



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Desempenho térmico de paredes de Trombe em soluções estruturais leves com aço

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente

Autor

Ana Isabel Carvalho Ferreira

Orientador

Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos

Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, julho, 2015

AGRADECIMENTOS

Neste espaço expresso a minha gratidão a todas as pessoas que, ao longo do meu Mestrado em Engenharia do Ambiente, me acompanharam, motivaram e que, de uma forma direta ou indireta, me ajudaram a concretizar esta etapa da minha vida, pois o caminho até este ponto nunca teria sido possível sem a ajuda de todas elas.

Começo por agradecer aos meus orientadores, o Professor Doutor Paulo Fernando Antunes dos Santos e a Professora Doutora Helena Maria dos Santos Gervásio, pelo acompanhamento, conhecimento transmitido e disponibilidade manifestados ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos professores da FCTUC que durante estes últimos anos partilharam os seus conhecimentos e contribuíram para a minha formação.

A todos os amigos que estiveram presentes, não especificamente ao longo da concretização deste trabalho, mas ao longo de toda a minha vida, e aos meus colegas do curso, que sempre me apoiaram e me ajudaram.

Aos meus pais agradeço o amor, a dedicação e a educação que me transmitiram e que assim me permitiram concluir o percurso académico. À minha mãe pela referência de força e determinação. Por todo o carinho e apoio, um muito obrigado aos meus pais, irmão e restantes familiares. É a vocês que devo tudo o que sou hoje. E espero que esta etapa, que agora termino, possa, de alguma maneira, retribuir tudo aquilo que fizeram por mim.

Por fim, um especial agradecimento ao meu namorado, Flávio Cerqueira, pela compreensão, ajuda, paciência e carinho, e, ainda, pelas palavras reconfortantes e pela força, demonstrados ao longo destes anos que me deram coragem para superar todos os obstáculos que surgiram. Obrigada por estares sempre presente pois nada disto seria possível sem o teu apoio. Obrigada por acreditares em mim!

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

A preocupação ambiental com a excessiva utilização dos combustíveis fósseis tem motivado a adoção de medidas de eficiência energética, nas vastas áreas, capazes de reduzir o impacto destas fontes energéticas. Neste contexto, torna-se urgente a procura por novas tecnologias para a eficiência energética dos edifícios.

Tendo em conta os componentes dos edifícios, as fachadas constituem um meio onde se pode atuar e propor soluções, uma vez que influenciam o consumo de energia do edifício e o conforto dos ocupantes, pois contribuem significativamente para a transferência de calor entre o ambiente exterior e o ambiente interior. Assim, a melhoria do desempenho energético dos edifícios pode ser alcançado através da integração de um sistema de parede de Trombe. Este sistema baseia-se na utilização de ganhos solares no inverno através de uma fachada de vidro e de uma parede com elevada massa térmica capaz de acumular o calor durante o dia. O seu adequado funcionamento consiste nos princípios de armazenamento de calor de ganhos diretos e indiretos e de ventilação natural.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho térmico de uma parede de Trombe, integrada numa construção leve em aço, e cujo elemento acumulador é composto por uma coluna de água. Para tal, recorreu-se à modelação numérica através do programa *DesignBuilder*, que foi primeiramente verificado, e depois utilizado para simular um sistema de parede de Trombe e posterior análise paramétrica, para as estações de aquecimento e arrefecimento, na cidade de Coimbra. A análise feita foi passiva, isto é, com os sistemas mecânicos de aquecimento e arrefecimento desligados. Tendo em consideração os resultados obtidos é possível concluir que através da implementação de uma parede de Trombe num compartimento é possível melhorar o comportamento térmico de um edifício, aproveitando a radiação solar.

Palavras-chave: Construção leve em aço, Sistemas passivos, Parede de Trombe, Desempenho térmico, *DesignBuilder*.

ABSTRACT

The environmental concerns on the excessive use of fossil fuels has motivated the adoption of energy efficiency measures, in vast areas, capable to reduce the impact of these energy sources. In this context, it becomes urgent to search for new technologies for energy efficiency of buildings.

Taking into account the components of buildings, the facades constitute a means where you can act and offer solutions, since they influence the energy consumption of the building and occupant comfort, as they contribute significantly to transfer the heat among the outside and the interior environment. Thus, the improvement of the energy performance of buildings can be achieved by integrating a Trombe wall system. This system is based on the use of solar gain in winter through a glass facade and a wall with high thermal mass able to accumulate heat during the day. The proper functioning consists on storage principles of direct and indirect gains and natural ventilation.

This work aims to evaluate the thermal performance of a Trombe wall, integrated in a steel lightweight construction, and whose accumulator element consists on a column of water. To this end, the numerical modelling was used through the program, DesignBuilder, which was first verified, and then used to simulate a Trombe wall system and posterior parametric analysis, to the heating and cooling stations, in the city of Coimbra. The analysis was passive, that is, with the mechanical heating and cooling systems switched off. Considering the obtained results it can be concluded that by implementing a Trombe wall on a compartment it is possible to improve the thermal behavior of buildings, taking advantage of the solar radiation.

Key words: Lightweight Steel Framing, Passive systems, Trombe wall, Thermal performance, DesignBuilder.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Enquadramento do tema	1
1.2	Motivação e objetivos	3
1.3	Estrutura da dissertação	4
2	CONSTRUÇÃO LEVE EM AÇO	5
2.1	Introdução	5
2.2	Métodos de construção	6
2.2.1	Construção “ <i>stick-build</i> ”	6
2.2.2	Construção em painéis	6
2.2.3	Construção modular	7
2.3	Vantagens e inconvenientes	7
2.4	Sustentabilidade desta solução construtiva	8
3	CASAS PASSIVAS	10
3.1	Introdução	10
3.2	Casas “Passivhaus”	10
3.2.1	Norma “Passivhaus”	11
3.3	Soluções solares passivas	12
3.3.1	Sistemas passivos de aquecimento	13
3.3.2	Sistemas passivos de arrefecimento	16
4	PAREDE DE TROMBE.....	18
4.1	Introdução	18
4.2	Constituintes da parede de Trombe	19
4.2.1	Parede acumuladora.....	20
4.2.2	Envidraçado	22
4.2.3	Caixa-de-ar	23
4.2.4	Dispositivos de sombreamento	23

4.2.5	Sistemas de ventilação.....	24
4.3	Princípio de funcionamento	25
4.3.1	Parede de Trombe Não Ventilada.....	25
4.3.2	Parede de Trombe Ventilada	26
4.3.3	Parede de Trombe-Michel Composta	28
4.3.4	Parede de Trombe Fotovoltaica.....	29
4.3.5	Paredes de Trombe com Materiais de Mudança de Fase (PCMs).....	29
4.3.6	Parede de Trombe com Isolante Transparente	31
4.3.7	Parede de Trombe em Malha.....	32
4.4	Vantagens e Inconvenientes.....	33
4.4.1	Vantagens:	33
4.4.2	Desvantagens:.....	33
5	CASO DE ESTUDO	34
5.1	Introdução	34
5.2	Introdução de dados	35
5.2.1	Dados climáticos	36
5.2.2	Geometria	38
5.2.3	Horário de ocupação	41
5.3	Análise CFD	42
5.3.1	Introdução.....	42
5.3.2	Resultados da simulação e análise.....	42
5.4	Comparação entre parede de Trombe e solução base	49
5.5	Análise paramétrica	50
5.5.1	Influência das dimensões da parede de Trombe.....	52
5.5.2	Influência da espessura da coluna de água	52
5.5.3	Influência da espessura da caixa-de-ar	53
5.5.4	Influência do tipo de vidro.....	55
5.5.5	Influência da cor do aço do painel.....	56
5.5.6	Influência da permeabilidade ao ar.....	57
5.5.7	Influência da área das aberturas para a ventilação	58

5.5.8	Alternativas para a estação de arrefecimento	61
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
6.1	Conclusões	64
6.2	Trabalhos futuros	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Consumo de energia final por setor, em 2011 (REA@, 2013).	2
Figura 2.1 – Exemplo de uma solução estrutural leve em aço (Futureng@, 2015).	5
Figura 2.2 – Representação esquemática da construção: a) “ <i>Stick-build</i> ”; b) Por painéis; c) Modular (Ferreira, 2014).	6
Figura 3.1 – Primeiras casas "Passivhaus" em Portugal: a) Projeto A; b) Projeto B (HOMEGRID@, 2015).	11
Figura 3.2 – Representação esquemática do sistema de ganho direto (Gonçalves e Graça, 2004).	13
Figura 3.3 – Esquema de funcionamento de uma parede de Trombe (Gonçalves e Graça, 2004).	14
Figura 3.4 – Representação Esquemática do Sistema de Ganho Isolado (Gonçalves e Graça, 2004).	15
Figura 3.5 – Funcionamento do coletor de ar: a) No inverno; b) No verão (Gonçalves e Graça, 2004).	15
Figura 3.6 – Representação Esquemática da Ventilação Natural. (AUWORKSHOP@, 2015)	16
Figura 3.7 – Representação Esquemática do Sistema de Arrefecimento pelo Solo (Gonçalves e Graça, 2004).	17
Figura 3.8 – Representação esquemática do Sistema de Arrefecimento Evaporativo (Gonçalves e Graça, 2004).	17
Figura 3.9 – Representação esquemática do Sistema de Arrefecimento Evaporativo (Gonçalves e Graça, 2004).	17
Figura 4.1 – Protótipo da casa criada por Félix Trombe e Jacques Michel, em Odeillo, França (Sá, 2011).	18
Figura 4.2 – Percentagem de eletricidade utilizada na casa para realizar diferentes tarefas: a) Casa base; b) Casa com paredes de Trombe (Bojic et al, 2014).	19
Figura 4.3 – Diagrama de uma parede de Trombe (DESIGN@, 2015).	20
Figura 4.4 – Exemplos de diferentes paredes acumuladoras: a) Em betão (Sá, 2011); b) Em adobe (LXRDESIGN@, 2015); c) Em pedra (CAD@, 2015).	21
Figura 4.5 – Efeito da massa térmica na estabilização da temperatura interior (GREENSPEC@, 2015).	21

Figura 4.6 – Exemplo do efeito de uma pala de sombreamento durante as estações de inverno e verão (AUWORKSHOP@, 2015).....	24
Figura 4.7 – Esquema de funcionamento da Parede de Trombe consoante as estações do ano: a) No inverno; b) No outono/primavera; c) No verão (CAD@, 2015).	25
Figura 4.8 – Funcionamento de uma parede de Trombe não ventilada (TGH@, 2015).	25
Figura 4.9 – Esquema de funcionamento da parede de Trombe não ventilada: a) Durante o dia; b) Durante a noite (Martins, 2010).	26
Figura 4.10 – Funcionamento de uma parede de Trombe ventilada (TGH@, 2015).	26
Figura 4.11 – Esquema de funcionamento da parede de Trombe ventilada no inverno: a) Durante o dia; b) Durante a noite (Martins, 2010).	27
Figura 4.12 – Esquema de funcionamento da parede de Trombe ventilada no verão: a) Durante o dia; b) Durante a noite (Martins, 2010).	28
Figura 4.13 – Esquema da parede de Trombe-Michel composta (Martins, 2010).	28
Figura 4.14 – Funcionamento da parede de Trombe fotovoltaica (Martins, 2010).	29
Figura 4.15 – Princípio de funcionamento da parede de Trombe com PCMs:	30
Figura 4.16 – Princípio de funcionamento da parede de Trombe com PCMs incorporados (Martins, 2010).	31
Figura 4.17 – Isolamento transparente (Martins, 2010).	32
Figura 4.18 – Representação da parede de Trombe me malha (Martins, 2010).	32
Figura 5.1 – Fotografia do protótipo experimental.	34
Figura 5.2 – <i>Layout</i> do <i>DesignBuilder</i>	35
Figura 5.3 – Valores horários para a semana de projeto de inverno em Coimbra (IWEC).	37
Figura 5.4 – Valores horários para a semana de projeto de verão em Coimbra (IWEC).	37
Figura 5.5 – Geometria do compartimento/módulo em:	38
Figura 5.6 – Geometria do compartimento/módulo nas fachadas a:	39
Figura 5.7 – Aberturas de ventilação localizadas na parede acumuladora.	40
Figura 5.8 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar na parede de Trombe.	43
Figura 5.9 – Distribuição da temperatura nas aberturas de ventilação.	44
Figura 5.10 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar em alçado.	44
Figura 5.11 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar vista no interior do compartimento.	45
Figura 5.12 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar na parte inferior do compartimento.	46
Figura 5.13 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar na parte superior do compartimento.	47
Figura 5.14 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar no compartimento.	48
Figura 5.15 – Análise CFD para o exterior envolvente ao módulo.	49
Figura 5.16 – Variação da temperatura interior durante a semana de projeto de Inverno para a solução base e para a solução com parede de Trombe.	50

Figura 5.17 – Variação da temperatura interior: dimensões da parede de Trombe.....	52
Figura 5.18 – Variação da temperatura interior: espessura da coluna de água.	53
Figura 5.19 – Variação da temperatura interior: espessura da caixa-de-ar.	54
Figura 5.20 – Ampliação da escala da Figura 5.19.	54
Figura 5.21 – Variação da temperatura interior: tipo de vidro.	55
Figura 5.22 – Variação da temperatura interior: cor do aço do painel.	57
Figura 5.23 – Variação da temperatura interior: permeabilidade ao ar.	58
Figura 5.24 – Variação da temperatura interior: área das aberturas para a ventilação.....	59
Figura 5.25 – Fluxo de ar na abertura superior.	60
Figura 5.26 – Ganhos de calor por ventilação natural interna (kW).	61
Figura 5.27 – Distribuição da temperatura interior com a introdução de dispositivos de sombreamento durante o verão.	62
Figura 5.28 – Distribuição da temperatura interior com a introdução de dispositivos de sombreamento durante o inverno.	63

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 5.1 – Coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados.	40
Quadro 5.2 – Coeficientes de transmissão térmica da envolvente opaca.	40
Quadro 5.3 – Perfil de ocupação do edifício utilizado no modelo.	41
Quadro 5.4 – Descrição do cenário de referência (cenário 1).	51
Quadro 5.5 – Cenários simulados para os parâmetros escolhidos.	51
Quadro 5.6 – Características de cada tipo de vidro.	55
Quadro 5.7 – Características térmicas (STEEL@, 2015; ASHRAE, 2005).	56
Quadro 5.8 – Infiltrações de acordo com a qualidade da solução construtiva.	57
Quadro 5.9 – Áreas das aberturas de ventilação simuladas.	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

O panorama energético atual exige que sejam feitas mudanças quer a nível económico, quer a nível ambiental e social, de modo a começar a caminhar para o desenvolvimento do conceito de sustentabilidade. O setor da energia é imprescindível para as atividades do quotidiano, o que justifica o aumento da procura, mas não justifica a utilização irracional deste bem, o que afeta os recursos existentes. O aumento do consumo energético no setor dos edifícios, aliado à maior sensibilidade da opinião pública para a excedente utilização dos combustíveis fósseis, tem motivado a adoção de medidas de eficiência energética, capazes de reduzir o impacte destas fontes energéticas.

Desta forma, foram tomadas medidas no sentido de reduzir a fatura energética dos edifícios residenciais. Em 2010, foi revista a Diretiva Comunitária relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios, tendo sido proposta uma nova meta a atingir, a meta dos “20-20-20”, que tem como objetivo a redução das emissões de gases de efeito de estufa em 20%, a redução do consumo de energia em 20% e a produção de energia através de fontes renováveis em 20%, até ao ano de 2020. A redução do consumo de energia pode dar uma contribuição significativa para alcançar estes objetivos.

Tendo em conta estas metas, os Estados-Membros têm vindo a promover um conjunto de medidas que promovam a eficiência energética, em linha com a Diretiva 2002/91/CE, de 16 de dezembro e de sua reformulação, a Diretiva n.º 2010/31/EU, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de maio de 2010, cujo objetivo é promover o desempenho energético dos edifícios ao exigir que todos os edifícios novos ou renovados tenham necessidades de energia quase nulas a partir de 2020, tendo em conta a relação custo-benefício, e com abastecimento energético através do recurso a energia de origem renovável.

Atualmente, o setor dos edifícios é responsável por 40% do consumo de energia e por 36% das emissões de CO₂ na União Europeia, UE. Ao melhorar a eficiência energética dos edifícios, seria possível reduzir o consumo total de energia da UE até 5% a 6% e diminuir as emissões de CO₂ em cerca de 5% (EC@, 2015).

Em Portugal, segundo a Direção Geral de Energia e Geologia, o setor dos edifícios é responsável pelo consumo de, aproximadamente, 30% da energia final.

Em 2011, o consumo de energia final nos principais setores de atividade foi de 35,8% nos transportes, 33,7% na indústria, 16,6% no setor doméstico, 11,3% nos serviços e 2,6 na agricultura e pescas, Figura 1.1 (REA@, 2013).

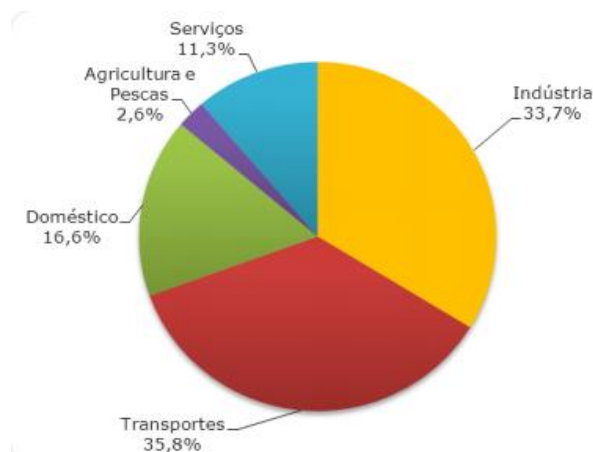


Figura 1.1 – Consumo de energia final por setor, em 2011 (REA@, 2013).

Ao transpor a diretiva comunitária para o Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto, Portugal veio aperfeiçoar vários aspetos que caminham no sentido da melhoria da eficiência energética do edificado nacional através do sistema de certificação energética dos edifícios (SCE), que inclui o regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação (REH) e o regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços (RECS). Assim, a indústria da construção deve procurar soluções inovadoras para enfrentar os desafios e implementar conceitos como sustentabilidade, ecologia e racionalização de recursos, promovendo a criação de instrumentos e metodologias que incentivem a eficiência energética.

No sentido da construção sustentável, destaca-se a construção com estrutura leve em aço, também conhecida por “LSF – *Lightweight Steel Framing*”, que veio responder às crescentes exigências económicas e ambientais. Constitui, assim, uma solução que tem vindo a crescer tendo em conta as diversas vantagens que apresenta, como a facilidade de transporte, flexibilidade e adaptabilidade, modularidade, estética, desempenho funcional (eficiência energética e conforto), industrialização e pré-fabricação, customização em massa, contentorização para transporte, reciclagem ou reutilização e segurança. Estas soluções construtivas têm em consideração os requisitos futuros a nível sustentável, apresentando uma estrutura modular flexível e resistente e onde é destacada uma maior facilidade na utilização de energias renováveis, por exemplo, a parede de Trombe.

No entanto, este tipo de sistema apresenta algumas condicionantes. No que diz respeito à inércia térmica estes sistemas foram classificados de fraca inércia térmica, ou seja, têm pouca capacidade de armazenamento de calor nos elementos envolventes. Contudo, este aspeto pode ser superado com a adoção de sistemas que aumentem a massa dos elementos de compartimentação e ainda através de uma conceção adequada para que se possa tirar o máximo partido da geometria do edifício e assim controlar os ganhos solares.

A aposta na construção de edifícios de baixo consumo ou passivos tem como finalidade a diminuição da dependência energética de um país, de modo a cumprir a regulamentação europeia. Neste sentido, destacam-se as casas passivas, onde são usados sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento para manter a temperatura interior de conforto. Estes sistemas consistem em tecnologias construtivas integradas nos edifícios e são caracterizados pelo aproveitamento de fontes naturais de energia, como o sol, o vento e o solo.

Levando-se em consideração todos os aspetos mencionados, esta dissertação tem como propósito o estudo de soluções passivas, nomeadamente da parede de Trombe, de modo a melhorar o comportamento térmico de uma solução construtiva leve em aço.

A parede de Trombe, que será objeto de estudo neste trabalho, consiste num sistema passivo de aquecimento de ganho indireto. Em Portugal, a aplicação deste sistema é pouco utilizado devido à falta de informação acerca da sua integração num edifício. Para que este sistema seja eficiente é fundamental que a sua utilização seja prevista logo na fase de projeto.

1.2 Motivação e objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo estudar o comportamento térmico passivo de um protótipo de estrutura leve em aço contendo uma parede Trombe, na cidade de Coimbra. Tratando-se de uma estrutura leve, a parede de Trombe pode aumentar a inércia térmica, conduzindo a um melhor desempenho térmico.

Numa primeira fase pretende-se demonstrar a importância dos sistemas construtivos leves em aço, que de uma forma geral apresentam uma grande variedade de soluções estruturais, promovendo a construção sustentável.

De seguida pretende-se enquadrar as casas passivas, onde serão abordados alguns sistemas passivos de aquecimento e arrefecimento, onde se incluem as paredes Trombe.

E por último, pretende-se aplicar a parede trombe a um caso de estudo. Nesta fase irá recorrer-se ao programa DesignBuilder de forma a modelar esta solução, avaliar o seu contributo para o aquecimento de espaços interiores e ainda fazer um estudo paramétrico.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho é constituído por seis capítulos, expondo-se de seguida uma pequena elucidação do conteúdo tratado em cada um deles.

Neste primeiro capítulo é feito um enquadramento do tema, onde é explicado o cenário atual sobre os consumos energéticos e possíveis formas de melhorar a situação. São também expostos os objetivos do trabalho e a organização da dissertação.

O segundo capítulo descreve o setor da construção no país e apresenta o sistema construtivo leve em aço, remetendo a construção metálica para uma solução sustentável.

No terceiro capítulo são aludidas as casas passivas, destacando-se os sistemas de aquecimento solar passivo, pois é onde se insere o sistema da parede de Trombe.

No quarto capítulo faz-se a caracterização da parede de Trombe, dos seus constituintes e do seu funcionamento, e de alguns tipos de parede de Trombe que foram surgindo ao longo do tempo.

O quinto capítulo apresenta um caso de estudo de uma parede de Trombe implementada numa solução construtiva leve em aço, para Coimbra, onde se analisa a influência da introdução da parede de Trombe e se faz uma análise paramétrica e respetiva análise dos resultados obtidos.

E, por último, no sexto capítulo, apresentam-se as conclusões obtidas neste trabalho, bem como propostas de trabalho futuro.

2 CONSTRUÇÃO LEVE EM AÇO

2.1 Introdução

O setor da construção civil em Portugal tem uma grande influência na vertente económica dos mercados pois possui capacidade de alterar vários fatores, como a taxa de emprego, de produto e de renda. As diversas obras que a construção civil oferece contribuem para o bem-estar da população e ainda enaltecem a economia.

A construção civil tem o compromisso de promover o bem-estar da comunidade e ao mesmo tempo satisfazer os requisitos ambientais. Posto isto, este setor deve caminhar para o progresso social, apostando em práticas sustentáveis. Neste contexto, destacam-se as soluções estruturais leves em aço, Figura 2.1, que são caracterizadas por uma elevada qualidade de construção e contribuem para a sustentabilidade do ambiente, através das matérias-primas utilizadas e dos métodos de construção.



Figura 2.1 – Exemplo de uma solução estrutural leve em aço (Futureng@, 2015).

A construção de estruturas leves em aço, designadas por “*Lightweight Steel Framing*”, é um sistema que utiliza aço galvanizado, enformado a frio, como principal elemento construtivo. A designação acima significa que estas estruturas são de peso leve, pois são concebidas a partir de chapa de aço com espessura reduzida. Este tipo de construção também é conhecido por ser sobretudo destinado para a construção de edifícios residenciais de pouca altura.

Este conceito nasceu nos Estados Unidos, no século XIX, como alternativa rápida e eficiente de utilizar os materiais disponíveis no local. Portugal importou esta alternativa para a construção por volta de 1993, e, desde então, a procura por este tipo de edifícios tem vindo a aumentar pelas várias vantagens que apresenta (Futureng, 2015).

2.2 Métodos de construção

Existem três métodos de construção com estruturas de aço formados a frio, Figura 2.2:

- Construção “*stick-build*”;
- Construção em painéis;
- Construção modular (Grubb *et al.*, 2001).

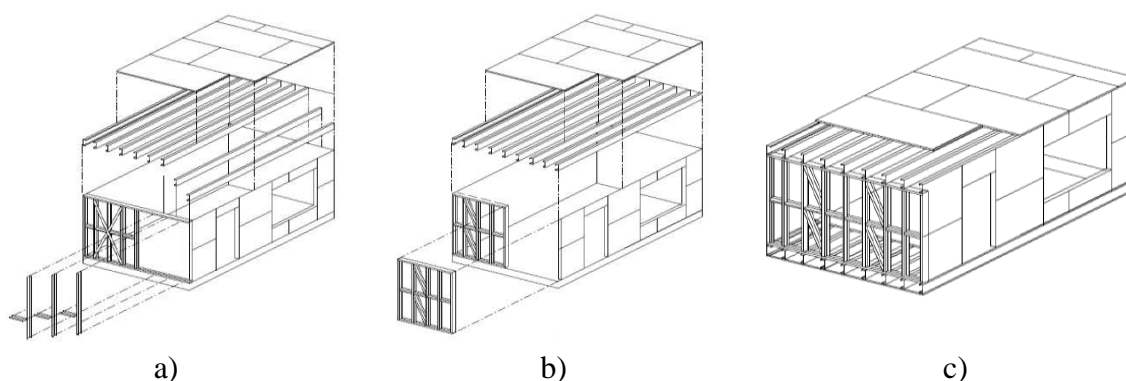


Figura 2.2 – Representação esquemática da construção: a) “*Stick-build*”; b) Por painéis; c) Modular (Ferreira, 2014).

2.2.1 Construção “*stick-build*”

Este método é o mais comum e usado na construção. Consiste na montagem dos elementos estruturais no próprio local da obra e estes podem vir já cortados à medida e perfurados para a instalação de várias infraestruturas. A união dos perfis é feita com elementos de fixação específicos para tal. As principais vantagens deste método de construção são: maior facilidade de transporte dos perfis para a obra, as modificações são acomodadas no local, as técnicas de conexão dos perfis são simples e podem ser facilmente manuseadas no local, e não há necessidade de um local exclusivo para a pré-montagem dos perfis (Grubb *et al.*, 2001).

2.2.2 Construção em painéis

A construção em painéis consiste na montagem dos elementos em condições de pré-fabricação, ou seja, são construídos módulos que constituem as paredes, pisos e coberturas, sendo depois

montados no local da obra. Neste método é possível que os painéis venham da fábrica já com revestimento interior, exterior e isolamento. Os painéis são ligados no local através de técnicas convencionais. Como vantagens apresenta-se a rapidez de construção, melhor controlo de qualidade do produto, redução dos custos no local da obra e, ainda, automação de tarefas produtivas (Grubb *et al.*, 2001).

2.2.3 Construção modular

O último método referido baseia-se na pré-fabricação por módulos, que inclui todos os elementos estruturais e ainda todos os acabamentos. Neste tipo de construção a montagem é feita em fábrica e depois é transportada para o local de obra. Este método beneficia de um menor tempo de obra mas, por outro lado, há uma maior dificuldade para transportar os módulos e existe ainda a necessidade de haver um local para armazenar os módulos (Gaspar, 2013).

2.3 Vantagens e inconvenientes

Este sistema construtivo tem vindo a ganhar espaço no setor da construção em Portugal, sendo uma solução já muito procurada noutros países mais desenvolvidos. Com o avanço da indústria e de estudos de novos materiais foi demonstrado que a construção metálica apresentava várias vantagens comparativamente à construção tradicional, entre as quais se destacam:

- Rapidez de execução em obra, que conduz a uma redução de custo relacionado com a mão-de-obra;
- Maior controlo de fabrico, garantindo um melhor controlo de qualidade e durabilidade para o sistema;
- Elevada segurança estrutural, devido ao seu baixo peso e amplo número de elementos estruturais possui boa resistência estrutural tanto a ações verticais como horizontais;
- Facilidade de montagem, manuseamento e transporte, devido à leveza dos materiais;
- Menor dependência das condições climáticas;
- Sustentabilidade construtiva, uma vez que o aço pode ser reciclado para outros fins, há uma maior redução no desperdício do material e existe uma maior precisão na montagem e construção, que exige menor manutenção durante a vida útil do edifício;
- Maior versatilidade, uma vez que a manutenção é mais fácil e há uma maior eficiência na reabilitação;
- Melhor desempenho funcional, térmico e acústico, que podem ser alcançados através de uma combinação de materiais de isolamento;
- Custo, relacionado com a matéria-prima e com a mão-de-obra, é muito similar ao praticado pela construção em alvenaria.

Apesar das vantagens enumeradas acima, este sistema construtivo também apresenta algumas desvantagens, sejam elas (Ferreira, 2014):

- Limitação da construção em altura, normalmente utiliza como referência edifícios residenciais até dois ou três pisos;
- Limitação à abertura de vãos, que influencia a eficiência do sistema em caso de ocorrência de sismos;
- Inércia térmica fraca, ou seja, tem pouca capacidade para reter calor nos elementos envolventes.

2.4 Sustentabilidade desta solução construtiva

O setor da construção é, atualmente, um dos principais responsáveis pelo aumento da poluição, com consequentes efeitos para o ambiente. Apesar de ser um dos setores mais importantes, continua a utilizar métodos de construção tradicionais e mão-de-obra não qualificada, destacando-se o consumo excessivo de recursos naturais e a grande produção de resíduos e desperdícios, ineficiência energética e, ainda, emissões globais de CO₂.

De modo a garantir um futuro sustentável, são criadas medidas e processos no sentido do desenvolvimento de novos produtos, tecnologias e sistemas de construção, inculcando uma atitude de inovação, qualidade e modernização das empresas.

A definição de Construção Sustentável mais aceite foi apresentada por Charles Kibert em 1994, que elucida como a “criação e gestão responsável de um ambiente construído saudável, tendo em consideração os princípios ecológicos e a utilização eficiente dos recursos” (PH@, 2015).

A construção com estrutura leve em aço estabelece uma solução que vai de encontro com o que se considera ser a construção sustentável, pois revela um menor impacto ambiental e é economicamente competitivo.

Este sistema construtivo é considerado mais sustentável sob o ponto de vista da preservação dos recursos naturais uma vez que a massa total de um edifício deste tipo é muito inferior à de um edifício em sistema construtivo tradicional, o que significa que necessita de menos recursos naturais (Mateus, 2004).

No que diz respeito à energia primária total integrada num edifício LSF, esta é sensivelmente igual à quantidade de energia incorporada num edifício tradicional, que resulta do facto de ser necessária uma grande quantidade de energia para manufaturar o aço necessário. Contudo, sabe-se que uma estrutura de aço apresenta maior possibilidade de ser reutilizada ou reciclada do que uma estrutura de betão armado, de onde se conclui que o consumo energético, desde a sua

extensão até ao fabrico, poderá ser amortizado num maior período de tempo, e ainda que a menor massa dos elementos construtivos de um sistema LSF possibilita o uso de meios de transporte e equipamentos mais ligeiros, diminuindo o consumo energético nas fases de transporte, elevação e montagem (Mateus, 2004).

Quanto aos resíduos produzidos pode dizer-se que estes são minorados uma vez que grande parte dos elementos construtivos são produzidos em fábrica e há um forte controlo sobre os processos produtivos. Outra fase onde se consegue reduzir os resíduos é durante as instalações para ligações de energia, entre outros, que podem ser facilmente inseridas no interior das paredes antes do seu revestimento, evitando-se assim a produção de resíduos, ao contrário do que acontece na construção convencional. Relativamente à fase de demolição, normalmente a mais crítica no que diz respeito aos resíduos, e uma vez que o aço é reciclável e pode ser reaproveitado, há uma menor produção de resíduos (Mateus, 2004).

Assim, a construção metálica prevalece sobre a construção convencional relativamente à sustentabilidade uma vez que o seu nível de industrialização é muito superior, os elementos construtivos são produzidos em fábrica de forma bastante controlada, o que contribui para a redução do tempo de construção, mão-de-obra e produção de resíduos.

3 CASAS PASSIVAS

3.1 Introdução

As Casas Passivas são um tipo de edifício que pretende conciliar os conceitos de eficiência energética, conforto, acessibilidade, ecologia e sustentabilidade, conjuntamente. O intuito destas casas é assegurar um ambiente interior confortável no inverno, sem a necessidade de um sistema de aquecimento convencional.

Este conceito de casas é caracterizado, essencialmente, por uma elevada eficiência energética, onde os gastos energéticos podem apresentar uma redução até os 75% relativamente aos edifícios convencionais e de acordo com legislação atual. No que diz respeito ao conforto, estas casas apresentam não só uma temperatura uniforme, sem grandes oscilações, como também uma boa qualidade do ar interior, nomeadamente, mantendo a humidade relativa em níveis adequados e as emissões de CO₂ bastante reduzidas, assegurando o bem-estar e saúde dos habitantes. Relativamente aos preços praticados por este tipo de construção, não excede, em média, os 5% em relação a uma construção convencional. Em termos de sustentabilidade, estas casas promovem tanto a redução das emissões de CO₂, devido à eficiência energética, como a utilização de fontes de energia renovável, pois apresentam menores necessidades energéticas, mostrando, assim, uma menor dependência dos combustíveis fósseis (PASSIVH@, 2015).

A principal ideia da casa passiva é a combinação de um sistema de ventilação de recuperação de calor com um sistema solar passivo, cuidadosamente controlados. A utilização destes dois sistemas conjuntamente permite melhorar a eficiência energética do edifício e, ao mesmo tempo, melhorar a qualidade do ar interior. O conforto e a durabilidade são melhorados através da eliminação de correntes de ar e de aberturas no isolamento, que causam desconforto, condensações e problemas de mofo. As necessidades de arrefecimento e aquecimento são reduzidas através do cuidadoso controlo dos ganhos solares (ESSENCIALH@, 2015).

3.2 Casas “Passivhaus”

As casas “Passivhaus” são casas passivas, certificadas, que cumprem os requisitos da norma “Passivhaus”. Este conceito foi criado na Alemanha no final dos anos 80 e, desde então, tem vindo a crescer de forma bastante significativa. Em todo o mundo já são contabilizados mais de

55 mil edifícios certificados, e Portugal não é exceção, tendo obtido, em 2012, as primeiras casas passivas com certificação, Figura 3.1, localizadas em Ílhavo (P3P@, 2014).



Figura 3.1 – Primeiras casas "Passivhaus" em Portugal: a) Projeto A; b) Projeto B (HOMEGRID@, 2015).

Neste conceito, o edifício tem que cumprir cinco princípios básicos: garantir bons níveis de isolamento térmico nos elementos construtivos da envolvente do edifício, utilizar janelas e portas de excelente qualidade, definir um sistema de ventilação com recuperação de calor, garantir que o edifício é estanque ao ar, ou seja, que não existem trocas de ar com o exterior, e ainda devem ser evitadas pontes térmicas na envolvente do edifício (PASSIVH@, 2015).

3.2.1 Norma "Passivhaus"

A norma "Passivhaus" surgiu, pela primeira vez, em 1995, quando Wolfgang Feist, baseando-se na experiência obtida nos primeiros casos de estudo sobre as casas passivas de Darmstadt e Groß-Umstadt, reuniu os conceitos passivos adotados nos casos de estudo e classificou-os na norma "Passivhaus". Essa norma assentava essencialmente em três requisitos: um limite de energia, para aquecimento e arrefecimento; um requerimento de qualidade (conforto térmico); e um conjunto definido de sistemas passivos preferenciais que permitiam cumprir o limite energético e de qualidade sem um custo elevado. Esta norma incluía já todas as características do que é hoje considerada a norma Alemã Passivhaus, definida por cinco pontos principais (Gonçalves e Brotas, 2007).

No entanto, apesar do desenho passivo ser intrinsecamente associado à norma "Passivhaus" na Europa central, o mesmo não acontece nos países Sul da Europa. Nestas regiões, a maioria dos profissionais da área consideram que uma casa passiva é uma construção que foi realizada segundo os princípios do desenho solar, enquanto muitos discordam com a associação do termo "passivo" a uma norma específica de edifícios, onde se recomenda um sistema ativo de ventilação (Gonçalves e Brotas, 2007).

Neste seguimento, o consórcio “Passive-On” elaborou uma proposta de revisão para a aplicação da norma em climas quentes Europeus, de onde resultaram seis pontos para definir a norma “Passivhaus” para climas quentes (Gonçalves e Brotas, 2007):

- No aquecimento, as necessidades úteis não podem exceder o limite de 15 kWh por m² por ano de área útil.
- No arrefecimento, as necessidades de calor sensível úteis, não devem exceder o limite de 15 kWh por m² por ano de área útil.
- Para a energia primária, todos os consumos, incluindo o aquecimento ambiente e de águas quentes sanitárias, arrefecimento, iluminação e outros equipamentos elétricos não devem exceder o limite de 120 kWh por m² por ano da área útil.
- De modo a garantir a estanquidade do edifício, se a qualidade do ar interior e o elevado nível de conforto térmico forem assegurados por meio de um sistema mecânico de ventilação, a envolvente do edifício deve cumprir o teste de pressurização (50 Pa), de acordo com a norma EN 13829, em não mais de 0.6 rph⁻¹. Em localizações com condições de projeto com temperaturas acima de 0 °C, o teste de pressurização com um limite de 1.0 rph⁻¹ é normalmente suficiente para atingir o critério de aquecimento.
- De maneira a assegurar o conforto térmico durante o inverno, a temperatura interior deve ser mantida acima dos 20 °C, usando os consumos de energia acima mencionados.
- De maneira a assegurar o conforto térmico durante o verão, a temperatura interior deve permanecer entre a banda de conforto definida na norma EN 15251. Se existir um sistema principal de arrefecimento ativo, a temperatura operativa do espaço consegue ser mantida abaixo de 26 °C.

3.3 Soluções solares passivas

Os sistemas passivos são dispositivos construtivos adaptados nos edifícios que contribuem para o seu aquecimento ou arrefecimento natural, ou seja, a troca de energia térmica é feita por meio natural (Gonçalves e Graça, 2004).

No inverno, estação de aquecimento, estes sistemas denominam-se de sistemas passivos de aquecimento e têm como objetivo maximizar a captação do sol. Esta pode ser feita através de vãos envidraçados aos quais ainda se podem associar elementos massivos que permitem o armazenamento de energia e posterior utilização. Estes sistemas podem ser classificados segundo três conceitos (Gonçalves e Graça, 2004):

- Sistemas de Ganho Direto;
- Sistemas de Ganho Indireto;
- Sistemas de Ganho Isolado.

No verão, estação de arrefecimento, estes sistemas são intitulados de sistemas passivos de arrefecimento e têm o intuito de tirar partido de fontes frias que permitem arrefecer o edifício. Estes sistemas poder ser classificados segundo vários conceitos (Gonçalves e Graça, 2004):

- Ventilação;
- Arrefecimento pelo solo;
- Arrefecimento evaporativo;
- Arrefecimento radiativo.

3.3.1 Sistemas passivos de aquecimento

Os sistemas passivos destinados ao aquecimento são parte integrante dos edifícios e podem funcionar como coletores e acumuladores de energia solar e ainda podem desempenhar a função de distribuição da energia através de processos de transferência de calor naturais. Neste tipo de sistemas deve ter-se sempre em conta a área envidraçada a sul, para maior captação da radiação solar durante o inverno, e a massa térmica para absorção, armazenamento e distribuição de calor (Gonçalves e Graça, 2004).

✓ Sistemas de ganho direto

Um sistema de ganho direto, como representado na Figura 3.2, consiste na incidência da radiação solar nos espaços a aquecer e nas massas térmicas envolventes, paredes e pavimentos. As massas térmicas são de extrema importância uma vez que atenuam a amplitude térmica no espaço interior que se pretende aquecer. Durante o período diurno, a massa térmica absorve o calor resultante da incidência da radiação solar e, posteriormente, durante o período noturno, liberta a energia acumulada para o espaço interior (Gonçalves e Graça, 2004).

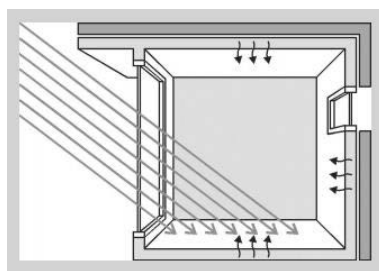


Figura 3.2 – Representação esquemática do sistema de ganho direto (Gonçalves e Graça, 2004).

As vantagens deste sistema é o maior rendimento energético, baixo custo, iluminação natural, o princípio de funcionamento é simples e apresenta uma grande flexibilidade na conceção arquitetónica. Como desvantagens destaca-se a perda de privacidade quando se opta por grandes vãos envidraçados, a radiação solar direta pode provocar degradação e descoloração

dos materiais utilizados no interior, pode ocorrer sobreaquecimento nos dias de maior calor e há a necessidade de incidência de radiação solar direta (Mendonça, 2005).

✓ **Sistemas de ganho indireto**

Neste tipo de sistemas o aquecimento do espaço interior é feito indiretamente e consiste na captação da energia solar por meio de uma parede acumuladora, que se situa entre a superfície de ganho e o espaço a aquecer, como mostra a Figura 3.3.

O sistema de ganho indireto mais utilizado é a parede de Trombe, que será objeto de estudo do presente trabalho. Neste sistema, a massa térmica capta e acumula a energia solar incidente, que posteriormente é transferida para o espaço por radiação pelo sistema que acumula a energia ou por convecção no caso de existir uma abertura entre o espaço a aquecer e o sistema de acumulação de energia (Gonçalves e Graça, 2004).

As aberturas de ventilação, caso existam, tornam a transmissão térmica mais rápida, uma vez que o ar quente da zona intermediária entra em circulação e aquece o compartimento por convecção natural (Moita, 1987).

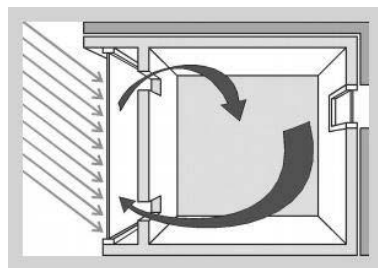


Figura 3.3 – Esquema de funcionamento de uma parede de Trombe (Gonçalves e Graça, 2004).

✓ **Sistemas de ganho isolado**

Nos sistemas de ganho isolado, a captação de ganhos solares e o armazenamento da energia captada encontram-se separados das áreas ocupadas dos edifícios. As estufas e os coletores de ar são exemplos deste tipo de sistema mais utilizados e combinam os efeitos de ganho direto e indireto.

A estufa, Figura 3.4, permite a transmissão da energia solar ao espaço adjacente por condução através da parede de armazenamento e, ainda, por convecção, caso hajam aberturas entre as divisões que permitam a circulação de ar (Gonçalves e Graça, 2004).

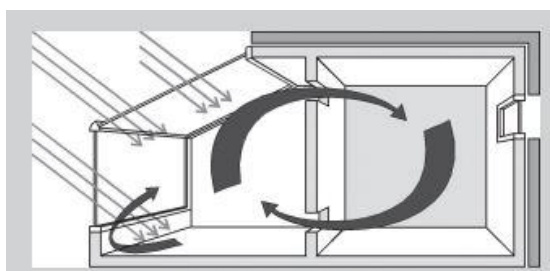


Figura 3.4 – Representação Esquemática do Sistema de Ganho Isolado (Gonçalves e Graça, 2004).

A grande vantagem deste sistema é que as estufas reduzem as perdas de calor do edifício, sendo a variação de temperaturas ao longo do dia nos espaços habitáveis muito pequena. Por outro lado, apresenta como principais desvantagens o seu preço e a grande oscilação de temperaturas dentro da estufa, tornando-a inabitável (Mendonça, 2005).

Os coletores de ar são sistemas constituídos por uma superfície de vidro e uma outra absorvedora, sem qualquer capacidade de armazenamento térmico, Figura 3.5. O seu funcionamento em termosifão permite ventilar os espaços interiores adjacentes ao longo de todo o ano. Este sistema permite aquecer o ar exterior a insuflar no interior do edifício numa situação de inverno, utilizando um dispositivo de captação solar que permite que toda a radiação absorvida seja transmitida diretamente ao ar de insuflação (Gonçalves e Graça, 2004).



Figura 3.5 – Funcionamento do coletor de ar: a) No inverno; b) No verão (Gonçalves e Graça, 2004).

No inverno, o ar é aquecido e insuflado no espaço adjacente por ventilação natural, permitindo o aquecimento direto do espaço. E no verão, o sistema permite a extração do calor do interior para o exterior sempre que for favorável.

3.3.2 Sistemas passivos de arrefecimento

Os sistemas passivos de arrefecimento utilizam fontes frias como estratégias para diminuir a temperatura no interior das habitações. As técnicas mais simples e eficazes de arrefecimento passivo consistem na prevenção dos ganhos solares, ou seja, tentar impedir a radiação solar direta de entrar no edifício. Isto pode ser conseguido através de opções arquitetónicas, as quais podem ser a utilização de sombreamento exterior, o tipo de vidro utilizado e respetivo controlo solar, utilização de isolamento na envolvente dos edifícios, ter em atenção as coberturas dos edifícios, a própria cor do edifício e ainda a sua massa térmica (Gonçalves e Graça, 2004).

As estratégias de arrefecimento passivo depende não só da existência de ambientes que atuem como fontes frias como também da diferença de temperaturas que permite dar origem a processos de transferência de calor significativos (Gonçalves e Graça, 2004).

✓ Ventilação Natural

A ventilação natural, esquematizada na Figura 3.6, é um processo de arrefecimento que tem por base a diferença de temperaturas entre o interior e o exterior.

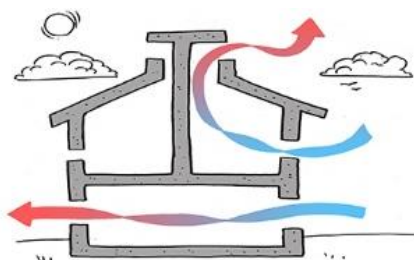


Figura 3.6 – Representação Esquemática da Ventilação Natural. (AUWORKSHOP@, 2015)

A maneira mais fácil de aproveitar a ventilação natural é abrir as janelas do edifício, permitindo a entrada e saída do ar, o que contribui para a circulação do ar e para a diminuição da temperatura interior do edifício (Cardoso, 2013).

✓ Arrefecimento pelo solo

O solo constitui uma importante fonte fria uma vez que no verão apresenta temperaturas inferiores à temperatura exterior. O arrefecimento pelo solo, Figura 3.7, pode ser conseguido por contacto direto, através da colocação de pisos subterrâneos em contacto com o solo, e/ou por contacto indireto, por entrada de ar no edifício através de um conjunto de condutas subterrâneas (Gonçalves e Graça, 2004).

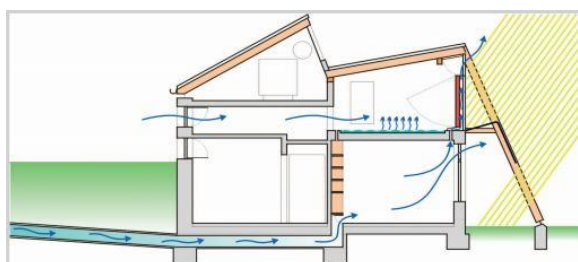


Figura 3.7 – Representação Esquemática do Sistema de Arrefecimento pelo Solo (Gonçalves e Graça, 2004).

✓ **Arrefecimento evaporativo**

Este tipo de sistema está associado à mudança de fase da água e é conseguido através da colocação de espelhos de água próximos do edifício. Assim, através da evaporação da água, o ar exterior é arrefecido assim como o ar que entra no edifício, Figura 3.8 (Gonçalves e Graça, 2004).

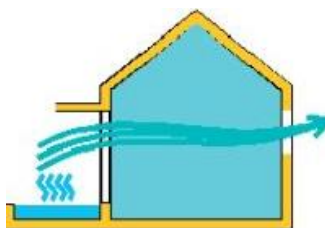


Figura 3.8 – Representação esquemática do Sistema de Arrefecimento Evaporativo (Gonçalves e Graça, 2004).

✓ **Arrefecimento radiativo**

Esta estratégia utiliza geralmente a cobertura dos edifícios, como representado na Figura 3.9, como elemento radiativo pois, sendo o elemento com maior exposição ao sol, favorece as trocas radiativas (Gonçalves e Graça, 2004).

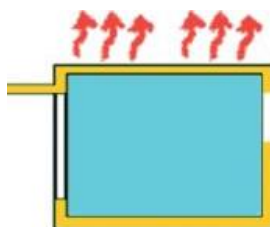


Figura 3.9 – Representação esquemática do Sistema de Arrefecimento Radiativo (Gonçalves e Graça, 2004).

4 PAREDE DE TROMBE

4.1 Introdução

A parede de Trombe é um sistema de paredes exteriores que surgiu no âmbito da arquitetura solar passiva. Neste tipo de arquitetura é tido em conta o clima do lugar de forma a adaptar a construção através de meios naturais. Esta tecnologia resulta numa solução confortável e, mais importante ainda, com menor impacto para o meio ambiente.

Este conceito já existe desde a antiguidade e surgiu pela primeira vez, em 1881, em Salem, quando Edward S. Morse patenteou o conceito de uma parede maciça de cor negra, uma caixa-de-ar, um envidraçado e aberturas através das quais o fluxo de ar pudesse ser regulado. Este conceito foi desenvolvido e popularizado em 1957 por Félix Trombe e Jacques Michel, em Odeillo, França, dando origem à chamada “Parede de Trombe”. Em 1967, foi construída a primeira casa com recurso a este sistema, como se pode ver na Figura 4.1 (Martins, 2010).



Figura 4.1 – Protótipo da casa criada por Félix Trombe e Jacques Michel, em Odeillo, França (Sá, 2011).

O desempenho dos sistemas solares passivos, como é o caso da parede de Trombe, é influenciado por vários fatores, nomeadamente pelas características dos seus constituintes, assim como também pela localização, orientação e forma do edifício, e, ainda pela área adequada de envidraçados por fachada.

As paredes de Trombe são mais eficazes em locais com fortes amplitudes térmicas diárias. Estes sistemas devem estar preferencialmente orientados a sul, pois, como já foi referido, é nesta posição que conseguem captar maior quantidade de radiação solar, e também porque esta orientação favorece a baixa altitude solar durante o inverno, sem alcançar ganhos excessivos durante o verão. Devem, ainda, ser ajustados dispositivos de proteção solar, de forma a evitar possíveis sobreaquecimentos durante a estação de arrefecimento. Esta solução contribui para o aumento do conforto térmico e para a redução das necessidades energéticas dos edifícios e, quando bem dimensionada, pode satisfazer até 15% das necessidades de aquecimento no período de inverno (Martins, 2010).

De acordo com um estudo realizado em França, cujo objetivo era que a casa em estudo tivesse um menor consumo de energia primária para aquecimento devido ao uso de uma parede de Trombe, ficou provado que a existência da parede de Trombe iria gerar uma poupança de energia primária operacional até 21% em relação à casa de base. Na Figura 4.2 pode-se observar os resultados obtidos em relação à percentagem de eletricidade utilizada na casa para realizar diferentes tarefas (Bojić et al, 2014).

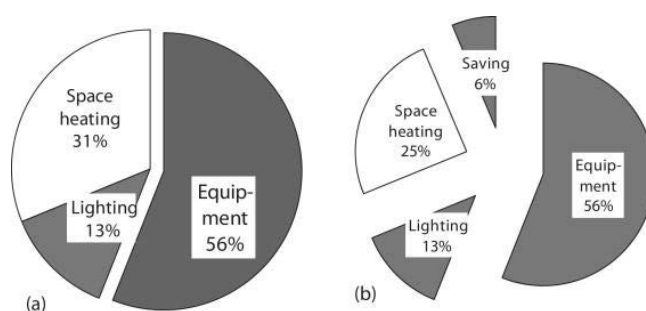


Figura 4.2 – Percentagem de eletricidade utilizada na casa para realizar diferentes tarefas:
a) Casa base; b) Casa com paredes de Trombe (Bojić et al, 2014).

Uma vez que esta técnica solar passiva será objeto de estudo do presente trabalho, neste capítulo será apresentada uma breve caracterização dos seus constituintes, bem como a descrição do seu princípio de funcionamento e diferentes tipos de sistemas de parede de Trombe.

4.2 Constituintes da parede de Trombe

Como já foi referido, a parede de Trombe é um sistema solar passivo de aquecimento por ganho indireto e é constituído essencialmente por um envidraçado orientado a sul, que corresponde à exposição solar que permite obter maior radiação, e uma parede maciça, normalmente de espessura variável e pintada de cor escura, onde podem ser introduzidas aberturas para a circulação de ar, Figura 4.3. Entre estes dois elementos é formada uma caixa-de-ar.

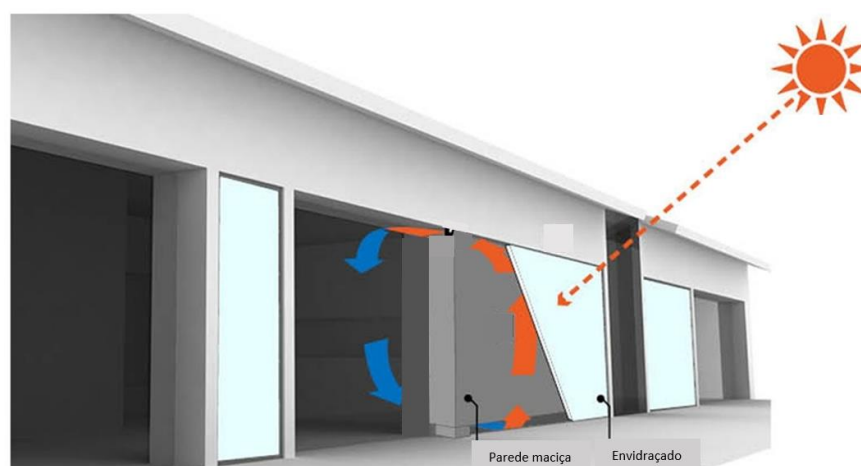


Figura 4.3 – Diagrama de uma parede de Trombe (DESIGN@, 2015).

O dimensionamento da parede de Trombe e a otimização do seu funcionamento são definidos tendo em conta cada um dos seus constituintes e o do seu conjunto. No que diz respeito à parede acumuladora, é necessário definir o material mais adequado, tendo em conta a sua capacidade de armazenamento térmico, assim como a espessura necessária para obter o desfaseamento ideal entre o período de acumulação e de libertação de calor para o interior do espaço adjacente. Relativamente ao envidraçado, é extremamente importante a condutibilidade térmica do vidro a utilizar, assim como a ponderação de dispositivos de sombreamento e de ventilação. É necessário também ter em consideração a espessura da caixa-de-ar pretendida, tendo em conta a quantidade de ar quente que é necessário armazenar para, posteriormente, ser transferida para o interior do espaço adjacente. Por outras palavras, o dimensionamento de uma parede de Trombe envolve a ponderação de vários parâmetros, das suas características e da forma como o seu comportamento influencia o desempenho do sistema (Sá, 2011).

4.2.1 Parede acumuladora

A parede acumuladora consiste numa parede de armazenamento térmico, geralmente constituída por materiais com elevada densidade, como por exemplo o betão, o tijolo maciço e pedra, pois são materiais com grande capacidade de armazenamento de calor, com condutibilidade térmica moderada, permitindo que o calor seja transferido e armazenado no interior do material, e emissividade elevada, que possibilita uma quantidade de radiação absorvida muito superior à que é refletida (Alves, 2014). Alguns dos exemplos do tipo de parede acumuladora são mostrados na Figura 4.4.

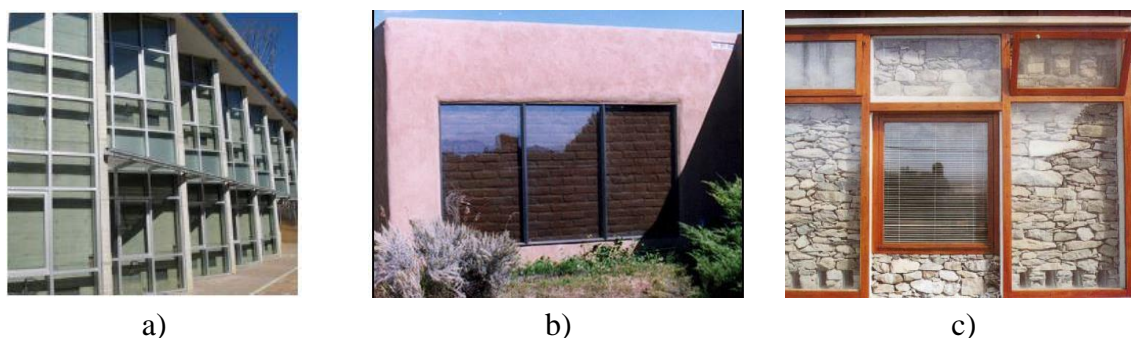


Figura 4.4 – Exemplos de diferentes paredes acumuladoras: a) Em betão (Sá, 2011); b) Em adobe (LXRDESIGN@, 2015); c) Em pedra (CAD@, 2015).

A característica mais importante no desempenho da parede de Trombe é a inércia térmica, pois diz respeito à capacidade de armazenamento térmico e de transmissão de calor deste sistema e pode ser usada no sentido de reduzir as necessidades de aquecimento e de arrefecimento ao longo do dia, uma vez que permite o controlo das flutuações de temperatura (Sá, 2011).

Na Figura 4.5 pretende-se mostrar o efeito da massa térmica na estabilização da temperatura interior de um espaço habitacional, de onde se conclui que há uma redução das oscilações de temperatura quando se recorre a elementos de elevada massa. Este efeito é útil quando se pretende reduzir as temperaturas máximas e armazenar calor para posterior libertação.

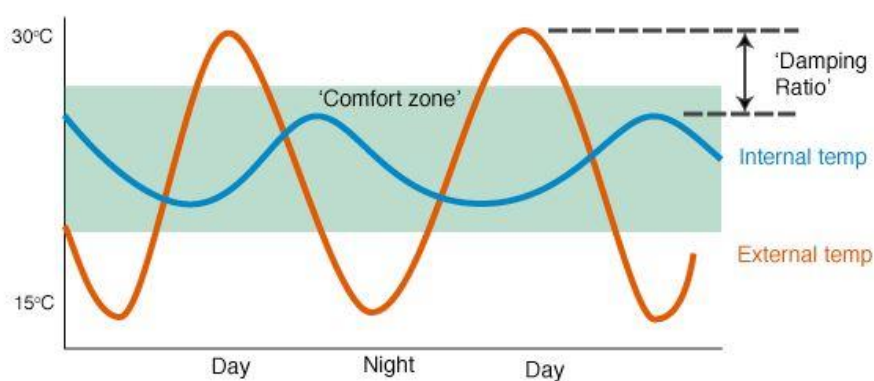


Figura 4.5 – Efeito da massa térmica na estabilização da temperatura interior (GREENSPEC@, 2015).

Em dias quentes, quando a radiação solar incide na massa, ela aquece e absorve o calor. Quando o ambiente se encontra a uma temperatura mais baixa que a da massa, esta irradia o calor armazenado para o espaço. Este efeito torna-se útil no inverno, em que a massa térmica armazena o calor dos ganhos solares durante o dia e transmite-o lentamente durante a noite.

Assim, a seleção do material para a construção da parede acumuladora deve ter em conta as suas características térmicas, sendo estas em função da densidade ou massa volúmica, da condutibilidade térmica, do calor específico e da capacidade calorífica. A densidade permite saber o grau de concentração de massa em determinado volume, a condutibilidade térmica representa a quantidade de calor transferido através dos materiais, o calor específico define a variação térmica de um material ao receber determinada quantidade de calor e, finalmente, a capacidade calorífica permite determinar o calor que é necessário fornecer a um material para induzir neste uma determinada variação de temperatura (Sá, 2011).

Por outro lado, existem outras características que influenciam a capacidade de absorção do calor da massa térmica de um material, sejam elas a cor, a textura e a espessura. Uma superfície exterior cujo material seja pintado de cor escura é capaz de absorver mais calor que resulta num aumento da temperatura do espaço que se pretende aquecer. A espessura é outro fator de grande importância uma vez que influencia as oscilações da temperatura interior do espaço. Esta pode variar em função das propriedades do material e do atraso térmico que se pretende, sendo um fator decisivo para se alcançar a devolução noturna do calor ao edifício (Sá, 2011).

4.2.2 Envidraçado

O envidraçado é o elemento construtivo que fica no exterior da parede de Trombe, pois é através dele que a radiação solar, e o respetivo calor, incide e é, posteriormente, conservado na caixa-de-ar, durante o dia. Este elemento tem também como função impedir que o calor acumulado pela parede acumuladora se difunda facilmente para o exterior. Desta maneira é fundamental ter em consideração as características do envidraçado, a espessura e o tipo de vidro, a sua localização e orientação na envolvente do edifício e a geometria de insolação.

Os envidraçados podem ser os elementos responsáveis pela maior quantidade de ganhos ou de perdas de calor. O desempenho térmico destes elementos é em função de algumas características, nomeadamente o coeficiente de transmissão térmica, U , o fator solar, g , e a transmitância, α . O coeficiente de transmissão térmica traduz a capacidade do material de cada camada do elemento em conduzir o calor, é expresso em $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ e engloba a contabilização da transferência de calor por condução, convecção e radiação. A emissividade é mais uma propriedade que também traduz o comportamento do vidro relativamente à energia solar, uma vez que representa a capacidade do vidro em absorver ou emitir energia a baixa temperatura. O fator solar do vidro representa a relação entre a energia solar transmitida através do vidro para o interior e a energia solar nele incidente. Quanto menor for o fator solar do vidro, menores serão os ganhos solares obtidos. E, por último, a transmitância representa a fração da luz incidente com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra de matéria (Sá, 2011).

Uma das características mais importantes neste constituinte é o tipo de vidro e respetiva espessura. Os vidros utilizados podem ser simples, duplos ou triplos. Um vidro duplo tem melhor desempenho térmico que um vidro simples, pois o seu coeficiente de transmissão térmica é menor, assim como o vidro triplo também irá prevalecer sobre o vidro duplo pela mesma razão.

De modo a obter o máximo desempenho da parede de Trombe, a área do envidraçado deve ser igual à área da parede acumuladora e é necessário ter em conta que as características, como a superfície do vidro, o tipo de vidro, a espessura das lâminas de vidro e da lâmina de ar, o material e a permeabilidade da caixilharia do envidraçado, devem ser ajustadas a cada tipo de parede de Trombe em função das propriedades dos restantes elementos construtivos.

4.2.3 Caixa-de-ar

A caixa-de-ar encontra-se entre o envidraçado e a parede acumuladora, e é aí que fica armazenado o calor proveniente da radiação solar incidente, criando-se o “efeito de estufa”. Este elemento deve ser projetado de tal forma que permita aumentar a quantidade de calor que pode ser acumulado nesse espaço, o que leva ao aumento dos ganhos e à diminuição das perdas de calor. Os fatores que mais influenciam os seus efeitos são a espessura e a altura da caixa-de-ar. A espessura tem influência na transmissão de calor para o interior do espaço adjacente, quer por condução através da parede de massa elevada, quer por convecção através das aberturas de ventilação. No entanto, a espessura que deve ser usada é bastante variável, sendo ajustada em função do comportamento pretendido e das condições climáticas (Sá, 2011).

4.2.4 Dispositivos de sombreamento

A parede de Trombe deve também incluir dispositivos de sombreamento como medida não só para evitar o sobreaquecimento durante o verão, mas também para funcionar como dispositivo de oclusão noturno durante o inverno, com o intuito de reduzir as perdas para o exterior durante a noite (Martins, 2010).

Existem inúmeros tipos de dispositivos de sombreamento solar e são classificados em função da sua localização, exteriores ou interiores, e ainda subdivididos tendo em conta o manuseamento, fixos ou móveis. Normalmente, os mais utilizados são as palas exteriores ou estores, conseguindo-se alcançar um maior desempenho quando se opta por uma combinação de dispositivos interiores e exteriores (Palhinha, 2009).

As palas exteriores, Figura 4.6, são dispositivos exteriores fixos e são projetadas de modo a obter o máximo de benefícios dos raios solares durante o inverno, deixando que os raios passem

pelo vão envidraçado uma vez que a posição do sol é mais baixa, e de forma a restringir os ganhos solares durante o verão.

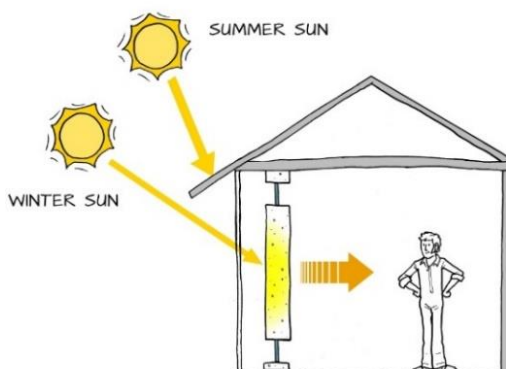


Figura 4.6 – Exemplo do efeito de uma pala de sombreamento durante as estações de inverno e verão (AUWORKSHOP@, 2015).

4.2.5 Sistemas de ventilação

A introdução de aberturas de ventilação na parede de Trombe leva a que existam diferentes designações para este sistema passivo. Parede de Trombe não ventilada é o nome que se dá a um sistema onde não está previsto qualquer tipo de sistema de ventilação. No caso de serem incluídas aberturas para ventilação, então o sistema passa a ser denominado de parede de Trombe ventilada e, neste caso, podem existir dois tipos de sistemas de ventilação. As aberturas para ventilação podem localizar-se apenas na parede acumuladora, situação correspondente à parede de Trombe clássica, ou podem existir na parede acumuladora e no envidraçado simultaneamente, designando-se, neste caso, por parede de Trombe duplamente ventilada (Sá, 2011).

Na parede de Trombe não ventilada, como não ocorre circulação de ar a transmissão de calor para o interior do compartimento é feita por condução, radiação e convecção através da parede acumuladora, enquanto que na parede de Trombe ventilada o aquecimento ou arrefecimento do espaço ocorre também por convecção de ar através das aberturas existentes na parede acumuladora (Sá, 2011).

No caso dos sistemas com ventilação, a introdução de ar quente no compartimento é mais rápida. A massa de ar quente que se encontra na caixa-de-ar entra no compartimento através das aberturas superiores, por ser menos densa, e sai do compartimento pelas aberturas inferiores, por termocirculação, eliminando a necessidade de ventilação por meios mecânicos (Sá, 2011).

É ainda de salientar a importância da parede de Trombe duplamente ventilada, já referida acima. Este tipo de sistema é uma solução para combater os problemas de sobreaquecimento durante o verão. As aberturas no exterior, ou seja, no envidraçado, devem ser projetadas de forma a poderem ser facilmente abertas ou fechadas quando necessário, permitindo o arrefecimento da caixa-de-ar durante a estação quente, como se pode ver na Figura 4.7 (Sá, 2011).

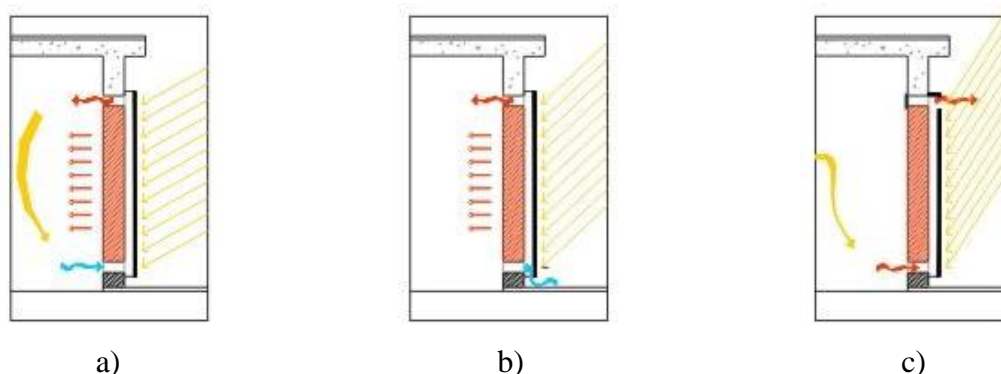


Figura 4.7 – Esquema de funcionamento da Parede de Trombe consoante as estações do ano: a) No inverno; b) No outono/primavera; c) No verão (CAD@, 2015).

4.3 Princípio de funcionamento

Após terem sido expostas, de uma forma geral, os principais constituintes da parede de Trombe, considerou-se conveniente apresentar de forma sintetizada o funcionamento da parede de Trombe como um sistema único. Desta forma tornar-se importante clarificar o modo de funcionamento deste sistema para os vários tipos de sistemas de parede de Trombe que existem.

4.3.1 Parede de Trombe Não Ventilada

A parede de Trombe não ventilada é o sistema mais simples e é composto por um vão envidraçado, por uma caixa-de-ar e pela parede acumuladora sem aberturas para ventilação, não havendo, por isso, circulação de ar dentro da caixa-de-ar, Figura 4.8.

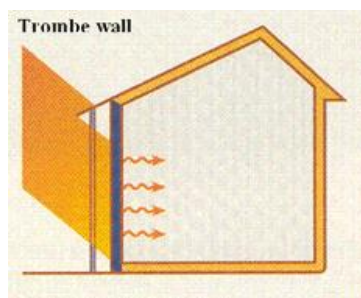


Figura 4.8 – Funcionamento de uma parede de Trombe não ventilada (TGH@, 2015).

De uma forma geral, a parede de Trombe não ventilada apresenta menor rendimento que uma parede de Trombe ventilada, pois a transmissão do calor para o interior é mais inconstante. Nestes sistemas, o aquecimento é feito por ação direta da radiação solar que atravessa o vidro e incide na parede maciça, cuja superfície deve ser de cor escura para absorver uma maior quantidade de energia. O calor acumulado na parede é, posteriormente, libertado para o interior da habitação através de fenómenos de condução, convecção e radiação. O processo de transferência de calor é feito muito lentamente, ou seja, o calor é acumulado na parede durante o dia e libertado, gradualmente, durante a noite, Figura 4.9 (Sá, 2011).



Figura 4.9 – Esquema de funcionamento da parede de Trombe não ventilada:
a) Durante o dia; b) Durante a noite (Martins, 2010).

4.3.2 Parede de Trombe Ventilada

A parede de Trombe ventilada é muito semelhante à parede de Trombe não ventilada. A principal diferença é a existência de aberturas, no topo e na base da parede acumuladora, para ventilação natural, Figura 4.10.

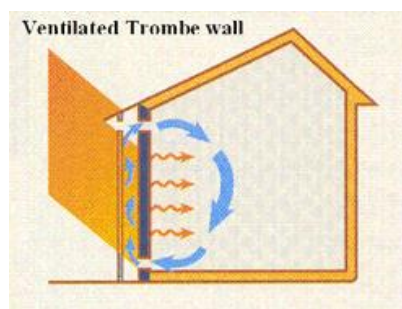


Figura 4.10 – Funcionamento de uma parede de Trombe ventilada (TGH@, 2015).

A escolha de colocar ou não as aberturas de termocirculação na parede depende essencialmente dos períodos em que se pretende que ocorra o aquecimento. No caso do objetivo ser o aquecimento durante o dia, então torna-se fundamental a existência de orifícios para circulação de ar (Martins, 2010).

A radiação solar que atravessa o envidraçado é captada uma parte pela parede acumuladora e outra parte é transferida para o ar contido entre o envidraçado e a parede. O calor absorvido é, posteriormente, transmitido para o interior do compartimento por condução e radiação, através da parede acumuladora, e por convecção, através das aberturas (Martins, 2010).

Para um melhor desempenho do sistema, as aberturas de ventilação devem possibilitar o controlo do fluxo de ar de modo a evitar possíveis sobreaquecimento do espaço, ou mesmo até para evitar perdas de calor para o exterior durante a noite. O correto funcionamento da parede de Trombe ventilada deve ser assegurado durante o dia e noite, tanto para a estação de aquecimento como para a estação de arrefecimento.

No inverno, durante o dia, as aberturas de ventilação devem estar abertas quando a temperatura na caixa-de-ar é superior à temperatura do compartimento e seja necessário o seu aquecimento. Durante a noite, as aberturas de ventilação devem ser fechadas, se possível, de modo a evitar perdas de calor, tornando-se também necessário a implementação de dispositivos de oclusão noturnos. A Figura 4.11 mostra o funcionamento deste sistema durante o inverno.

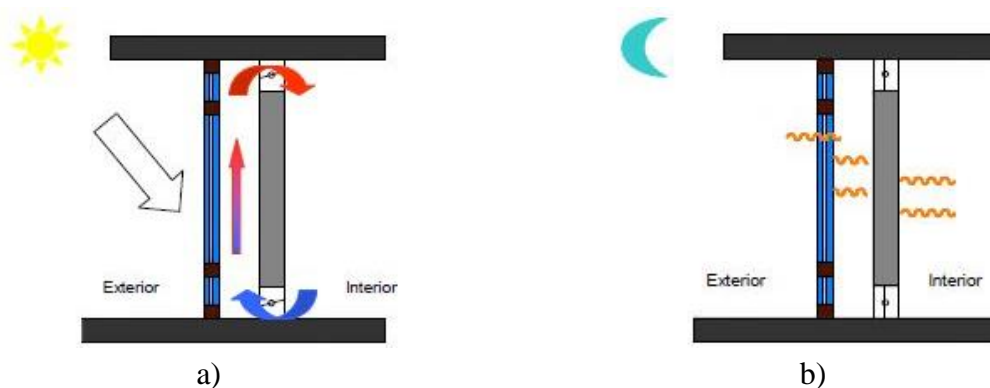


Figura 4.11 – Esquema de funcionamento da parede de Trombe ventilada no inverno:
a) Durante o dia; b) Durante a noite (Martins, 2010).

É no verão que mais se manifesta a extrema importância de uma parede de Trombe duplamente ventilada. Neste caso, durante o dia, a abertura superior na parede deve estar fechada e a abertura superior no envidraçado deve estar aberta. Devem ainda ser previstos dispositivos de sombreamento. Durante a noite, devem ser abertos os orifícios de ventilação do envidraçado e

fechados os existentes na parede acumuladora, de maneira a facilitar o arrefecimento da parede, como se mostra na Figura 4.12 (Sá, 2011).



Figura 4.12 – Esquema de funcionamento da parede de Trombe ventilada no verão: a) Durante o dia; b) Durante a noite (Martins, 2010).

4.3.3 Parede de Trombe-Michel Composta

A parede de Trombe-Michel composta é semelhante a uma parede de Trombe clássica com aberturas de termocirculação, apresentando como diferença a introdução de isolante na parte de trás da parede maciça, como se pode ver na Figura 4.13.

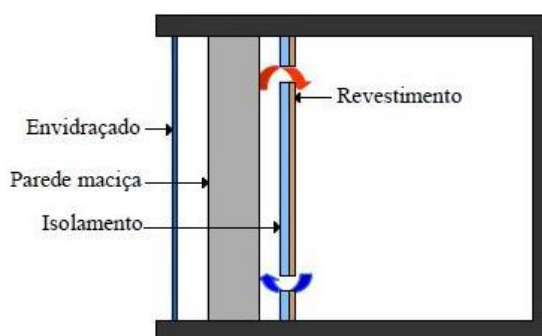


Figura 4.13 – Esquema da parede de Trombe-Michel composta (Martins, 2010).

Na parede de Trombe-Michel composta, a radiação solar é absorvida pela parede acumuladora, transferida de seguida para a camada de ar interior por condução e, posteriormente, cedido para o interior do compartimento por convecção, através do fenómeno de termocirculação de ar entre a parede acumuladora e a camada de isolamento térmico (Shen et al, 2007).

Este tipo de sistema foi desenvolvido no sentido de diminuir as perdas de calor significativas durante os períodos de frio, devido à baixa resistência térmica da parede maciça. E apresenta

como principais desvantagens a elevada espessura, que limita o espaço habitacional, a dificuldade de execução e, conseqüentemente, custos de construção mais elevados.

4.3.4 Parede de Trombe Fotovoltaica

A parede de Trombe fotovoltaica é análoga à parede de Trombe duplamente ventilada, mas com a adição de células fotovoltaicas ao envidraçado exterior e ainda com isolamento térmico opcional, Figura 4.14 (Martins, 2010).

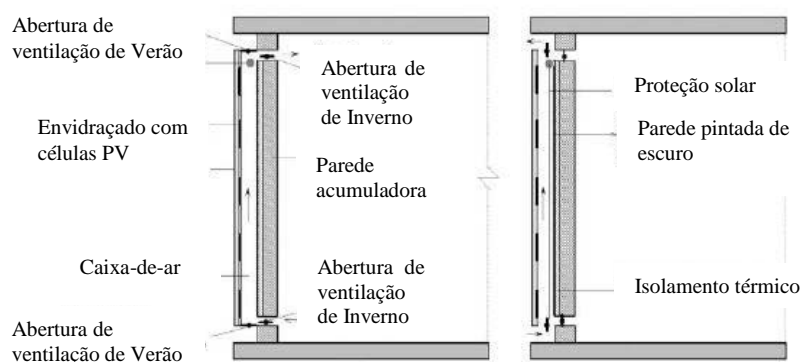


Figura 4.14 – Funcionamento da parede de Trombe fotovoltaica (Martins, 2010).

Neste sistema, parte da radiação incidente é acumulada no painel de vidro e outra parte é absorvida pela parede acumuladora. O calor é transferido para o interior do compartimento por condução, através da parede acumuladora, e por convecção, através das aberturas de termocirculação. Este tipo de parede tem ainda o proveito de uma possível produção de energia elétrica (Martins, 2010).

4.3.5 Paredes de Trombe com Materiais de Mudança de Fase (PCMs)

Os materiais de mudança de fase, conhecidos pela sigla em inglês PCMs, abreviatura de *Phase Change Materials*, têm capacidade de armazenamento de energia calorífica, sendo esta libertada consoante a mudança de fase.

A parede de Trombe com materiais de mudança de fase pode ser gerada de duas formas diferenciadas, a energia pode ser absorvida incorporando PCMs encapsulados nos materiais de construção padrão, tais como betão, cimento, placas de gesso e outros revestimentos, ou então pela introdução de PCMs sem encapsulamento nos materiais utilizados, como por exemplo o tijolo de vidro (Martins, 2010).

O funcionamento deste sistema é bastante simples. Nos períodos em que a temperatura ambiente aumenta, o calor é absorvido pelo PCM, conforme se dá a mudança para o estado líquido, enquanto que nos períodos em que a temperatura diminui, ocorre a solidificação do PCM, resultando na libertação de energia sob a forma de calor (Martins, 2010).

Para um correto funcionamento deste tipo de parede é extremamente importante controlar a temperatura de fusão e de solidificação do material. A temperatura de fusão deve ser mais baixa que a temperatura de conforto para o verão, ao passo que a temperatura de solidificação deve estar acima da temperatura de conforto para o inverno. No entanto, ambas as temperaturas devem ser o mais próximo possível das temperaturas de conforto (Martins, 2010).

✓ Parede de Trombe com PCMs encapsulados

Este tipo de parede é constituída por uma parede acumuladora, revestimento da parede com PCMs encapsulados, a caixa-de-ar e um envidraçado triplo, designado por TIM (*Transparent Insulation Material*), Figura 4.15 (Martins, 2010).

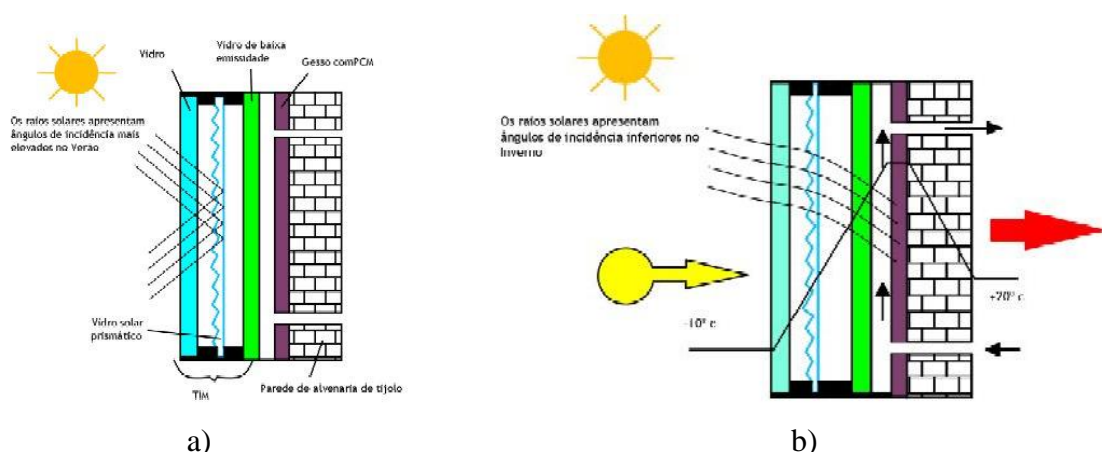


Figura 4.15 – Princípio de funcionamento da parede de Trombe com PCMs:
a) No verão; b) No inverno (Sá, 2011).

Como se pode verificar na Figura 4.15, o ângulo de incidência dos raios solares é menor no inverno e maior no verão e, como tal, a camada de TIM é concebida para transmitir os raios solares com menor ângulo de incidência e refletir os raios solares com maior ângulo de incidência. Desta forma, no inverno, a radiação solar é absorvida pelo TIM, sendo armazenada no revestimento da parede acumuladora com os PCMs encapsulados. O calor armazenado é depois transmitido para o compartimento por circulação de ar através das aberturas. Por outro lado, no verão, os raios solares são refletidos pelo TIM de maneira a evitar o sobreaquecimento do espaço (Martins, 2010).

✓ Parede de Trombe com PCMs incorporados nos materiais

Este tipo de parede é muito semelhante a uma parede de Trombe clássica, diferenciando-se pela parede acumuladora, que, neste caso, é constituída por um material mais leve e translúcido, também de grande capacidade térmica, como por exemplo blocos de vidro com PCMs incorporados (Martins, 2010).

Este sistema, como se mostra na Figura 4.16, é constituído por uma parede acumuladora de blocos de vidro contendo PCMs, aberturas de ventilação reguláveis, uma caixa-de-ar e um envidraçado exterior com um sistema manual de ventilação, que deve permanecer aberto no verão e fechado durante o inverno. Deve ainda ser projetada uma abertura de ar na fachada a norte com a finalidade de promover a ventilação natural no verão (Sá, 2011).

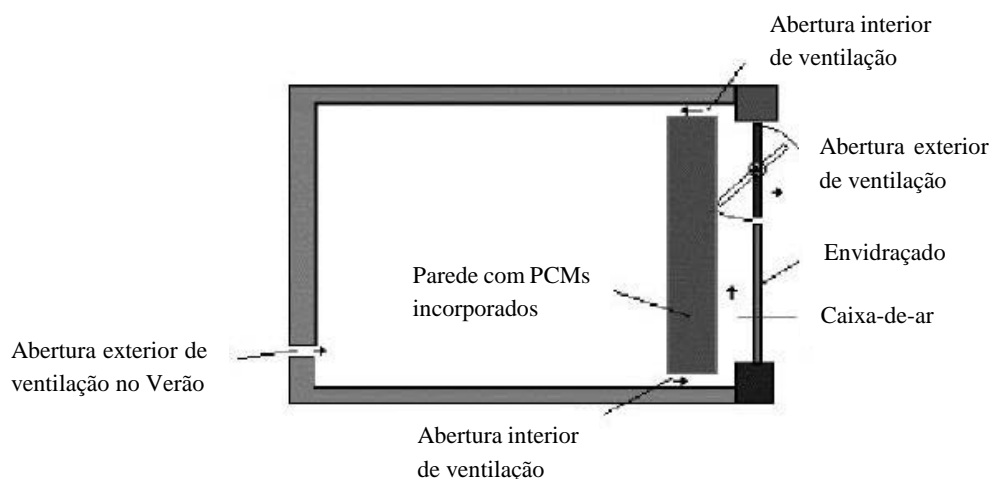


Figura 4.16 – Princípio de funcionamento da parede de Trombe com PCMs incorporados (Martins, 2010).

Durante o inverno, os raios solares incidentes atravessam o envidraçado aquecendo o ar que existe na caixa-de-ar e, conseqüentemente, aquecendo também o PCM constituinte da parede de blocos de vidro, que passa do estado líquido ao estado sólido. Ocorre a transferência de calor para o interior do compartimento através das aberturas de ar que existem na parede acumuladora. Durante o verão, as aberturas de ar exteriores devem permanecer abertas, promovendo a ventilação natural e evitando o sobreaquecimento do espaço (Martins, 2010).

4.3.6 Parede de Trombe com Isolante Transparente

A parede de Trombe com isolamento transparente é também semelhante à parede de Trombe clássica, apenas diferenciando o material utilizado na parte exterior da parede, sendo, neste caso, utilizado um isolamento transparente, Figura 4.17.



Figura 4.17 – Isolamento transparente (Martins, 2010).

Uma vez que os materiais de isolamento transparente combinam boas propriedades de transmissão solar com elevada resistência térmica esta solução é considerada bastante viável. Também não se formam condensações tão facilmente, o que contribui para um efeito estético mais agradável que o vidro convencional. Por outro lado, apresenta como desvantagem as altas temperatura que se formam na face exterior da parede acumuladora, que podem danificar o isolamento e criar problemas de conforto no verão. O possível sobreaquecimento no verão deve ser acautelado com recurso a dispositivos de sombreamento (Martins, 2010).

4.3.7 Parede de Trombe em Malha

A parede de Trombe me malha é constituída por uma parede interior em malha de tijolos cerâmicos ou blocos de betão, uma caixa-de-ar e o envidraçado exterior, Figura 4.18.

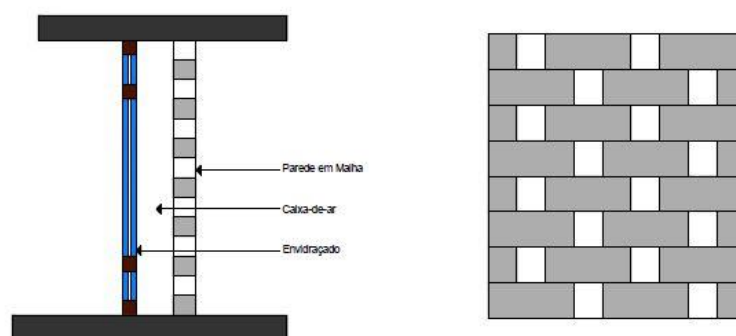


Figura 4.18 – Representação da parede de Trombe me malha (Martins, 2010).

A sua configuração é mais complexa do que a da parede de Trombe clássica, já que esta possui aberturas retangulares de igual dimensão e uniformemente distribuídas, enquanto a parede de

Trombe clássica pode não ter aberturas de ventilação, ou no caso de existirem, apenas são colocadas no topo e na base (Sá, 2011).

4.4 Vantagens e Inconvenientes

A parede de Trombe é um sistema solar passivo e, como tal, apresenta diversas vantagens mas também alguns inconvenientes. Perante o cenário energético atual, esta pode ser uma solução que vai de encontro com uma construção sustentável. De seguida são expostas as principais vantagens e desvantagens que este tipo de sistema apresenta.

4.4.1 Vantagens:

- Reduzem o consumo de energias não renováveis para o aquecimento;
- As oscilações de temperatura no interior do edifício são menores, contribuindo para o aumento do conforto térmico;
- Proteção contra os raios ultravioleta;
- Maior privacidade do compartimento interior;
- Podem atuar como sistema de aquecimento durante o inverno e de arrefecimento durante o verão, através da circulação do ar interior;
- Sistemas passivos de baixa manutenção.

4.4.2 Desvantagens:

- Pode ocorrer formação de condensações no envidraçado;
- Para maior eficácia exigem uma orientação a sul;
- Perdas térmicas noturnas elevadas no caso do isolamento não ser bem concebido;
- Podem provocar sobreaquecimento no verão no caso de não serem previstos dispositivos de proteção solar;
- A espessura da parede acumuladora limita o espaço habitável;
- As paredes acumuladoras impedem a iluminação natural e a vista para o exterior.

5 CASO DE ESTUDO

5.1 Introdução

No presente trabalho foi analisado o comportamento térmico de um módulo simples, com uma parede de Trombe, para as condições climáticas da cidade de Coimbra, Portugal. Neste estudo começou-se por fazer uma modelação numérica do modelo que se pretendia testar, Figura 5.1. Após a modelação fez-se uma análise mais detalhada do modelo por forma a verificar se os resultados obtidos para a distribuição da temperatura e do escoamento de ar eram coerentes. Tendo em conta esses resultados foi feita, posteriormente, uma análise paramétrica.



Figura 5.1 – Fotografia do protótipo experimental.

Para a realização deste trabalho utilizou-se o *software* de modelação do comportamento energético de edifícios, o *DesignBuilder*, versão 4.2.0.054, que surge como interface gráfica do *EnergyPlus*, que é o responsável pela realização dos cálculos e simulações. Este programa permite desenhar e modelar um edifício, caracterizá-lo, bem como os seus sistemas energéticos, e realizar simulações de forma a determinar consumos energéticos e potências de climatização e ainda testar estratégias de otimização energética. O *DesignBuilder* oferece uma plataforma de modelação de edifícios em 3D de fácil e rápida utilização.

Este tipo de modelação permite verificar o desempenho na fase de projeto e estudar diversas soluções antes da fase de construção do edifício, de forma a minimizar os consumos energéticos e a melhorar o conforto térmico dos habitantes, uma vez que permite efetuar simulações muito fiáveis. Assim, depois de construído o modelo do edifício, é possível alterar diversos elementos construtivos, desde o nível mais geral, o edifício, ao nível mais detalhado, partes constituintes das zonas, até se obter uma solução satisfatória.

Este programa permite desenvolver um modelo geométrico tridimensional de um edifício, não só para estudar o design do edifício, como a sua orientação e forma, mas também atribuir modelos e características das soluções construtivas, modo de utilização do edifício no que respeita à ocupação, sistemas de iluminação, equipamentos elétricos e sistemas AVAC.

5.2 Introdução de dados

Este subcapítulo teve como objetivo compreender melhor o funcionamento do programa. Este programa trabalha em hierarquia de dados. Na Figura 5.2 pode-se observar o esquema geral da janela do programa, onde se podem fazer diversas operações. Na barra de ferramentas estão localizadas todas as componentes utilizadas para a construção geométrica do modelo.

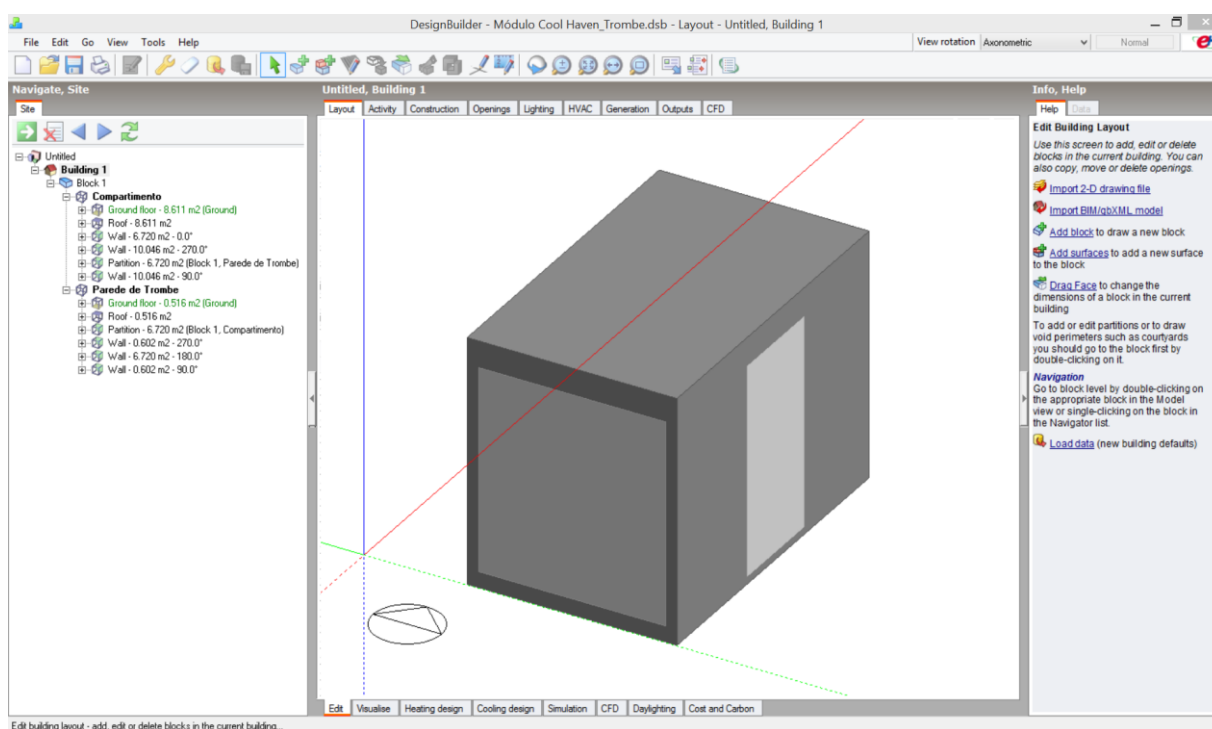


Figura 5.2 – Layout do DesignBuilder.

Do lado esquerdo do *layout* está o Painel de Navegação, onde se pode ver a sequência da hierarquia de dados. Quando é introduzida uma alteração num determinado nível, essa alteração é aplicada a todos os níveis subjacentes ao qual a alteração foi efetuada. Existem ainda os Separadores de Dados, na parte superior, onde se insere o tipo de atividade, o dimensionamento construtivo, aberturas, iluminação e sistemas AVAC, e os Separadores de Telas, na parte inferior, onde se pode observar o modelo, o projeto de aquecimento e arrefecimento, as simulações, a análise CFD e a iluminação natural. No lado direito existe o Painel de Informação que serve como guia de ajuda.

Ao iniciar a modelação no *DesigBuilder* é necessário escolher a cidade onde se localiza o edifício, neste caso, Coimbra. Posteriormente, efetuou-se a definição geométrica do modelo, implementando-se já todos os elementos construtivos.

5.2.1 Dados climáticos

A escolha do local de implantação do edifício determina as condições climáticas para as quais irão ser feitas as simulações. Assim, as simulações foram realizadas para as semanas de projeto tanto para o inverno como para o verão. As semanas de projeto representam o período mais frio e mais quente. Para este estudo foram adotadas estas semanas por serem representativas das semanas mais desfavoráveis. Isto significa que se a parede de Trombe mostrar eficiência para o período considerado mais frio, espera-se que numa semana típica apresente um bom desempenho.

A escolha das semanas de projeto é feita de forma automática pelo programa através de uma análise estatística dos dados climáticos relativos à região. Tendo em conta a base de dados é feita uma média ao longo de alguns anos, de onde resultam os períodos utilizados nestas simulações.

Para a simulação de inverno, os resultados obtidos dizem respeito ao período de 13 a 19 de Janeiro. Esta semana começa num domingo e termina num sábado. Para a simulação de verão, foi analisado o período de 10 a 16 de Agosto, sendo que este período tem início num sábado e termina numa sexta-feira. Os valores da temperatura e da radiação solar nos períodos referidos encontram-se na Figura 5.3 e Figura 5.4, sendo a fonte de informação destes dados o IWEC (*International Weather for Energy Calculation*).

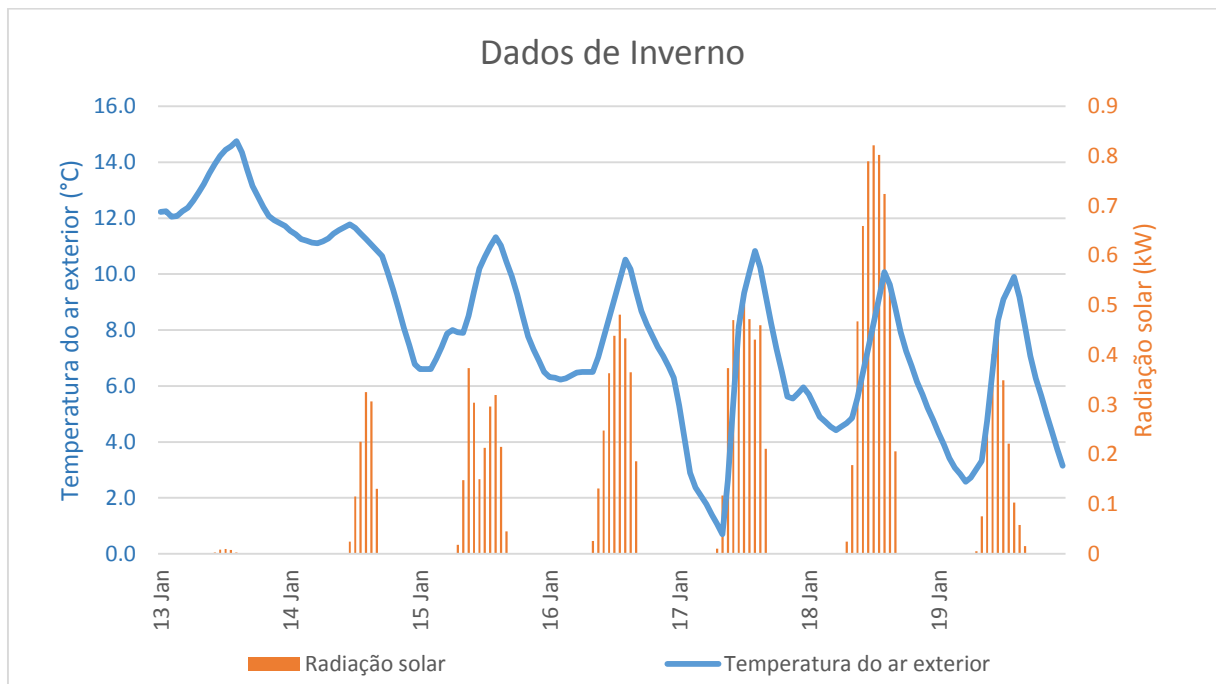


Figura 5.3 – Valores horários para a semana de projeto de inverno em Coimbra (IWEC).

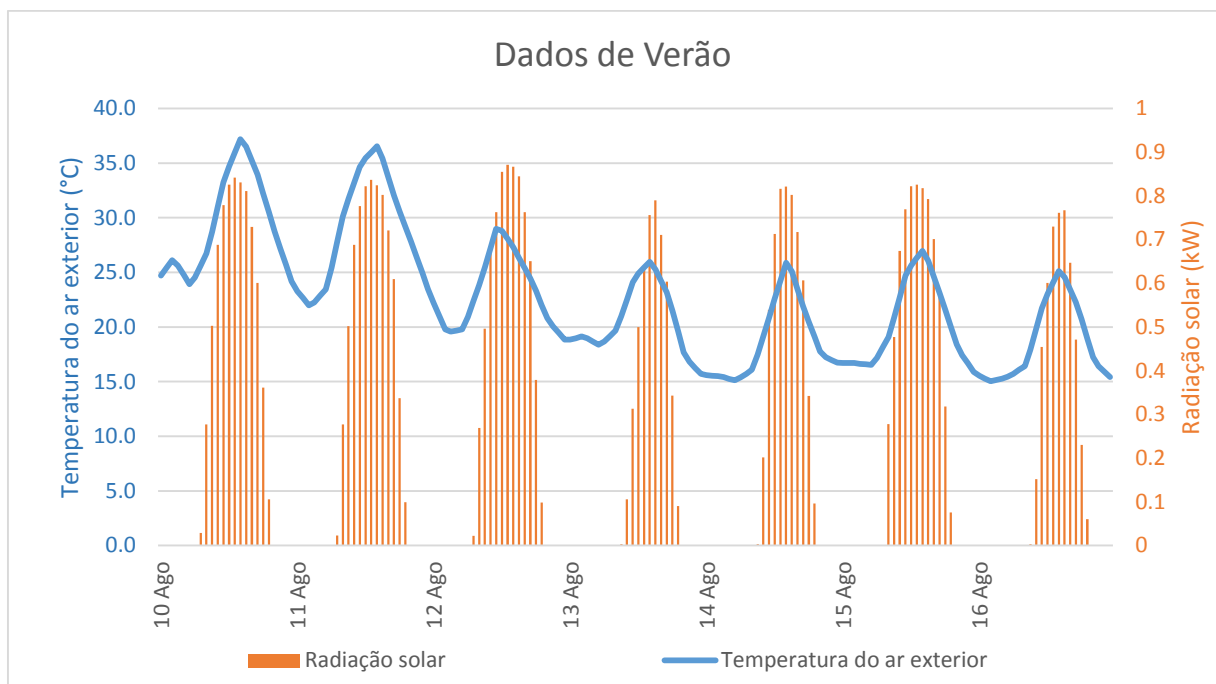


Figura 5.4 – Valores horários para a semana de projeto de verão em Coimbra (IWEC).

5.2.2 Geometria

A configuração do modelo em análise é apresentada na Figura 5.5 e Figura 5.6, e corresponde a um módulo simples com estrutura leve em aço. Possui dimensões de $3,8 \times 2,4$ m, ou seja, uma área de $9,12 \text{ m}^2$. As fachadas a norte e sul têm uma área de $6,72 \text{ m}^2$ e as fachadas a este e oeste têm uma área de $10,64 \text{ m}^2$. Na fachada orientada a este existe uma porta de $2,40 \times 1,15$ m e na fachada a oeste há uma janela de $1,18 \times 1,00$ m. Tanto a porta como a janela encontram-se centradas na fachada do módulo.

Na Figura 5.5 é possível observar o modelo numa perspetiva axonométrica e em planta. A planta permite visualizar a disposição da parede de Trombe. No *layout* é diferenciado o espaço habitável e o espaço que diz respeito à parede de Trombe a cores diferentes.

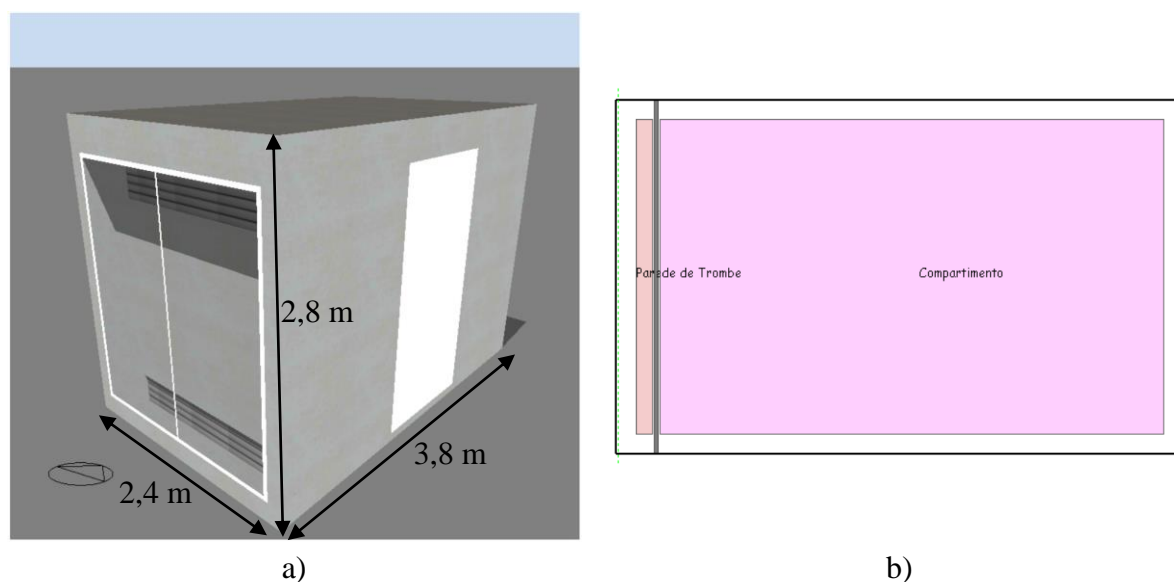


Figura 5.5 – Geometria do compartimento/módulo em:

a) Perspetiva axonométrica; b) Planta.

De seguida são apresentadas na Figura 5.6 todas as fachadas do módulo. Nesta figura pode ser visualizada a geometria da parede de Trombe, da janela e da porta.

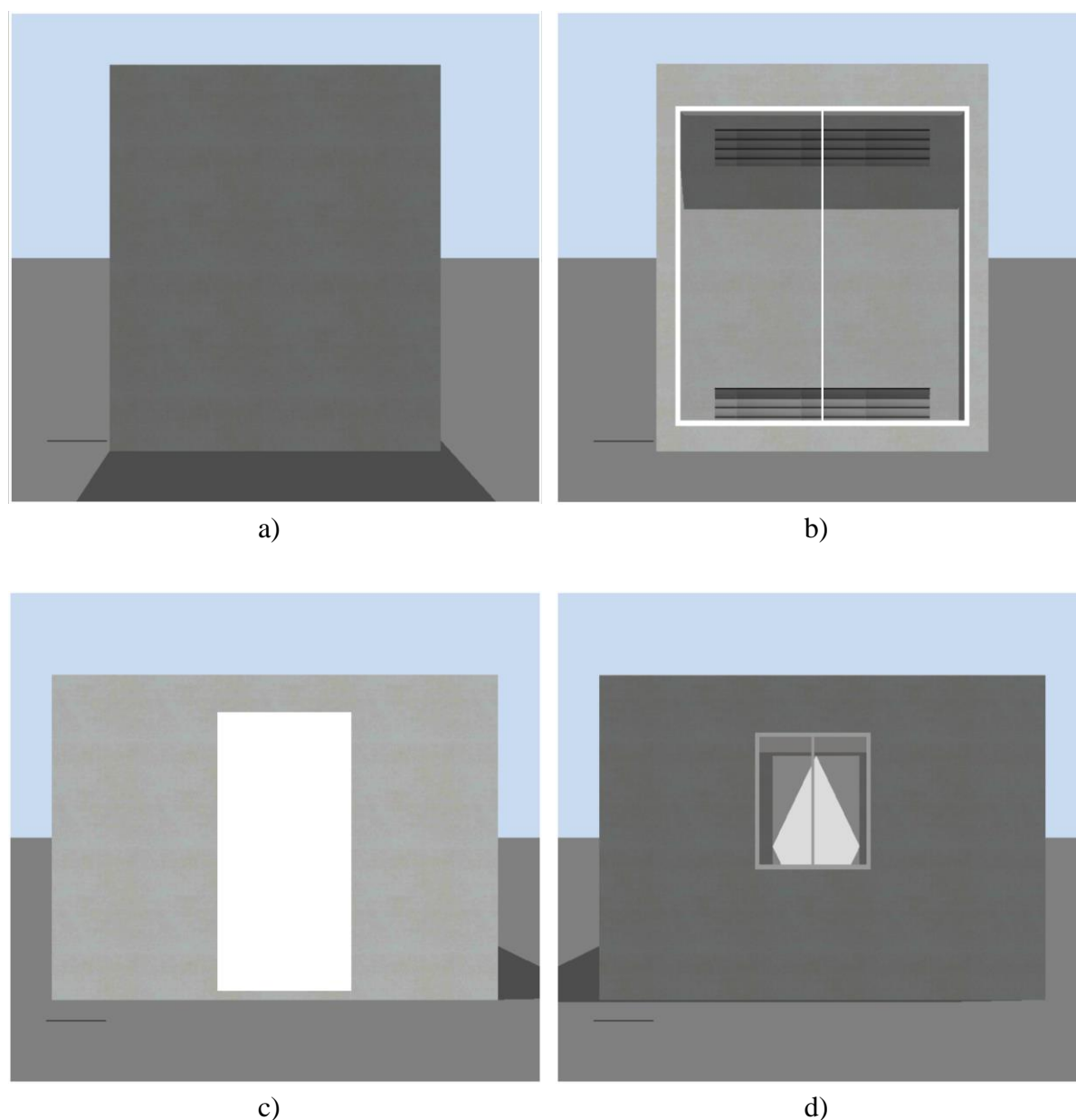


Figura 5.6 – Geometria do compartimento/módulo nas fachadas a:
a) Norte; b) Sul; c) Este; d) Oeste.

Para uma análise mais completa do módulo em estudo importa saber todas as suas características, desde a sua configuração até às suas características construtivas. Deste modo, nesta seção foi detalhada toda a informação necessária. A parede de Trombe é composta por um vidro claro duplo com pano de 6 mm e 13 mm de espessura da caixa-de-ar, uma caixa-de-ar de 10 cm e a parede acumuladora é constituída por um painel de aço de 1,5 mm e uma coluna de aço de 5 cm, Quadro 5.1 e Quadro 5.2.

Quadro 5.1 – Coeficiente de transmissão térmica dos vãos envidraçados.

Vãos envidraçados		
Tipo de vidro	U (W/K.m ²)	Fator solar (SHGC)
Vidro duplo claro 6 mm / 13 mm	2,665	0,703

Quadro 5.2 – Coeficientes de transmissão térmica da envolvente opaca.

Envolvente opaca	Material	Espessura (m)	Coeficiente de transferência de calor, U (W/K.m²)
Paredes exteriores	Placa de OSB	0,012	0,380
	Lã de rocha	0,050	
	Caixa-de-ar	0,010	
	Lã de rocha	0,050	
	Placa de OSB	0,012	
Parede de Trombe	Estrutura em aço	0,0015	2,912
	Coluna de água	0,05	
	Estrutura em aço	0,0015	

Existem duas grelhas de ventilação localizadas na parte superior e inferior da parede acumuladora, Figura 5.7. Cada grelha apresenta dimensão de 0,30 m × 1,67 m e a distância das aberturas até à parede adjacente é 0,23 m. Estas grelhas podem ser abertas ou fechadas, dependendo das condições de funcionamento. Neste caso, as grelhas apenas estão abertas durante o inverno.

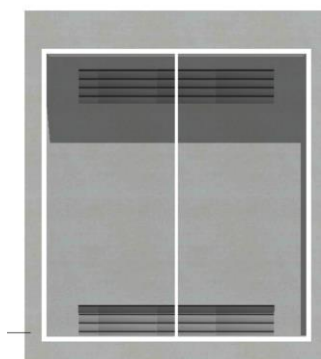


Figura 5.7 – Aberturas de ventilação localizadas na parede acumuladora.

Outro fator que importa esclarecer é a estanquidade ao ar assumida para o módulo. No programa, a permeabilidade ao ar é definida de acordo com a qualidade da solução construtiva em termos de permeabilidade. Existem cinco possibilidades a ser escolhidas, variando desde uma qualidade da solução construtiva muito pobre (com elevadas infiltrações) até uma qualidade considerada excelente (praticamente sem infiltrações). Para este modelo foi assumida que a qualidade da solução construtiva era excelente, o que significa que as infiltrações são quase nulas.

Nos modelos estudados, uma vez que a análise feita foi passiva, apenas foi considerada a existência de ventilação natural, tendo sido excluídos todos os sistemas AVAC.

5.2.3 Horário de ocupação

No separador *Activity* foi definido o horário de ocupação. Para este foi considerado um horário típico para edifícios de escritório, Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Perfil de ocupação do edifício utilizado no modelo.

Profiles							
Mo...	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday	Sunday
Jan	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Feb	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Mar	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Apr	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
May	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Jun	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Jul	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Aug	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Sep	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Oct	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Nov	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off
Dec	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	8:00 to 18:00	Off

5.3 Análise CFD

5.3.1 Introdução

Este subcapítulo teve como finalidade fazer uma análise mais detalhada do modelo e assim verificar se a distribuição de temperaturas e o escoamento de ar apresentavam coerência.

A análise CFD (*Computational Fluid Dynamics*) usa a análise numérica e algoritmos para resolver e analisar os problemas que envolvem escoamentos de fluidos. A simulação é usada para calcular campos de concentração, temperaturas, velocidades, pressões e outras propriedades de um determinado fluido. Esta ferramenta do programa *DesignBuilder* permite avaliar as correntes de ar e a distribuição da temperatura nos edifícios através da simples especificação da data e horário na análise CFD, com valores anteriormente calculados pelo *EnergyPlus* para as temperaturas, fluxos de calor e taxas de renovação de ar.

5.3.2 Resultados da simulação e análise

Na simulação foi considerada uma data e um horário que permitisse visualizar o que acontecia num dia de inverno, tendo em conta a inércia sofrida pela parede acumuladora. Desta forma, a simulação foi feita para o modelo de referência no dia 18 de janeiro, às 16 horas.

Antes de se obter qualquer resultado era esperado que a parede de Trombe apresenta-se uma temperatura superior à do compartimento e que o movimento do fluxo de ar fosse ascendente na parede de Trombe. Da mesma forma, também era esperado que fosse notável uma diferença na distribuição da temperatura ao nível da grelha inferior, devido à entrada de ar vindo do compartimento.

A Figura 5.8 mostra os resultados obtidos na parede de Trombe para dois parâmetros, a distribuição de temperatura e o fluxo de ar. Estas duas propriedades são classificadas segundo uma escala onde lhes são atribuídas cores conforme a sua velocidade e temperatura. Como esperado, a parede de Trombe apresenta temperaturas elevadas, na ordem dos 29 °C, com exceção da abertura de ventilação inferior, onde se verifica um tom mais claro. Este facto deve-se à entrada de ar mais fresco que vem do compartimento, ou seja, é devido aos fenómenos de convecção natural.

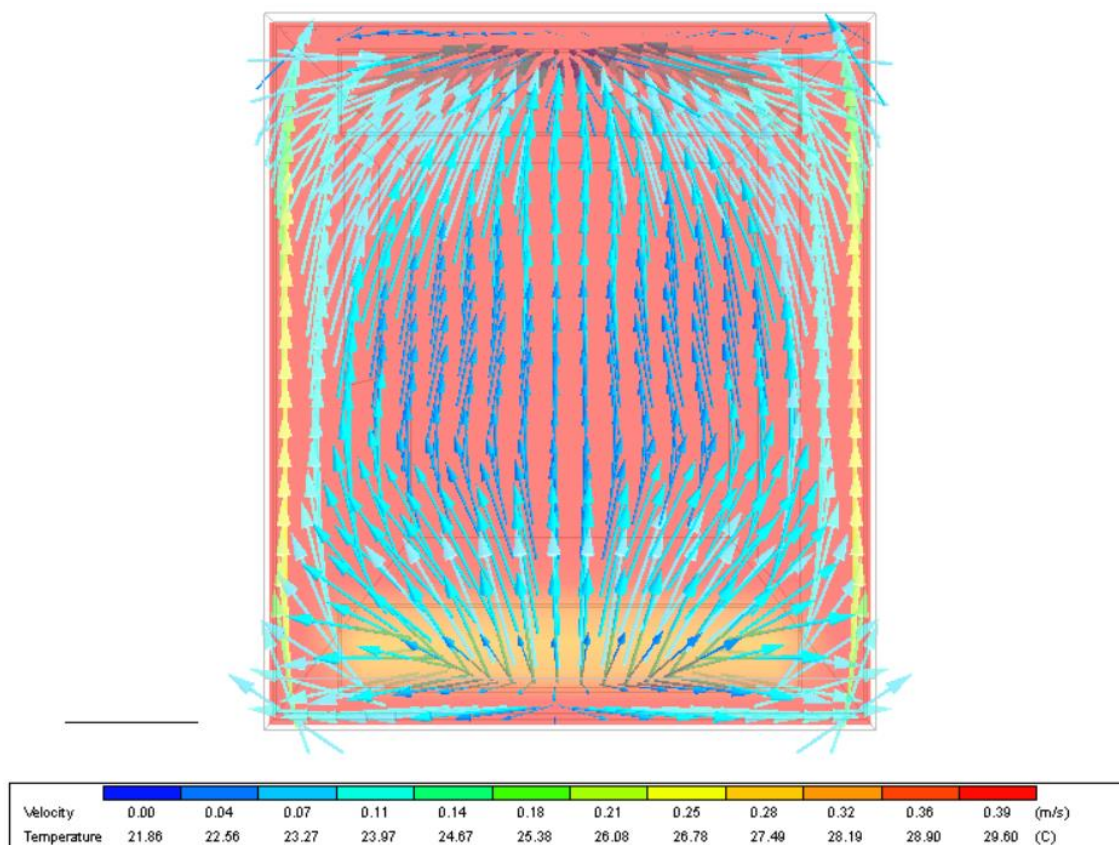


Figura 5.8 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar na parede de Trombe.

Analisando o fluxo de ar representado na Figura 5.8, também é possível ver o trajeto por onde o ar circula, observando a convergência das setas para as aberturas. O ar que vem do compartimento entra na abertura inferior, aquece e sobe, entrando de novo para o compartimento através da abertura superior. Assim, é possível confirmar que as aberturas para a ventilação estão a funcionar tal como esperado. Outro facto notado foi a velocidade do fluxo de ar. Observa-se ainda que o fluxo de ar tem maior velocidade junto às aberturas e ao longo das extremidades da fachada.

Na Figura 5.9 está representada a distribuição da temperatura nas grelhas da ventilação. Como se pode observar e conforme o esperado, a abertura inferior encontra-se a uma temperatura mais baixa porque está a entrar ar que vem do compartimento a uma temperatura inferior. Por outro lado, a abertura superior já se encontra a uma temperatura mais elevada porque o ar quando aquece na parede de Trombe desloca-se para cima por ser menos denso.

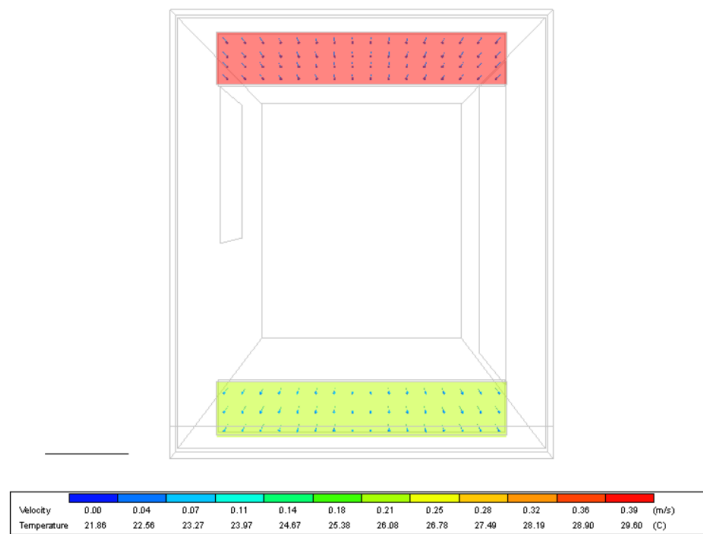


Figura 5.9 – Distribuição da temperatura nas aberturas de ventilação.

É possível ver com maior detalhe o movimento do fluxo de ar ao longo do compartimento na Figura 5.10.

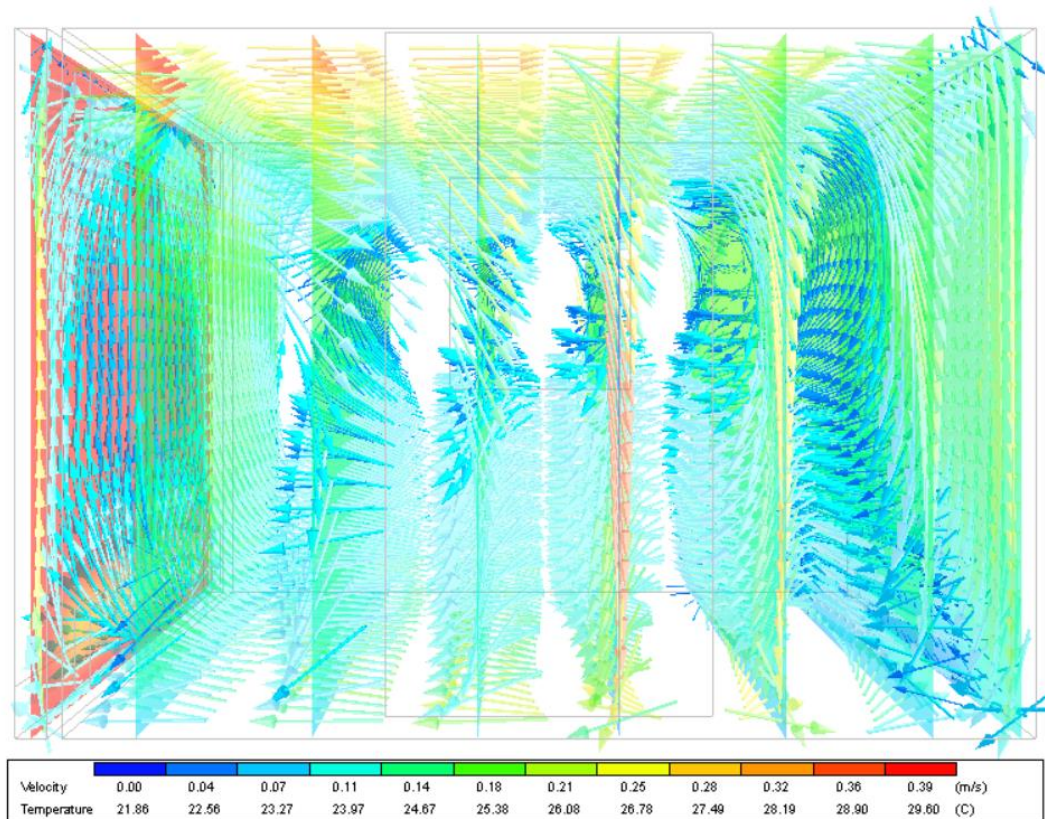


Figura 5.10 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar em alçado.

Como se pode observar na Figura 5.10, o ar quente da parede de Trombe entra no compartimento através da abertura superior, desloca-se ao longo do compartimento, arrefece e vai descendo, por ser mais denso. O ar frio desloca-se então para a parede de Trombe novamente, onde entra através da abertura inferior. Por este motivo, a ventilação natural interna é considerada um dos parâmetros mais importantes para o correto funcionamento e eficiência da parede de Trombe, pois é através dela que a temperatura do ar interior aumenta.

Na Figura 5.11 é apresentada a distribuição da temperatura e do fluxo de ar com vista pelo interior do compartimento. Pela análise da figura, verifica-se que junto às fachadas laterais, a velocidade do fluxo de ar é menor. Por outro lado, constata-se que junto à cobertura, porta e janela a velocidade de fluxo de ar é maior.

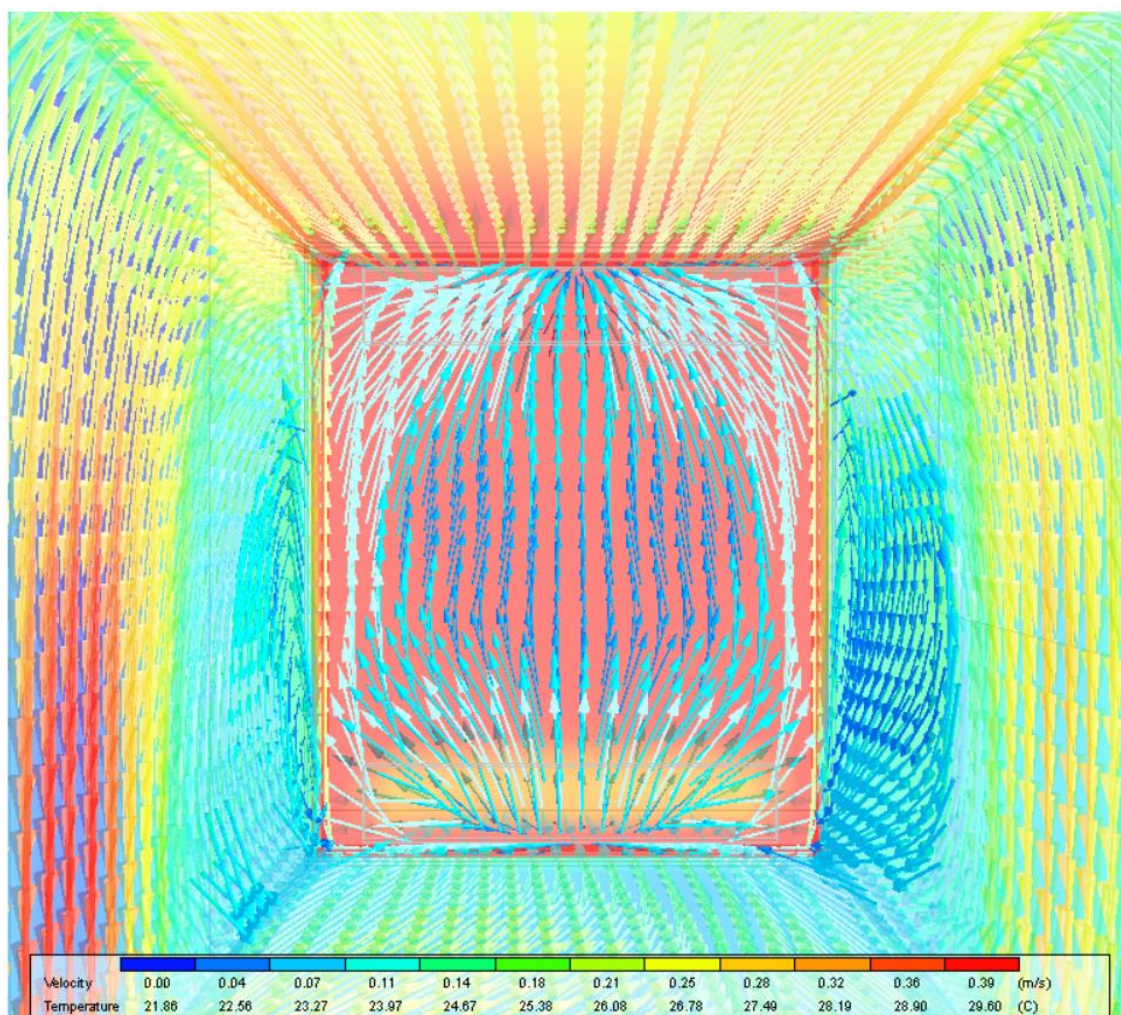


Figura 5.11 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar vista no interior do compartimento.

As figuras 5.12 e 5.13 mostram a distribuição da temperatura e do fluxo de ar na base e no topo do compartimento, respetivamente.

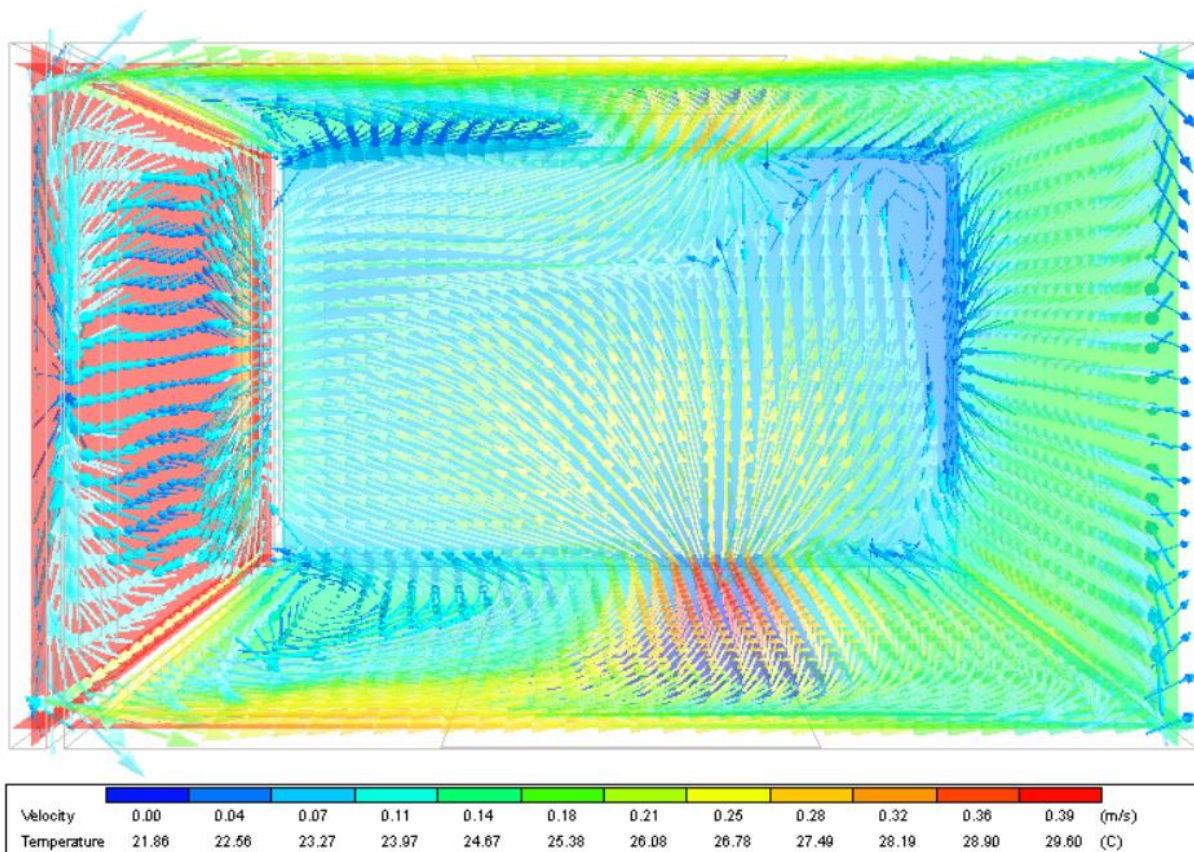


Figura 5.12 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar na parte inferior do compartimento.

Na Figura 5.12, como era de esperar, a temperatura junto ao pavimento é mais baixa, pois o ar frio desloca-se para baixo. Junto às fachadas, o ar desce e movimenta-se para o centro do compartimento, de onde depois segue até à abertura inferior da parede de Trombe. É possível ainda observar a influência da porta no movimento do ar. Junto à porta, existe um fluxo de ar que se desloca para a direita, contrariando a tendência que se desloca para a parede de Trombe (esquerda).

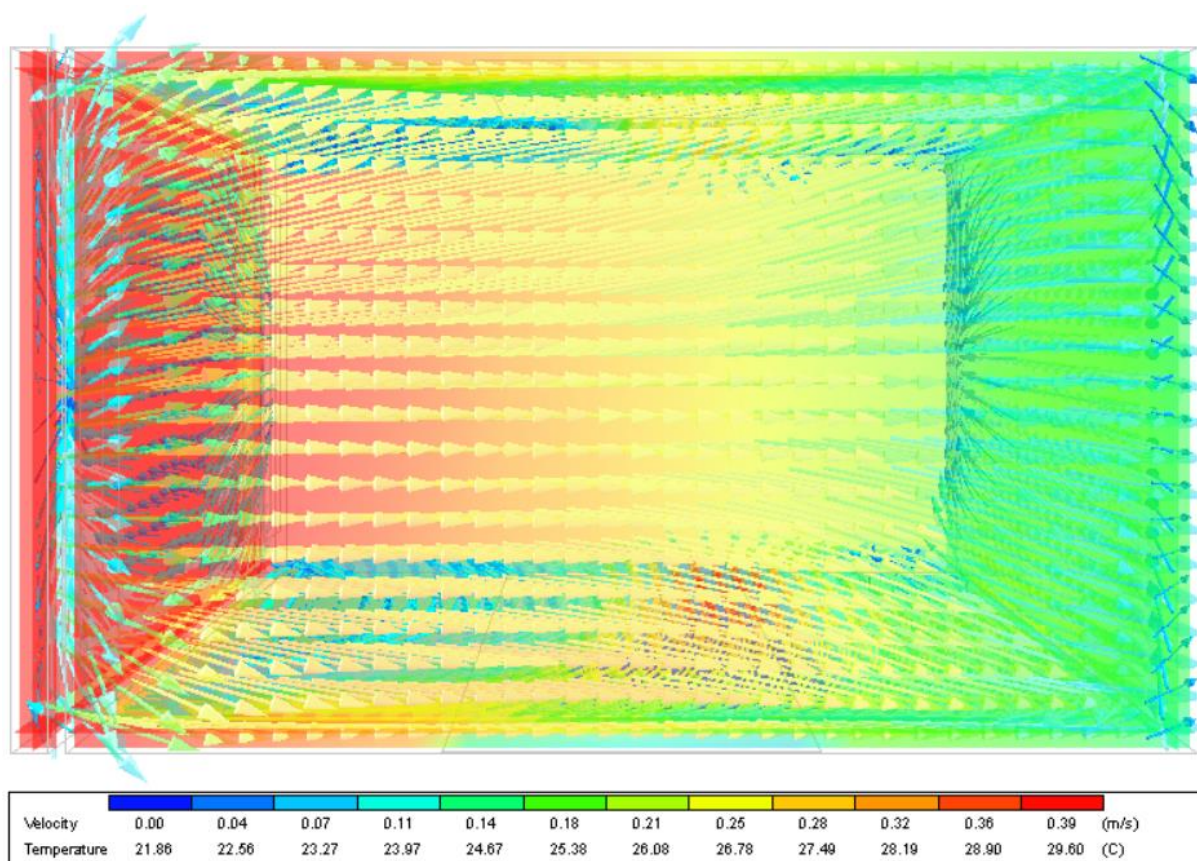


Figura 5.13 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar na parte superior do compartimento.

Por outro lado, na Figura 5.13, consegue-se observar a distribuição gradual da temperatura ao longo do compartimento, do mais quente ao mais frio. É bastante perceptível que a parede de Trombe se encontra muito mais quente que o compartimento e a distribuição do calor ao longo deste, estando a parede oposta mais fria.

Na Figura 5.14 é apresentada a distribuição da temperatura no compartimento e o fluxo de ar para as fachadas onde existe a porta e a janela. Consegue-se observar que na parede adjacente à parede de Trombe a temperatura vai, gradualmente, ficando mais baixa ao longo desta. O ar movimenta-se em círculo ao longo do compartimento e volta a entrar na abertura inferior.

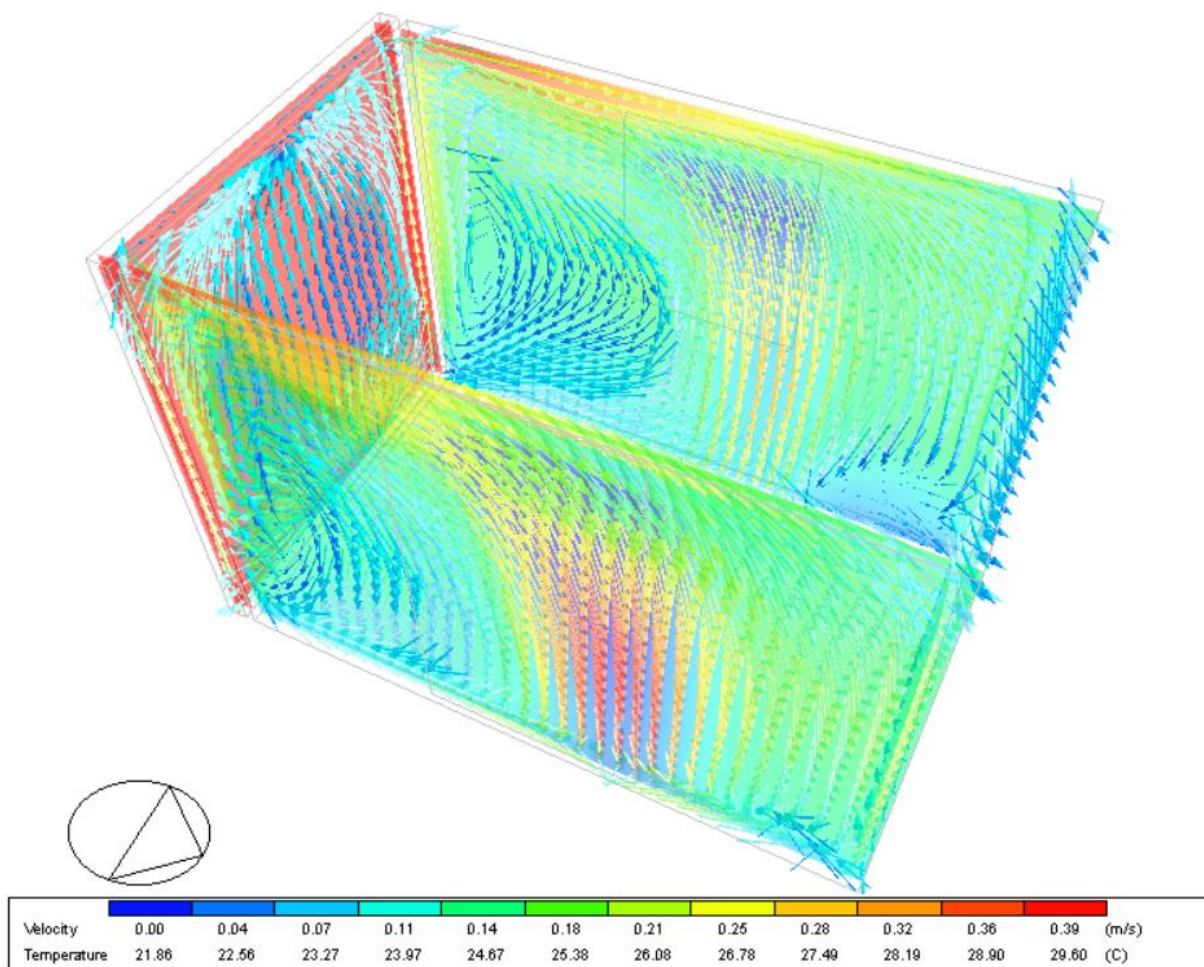


Figura 5.14 – Distribuição da temperatura e do fluxo de ar no compartimento.

É ainda possível analisar os efeitos da porta e da janela, quer na distribuição da temperatura, quer no fluxo de ar. Em termos de temperatura, quer a porta quer a janela, encontram-se a uma temperatura mais baixa. Uma vez que coeficiente de transmissão térmica é maior vão existir algumas perdas através destas componentes. No entanto, em termos de fluxo de ar, este é mais significativo junto destes dois elementos. A maior velocidade do fluxo de ar junto da porta e da janela resulta do facto de existirem algumas infiltrações, podendo também estar relacionado com a direção do vento.

De modo a verificar a influência do vento foi feita uma análise CFD do espaço envolvente ao módulo. Para tal foram usados os valores das condições utilizadas na simulação anterior, ou seja, foi introduzido a direção e velocidade do vento no dia 18 de janeiro, às 16 horas. Assim, foi considerada uma direção de 40° e uma velocidade de 3,3 m/s. Os resultados obtidos apresentam-se na Figura 5.15.

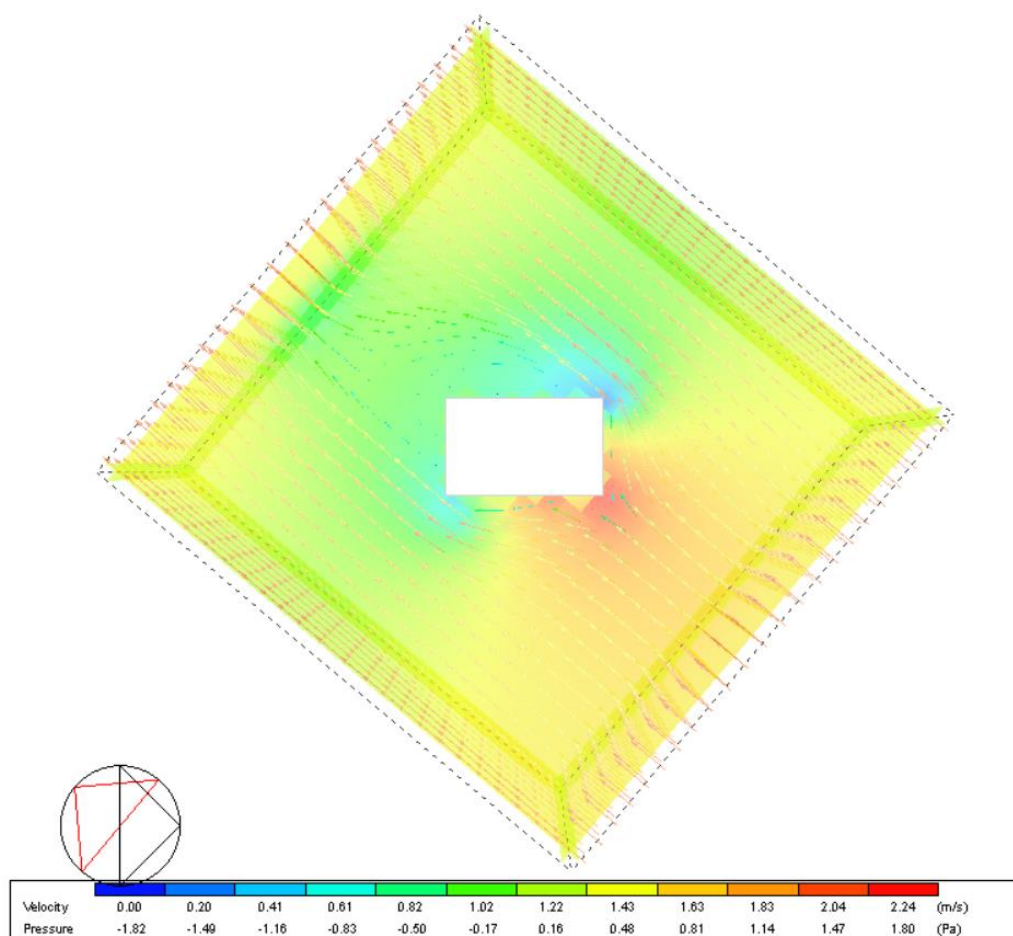


Figura 5.15 – Análise CFD para o exterior envolvente ao módulo.

Da figura constata-se que o vento tem maior incidência na fachada oposta à parede de Trombe e na fachada onde existe a porta, exercendo pressões nestas fachadas e sucções nas fachadas opostas.

Pela observação dos aspetos analisados neste subcapítulo foi possível confirmar que o modelo estava a funcionar como esperado e que os resultados mostravam coesão. Posto isto, passou-se para a análise da contribuição da parede de Trombe no compartimento.

5.4 Comparação entre parede de Trombe e solução base

Numa primeira abordagem foi simulado o comportamento térmico de dois modelos. O primeiro modelo corresponde a uma solução sem parede de Trombe, denotada como solução base. O segundo modelo acomoda uma parede de Trombe, localizada na fachada a sul. A única diferença entre estes dois sistemas é a existência da parede de Trombe, sendo os seus elementos construtivos exatamente iguais. Neste caso, serão comparadas as temperaturas interiores do

compartimento, Figura 5.16, durante a estação de aquecimento, com o objetivo de verificar a influência que a parede de Trombe tem na temperatura interior do compartimento.

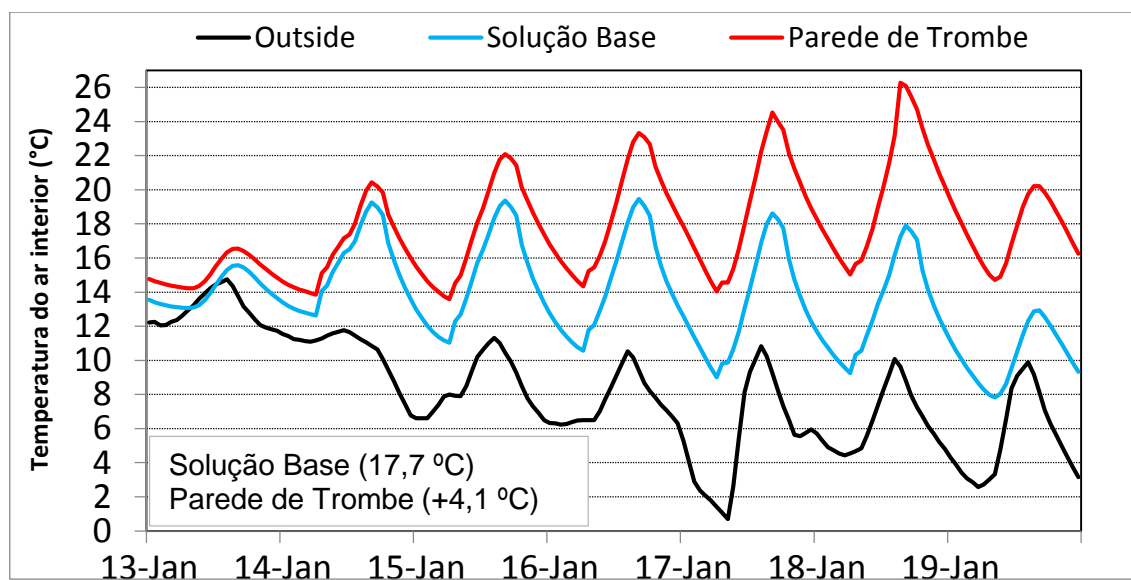


Figura 5.16 – Variação da temperatura interior durante a semana de projeto de Inverno para a solução base e para a solução com parede de Trombe.

Analisando os resultados, percebe-se que o sistema com parede de Trombe tem um contributo significativo no conforto térmico de um espaço interior, uma vez que as oscilações de temperatura não são tão acentuadas e a temperatura mínima atingida com este sistema é de 13,6 C. A temperatura interior do compartimento com o contributo da parede de Trombe tem um aumento médio de cerca de 4,1 °C.

Realça-se ainda o facto de existirem maiores diferenças nas temperaturas entre os dois casos nos dias 17 e 19. Isto acontece devido à maior radiação solar nesses dias, que pode ser visto na Figura 5.3, o que significa que a parede de Trombe, como era esperado, tem maior impacto na temperatura interior quando na presença de radiação solar significativa.

5.5 Análise paramétrica

Nesta secção expõe-se a análise paramétrica de diferentes soluções construtivas para a parede de Trombe. As simulações consistem na alteração de vários parâmetros, sejam eles dimensões da parede de Trombe, a espessura da coluna de água, a espessura da caixa-de-ar, o tipo de vidro, a cor do aço do painel, as infiltrações e a área das aberturas para a ventilação, durante a estação de aquecimento, e ainda dispositivos de proteção solar, por forma a averiguar os efeitos que esta pode provocar na estação de arrefecimento.

De seguida é apresentado no Quadro 5.4, o cenário 1, que corresponde à situação de referência com o qual foram comparados todos os outros cenários simulados para os vários parâmetros, apresentados no Quadro 5.5.

Quadro 5.4 – Descrição do cenário de referência (cenário 1).

Dimensões da parede de Trombe	2,4 m
Espessura da coluna de água	5 cm
Espessura da caixa-de-ar	10 cm
Tipo de vidro	Duplo
Cor do aço do painel	Cinzento
Área das aberturas de ventilação	1,666 m × 0,300 m
Infiltrações	Infiltrações quase nulas
Dispositivos de proteção solar	Sem dispositivos

Quadro 5.5 – Cenários simulados para os parâmetros escolhidos.

Cenário 2	Dimensões da parede de Trombe	1,2 m
Cenário 3		0,6 m
Cenário 4	Espessura da coluna de água	10 cm
Cenário 5		20 cm
Cenário 6	Espessura da caixa-de-ar	20 cm
Cenário 7		30 cm
Cenário 8	Tipo de vidro	Simple
Cenário 9		Tripl
Cenário 10	Cor do aço do painel	Branco
Cenário 11		Preto
Cenário 12	Áreas das aberturas de ventilação	0,833 m × 0,300 m
Cenário 13		2 × 0,833 m × 0,300 m
Cenário 14		3 × 0,500 m × 0,300 m
Cenário 15	Permeabilidade ao ar ¹	Construção média
Cenário 16		Construção pobre
Cenário 17		Sem infiltrações
Cenário 18	Dispositivos de proteção solar	Pala horizontal
Cenário 19		Rolo exterior
Cenário 20		Pala horizontal + rolo exterior
Cenário 21		Situação de inverno ²

¹ A permeabilidade ao ar é definida segundo a qualidade da solução construtiva.

² Simulação para o inverno com a colocação de uma pala horizontal e de um rolo pelo exterior.

5.5.1 Influência das dimensões da parede de Trombe

Um outro modo de estudar a influência de uma parede de Trombe na temperatura interior de um compartimento é alterando as suas dimensões. Uma vez que uma das suas desvantagens é a perda de iluminação natural e do contacto com o exterior, estas podem ser amenizadas através de soluções em que apenas se implemente a parede de Trombe numa pequena área da parede. Para tal foram analisados mais dois cenários para serem comparados com a situação de referência. Na situação de referência, a parede de Trombe ocupa 100% a fachada a sul, enquanto no cenário 2 corresponde a 50% da área total da fachada ou seja 1,2 m², e no cenário 3 representa apenas 25%, 0,6 m².

Uma breve análise da Figura 5.17 mostra que, tal como esperado, quanto maior for a parede de Trombe, maiores são os ganhos de calor no compartimento. Analisando de uma forma mais geral, na situação em que a parede de Trombe corresponde a 50% da área da fachada onde está implementada, isso causa uma diminuição na temperatura média interior de cerca de 1,5 °C e de 2,7 °C no caso em que corresponde a 25%.

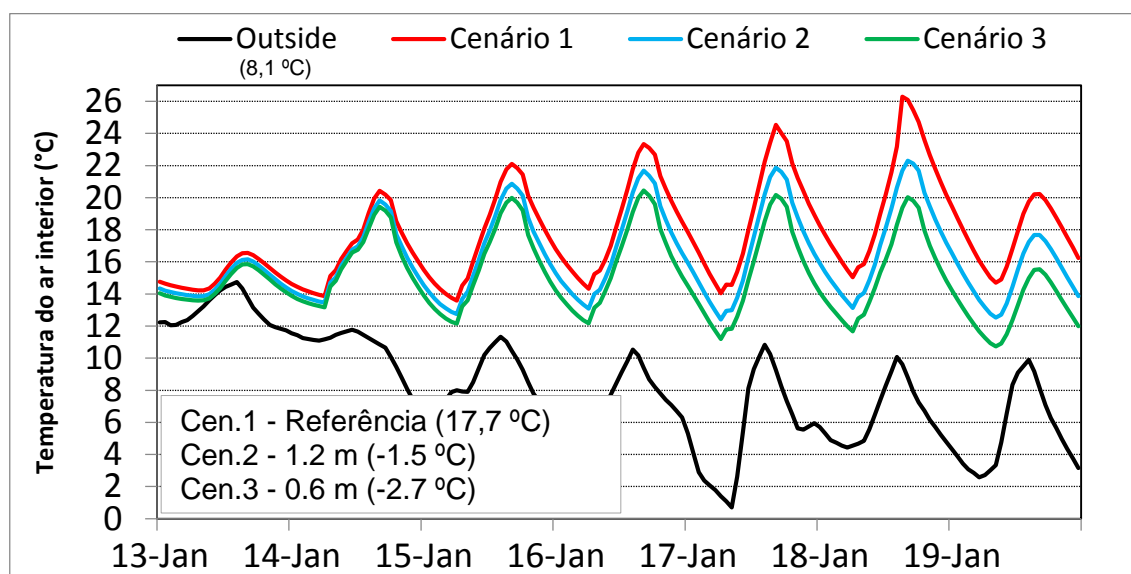


Figura 5.17 – Variação da temperatura interior: dimensões da parede de Trombe.

Novamente destacam-se os dias em que a radiação solar é maior, tendo um elevado contributo para o aumento da temperatura interior do compartimento.

5.5.2 Influência da espessura da coluna de água

Uma vez que a parede acumuladora do caso em estudo é constituída por uma coluna de água, importa estudar o impacto que a sua espessura pode ter no desempenho da parede de Trombe.

Assim, fez-se variar a espessura para valores de 5 cm (situação de referência), 10 e 20 cm. Os resultados gerados são mostrados na Figura 5.18.

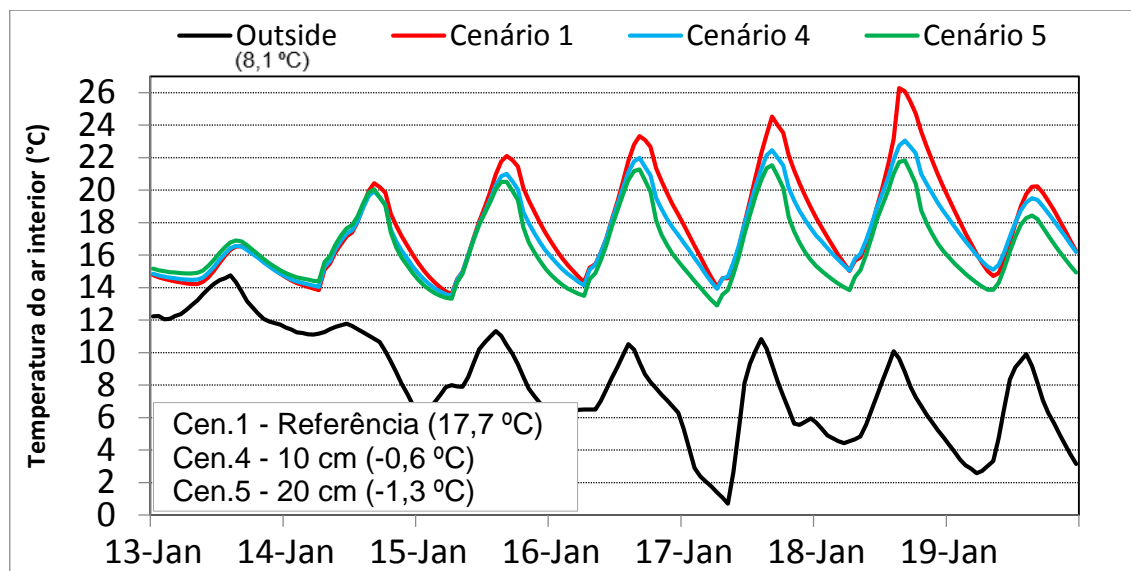


Figura 5.18 – Variação da temperatura interior: espessura da coluna de água.

Na Figura 5.18 é possível observar que a parede acumuladora com 5 cm, situação de referência, apresenta melhor desempenho térmico. Então, quanto menor for a espessura da parede acumuladora, mais rápida é a transmissão de calor para o compartimento. Por outro lado, o volume de água também irá influenciar, ou seja, quanto maior for o volume de água, como é o caso do cenário 5, mais difícil se torna aquecer a água, e portanto as temperaturas conseguidas serão inferiores.

Em termos de temperatura média atingida no compartimento, a diferença não é muito significativa. No entanto, é nos dias de maior radiação solar que as diferenças se destacam. No dia de maior radiação, dia 18 de janeiro, a diferença entre a situação de referência e os restantes cenários é de cerca de 3 °C.

5.5.3 Influência da espessura da caixa-de-ar

A espessura da caixa-de-ar é mais um parâmetro que influencia a variação da temperatura interior. Fez-se variar a espessura para valores de 10 cm (situação de referência), 20 e 30 cm. Os resultados obtidos são expostos na Figura 5.19 e Figura 5.20.

Pela análise da Figura 5.19 não é possível observar grande diferença entre os resultados obtidos para as diferentes espessuras da caixa-de-ar. Fazendo apenas uma comparação em termos de

temperatura média atingida no compartimento, pode dizer-se que a diferença entre a situação de referência e os cenários simulados é quase insignificante.

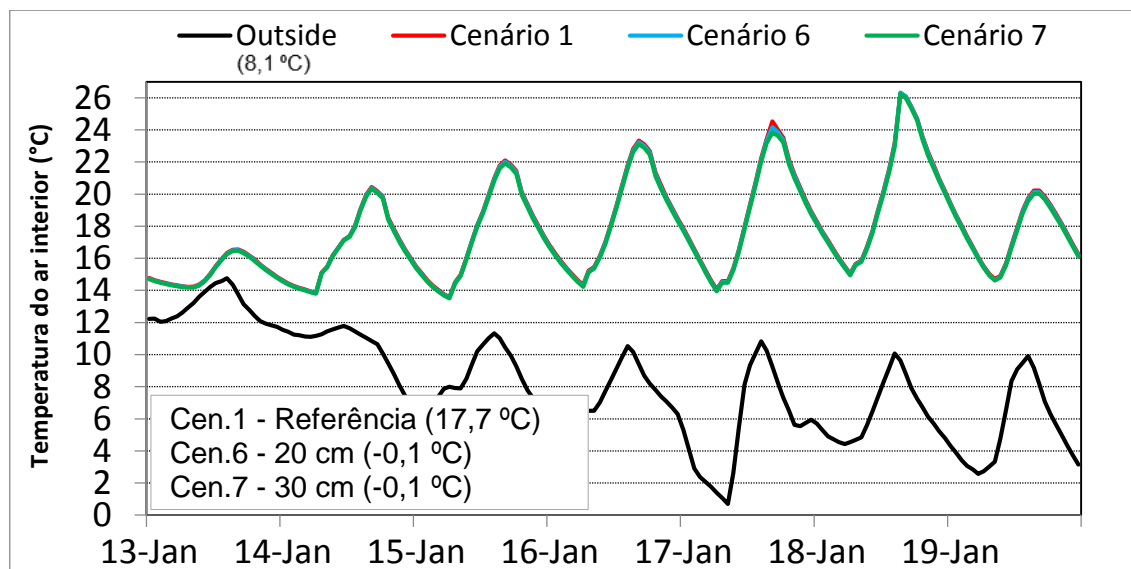


Figura 5.19 – Variação da temperatura interior: espessura da caixa-de-ar.

De maneira a avaliar com mais detalhe os resultados, foi feita uma ampliação da escala do gráfico nos picos da temperatura, Figura 5.20. Neste gráfico é possível observar que as temperaturas são superiores na situação de referência, ou seja, quando se utiliza uma caixa-de-ar de 10 cm. Por outro lado, também é perceptível que as temperaturas tendem a ser, ligeiramente, mais baixas com a caixa-de-ar de 30 cm. Daqui se retira que, uma vez que a diferença na temperatura interior não é significativa, a melhor solução será optar pela caixa-de-ar de menor espessura, pois desta forma há uma menor ocupação do espaço habitável.

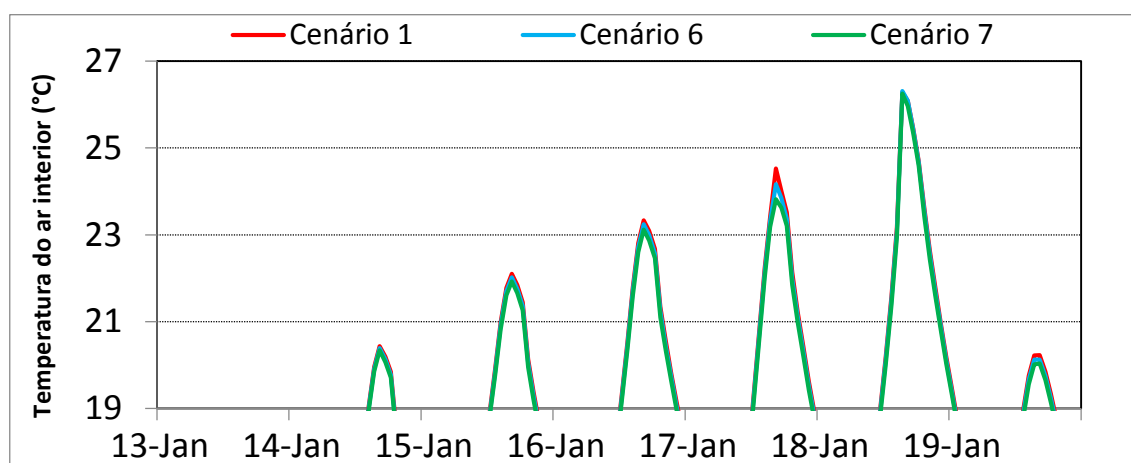


Figura 5.20 – Ampliação da escala da Figura 5.19.

5.5.4 Influência do tipo de vidro

Um dos parâmetros que se pode alterar de modo a verificar a sua influência na parede de Trombe é o tipo de vidro utilizado. Neste caso fez-se uma modificação no envidraçado da parede de Trombe, mantendo-se a solução construtiva para os outros vãos envidraçados. Foi comparada a utilização de vidro simples constituído por um único pano de 6 mm de espessura, cenário 8, um vidro duplo, que corresponde à situação de referência, e um vidro triplo com pano de 3 mm e 13 mm de espessura da caixa-de-ar, cenário 9. No Quadro 5.6 encontram-se as características mais relevantes para cada tipo de vidro.

Quadro 5.6 – Características de cada tipo de vidro.

Tipo de vidro	U (W/K.m ²)	Fator solar (SHGC)
Vidro simples claro 6 mm	5,778	0,819
Vidro duplo claro 6 mm / 13 mm	2,665	0,703
Vidro triplo claro 3 / 13 mm	1,757	0,684

Os resultados que foram obtidos podem ser visualizados na Figura 5.21 que se apresenta em seguida.

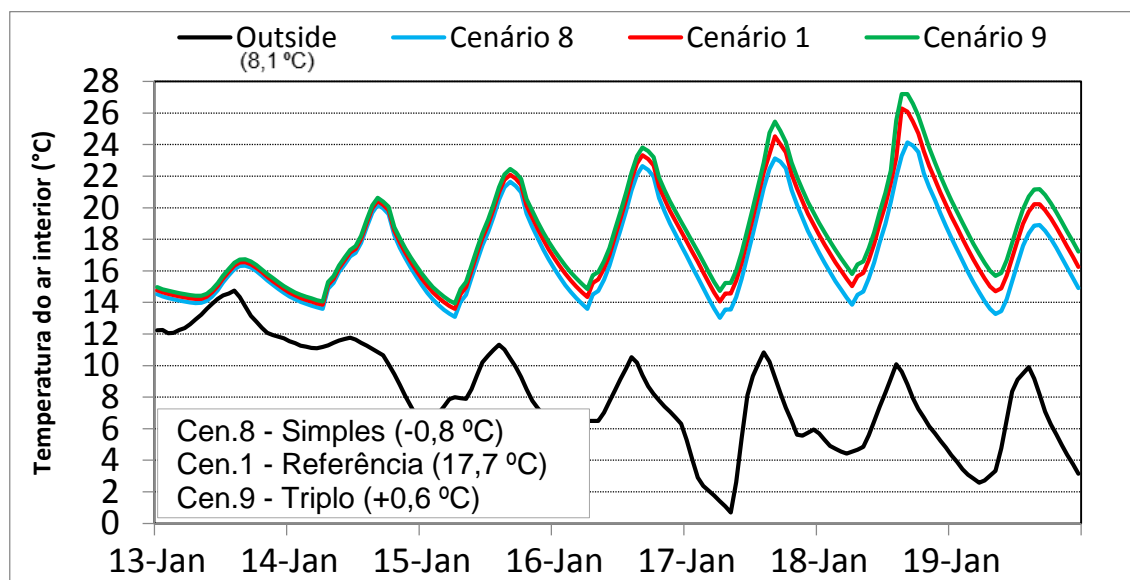


Figura 5.21 – Variação da temperatura interior: tipo de vidro.

Conforme esperado, o vidro com maior coeficiente de transmissão térmica, vidro simples, é o que apresenta pior desempenho. A utilização de vidro triplo corresponde à melhor solução, pois consegue-se temperaturas interiores mais elevadas, devido ao seu melhor desempenho térmico. No que respeita à temperatura média alcançada, comparando a utilização de vidro duplo com vidro simples, existe uma diferença de 0,8 °C, e 0,6 °C comparando com vidro triplo, ou seja, as diferenças não são muito significativas. No entanto, se voltarmos a olhar para o dia de maior radiação solar, as diferenças são mais consideráveis, sendo a melhor solução a utilização de vidro triplo.

5.5.5 Influência da cor do aço do painel

Como já foi referido em capítulos anteriores, a cor da parede acumuladora detém alguma relevância no desempenho da parede de Trombe. Uma superfície cujo material seja de cor escura é capaz de absorver mais calor, enquanto uma superfície clara absorve menos calor. Assim, antes de qualquer avaliação, esperava-se que as temperaturas interiores com o aço pintado de cor escura fossem mais elevadas do que as temperaturas obtidas para o aço pintado de cor clara.

De forma a estudar este parâmetro foram simuladas duas condições extremas, uma em que o painel de aço seria pintado de branco, cenário 10, e uma outra onde o painel seria de cor preta, cenário 11, ambas comparadas com a situação de referência que corresponde a um painel de cor cinzenta. Para tal, foram tidas em consideração as características que se apresentam no Quadro 5.7.

Quadro 5.7 – Características térmicas (STEEL@, 2015; ASHRAE, 2005).

Cor do aço	Absorção térmica (emissividade)	Absorção solar	Absorção visível
Branco	0,3	0,23	0,23
Cinzento	0,3	0,3	0,3
Preto	0,3	0,90	0,90

Ao analisar a Figura 5.22 nota-se que a melhor solução é, sem dúvida, quando a superfície da parede acumuladora é pintada de cor escura, devido ao maior poder de absorção do calor. Em termos de temperatura média, consegue-se aumentar cerca de 1,4 °C em relação à situação de referência. Como acontecia nos resultados apresentados anteriormente, a diferença revela-se mais significativa nos dias em que a radiação solar é maior. Para o dia 18 de janeiro, no cenário 11, a temperatura máxima atingida está acima dos 28,7 °C, o que representa uma diferença de 2,6 °C em relação à situação de referência.

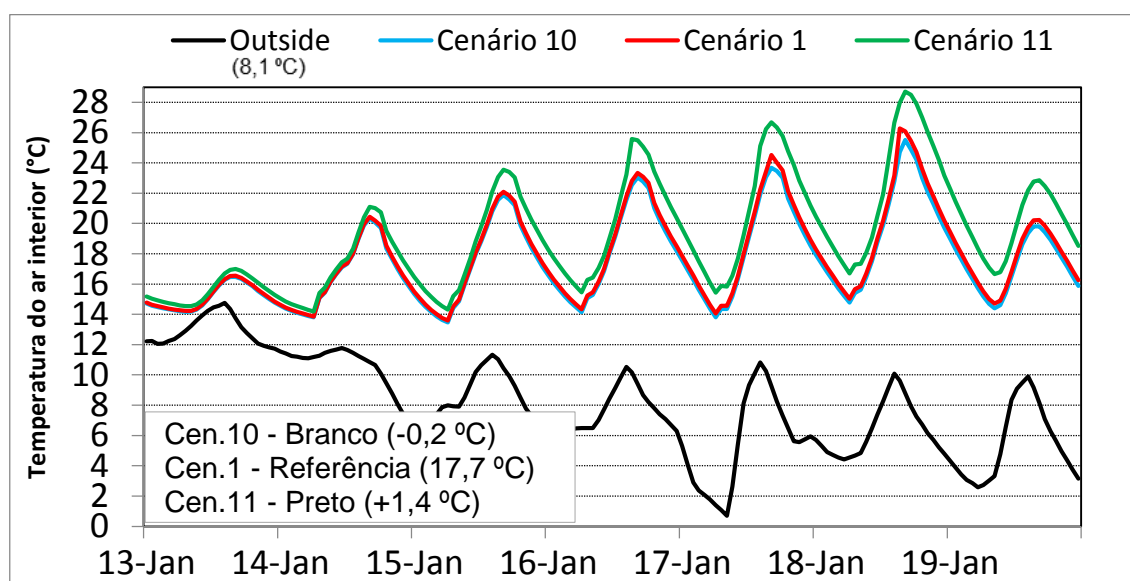


Figura 5.22 – Variação da temperatura interior: cor do aço do painel.

5.5.6 Influência da permeabilidade ao ar

Na situação de referência considerou-se que a qualidade da solução construtiva era excelente e por isso as infiltrações eram quase nulas. Foram simulados mais três casos para se poder comparar. Um primeiro caso em que se considerou uma solução construtiva de qualidade média, apresentando algumas infiltrações, cenário 15, um caso extremo, em que se considerou uma solução construtiva de menor qualidade, cenário 16, e um outro caso em que não foram consideradas quaisquer infiltrações, cenário 17.

No Quadro 5.8 são apresentadas as infiltrações definidas para cada tipo de solução de acordo com a qualidade construtiva. As infiltrações são consideradas por metro de comprimento da fissura e para uma pressão de 1 Pa.

Quadro 5.8 – Infiltrações de acordo com a qualidade da solução construtiva.

	Janela exterior (kg/s.m)	Porta exterior (kg/s.m)	Grelhas interiores (kg/s.m)	Paredes exteriores (kg/s.m)	Média (kg/s.m)
Sem Infiltrações	-	-	-	-	-
Excelente	0.00001	0.00020	0.00100	0.00001	0.00031
Média	0.00014	0.00140	0.00700	0.00010	0.00216
Muito pobre	0.00300	0.00300	0.02000	0.00040	0.00660

Na Figura 5.23 é possível observar os resultados em função da permeabilidade considerada. Numa primeira abordagem concluiu-se que a solução considerada de qualidade excelente se aproxima muito da situação onde não considerou a existência de qualquer infiltração, sendo a variação da temperatura média interior entre estes dois cenários insignificante.

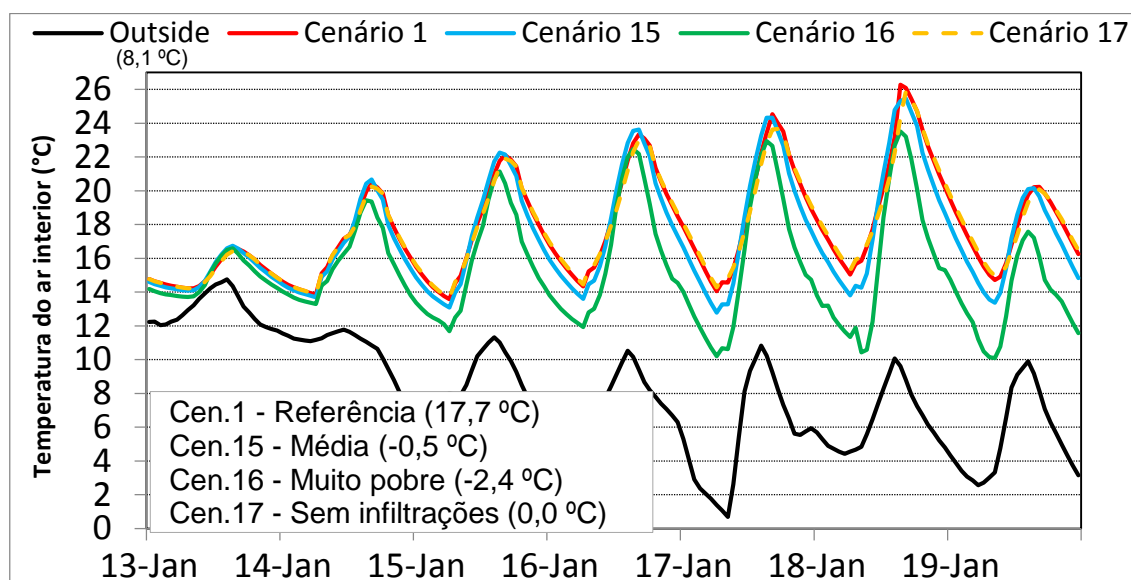


Figura 5.23 – Variação da temperatura interior: permeabilidade ao ar.

A solução construtiva de qualidade muito pobre, como era esperado, ao apresentar muitas infiltrações, isso refletiu-se nas temperaturas mínimas interiores, que se mostraram bastante mais baixas que nos restantes casos. A solução de qualidade construtiva média apresenta temperaturas máximas semelhantes à situação de referência, em alguns casos até superior, que resulta de uma maior circulação de ar devido à existência de mais infiltrações. No entanto, esta solução apresenta temperaturas mínimas inferiores, o que significa que as infiltrações contribuem para uma maior perda de calor, levando a que existam maiores amplitudes térmicas.

5.5.7 Influência da área das aberturas para a ventilação

Um dos principais parâmetros para um bom desempenho de uma parede de Trombe é a ventilação. A ventilação pode contribuir para o conforto térmico e para a qualidade do ar interior dos edifícios. É essencial controlar os fluxos de ar entre o exterior e o interior. Da mesma forma, também é importante controlar a ventilação natural interna. Assim, com a introdução de aberturas para que o ar circule, o aquecimento do compartimento é feito de forma mais eficiente. Por este motivo importa avaliar o impacto que podem ter grelhas de ventilação de diferentes dimensões neste módulo.

Para tal, foram estudados mais três cenários a serem comparados com o de referência. No cenário 12, diminuiu-se para metade o comprimento da abertura, ou seja, neste cenário existe apenas uma abertura, superior e outra inferior, centradas, que têm metade do comprimento da abertura da situação de referência. No cenário 13, existem duas aberturas superiores e duas inferiores, todas elas centradas, e cuja dimensão de cada uma corresponde a metade do comprimento da situação de referência. Por último, no cenário 14, existem três aberturas, superiores e inferiores, cujo comprimento é de 0,5 m. No Quadro 5.9 apresentam-se de forma sucinta os diferentes cenários que foram simulados.

Quadro 5.9 – Áreas das aberturas de ventilação simuladas.

Cenários	Dimensões	Área por abertura (m ²)	Área total ¹ (m ²)
Referência	1,666 m × 0,300 m	0,50	0,50
Cenário 12	0,833 m × 0,300 m	0,25	0,25
Cenário 13	2 × 0,833 m × 0,300 m	0,25	0,50
Cenário 14	3 × 0,500 m × 0,300 m	0,15	0,45

¹ Área total na parte superior ou inferior da parede de Trombe.

Na Figura 5.24 encontram-se os resultados obtidos nas simulações para este parâmetro. Como se pode observar, a diferença entre os vários cenários não é muito significativa. Mesmo a variação da temperatura média é quase desprezável.

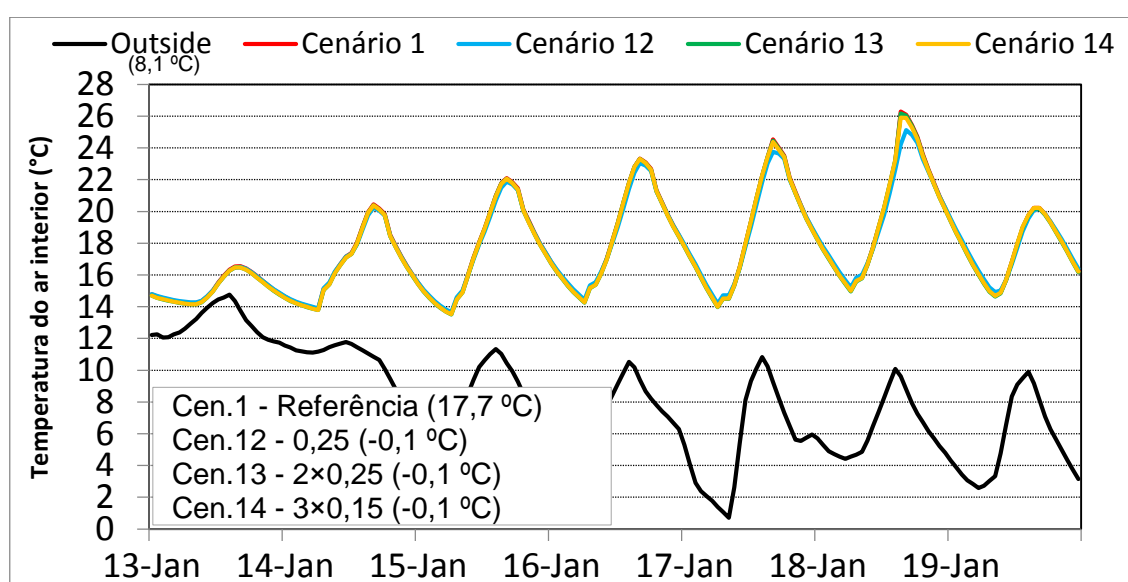


Figura 5.24 – Variação da temperatura interior: área das aberturas para a ventilação.

Uma forma de avaliar se as aberturas estão a funcionar corretamente é analisando o fluxo de ar que entra e que sai de cada abertura. De seguida apresenta-se o fluxo de ar na grelha superior para os diferentes cenários, Figura 5.25. Os resultados apresentados são representativos apenas de uma abertura para cada cenário. Optou-se por mostrar os resultados apenas para a grelha superior uma vez que na grelha inferior, tal como esperado, os resultados são simétricos, ou seja, o fluxo de ar que sai da parede de Trombe na abertura superior é igual ao fluxo de ar que entra na abertura inferior.

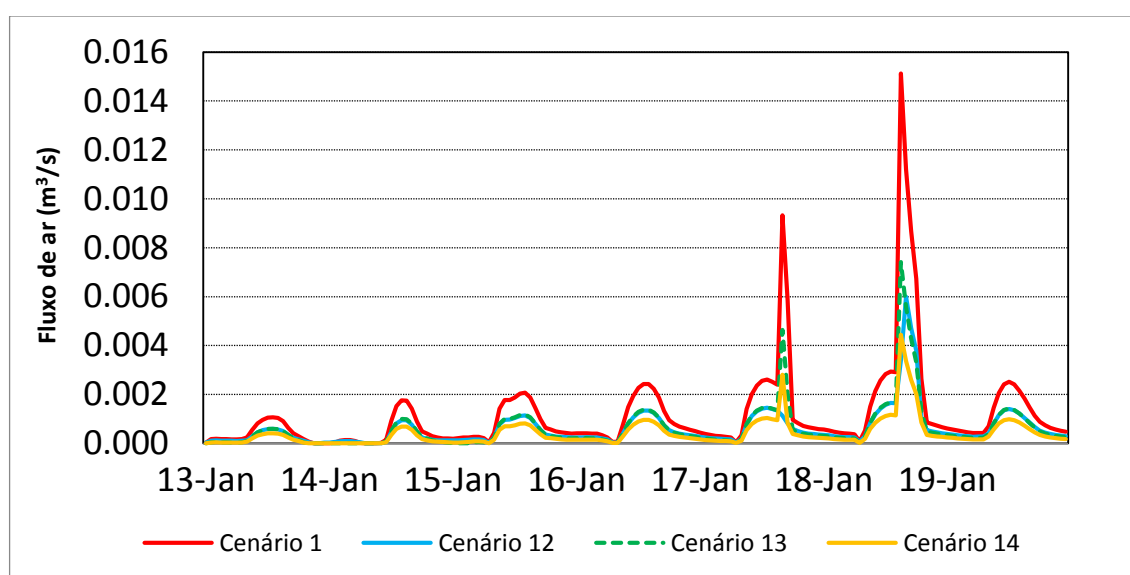


Figura 5.25 – Fluxo de ar na abertura superior.

Numa primeira abordagem, observando a figura representada acima, pode dizer-se que a taxa de renovação de ar é baixa, em parte devido ao facto das infiltrações serem quase nulas. No entanto, observam-se dois picos de ventilação que dizem respeito ao dia 17 e 18 de janeiro. Isto acontece porque no programa foi assumido um *setpoint* da ventilação natural de 24 °C. Assim, quando o compartimento atinge essa temperatura, o programa faz com que haja uma maior ventilação, através da abertura da janela ou da porta.

Analisando os diferentes cenários, conforme o esperado, a grelha de maior área apresenta um maior fluxo de ar. Os resultados para os cenários 12 e 13 são semelhantes pois as grelhas têm a mesma área. No entanto, no cenário 12 o fluxo de ar é ligeiramente inferior, pois a abertura fica centrada, enquanto no cenário 13, uma vez que tem duas aberturas, a grelha observada fica mais deslocada para a extremidade da parede. Outro facto observado é que para o cenário 12 existe apenas um pico, pois no dia 17 de janeiro a temperatura interior neste cenário não atingiu os 24 °C. Relativamente ao cenário 14, como era esperado, o fluxo de ar em cada grelha é menor pois a área também é menor, o que depois é compensado porque existem três grelhas.

Foi ainda analisado para cada cenário os ganhos de calor por ventilação natural interna, Figura 5.26.

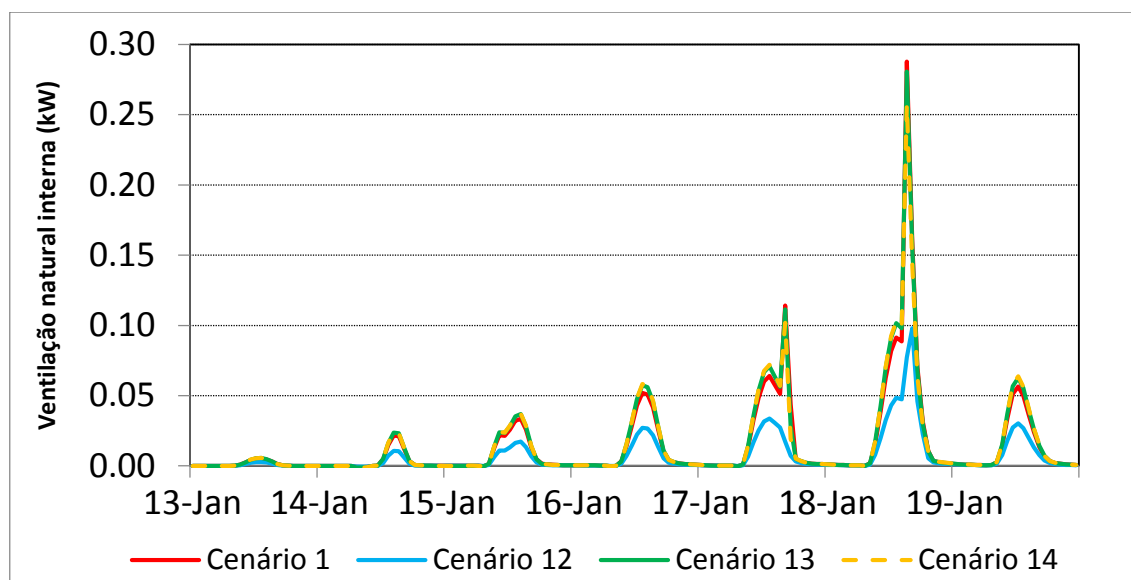


Figura 5.26 – Ganhos de calor por ventilação natural interna (kW).

Através da análise da Figura 5.26, pode dizer-se que, como esperado, o cenário 12 revelou ser o menos vantajoso, uma vez que a área também era menor. No entanto, os restantes cenários são muito similares, pois apesar de diferirem no número de grelhas, a área total é análoga.

5.5.8 Alternativas para a estação de arrefecimento

Um dos problemas que pode surgir com a adoção de uma parede de Trombe é o possível sobreaquecimento no verão. Uma forma de mitigar este problema é recorrendo a dispositivos de sombreamento. Os dispositivos de sombreamento ou de proteção solar são importantes para evitar a penetração da radiação solar direta, reduzindo, desta forma, a necessidade de aplicação de sistemas mecânicos de arrefecimento como o ar condicionado.

Numa primeira abordagem foram estudadas três situações. Primeiro começou-se por aplicar um dispositivo de sombreamento fixo na fachada onde está implementada a parede de Trombe, uma pala horizontal de 1,5 m de largura, cenário 18. Uma outra simulação consistiu apenas na aplicação de um dispositivo móvel, neste caso, um rolo exterior, cenário 19. No cenário 20 optou-se pela combinação dos dois dispositivos testados anteriormente. Os resultados obtidos encontram-se expostos na Figura 5.27.

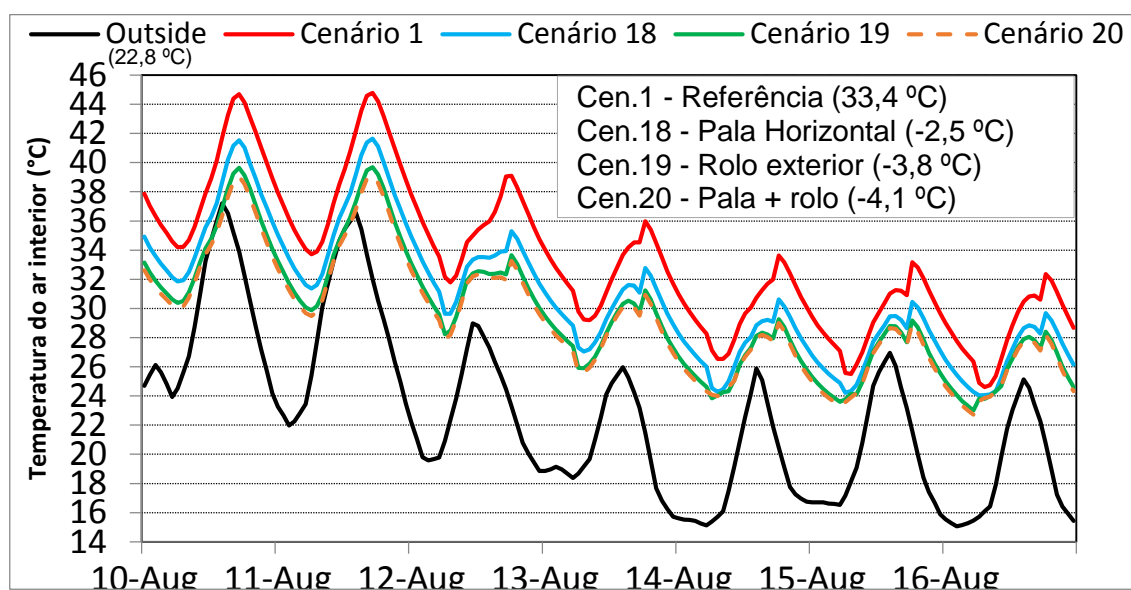


Figura 5.27 – Distribuição da temperatura interior com a introdução de dispositivos de sombreamento durante o verão.

Dos resultados obtidos é possível observar que a colocação de dispositivos de sombreamento tem, claramente, um impacto nas temperaturas interiores do compartimento. O rolo exterior revelou ser uma alternativa bastante eficaz, contudo, a melhor solução, como esperado, foi a combinação dos dois dispositivos. No verão consegue-se diminuir a temperatura média em cerca de 4,1 °C tendo em conta a melhor solução.

No entanto, a colocação destes dispositivos também se reflete na estação de aquecimento. A preferência por dispositivos móveis é sempre mais versátil do que os sistemas fixos, uma vez que permite controlar os dispositivos em função da radiação solar que se pretende. Assim, durante o inverno é possível captar a radiação solar incidente de modo a utilizá-la para o aquecimento do compartimento, e durante o verão consegue-se impedir um possível sobreaquecimento.

Considerando a melhor solução foi analisado qual seria o efeito da introdução dos dispositivos na temperatura interior durante o inverno, cenário 21. Na Figura 5.28 mostram-se os resultados obtidos.

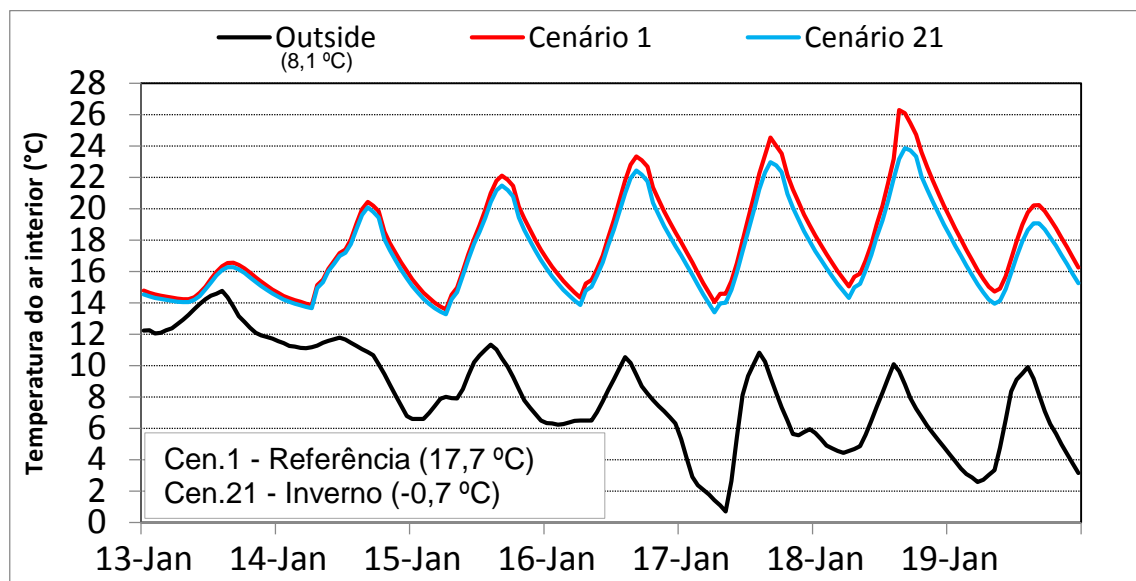


Figura 5.28 – Distribuição da temperatura interior com a introdução de dispositivos de sombreamento durante o inverno.

Pela análise dos resultados verifica-se que a implementação de dispositivos de sombreamento durante o verão não têm influência durante a estação de aquecimento. Isto acontece pois é possível controlar o dispositivo móvel tendo em conta a radiação solar que se pretende. Da mesma forma, o dispositivo fixo utilizado é idealizado de modo a obter o máximo de benefícios dos raios solares durante o inverno e de forma a limitá-los durante o verão. Isto é possível devido à variação dos ângulos que o sol forma com a superfície da Terra durante as diferentes épocas do ano. Tendo em conta estes aspetos, pode dizer-se que os dispositivos de proteção solar constituem assim uma mais-valia para o sistema.

Dado o exposto ao longo deste subcapítulo pode dizer-se que uma parede de Trombe contribui de forma positiva no comportamento térmico do protótipo. No entanto, é importante ter em conta vários parâmetros durante a fase de projeto de forma a obter o melhor desempenho possível deste sistema. É necessário também fazer uma ponderação entre os ganhos e possíveis consequências deste sistema para as diferentes estações do ano.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 Conclusões

A presente dissertação teve, como principal objetivo, avaliar o desempenho térmico passivo, isto é, sem sistemas mecânicos de aquecimento e arrefecimento, de uma parede de Trombe. O recurso a este tipo de sistema em Portugal ainda é pouco solicitado pois é uma técnica pouco conhecida no sector da construção. De seguida apresentam-se as principais conclusões obtidas ao longo da realização deste trabalho.

Segundo a pesquisa efetuada, a parede de Trombe constitui um sistema com várias vantagens, nomeadamente, a diminuição do consumo de energia de origem fóssil para aquecimento, aumento do conforto térmico, são sistemas passivos de baixa manutenção, podem atuar tanto como sistema de aquecimento durante o inverno como de arrefecimento durante o verão, quando dimensionados de forma correta, e ainda contribui para o aumento da inércia térmica.

No entanto, como se sabe, este sistema também apresenta algumas desvantagens. Para se conseguir uma maior eficácia durante o inverno, este sistema é fortemente dependente da radiação solar e de uma boa orientação. A parede pode limitar o espaço habitável, impedir a iluminação natural ou mesmo a vista para o exterior. E ainda há a hipótese de ocorrência de um sobreaquecimento no verão. Contudo, grande parte destas desvantagens podem ser contornadas quando se dimensiona convenientemente o sistema. A parede de Trombe apresenta a vantagem de ser facilmente adaptada ao que se pretende, podendo apenas ocupar uma pequena área da fachada onde se insere e prevendo-se dispositivos de proteção solar fixos e/ou móveis.

No que diz respeito ao caso de estudo, foram simulados alguns cenários com alterações nos constituintes da parede de Trombe que permitiu não só avaliar o seu desempenho térmico mas também perceber quais os parâmetros que mais influenciam a sua eficiência. De uma maneira geral pode dizer-se que os resultados obtidos são bastante credíveis para qualquer um dos cenários simulados.

Da análise CFD foi possível concluir que o modelo da parede de Trombe estava a funcionar conforme o previsto, o ar presente na caixa-de-ar é aquecido, sobe e entra no compartimento

através da abertura superior. No compartimento, o ar desloca-se ao longo deste, desce e retorna à parede de Trombe, onde entra através a abertura inferior.

Numa primeira abordagem é possível dizer que a parede de Trombe é um sistema de aquecimento passivo com elevada eficiência, como se pode comprovar pelos resultados obtidos para a comparação deste sistema com um sistema de base (sem parede de Trombe).

Fazendo uma síntese dos cenários simulados na análise paramétrica, o primeiro parâmetro a ser alterado foi a dimensão da parede de Trombe. Este parâmetro surgiu por ser uma das desvantagens do sistema a perda de iluminação natural e contacto com o exterior, e assim seria possível minorar estes efeitos. Dos resultados obtidos verificou-se que mesmo que a parede de Trombe ocupe uma pequena área da fachada onde está implementada, é possível aumentar a temperatura interior do compartimento.

Na segunda simulação alterou-se a espessura da coluna de água e verificou-se que com uma parede menos espessa, eram atingidas temperaturas interiores mais elevadas.

De seguida foi simulada a variação da espessura da caixa-de-ar e observou-se que não existiam diferenças significativas entre os vários cenários. Contudo, numa análise mais pormenorizada, foi possível notar que a melhor solução era a caixa-de-ar de menor espessura.

Outro parâmetro estudado foi o tipo de vidro utilizado na parede de Trombe. Comparou-se a utilização de vidro simples, duplo e triplo. Como esperado, e uma vez que o vidro triplo apresentava menor coeficiente de transmissão térmica, foi a solução em que se conseguia atingir temperaturas interiores mais elevadas. O vidro triplo apresenta melhor desempenho que o vidro duplo, e este, por sua vez, melhor que o vidro simples.

A cor da pintura do aço do painel foi o quinto parâmetro a ser alterado. Neste parâmetro foram testados dois cenários extremos, um em que se utilizava cor branca e outro onde se aplicou cor preta, e ainda a situação de referência que dizia respeito à utilização de cor cinzenta. Conforme o previsto, a utilização de cor mais escura atingiu temperaturas interiores mais elevadas.

Para as simulações relativas à permeabilidade ao ar, os resultados foram obtidos em função da qualidade de execução ou da construção ser mais ou menos eficiente. Conforme a expectativa, a melhor solução foi considerando uma construção excelente, já que esta apresentava infiltrações quase nulas. A solução de qualidade construtiva média revelou resultados interessantes, pois apresentou temperaturas máximas ligeiramente superiores à situação de referência para alguns casos, que resultam de uma maior circulação de ar devido à existência de mais infiltrações. No entanto, essa solução apresentou temperaturas mínimas inferiores,

resultando na existência de maiores amplitudes térmicas. A solução construtiva de qualidade muito pobre, como era esperado, apresentou temperaturas mínimas interiores muito baixas devido às infiltrações.

Um dos parâmetros mais importantes para que a parede de Trombe funcione corretamente é a área das aberturas para a ventilação. Relativamente aos resultados obtidos para a temperatura interior do compartimento pode dizer-se que as diferenças não foram muito significativas. No entanto, analisando o fluxo de ar nas grelhas e os ganhos de calor por ventilação natural interna, percebeu-se que quanto maior for a área melhores são os resultados.

Por último, mas não menos importante, foi analisado o cenário de referência para o verão, de modo a avaliar o efeito da parede de Trombe para esta estação e arranjar soluções para evitar o seu sobreaquecimento, nomeadamente, a colocação de dispositivos de proteção solar. A melhor solução foi a combinação de uma pala horizontal e de um rolo colocado pelo exterior, conseguindo-se uma redução da temperatura média interior de 4,1 °C, o que é bastante significativo. Contudo, é sempre importante fazer uma ponderação entre os ganhos e os prejuízos que a colocação de dispositivos de sombreamento pode trazer, e assim foi verificada a melhor solução obtida para o caso de inverno. Os resultados revelaram que os dispositivos implementados não têm influência no inverno, pois a pala é projetada de forma a favorecer a posição do sol e o dispositivo móvel pode ser facilmente controlado. Face a estes aspetos, verifica-se que os dispositivos de sombreamento contribuem de uma forma positiva para este sistema.

Em virtude dos dados observados, conclui-se que através da implementação de uma parede de Trombe num compartimento é possível aumentar o comportamento térmico de um edifício, aproveitando a radiação solar. E levando em consideração o panorama atual da construção em Portugal, justifica-se ainda mais a necessidade de soluções como a proposta desenvolvida neste trabalho para serem utilizadas tanto para construções novas como para a reabilitação.

6.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, propõe-se fazer uma comparação entre os resultados obtidos com a modelação numérica e resultados medidos de um protótipo experimental, o que não foi possível fazer neste trabalho. E ainda a simulação de uma parede de Trombe para uma moradia, ou seja, para uma situação com mais compartimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, A. (2014). “Avaliação do Desempenho Térmico de Paredes de Trombe em Pedra”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- ASHRAE, (2005). “2005 American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers (ASHRAE) Handbook: Fundamentals - SI edition”.
- AUWORKSHOP@ (2015). <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/>. Building Science Fundamentals. Consultado em 31/03/2015.
- Bojić, M., Johannes, K. and Kuznik, F. (2014). “Optimizing energy and environmental performance of passive Trombe wall”. *Energy and Buildings* 70 (2014) 279-286.
- CAD@ (2015). <http://www.planetacad.com/>. Companhia de Arquitetura e Design. Consultado em 14/04/2015.
- Cardoso, B. (2013). “Análise paramétrica de uma solução passiva para uma moradia com estrutura em aço leve”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto, do Ministério da Economia e do Emprego. Diário da República, 1.ª série – N.º 159, pp. 4988-5005.
- DESIGN@ (2015). <http://www.dannyforsterdesignstudio.com/indiana-culver-residence/p0sck73ajp349ujtcafudyj1k5hvqc>. Danny Forster, Design Studio. Consultado em 02/04/2015.
- Diretiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de Dezembro de 2002 relativa ao desempenho energético dos edifícios. Jornal Oficial das Comunidades Europeias, N.º L1, 4 de Janeiro de 2003, pp. 65-71.
- Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). Jornal Oficial da União Europeia, N.º L153, 18 de Junho de 2010, pp. 13-35.

-
- DGEG@ (2015). <http://www.dgeg.pt/> Direção Geral de Energia e Geologia (página internet oficial), Coimbra. Consultado em 5 de Março de 2015.
- ESSENCIALH@ (2015). <http://www.essentialhabitat.com/>. Essential Habitat healthy spaces for humans. Consultado em 30/03/2015.
- EC@ (2015). <http://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>. European Commission – Energy Efficiency in Buildings. Consultado em 21/04/2015.
- Ferreira, M. (2014). “O sistema construtivo com estrutura leve em aço”. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Futureng@ (2015). <http://www.futureng.pt/>. Light Steel Framing, Engenharia e Projeto. Consultado em 24/03/2015.
- Gaspar, A. (2013). “Construção de Edifícios de Habitação em Light Steel Framing - Alternativa viável à construção tradicional”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Comunicação, Arquitetura, Artes e Tecnologias da Informação da Universidade Lusófona do Porto.
- Gonçalves, H. e Brotas, L. (2007). “A norma Passivhaus em climas quentes da Europa: Diretrizes de projecto para casas confortáveis de baixo consumo energético”. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação.
- Gonçalves, H. e Graça, J. M. (2004). “Conceitos Bioclimáticos para edifícios em Portugal”. Departamento de energias renováveis – INETI. Lisboa, Portugal.
- GREENSPEC@ (2015). <http://www.greenspec.co.uk/building-design/thermal-mass/>. Consultado em 15/04/2015.
- Grubb, P., Gergolewski, M. and Lawson, R., (2001). Building Design using Cold Formed Steel Sections – Light Steel Framing in Residential Construction, The Steel Construction Institute, Publicação nº SCI P301, ISBN 1-85942-121-0.
- HOMEGRID@ (2015). <http://www.homegrid.pt/>. Consultado em 31/03/2015.
- LXRDESIGN@ (2015). <http://www.lxrdesign.biz/DETAILS.htm>. LX&R Design. Consultado em 02/04/2015.
- Martins, A. (2010). “Contribuição da parede de trombe na redução dos consumos energéticos dos edifícios”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Trás-os-Montes e alto Douro.
-

- Mateus, R. (2004). “Novas tecnologias construtivas com vista à sustentabilidade da construção”. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho.
- Mendonça, P. (2005). “Habitar sob uma segunda pele: estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados”. Universidade do Minho.
- Moita, F. (1987). “Energia Solar Passiva 1”. Direção-Geral de Energia, Imprensa Nacional Casa da Moeda.
- Palhinha, M. (2009). “Sistemas de sombreamento em arquitectura: proposta de um novo método de concepção e dimensionamento”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- PASSIVH@ (2015). <http://www.passivhaus.pt/>. Associação PassivHaus Portugal. Consultado em 30/03/2015.
- PH@ (2015). <http://www.portaldahabitacao.pt/>. Portal da habitação. Consultado em 25/03/2015.
- P3P@ (2014). <http://p3publico.pt/>. Consultado em 31/03/2015.
- REA@ (2013). REA 2013 Portugal. Relatório de Estado do Ambiente, Agência Portuguesa do Ambiente.
- Sá, A. (2011). “Parede de Trombe: Análise Experimental e Simulação de Desempenho Térmico”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil da Universidade da Beira Interior, Covilhã.
- Shen, J., Lassue, S., Zalewski, L. and Huang, D. (2007). “Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls”. *Energy and Buildings* 39 (2007) 962-974.
- STEEL@ (2015). <http://www.steel.com.au/products/coated-steel/colorbond-steel/basix-and-bca-classification>. Classification of COLORBOND steel colours for BCA and BASIX. Consultado em: 20/05/2015.
- TGH@ (2015). <http://www.the-green-house.net/passive-solar-energy/>. The Green House – Passive Solar Energy. Consultado em 15/04/2015.