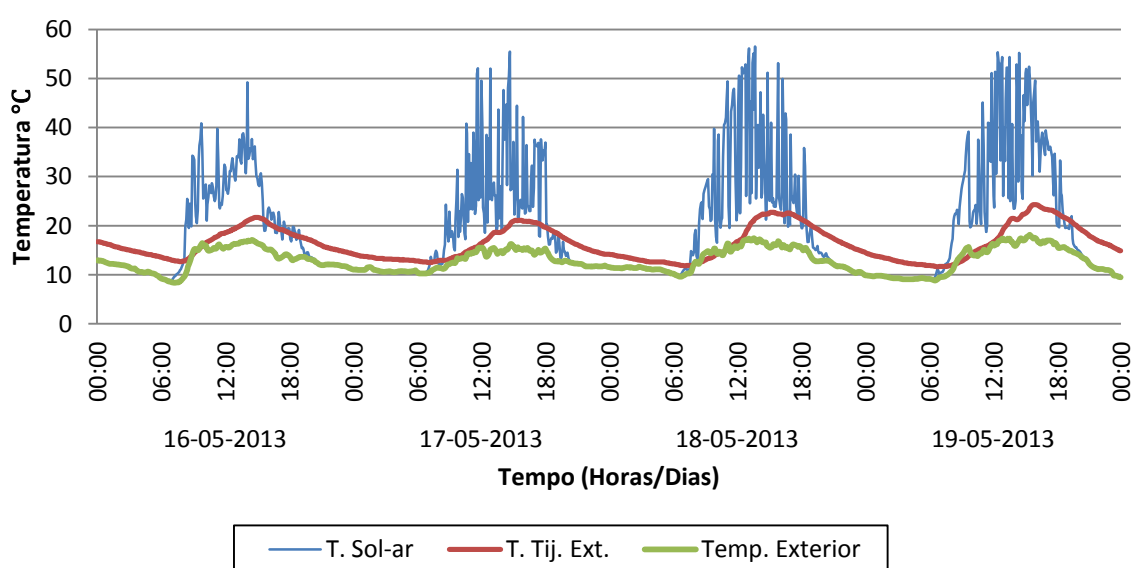


Fig. 4.3 – Comparação da Temperatura Sol-ar com as temperaturas registadas

Durante a noite o valor registado é maior (T. Tij. Ext.) porque o sensor que regista esta temperatura se encontra protegido, estando ainda um pouco dentro do tijolo, e não exatamente à superfície, pelo que faz um pouco de efeito de estufa do calor acumulado durante o dia.

Durante o dia o valor da temperatura Sol-ar revelam-se maiores do que os registados devido à radiação solar. Mesmo em dias de nebulosidade, como foi o caso dos dias analisados, existe radiação solar e esta influência e aumenta em muito este valor. A radiação solar ou calor atravessa o ar sem lhe afetar a temperatura, mas é absorvida na superfície da parede.

Observando o gráfico a seguir apresentado, Figura 4.4, verifica-se que a temperatura no exterior do tijolo (T. Tij. Exterior) se aproxima bastante da temperatura ambiente do exterior em dias de fraca radiação solar, como é o caso dos dias 17 e 18 de Junho. A maior parte do calor absorvido pelo tijolo deve-se à radiação solar e na ausência desta as temperaturas tendem a igualar-se.

De 15 a 18 de Junho:

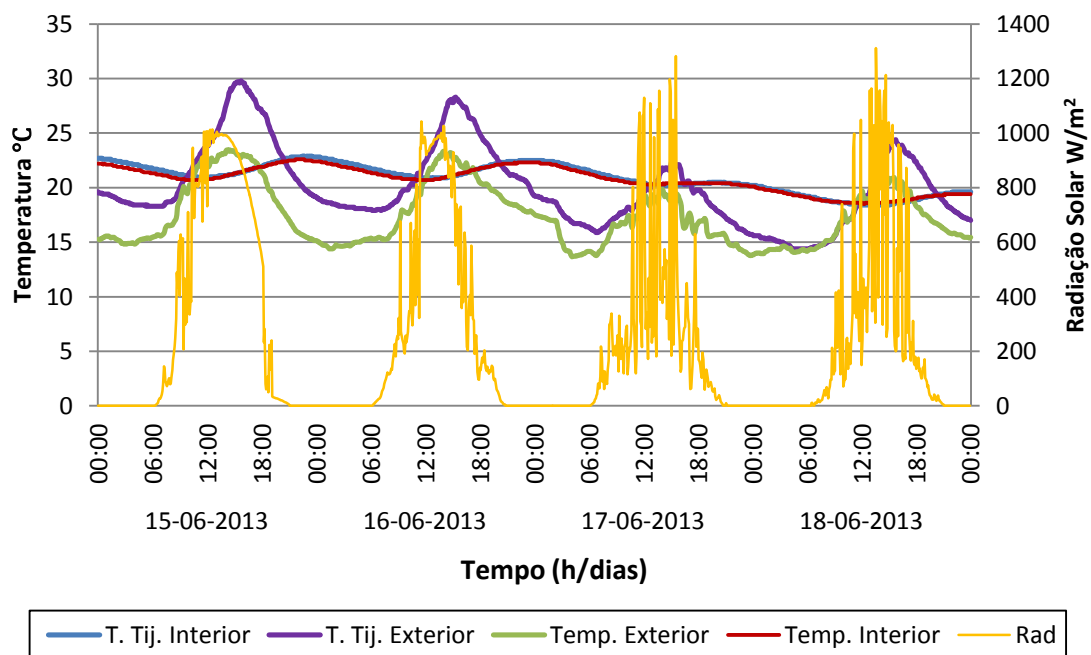


Fig. 4.4 – Desempenho térmico da parede da célula de teste, de 15 a 18 de Junho

No quadro VII nota-se a fraca intensidade solar dos dias 17 e 18 de Junho e a sua influência na temperatura registada no exterior.

Quadro VII – Resultados do ensaio de 15 a 18 de Junho

Data	Temp. Exterior		Temp. Interior		Radiação Solar (W/m ²)	Atraso (h)
	T. Máx. (°C)	Registo (h)	T. Máx. (°C)	Registo (h)		
15-06-2013	23,44	15:10	22,60	21:45	351,75	6:35
16-06-2013	23,33	14:00	22,40	00:00	256,60	10:00
17-06-2013	19,89	13:50	22,30	00:00	181,93	10:10
18-06-2013	21,06	14:35	20,10	00:00	203,82	9:25

De 19 a 22 de Junho:

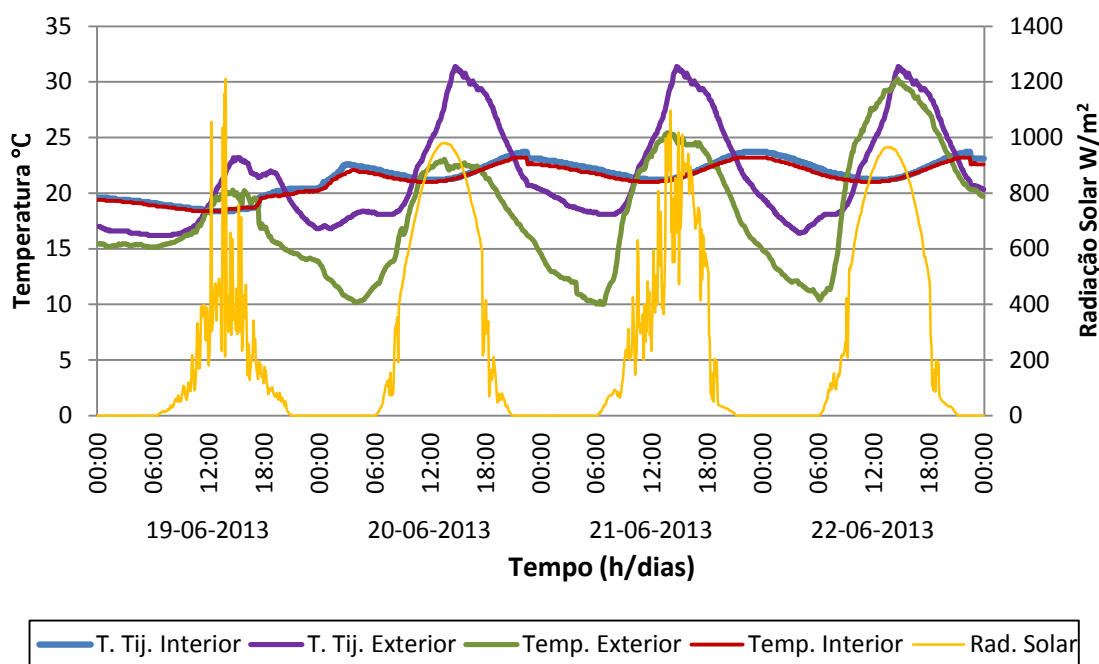


Fig. 4.5 – Desempenho térmico da parede da célula de teste, de 19 a 22 de Junho

O resumo dos resultados obtidos no período de 19 a 22 de Junho é apresentado no quadro seguinte. Apresentam-se as temperaturas máximas registadas no exterior e interior da célula de teste, atraso térmico registado e a intensidade média da radiação solar registada em cada dia.

Quadro VIII – Resultados do ensaio de 19 a 22 de Junho

Data	Temp. Exterior		Temp. Interior		Radiação Solar (W/m ²)	Atraso (h)
	T. Máx. (°C)	Registo (h)	T. Máx. (°C)	Registo (h)		
19-06-2013	20,28	14:40	20,20	22:30	129,46	7:50
20-06-2013	23,06	13:35	23,20	21:30	331,53	7:55
21-06-2013	25,44	13:45	23,20	21:20	232,13	7:45
22-06-2013	30,28	14:40	23,20	21:20	321,11	6:40

Como se verificou, os resultados obtidos nestes dois períodos de monitorização, de 15 a 18 e de 19 a 22 de Junho, são muito similares. Apresenta-se uma continuação dos valores de temperatura já registados anteriormente em período de primavera, altas amplitudes térmicas.

Em dias de nebulosidade, como é o caso dos dias 17, 18, 19 e 21 de junho, Figura 4.4 e 4.5 em que a radiação solar ao longo do dia teve muitos altos e baixos, esta influência em muito a temperatura, como se pode verificar graficamente, quando a radiação solar é muito inconstante nota-se uma baixa na temperatura exterior.

Comparando os dias de menor e maior amplitude térmica (19 e 22 de Junho), no dia 19 de Junho a temperatura máxima registada pela estação meteorologia no exterior foi de 20,28°C e no dia 22 foi de 30,28°C, sendo as temperaturas mínimas de ambos durante a noite na ordem dos 10°C. De notar que mesmo com estas variações, a temperatura no interior da célula de teste não registou grandes oscilações, mantendo-se entre os 18 e os 23°C, maioritariamente na ordem dos 22°C.

Mesmo a fraca intensidade da radiação solar incidente não relevou um atraso térmico diferente do obtido em condições de forte radiação solar. Embora a radiação solar fosse menor, a temperatura exterior continuava a ser maior que a temperatura interior, daí se continuar a verificar sensivelmente o mesmo atraso.

De 02 a 05 de Julho:

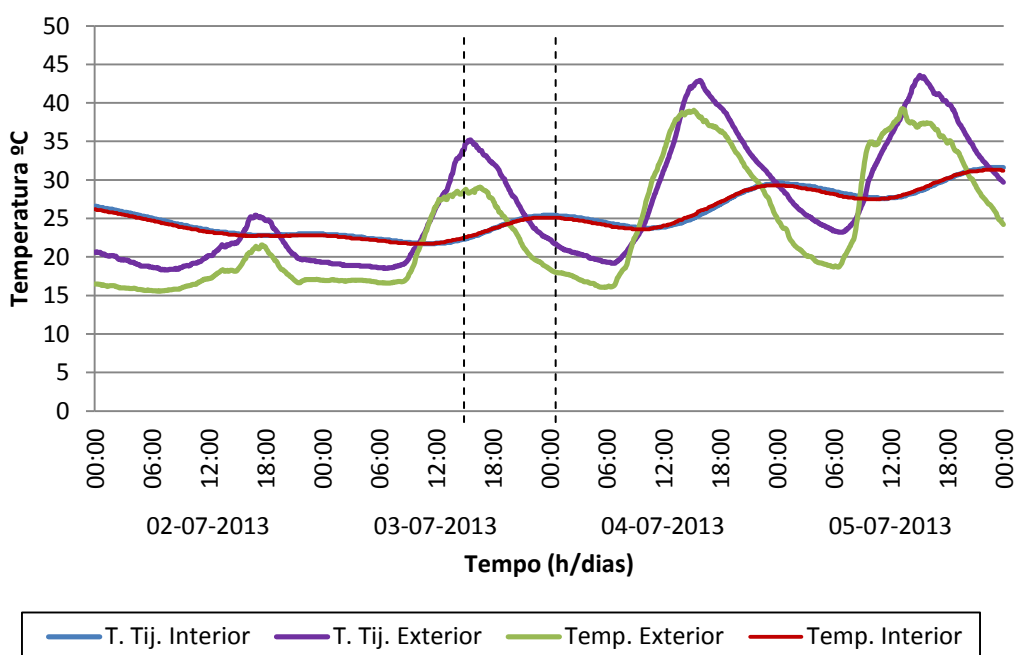


Fig. 4.6 – Desempenho térmico da parede da célula de teste, de 02 a 05 de Julho

Pela análise gráfica nota-se um aumento do atraso térmico, que se deve ao aumento da temperatura exterior registada, como se confirma com os valores apresentados no quadro IX, e assim proporcionando um maior atraso térmico. No dia 02 de Julho a temperatura máxima exterior foi apenas de 21,56°C com um atraso térmico de cerca de 6h e 30 minutos, enquanto no dia 05 de Julho com temperatura máxima exterior de 39,28°C o atraso térmico registado foi na ordem das 9 horas.

Quadro IX – Resultados do ensaio de 02 a 05 de Julho

Data	Temp. Exterior		Temp. Interior		Atraso (h)
	T. Máx. (°C)	Registo (h)	T. Máx. (°C)	Registo (h)	
02-07-2013	21,56	17:35	26,20	00:00	6:25
03-07-2013	29,06	16:40	25,17	00:00	7:20
04-07-2013	39,06	15:15	29,30	22:50	7:35
05-07-2013	39,28	13:15	31,11	22:30	9:15

De 06 a 09 de Julho:

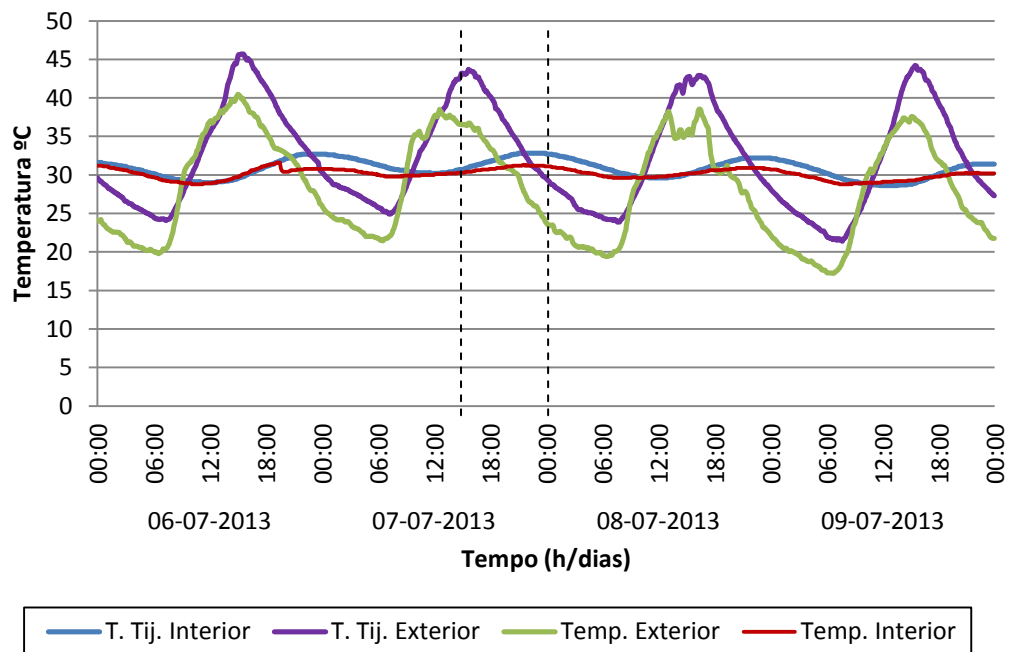


Fig. 4.7 – Desempenho térmico da parede da célula de teste, de 06 a 09 de Julho

No que se refere ao comportamento da parede entre 6 e 9 de Julho, este é muito semelhante aos analisados anteriormente, como se pode verificar no quadro a seguir apresentado.

Quadro X – Resultados do ensaio de 06 a 09 de Julho

Data	Temp. Exterior		Temp. Interior		Atraso (h)
	T. Máx. (°C)	Registo (h)	T. Máx. (°C)	Registo (h)	
06-07-2013	40,44	15:00	31,60	19:10	4:10
07-07-2013	38,50	12:35	31,30	21:30	9:05
08-07-2013	38,56	16:25	31,10	00:00	7:25
09-07-2013	37,61	15:05	30,70	00:00	8:55

Como referido anteriormente e demonstrado pelos registos efetuados, o atraso térmico é maior quanto maior for a temperatura máxima no exterior. Isto é válido em situações em que o tempo está a aquecer gradualmente. No entanto no período de 06 a 09 de Julho esta

tendência não se verificou completamente, as temperaturas registadas nestes dias foram muito similares, não se conseguindo obter a tendência anterior. Este atraso térmico não está só relacionado com a radiação solar e a capacidade do tijolo absorver e transmitir calor para o interior, mas também com a capacidade do interior arrefecer no período noturno. Neste período as temperaturas registadas foram muito elevadas, mesmo durante a noite as temperaturas exteriores não baixaram dos 20°C. Assim sendo, e o tijolo funcionando como barreira, devido a capacidade de reter o calor acumulado no material, o interior da célula de teste não conseguiu “arrefecer” o suficiente, embora ainda assim o amortecimento térmico seja na ordem 9°C.

Nos gráficos a seguir apresentados (Figura 4.8 e 4.9), mostra-se que a humidade relativa dentro da célula de teste se manteve na ordem 60 e 50 % respetivamente. Este valores vão ao encontro dos estipulados para que o ambiente seja confortável. Embora no exterior do tijolo a humidade oscile bastante, no interior da célula de teste conseguiu-se obter resultados muito favoráveis.

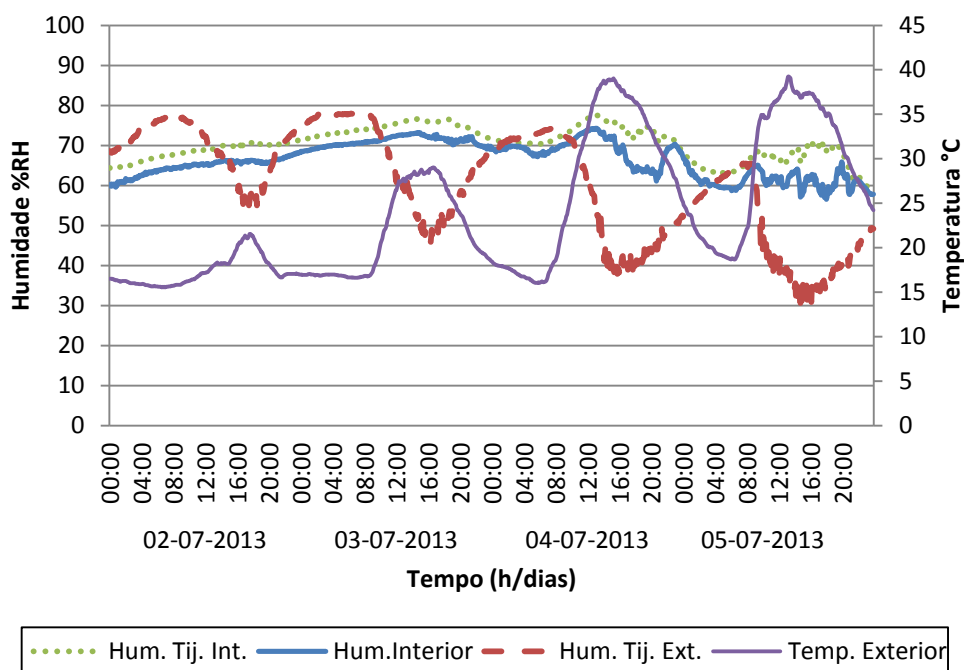


Fig. 4.8 – Humidade relativa no período de 02 a 05 de Julho e temperatura exterior

Analisando o gráfico anterior (Figura 4.8), à medida que a temperatura no exterior aumenta a humidade relativa na parte exterior do tijolo diminui (período diurno) e quando a temperatura no exterior diminui a humidade relativa deste aumenta (período noturno), acontecendo assim em ciclos diários. Este facto também se deve à extrema humidade noturna que se faz sentir na cidade de Leiria em contradição com a imensa radiação solar durante o dia. Ainda assim, a humidade relativa no interior da célula de teste manteve-se praticamente constante, na ordem dos 60%.

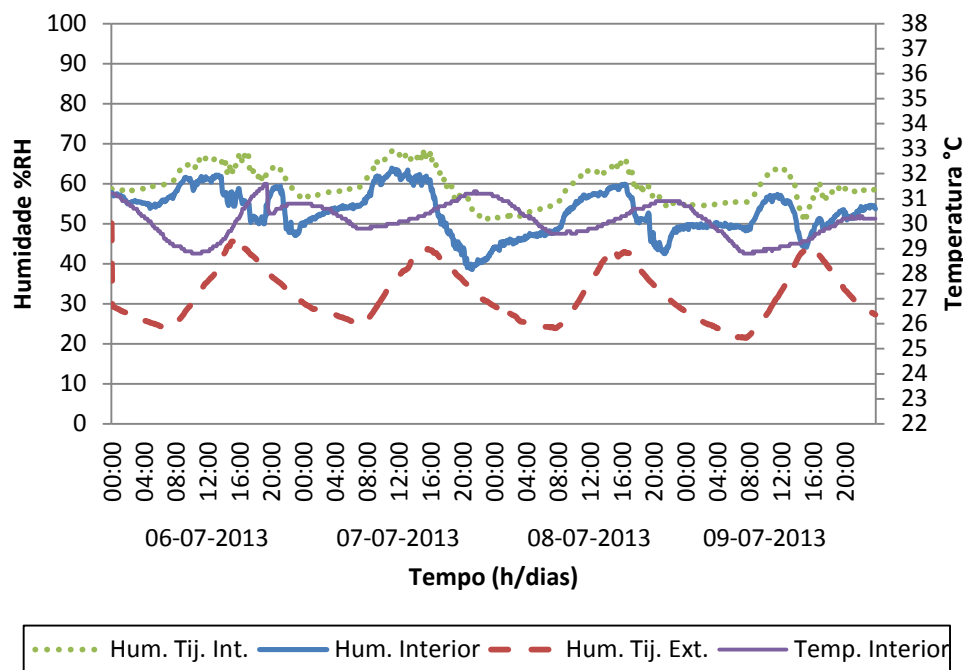


Fig. 4.9 – Humidade relativa no período de 06 a 09 de Julho e Temperatura interior

Comparando a humidade relativa registada, que ronda os 50%, com a temperatura interior da célula de teste, Figura 4.9, também se verifica que quanto maior a temperatura menor a humidade e vice-versa. Os dados registados encontram-se dentro dos estabelecidos pelo regulamento, nomeadamente o RCCTE, como valor médio de referência de humidade relativa do ar de 50%.

O fluxo de calor que atravessa um elemento opaco da envolvente é determinado com base no conhecimento dos elementos climáticos e das propriedades térmicas dos materiais que constituem esse elemento.

Analisados os valores de fluxo de calor, apresentados nas Figura 4.10 e 4.11, na superfície

exterior do tijolo q_{in} , verifica-se um valor positivo crescente a partir das 07:00, atingindo um valor máximo que ronda os 400W/m^2 cerca das 12:30, decrescendo até se tornar um valor nulo às 18:00, aproximadamente. Ou seja entre as 07:00 e as 18:00 a parede recebe energia para o seu interior. No período noturno os valores do fluxo de calor são negativos, ou seja a parede liberta para o ambiente exterior calor.

Tendo como referencial a superfície interior da parede, em contacto com o interior da célula de teste, verificamos que o fluxo de calor é positivo e crescente a partir de cerca das 18:00 atingindo um patamar máximo cerca das 00:00 e até as 09:00 quando inverte a tendência e anula-se cerca das 10:00/11:00, passando a valores negativos. Ou seja, a parede transmite calor para o interior da célula de teste entre as 18:00 e as 10:00/11:00 enquanto no período restante a parede absorve calor do ambiente da célula. Comparando a ordem de grandeza dos fluxos de calor que entram na parede pela superfície exterior e o fluxo de calor trocado na superfície interior da parede, da ordem de 6 W/m^2 e 15 W/m^2 , respetivamente (Figura 4.10 e 4.11), verifica-se uma diferença muito significativa. Assim conclui-se, pelos períodos horários e pelo balanço energético que o fluxo de calor que entra para a parede vai sendo acumulado nas primeiras camadas do material de forma progressiva ao longo da espessura da parede sem que contudo sature a capacidade de armazenamento de calor pela massa da parede por forma a chegar a superfície oposta no interior da célula com fluxo de calor significativo.

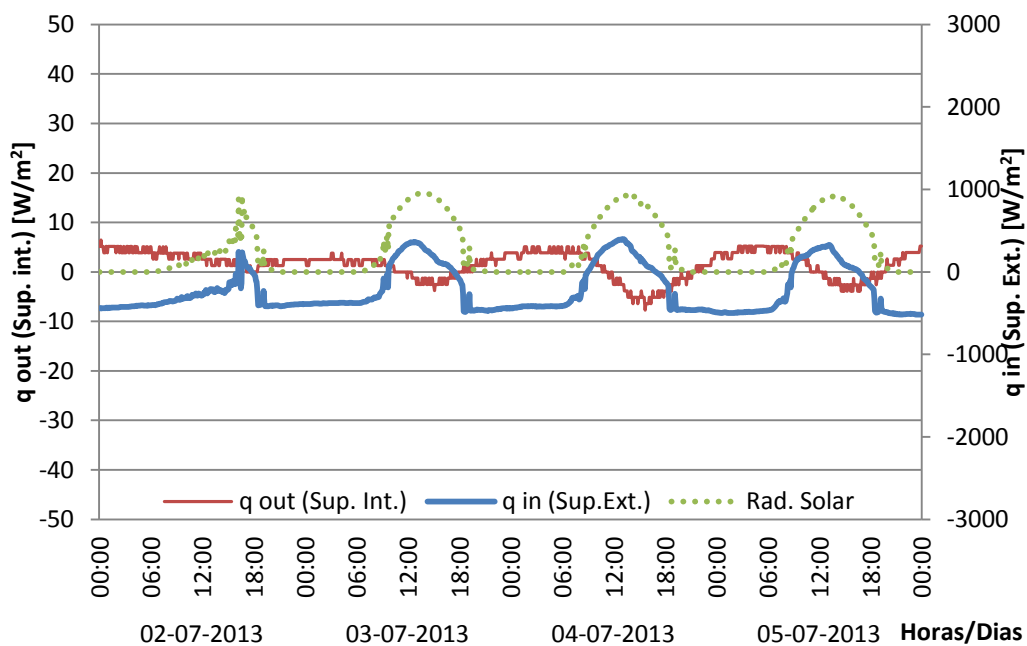


Fig. 4.10 – Comparação entre o fluxo de calor que entra e que sai do tijolo e a radiação solar

De notar que o referido anteriormente acontece porque ocorre a variação do ciclo diário de aquecimento da superfície exterior da parede, estando esta a perder calor após o final da tarde até ao início da manhã seguinte, libertando do interior da parede o calor que se ia acumulando e transmitindo para a outra face durante o dia.

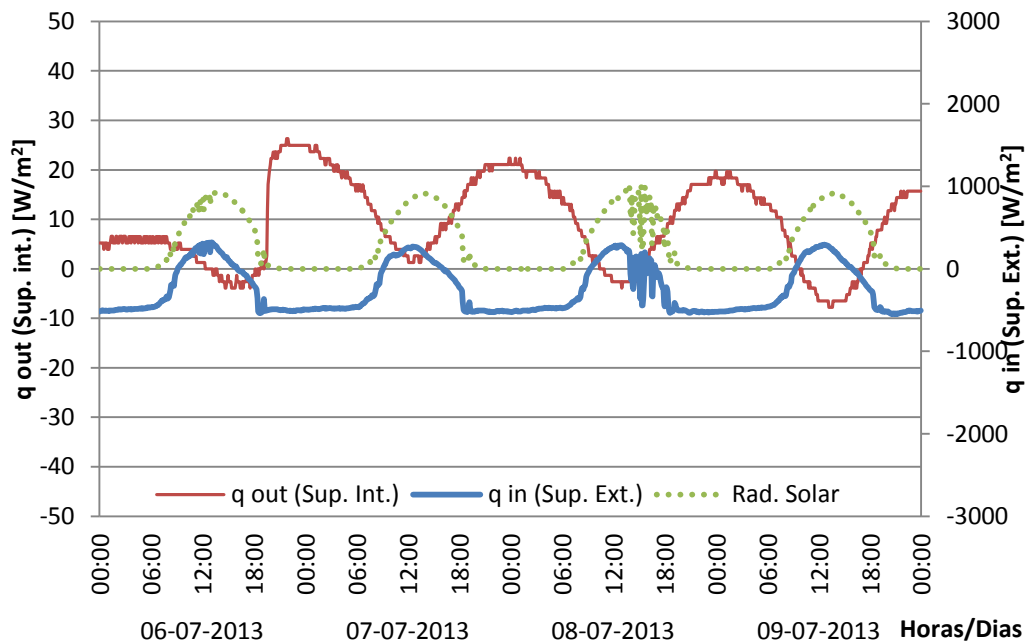


Fig. 4.11 – Comparação entre o fluxo de calor que entra e que sai do tijolo e a radiação solar

O tijolo tem capacidade de armazenamento de energia porque transmite calor por condução nas duas direções, quer novamente para o exterior quer para dentro da célula de teste. O núcleo do tijolo está mais quente e embora a quantidade de calor irradiada nas duas direções seja bem diferente (muito maior para o exterior do que para o interior) isto acontece porque o calor armazenado está muito mais próximo do exterior. O tijolo não ficou totalmente “cheio” nas horas de radiação solar, acumulando o calor mais na parte exterior, e assim este transmite menos calor para dentro da célula de teste do que para fora, visto de encontrar mais perto do calor armazenado.

Pode ainda verificar-se claramente que o fluxo de calor na superfície exterior, ou seja que entra para dentro do tijolo na sua grande maioria se deve a radiação solar, sendo esta a principal causa do calor acumulado no tijolo.

O calor que entra para dentro da célula de teste durante a noite (quando já não há radiação solar) é muito pequeno comparativamente com o que volta para o exterior. Durante o dia o interior da célula de teste está a arrefecer, passando calor para o interior do tijolo, mostrando

consistência com o atraso de resposta da parede atrás analisado.

A inércia térmica é uma noção que engloba simultaneamente a acumulação de calor e a sua restituição ao ambiente, por convecção e radiação, com um desfasamento que é função das características do elemento armazenador.

4.2 Comparação de custos

Em Portugal não é prática corrente analisar-se os custos relativos aos materiais utilizados para execução das paredes exteriores. Opta-se pelo material mais barato e mais usual, sem haver comparações com as diferentes soluções atualmente existentes no mercado que por vezes não sendo mais baratas de imediato, o são a longo prazo. A utilização de paredes de alvenaria simples é uma opção vantajosa relativamente às paredes duplas que permitem poupar tempo de execução e assim uma poupança em termos de custos de mão-de-obra.

As soluções construtivas devem ser analisadas como um todo, e os custos deverão incluir os materiais, a mão-de-obra e o tempo de execução bem como os equipamentos necessários. Deve-se ainda estimar os custos futuros, como os gastos enérgicos.

Como exemplo, utilizando como base uma moradia unifamiliar com área total de 271 m² e com área de paredes exteriores de 141,78 m², é feita uma análise simplista de dois tipos de construção, utilizando dados e valores consultados *online* [43, 44].

Parede dupla de tijolo de 30x20x11 + 30x20x15:

Descrição	Quantidade	Preço unitário	Preço Global
Tijolo furado de 30x20x11	141.78m ²	2.00 €/m ²	283.56 €
Tijolo furado de 30x20x15	141.78m ²	2.66 €/m ²	377.13 €
Argamassa de assentamento	53.40kg	0.45 €/Kg	24.03 €
Assentamento de tijolo	141.78m ²	8.00 €/m ²	1 134.24 €
Total			1 818.96 €

Parede simples de tijolo térmico 30x19x29:

Descrição	Quantidade	Preço unitário	Preço Global
Tijolo térmico 30x19x29	141.78m ²	4.25 €/m ²	602.96 €
Argamassa de assentamento	47.50kg	0.45 €/Kg	21.38 €
Assentamento de tijolo	141.78m ²	4.00 €/m ²	567.12 €
Total			1 191.46 €

Como se pode verificar, o uso de uma parede simples de tijolo térmico é mais vantajosa em termos de custos, apresentando uma diferença assinalável, ainda que os custos dos materiais sejam bastante próximos, o gasto em mão de obra é o dobro para a parede dupla. Relativamente ao coeficiente de transmissão térmica (U) de uma parede simples de alvenaria de tijolo térmico este é mais baixo (0,7 W/(m²C)) ou seja melhor que o de uma parede dupla de alvenaria de tijolo furado sem isolamento térmico (0,96 W/(m²C)).

As alvenarias de paredes duplas costumam ainda ter na sua constituição o isolamento térmico na caixa de ar, geralmente um poliestireno extrudido (XPS) ou um poliestireno expandido (EPS), o que faz com que estas se comportem melhor em termos de resistência térmica, no entanto esta incorporação de isolamento irá encarecer ainda mais a obra e os resultados não serão muito relevantes.

Se a ambas as situações colocarmos um isolamento, por forma a melhorar as características das paredes, ou seja à parede dita tradicional com alvenaria dupla adicionamos isolamento de XPS na caixa-de-ar e à parede de tijolo térmico adicionarmos isolamento pelo exterior em cortiça. Eis os resultados obtidos:

Parede dupla de tijolo de 30x20x11 + XPS(3 cm) + 30x20x15:

Descrição	Quantidade	Preço unitário	Preço Global
Tijolo furado de 30x20x11	141.78m ²	2.00 €/m ²	283.56 €
Tijolo furado de 30x20x15	141.78m ²	2.66 €/m ²	377.13 €
Argamassa de assentamento	53.40kg	0.45 €/kg	24.03 €
Assentamento de tijolo	141.78m ²	8.00 €/m ²	1 134.24 €
Isolamento 3 cm XPS	141.78m ²	6.00 €/m ²	850.68 €
Reboco tradicional e aplicação	141.78m ²	10.00 €/m ²	1 417.80 €
Total			4 087.44 €

Parede simples de tijolo térmico 30x19x29 + isolamento pelo exterior em cortiça:

Descrição	Quantidade	Preço unitário	Preço Global
Tijolo térmico 30x19x29	141.78m ²	4.25 €/m ²	602.96 €
Argamassa de assentamento	47.50kg	0.45 €/kg	21.38 €
Assentamento de tijolo	141.78m ²	4.00 €/m ²	567.12 €
Isolamento em cortiça	141.78m ²	7.00 €/m ²	992.46 €
Total			2 183.92 €

Como se verifica a diferença de custos é muito significativa, quase de 2000€ e, as propriedades finais das paredes também são significativamente diferentes. Segundo o ITE 50, a primeira hipótese (Parede dupla de tijolo de 30x20x11 + XPS(3 cm) + 30x20x15) apresenta um coeficiente de transmissão térmica de 0,6 W/(m²C). Se utilizarmos tijolo térmico e isolamento de cortiça apenas de 3 cm obtemos um coeficiente de transmissão térmica de 0,45 W/(m²C) [45].

A solução de parede simples com tijolo térmico é a mais vantajosa, quer em termos económicos quer em termos de eficiência térmica. Tirando partido das excelentes características do tijolo térmico é possível utilizar este material conseguindo excelentes desempenhos térmicos. As paredes simples com isolamento térmico pelo exterior são vantajosas em termos de processo construtivo, sendo este mais simples, permitindo uma maior rapidez de construção e economia ao nível de mão de obra.

5. Conclusão

Este trabalho consiste num estudo bibliográfico e trabalho experimental para analisar e avaliar o uso de tijolos térmicos (Bloco ThermoPreliis) em vez da típica construção utilizada em Portugal. Face ao escasso trabalho experimental existente, neste trabalho foi desenvolvido um modelo para estudar a transmissão de calor em regime dinâmico de uma parede da envolvente exterior.

De forma geral, verifica-se que, para as variações dos perfis de temperatura e humidade relativa do ar no interior da parede, a capacidade de amortecimento e o atraso térmico são influenciadas pelas condições exteriores de temperatura, humidade relativa e da intensidade da radiação solar. Estes resultados vão ao encontro de outras pesquisas e estudos apresentadas no capítulo 2, dedicado à revisão bibliográfica.

É preciso perceber que as paredes das casas têm vida própria, dilatam e contraem com as variações de temperatura. Não basta adotar um bom material, é preciso aplicá-lo corretamente e ter um projeto arquitetónico concebido de acordo com a ação do sol e dos ventos. O tijolo térmico tem dimensões diferentes e massa significativa que permitem reter o calor e libertá-lo de forma progressiva. Como resultado gasta-se menos energia para aquecer e arrefecer os espaços dos edifícios, reduzem-se as emissões de CO₂ e obtêm-se melhorias da qualidade do ambiente interior.

Da análise e interpretação dos resultados, pode-se concluir que o tijolo térmico apresenta capacidade de armazenar uma grande quantidade de calor. Durante o dia, em que há radiação solar, o tijolo absorve a energia e durante o período noturno, em que as temperaturas quer no interior da célula de teste quer no exterior estão mais baixas que o núcleo do tijolo, este devolve o calor acumulado para o ambiente. Este estudo, embora efetuado na cidade de Leiria

pode ser facilmente adaptado para todo o país não havendo diferenças significativas entre os valores de radiação solar nas diferentes localidades em dias de céu limpo [43].

É perceptível que a massa do edifício atua como um sistema de termorregulação, evitando as oscilações da temperatura do ar interior, garantindo o conforto térmico e limitando os consumos de energia. As paredes de alvenaria de tijolo térmico apresentam um bom comportamento térmico transiente, embora as oscilações de temperatura no exterior fossem muito grandes, dentro da célula de teste tal não se verificou. A temperatura do ar no interior é mantida praticamente constante ao longo dos dias. Quanto ao atraso térmico, comparando o pico de calor no exterior medido pela estação meteorológica com o pico de calor no interior da célula de teste, nota-se um atraso de cerca de 7 a 8 horas na maioria dos dias analisados e amortecimentos por vezes na ordem dos 9 a 10°C, ou seja não existe sobreaquecimento do interior da célula de teste durante o dia. O tijolo funciona como uma barreira durante o dia, e durante a noite não deixa que o calor “escape” para o exterior. Quanto à humidade admissível no interior de uma habitação, esta deve rondar os 50%, segundo o RCCTE. Como se pode verificar os resultados obtidas estão nessa ordem de valores.

Estes resultados mostram claramente as vantagens da massa térmica e a sua capacidade de contrariar as variações de temperatura do ar no interior, ou seja, reduzir a transferência de calor. Mostram ainda as vantagens em relação as estratégias de atenuação da temperatura no verão, uma vez que a temperatura e também o fluxo de calor apresenta máximos no interior durante a noite, quando as temperaturas do ar no exterior já são muito baixas.

Em termos económicos, foi feita uma comparação de preços. Somando todas as parcelas de gastos e ainda pensando no futuro económico em termos energéticos comprova-se facilmente que o uso deste tipo de tijolo em parede simples se torna vantajoso em relação à solução tradicional de parede dupla com isolamento.

5.1 Trabalhos Futuros

Demonstrada a importância e as vantagens do uso de diferentes materiais construtivos, neste caso o tijolo térmico, existem ainda várias questões em aberto que poderão influenciar o desempenho destas paredes simples. Na impossibilidade de as abordar todas, destaca-se alguns estudos de interesse futuro em que será útil aproveitar as potencialidades da célula de teste construída:

- Instrumentação ao longo de mais pontos segundo a espessura do tijolo e a caracterização da “onda de calor” ao longo do mesmo, que por dificuldade de instrumentação não foi possível fazer;
- Avaliação da aplicação de isolamento térmico pelo exterior por exemplo em cortiça, nas paredes de alvenaria de tijolo térmico;
- Estudo específico de estruturas pesadas e leves, onde começa uma e acaba a outra, de que modo uma estrutura “demasiado pesada” influencia negativamente o conforto térmico;
- Construção de outra célula de teste, no mesmo local, com paredes de alvenaria de tijolo duplas com isolamento na caixa de ar, que permitem uma comparação entre as diferentes tipologias de parede.

Referências

- [1] DL 78/2006 – Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE)
- [2] JD Healy – *Excess winter mortality in Europe: a cross country analysis identifying key risk factor*; Journal of epidemiology; University College Dublin, Richview Campus, Dublin 2002
- [3] DGEG - Direção Geral de Energia e Geologia. Disponível em <http://www.dgeg.pt/> Acesso em 3 Julho 2012
- [4] Disponível em http://repositorio-iul.iscte.pt/bitstream/10071/2212/3/3%20%20%20Trabalho_..%20FINAL.pdf, Acesso em 4 jul. 2012
- [5] Direção Geral de Energia – *Eficiência energética nos edifícios 2002*
- [6] DL 80/2006 – RCCTE, Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios
- [7] DL 79/2006 - Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE)
- [8] INE – Instituto nacional de Estatística – *Estatísticas da construção e Habitação 2010*. INE 2011. www.ine.pt
- [9] DL 118/2013 - Regulamentação Térmica
- [10] Ministério da Ciência e Tecnologia, Ministério das Relações Exteriores da República Federativa do Brasil, *Protocolo de Quioto*, Brasil
- [11] Disponível em <http://ictsd.org/i/trade-and-sustainable-development-agenda/151445/>, acesso em 16 Outubro 2013
- [12] Disponível em <http://www.estig.ipbeja.pt/~pdnl/>, Acesso em 5 Jul. 2012
- [13] Dutra, Miguel Resende – *Caracterização de Revestimentos em Fachadas Ventiladas. Análise do Comportamento*; Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia civil, Lisboa, Março 2010

- [14] APICER, CTCV e DEC-FCTUC - *Manual de Alvenaria de Tijolo*. Associação Portuguesa de Industriais de Cerâmica de Construção, Coimbra, 2009
- [15] Disponível em <http://building.dow.com/europe/pt/insulate/thermal/walls/instal/duplas.htm>, acesso em 16 Outubro 2013
- [16] Disponível em <http://www.prelis.pt/>, acesso em 17 Outubro 2013
- [17] Preceram – Manual de Aplicação. Disponível em http://www.preceram.pt/documentos/aplic_tijolo_preceram.pdf, acesso em 17 Outubro 2013
- [18] Simões, Nuno *et al* - *Influência das Juntas de Argamassa no Desempenho Térmico de Paredes de Alvenaria*, Coimbra
- [19] ISO 6946 (2007) *Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation method*. Second edition. ISO, Suíça
- [20] Disponível em <http://repositorio.ipl.pt/bitstream/10400.21/451/3/5.%20CORPO%20TESE.pdf>, Acesso em 4 de Jul. 2012
- [21] Guohui Gan – *A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings*, UK 1997
- [22] Türkan Göksal Özbalta; Semiha Kartal - *Heat gain through Trombe wall using solar energy in a cold region of Turkey*, 2010
- [23] Disponível em <http://www.construcaosustentavel.pt/index.php?/O-Livro-%7C%7C-Construcao-Sustentavel/Eficiencia-Energetica/Paredes-Trombe>, acesso em 12 Julho 2012
- [24] Lobão, Ricardo – *Modelo simplificado de Previsão do comportamento Térmico de Edifícios*; Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia civil, Guimarães 2004
- [25] Disponível em <https://woc.uc.pt/efs/getFile.do?tipo=2&id=412>, Acesso em 5 Jul. 2012
- [26] M. Guedes de Almeida e E. Maldonado – *Modelo de Simulação Térmica de Elementos Construtivos não Homogéneos*, Porto e Guimarães 2000
- [27] Andrea Campiolo, Simone Ferrari, Monica Lavagna, Eugenio Morello, Marco Baldinazzo - *Costrure Tecnologia – Massa térmica e Risparmio energetico, Variable Tempo*, Politecnico di Milano, 2007
- [28] A. de Gracia, A. Caltell, M. Medrano, L. F. Cabeza – *Dynamic thermal performance of alveolar brick construction system*, Lleida, Spain 2011

- [29] Albert Castell, *et al.* – *Experimental Study of PCM in Mediterranean Buildings*, Lleida, Spain
- [30] Silva, Pedro - *Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE*; Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia civil, Universidade do Minho 2006
- [31] Simone Ferrari e Valentina Zanutto – *Effectiveness of thermal mass in building envelope: an experimental test in climatic chamber*; Milão, Italia
- [32] Brundtland, G.H. et al. (1988) *Nosso Futuro Comum*. Fundação Getúlio Vargas. Relatório de 1987 da Comissão Mundial Meio Ambiente e Desenvolvimento da ONU, Rio de Janeiro 2ª Edição, 1991
- [33] Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations Secretariat (2009). *World Population Prospects: The 2008 Revision. Highlights*. Nova Iorque: United Nations.
- [34] Pereira, Manuel Fernando – *Anomalias em Paredes de Alvenaria sem função Estrutural*; Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia civil, Guimarães 2005
- [35] Abrantes, João Bartolomeu - *Implicações do Conforto Térmico no Consumo Energético – Uma Hipótese de Modelo Adaptativo Aplicada ao Verão*; Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia civil, Lisboa 2012
- [36] Ribeiro, Paulo Jorge - *AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS DE HABITAÇÃO COM RECURSO A UM TERMOFLUXÍMETRO*; Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia civil, Vila Real 2009
- [37] Disponível em http://www.didai.com.br/_upload/br/arquivos/Manual_LogTag_analisador.pdf, Acesso em 3 Julho 2012
- [38] Disponível em <http://www.logtagrecorders.com/software/software.htm>, Acesso em 3 Julho 2012
- [39] Carlos A. Pina dos Santos; Luís Matias - *ITE 50 – Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envolvente dos Edifícios*; LNEC, Lisboa 2006
- [40] Davis Instruments 2009 Catalog, disponível em http://www.agrolinkholambra.com.br/pdf/davis_Catalog09.pdf
- [41] Silva, Pedro - *Análise do Comportamento Térmico de Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE*; Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia civil, Universidade do Minho 2006

- [42] CEC Report 11, "Guidelines for ventilation requirements in buildings", Luxemburgo, 1992
- [43] Disponível em <http://www.geradordeprecos.info/>, acesso em 18 Outubro 2013
- [44] Disponível em <http://orcamentos.eu/>, acesso em 18 Outubro 2013
- [45] Disponível em http://www.amorim.com/cor_neg_isolamentos.php, acesso 18 Outubro 2013
- [46] Lopes, Luís Manuel – *Caracterização das Cargas Térmicas de A. em Edifícios Pesados*; FEUP 1995