



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

## **Parede de Trombe: Análise Experimental e Simulação de Desempenho Térmico**

Ana Cristina Briga de Sá

Tese para obtenção do Grau de Doutor em  
**Engenharia Civil**  
(3º ciclo de estudos)

Orientadora: Prof. Doutora Anabela Gonçalves Correia de Paiva  
Co-orientador: Prof. Doutor José Boaventura Ribeiro da Cunha  
Co-orientador: Prof. Doutor João Carlos Gonçalves Lanzinha

Covilhã, Dezembro de 2011



## Agradecimentos

Ao concluir este trabalho, é minha vontade manifestar os mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a sua concretização. A todos, os meus sinceros agradecimentos.

À Universidade da Beira Interior, pelo enquadramento institucional, científico e logístico que me proporcionou.

À Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, por proporcionar a realização deste trabalho.

À Prof.<sup>a</sup> Doutora Anabela Paiva, minha orientadora, pelo acompanhamento, estímulo, conhecimento, confiança e amizade, manifestados ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Doutor José Boaventura da Cunha e ao Prof. Doutor João Lanzinha, co-orientadores, pelo estímulo, disponibilidade e conhecimentos transmitidos.

Ao Presidente da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Prof. Doutor José Bulas Cruz, pela disponibilidade demonstrada no desenvolvimento deste trabalho.

À Prof.<sup>a</sup> Doutora Sandra Pereira e à Eng.<sup>a</sup> Ana Costa, pela contribuição no decorrer da fase experimental.

À empresa Projectacon- Engenharia Lda., pelo fornecimento dos materiais e mão-de-obra necessários à implementação do dispositivo experimental, sem o qual a realização deste trabalho não seria possível.

Aos colaboradores da Projectacon - Engenharia Lda.

Aos meus alunos de Projecto de Licenciatura.

Aos colegas e amigos que sempre me apoiaram.

Ao Moisés e aos meus pais, pelo apoio, compreensão e constante incentivo ao longo deste tempo.



## Resumo

A necessidade de redução do consumo de energia nos edifícios exige que se adoptem medidas de melhoria do desempenho energético de edifícios novos e existentes. Uma das formas de alcançar este objectivo consiste na integração de soluções construtivas mais sustentáveis, como por exemplo, os sistemas solares passivos. Apesar de o aproveitamento da energia solar através deste tipo de sistemas ser uma técnica bastante antiga, o recurso aos sistemas solares passivos não constitui, actualmente, uma prática muito corrente na construção, diminuindo a sua aplicação no que se refere aos sistemas passivos de ganho indirecto. A parede de Trombe é um sistema de ganho indirecto e a sua integração na envolvente dos edifícios em Portugal é escassa devido à falta de informação por parte dos diversos intervenientes do sector da construção, no que respeita ao seu desempenho energético e às suas características construtivas.

No sentido de contribuir para o aumento do conhecimento científico nesta área, apresenta-se neste trabalho a análise experimental e a simulação do desempenho térmico da parede de Trombe sujeita a condições climáticas reais na cidade de Vila Real. A análise experimental englobou o projecto, construção, instrumentação e monitorização de um dispositivo experimental, constituído por uma célula de teste que incluiu a construção de uma parede de Trombe. Nesta fase foi possível analisar os valores obtidos relativos às temperaturas na parede acumuladora, na caixa-de-ar e nas aberturas de ventilação, para a parede de Trombe sujeita à influência dos dispositivos de sombreamento. Para além da análise experimental, foi também aplicada uma metodologia de cálculo do desempenho térmico da parede de Trombe com carácter dinâmico, implementada em ambiente de programação MatLab que permitiu calcular os ganhos totais através deste sistema. A análise efectuada permitiu definir os períodos de actuação do sistema de ventilação e do dispositivo de sombreamento exterior que melhor se adaptam às estações de aquecimento e de arrefecimento, bem como aos períodos diurno e nocturno. Concluiu-se assim, que o trabalho desenvolvido nesta tese constitui um contributo válido para o melhor conhecimento do desempenho térmico da parede de Trombe, o qual constituirá um incentivo para a sua maior aplicação em edifícios novos e existentes.

## Palavras-chave

Parede de Trombe, desempenho térmico, trabalho experimental, simulação dinâmica.



## Abstract

The need to reduce energy consumption in buildings requires solutions to improve the energy performance of new and existing buildings. One way to achieve this objective is the integration of more sustainable solutions, such as passive solar systems. The use of solar energy is a very old technique, but nowadays its use is no longer such a common practice in construction, especially in what concerns the use of indirect gain passive solar systems, such as the Trombe wall. Its integration into the building envelope in Portugal is still rare, because of the lack of information about its energy performance and its construction system by the stakeholders in the construction sector.

In order to contribute to the increase of scientific knowledge in this area, this study presents the experimental analysis and simulation of the thermal performance of the Trombe wall in the real weather conditions of the city of Vila Real. The experimental analysis included the design, construction, instrumentation and monitoring of an experimental device consisting of a test cell with a Trombe wall. At this stage it was possible to analyze the temperature values obtained in the massive wall, in the air box and at the air vents of the Trombe wall, affected or not by shading devices. In addition to the experimental analysis a dynamic calculation methodology of the thermal performance of the Trombe wall was also applied. This methodology was implemented in MatLab and allowed the calculation of the total gains through this system. This analysis allowed the definition of the periods of appropriate operation of the ventilation system and of the exterior shading device for the heating and cooling seasons, as well as during the various periods the day. The scientific work developed in this thesis is a valuable contribution to a better understanding of the thermal performance of the Trombe wall, which will provide an incentive for its main application in new and existing buildings.

## Keywords

Trombe wall, thermal performance, experimental work, dynamic simulation.





# Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
1.1 Enquadramento	3
1.2 Objectivos	4
1.3 Contribuição	5
1.4 Organização do trabalho	5
Capítulo 2 - Funcionamento da Parede de Trombe e dos seus Constituintes	7
2.1 Introdução	9
2.2 Descrição geral	9
2.3 Constituintes da parede de Trombe	12
2.3.1 Parede acumuladora	13
2.3.2 Envidraçado	19
2.3.3 Dispositivos de sombreamento	25
2.3.4 Caixa-de-ar entre o vidro e a parede acumuladora	29
2.3.5 Sistema de ventilação	30
2.4 Modo de funcionamento	31
2.5 Integração arquitectónica	35
2.6 Conclusões	36
Capítulo 3 - Parede de Trombe: Estudos Desenvolvidos	37
3.1 Introdução	39
3.2 Parede de Trombe clássica	39
3.2.1 A parede de Trombe clássica e outros sistemas solares passivos	39
3.2.2 Características dimensionais e materiais da parede acumuladora	42
3.2.3 Características do envidraçado	46
3.2.4 Dispositivos de sombreamento	49

## Índice

---

3.2.5 Parâmetros influenciadores da transmissão de calor por convecção natural	51
3.3 Parede de Trombe não ventilada	56
3.4 Variantes à parede de Trombe clássica	58
3.4.1 Parede de Trombe duplamente ventilada	58
3.4.2 Parede de Trombe melhorada com isolamento térmico	60
3.4.3 Parede de Trombe-Michel composta	62
3.4.4 Parede de Trombe fotovoltaica	64
3.4.5 Parede de Trombe modificada	66
3.4.6 Parede de Trombe com materiais de mudança de fase (PCM)	69
3.4.7 Parede de Trombe em malha (Lattice Wall)	72
3.4.8 Parede solar metálica	73
3.5 A integração da parede de Trombe na reabilitação de edifícios	74
3.6 Cálculo do desempenho térmico da parede de Trombe com base em documentos normativos e regulamentares	75
3.7 Aplicação da parede de Trombe em Portugal	76
3.8 Conclusões	77
Capítulo 4 - Metodologia de Análise do Desempenho Térmico da Parede de Trombe	79
4.1 Introdução	81
4.2 Metodologia experimental	82
4.2.1 Fase de projecto	82
4.2.1.1 Configuração da célula de teste	82
4.2.1.2 Caracterização da parede de Trombe	85
4.2.2 Fase de construção	86
4.2.3 Instrumentação e monitorização	91
4.2.3.1 Equipamentos utilizados	92

## Índice

---

4.2.3.1.1 Sensores	92
4.2.3.1.2 Termofluxímetros	97
4.2.3.1.3 Sistemas de aquisição de dados	97
4.2.3.1.4 Termohigrómetro	98
4.2.3.1.5 Câmara de termografia	99
4.3 Metodologia de simulação térmica	100
4.3.1 Formulação	100
4.3.1.1 Transferência de calor através do envidraçado	101
4.3.1.2 Transferência de calor através da parede acumuladora	105
4.4 Conclusões	106
Capítulo 5 - Análise dos Resultados Experimentais	109
5.1 Introdução	111
5.2 Parâmetros influenciadores do desempenho da parede de Trombe	112
5.2.1 Condições climáticas exteriores	112
5.2.2 Variação da temperatura na caixa-de-ar entre o vidro e a parede acumuladora	114
5.2.3 Variação da temperatura na parede acumuladora	118
5.2.3.1 Temperaturas superficiais exteriores	118
5.2.3.2 Perfil transversal de temperaturas	122
5.2.3.3 Temperaturas superficiais interiores	125
5.2.4 Desfasamento na devolução de calor	128
5.2.5 Temperatura e velocidade do ar nas aberturas de ventilação	131
5.2.5.1 Variação da temperatura	131
5.2.5.2 Velocidade do ar	133

## Índice

---

5.2.6 Condições climáticas interiores	134
5.2.7 Fluxo de calor através da parede de Trombe	137
5.3 Conclusões	141
Capítulo 6 - Cálculo do Desempenho Térmico da Parede de Trombe	145
6.1 Introdução	147
6.2 Implementação da metodologia de cálculo no programa de simulação MatLab	147
6.2.1 Condições de aplicação	147
6.2.2 Análise dos resultados obtidos	149
6.2.2.1 Transferência de calor através do envidraçado	149
6.2.2.1.1 Ganhos solares	149
6.2.2.1.2 Perdas de calor	150
6.2.2.1.3 Factor de utilização dos ganhos solares	151
6.2.2.1.4 Caudal de ventilação	152
6.2.2.1.5 Ganhos solares totais	153
6.2.2.2 Transferência de calor através da parede acumuladora	153
6.2.2.2.1 Coeficiente de transferência de calor	154
6.2.2.2.2 Ganhos solares totais	155
6.2.2.3 Desempenho térmico da parede de Trombe	155
6.3 Conclusões	158
Capítulo 7 - Conclusões e Trabalho Futuro	161
7.1 Conclusões finais	163
7.2 Trabalho futuro	166
Referências Bibliográficas	169

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Protótipo de casa solar criada por Félix Trombe e Jacques Michel, em Odeillo, França.	10
Figura 2.2 - Casa Solar em Odeillo, França: a) corte esquemático; b) planta.	10
Figura 2.3 - Desenho esquemático da parede de Trombe: a) não ventilada; b) clássica (ventilada).	11
Figura 2.4 - Efeito da massa térmica na estabilização da temperatura interior.	13
Figura 2.5 - Influência da inércia térmica de paredes de tijolo no valor da temperatura interior.	14
Figura 2.6 - Parede de Trombe: a) em betão; b) em adobe; c) em água.	15
Figura 2.7 - Superfície exterior de uma parede de Trombe pintada de preto.	17
Figura 2.8 - Parede de Trombe em tijolo sem pintura.	17
Figura 2.9 - Perfis de temperatura de uma parede pesada ao longo de um dia.	18
Figura 2.10 - Comportamento da inércia térmica: a) Inverno; b) Verão.	18
Figura 2.11 - Comportamento do vidro face à radiação solar incidente.	21
Figura 2.12 - Distribuição percentual da energia incidente para um vidro simples incolor em função do ângulo de incidência.	23
Figura 2.13 - O tipo de envidraçado utilizado disfarça a existência da parede de Trombe.	24
Figura 2.14 - Aplicação de vidro transparente na parede de Trombe.	24
Figura 2.15 - Introdução de película reflectora da radiação solar.	24
Figura 2.16 - Vista Sudeste da Casa Vale Rosal: a) influência da vegetação no Inverno; b) influência da vegetação no Verão.	27
Figura 2.17 - Dispositivo de sombreamento exterior em parede de Trombe.	28
Figura 2.18 - A existência do sombreamento exterior disfarça a parede de Trombe.	28
Figura 2.19 - Parede de Trombe ventilada numa escola na Índia ( <i>Best Green Building 2002</i> ): a) fase de construção; b) fase de conclusão.	29
Figura 2.20 - Elevada espessura da caixa-de-ar numa parede de Trombe ( <i>OHSU Center for Health and Healing</i> ).	30
Figura 2.21 - Espessura de caixa-de-ar reduzida na casa Shafer em Porto Santo.	30
Figura 2.22 - Esquema de funcionamento da parede de Trombe não ventilada: a) durante o dia; b) durante a noite.	32
Figura 2.23 - Esquema de funcionamento da parede de Trombe ventilada, durante o dia, no Inverno.	33
Figura 2.24 - Aquecimento por radiação e convecção durante o período de Inverno.	33

## Lista de Figuras

---

Figura 2.25 - Esquema de funcionamento da parede de Trombe ventilada, durante a noite, no Inverno.	33
Figura 2.26 - Esquema de funcionamento da parede de Trombe ventilada, durante a noite, no Verão.	34
Figura 2.27 - Esquema de funcionamento da parede de Trombe no sentido de favorecer a ventilação no Verão.	34
Figura 2.28 - Princípio de funcionamento da parede de Trombe no Verão.	34
Figura 2.29 - Pormenor construtivo da parede de Trombe.	35
Figura 2.30 - Integração arquitectónica da parede de Trombe numa moradia em Toronto.	36
Figura 2.31 - Aplicação de uma parede de Trombe num edifício bioclimático na Grécia.	36
Figura 3.1 - Alçado Sul das cinco células de teste (da esquerda para a direita): ganho directo, parede de Trombe, parede de água, estufa e cobertura de água.	40
Figura 3.2 - a) e b) Posição do envidraçado na parede de Trombe.	48
Figura 3.3 - Dispositivo de sombreamento amovível ( <i>Baer Zome Cluster, Corrales, NM 1972</i> ).	49
Figura 3.4 - Sombreamento no interior da caixa-de-ar.	50
Figura 3.5 - Modos de funcionamento da Parede de Trombe no Verão: a) sistema de ventilação fechado; b) sistema de ventilação aberto no envidraçado; c) abertura de ventilação na base da parede acumuladora e no topo do envidraçado.	59
Figura 3.6 - Desenho esquemático da parede de Trombe melhorada com isolamento térmico pelo interior.	60
Figura 3.7 - Desenho esquemático da parede de Trombe melhorada com isolamento pelo exterior.	61
Figura 3.8 - Desenho esquemático da Parede de Trombe - Michel composta.	62
Figura 3.9 - Esquema da ventilação natural de uma habitação com recurso à parede de Trombe modificada.	66
Figura 3.10 - Representação esquemática de funcionamento da parede de Trombe modificada, parcialmente envidraçada (PG-MTW).	67
Figura 3.11 - Parede de Trombe modificada: a) representação esquemática; b) posicionamento da abertura de ventilação superior.	68
Figura 3.12 - a) Princípio de funcionamento da parede de Trombe com PCM no Verão: não existe acumulação de energia; b) Princípio de funcionamento da parede de Trombe com PCM no Inverno: aquecimento solar passivo.	70
Figura 3.13 - Princípio de funcionamento da parede de Trombe com PCM.	71
Figura 3.14 - Vista frontal da parede acumuladora com PCM incorporado.	71
Figura 3.15 - Desenho esquemático da “Lattice Wall” a) perfil transversal; b) vista frontal.	72
Figura 3.16 - Representação esquemática da integração da parede solar metálica na ventilação natural.	73
Figura 4.1 - Local de implantação da célula de teste ( <i>Google Earth</i> ).	83

## Lista de Figuras

---

Figura 4.2 - Desenho esquemático da célula de teste.	84
Figura 4.3 - Desenho esquemático da parede de Trombe.	86
Figura 4.4 - Contentor que serviu de base à construção da célula de teste: a) remoção da fachada orientada a Sul; b) blocos de betão para assentamento.	87
Figura 4.5 - Colocação de isolamento térmico na envolvente: a) paredes exteriores; b) cobertura.	87
Figura 4.6 - Construção das aberturas de ventilação inferiores.	88
Figura 4.7 - Colocação do sensor de temperatura a meia espessura da parede acumuladora.	88
Figura 4.8 - Colocação dos obturadores nas aberturas de ventilação: a) 1º tipo de obturadores; b) 2º tipo de obturadores.	88
Figura 4.9 - Isolamento térmico da envolvente do contentor; a) visualização da espessura de XPS aplicada nas paredes e no pavimento; b) vista interior do contentor.	89
Figura 4.10 - Isolamento térmico em XPS da envolvente da caixa-de-ar: a) pavimento; b) parede.	90
Figura 4.11 - Dispositivos de sombreamento exteriores utilizados.	90
Figura 4.12 - Aspecto final da célula de teste.	90
Figura 4.13 - Desenho esquemático da designação e localização dos sensores utilizados.	92
Figura 4.14 - Sensor de humidade relativa.	94
Figura 4.15 - Curvas das temperaturas simulada e especificada pelo fabricante versus resistência para o termistor <i>TM1 da Delta T devices, Ltd.</i>	94
Figura 4.16 - Sensor de temperatura $T_i$ .	95
Figura 4.17 - Sondas de temperatura $T_{i1}$ e de humidade relativa $HR_i$ .	95
Figura 4.18 - Sensores de temperatura na caixa-de-ar ( $T_{ca1}$ e $T_{ca2}$ ) e na superfície exterior da parede acumuladora ( $T_{sup1}$ , $T_{sup2}$ e $T_{sup3}$ ).	96
Figura 4.19 - Localização dos sensores de temperatura e de fluxo de calor na superfície interior da parede acumuladora.	96
Figura 4.20 - Colocação das sondas de temperatura junto às aberturas de ventilação: a) abertura superior esquerda; b) abertura inferior esquerda com 1º tipo de obturadores; c) aberturas com colocação do 2º tipo de obturadores.	97
Figura 4.21 - Sistema de aquisição de dados: a) <i>datalogger Delta-T</i> ; b) <i>datalogger Hukseflux</i> .	98
Figura 4.22 - Termohigrómetro e sondas de temperatura e humidade relativa do ar interior.	98
Figura 4.23 - Câmara de Termografia utilizada.	99
Figura 5.1 - Variação da intensidade de radiação solar total ( $R_S$ ) medida na cobertura da célula de teste, segundo um plano horizontal.	112
Figura 5.2 - Pormenor da variação da intensidade de radiação solar total ( $R_S$ ) medida num plano horizontal: a) Período de 5 a 13 de Agosto de 2011; b) Período de 27 de Outubro a 4 de Novembro de 2011	113

## Lista de Figuras

---

Figura 5.3 - Variação da temperatura exterior ( $T_e$ ).	114
Figura 5.4 - Variação da temperatura na caixa-de-ar: a) Temperatura superior ( $T_{ca2}$ ); b) temperatura inferior ( $T_{ca1}$ ); c) diferencial de temperatura $dT$ ( $T_{ca2}-T_{ca1}$ ).	116
Figura 5.5 - Variação das temperaturas medidas na superfície exterior da parede acumuladora: a) temperatura superior ( $T_{sup3}$ ); b) temperatura central ( $T_{sup2}$ ); c) temperatura inferior ( $T_{sup1}$ ).	118
Figura 5.6 - Sombreamentos na superfície exterior da parede acumuladora.	119
Figura 5.7 - Variação do diferencial de temperaturas medidas na superfície exterior da parede acumuladora: a) diferencial de temperatura $T_{sup3}-T_{sup2}$ ; b) diferencial de temperatura $T_{sup3}-T_{sup1}$ .	120
Figura 5.8 - Variação do diferencial de temperaturas medidas ao longo do perfil transversal da parede acumuladora: a) temperatura superficial exterior ( $T_{sup2}$ ); b) temperatura no interior da parede ( $T_{ip}$ ); c) temperatura superficial interior ( $T_{supi5}$ ).	123
Figura 5.9 - Variação do diferencial entre as temperaturas medidas ao longo do perfil transversal da parede acumuladora: a) diferencial de temperatura $T_{sup2}-T_{ip}$ ; b) diferencial de temperatura $T_{ip}-T_{supi5}$ .	124
Figura 5.10 - Zona da parede referente ao termograma da Figura 5.11.	125
Figura 5.11 - Termograma recolhido às 18h30min do dia 13 de Setembro de 2011.	125
Figura 5.12 - Termogramas recolhidos na proximidade das aberturas superiores, às 18h30min do dia 13 de Setembro de 2011: a) laterais esquerdas; b) laterais direitas.	126
Figura 5.13 - Termogramas recolhidos na proximidade das aberturas inferiores, às 18h30min do dia 13 de Setembro de 2011: a) laterais esquerdas; b) laterais direitas.	126
Figura 5.14 - Termogramas recolhidos às 09h50min do dia 14 de Setembro de 2011: a) zona superior da parede acumuladora; b) zona central da parede acumuladora.	127
Figura 5.15 - Termogramas recolhidos às 19h45min do dia 14 de Setembro de 2011: a) zona lateral esquerda da parede acumuladora; b) zona lateral direita da parede acumuladora.	127
Figura 5.16 - Termogramas recolhidos às 11h00min do dia 19 de Setembro de 2011: a) próximo das aberturas inferiores do lado direito; b) próximo das aberturas superiores do lado esquerdo.	128
Figura 5.17 - Variação dos sinais $u$ (a azul) e $y$ (a preto).	129
Figura 5.18 - Correlação utilizada na determinação do atraso entre os dois sinais.	130
Figura 5.19 - Atraso entre os sinais da radiação solar total e a temperatura superficial interior da parede de Trombe não ventilada.	130
Figura 5.20 - Atraso entre os sinais da radiação solar total e a temperatura superficial interior da parede de Trombe ventilada.	131
Figura 5.21 - Variação dos valores das temperaturas na abertura superior esquerda (a vermelho) e na abertura inferior esquerda (a azul).	132
Figura 5.22 - Variação da velocidade do ar na 2ª abertura superior esquerda.	134
Figura 5.23 - Variação da temperatura do ar no interior da célula de teste, $T_i$ (a vermelho), do ar exterior, $T_e$ (a azul) e do diferencial entre as duas temperaturas (a preto).	135



## Lista de Figuras

---

Figura 5.24 - Variação do fluxo de calor através da parede de Trombe para o interior da célula de teste.	137
Figura 5.25 - Variáveis influenciadoras do desempenho da parede de Trombe.	140
Figura 5.26 - Diagrama de temperaturas na parede de Trombe.	142
Figura 6.1 - Variação dos ganhos solares, $Q_{g_{n,sw}}$ , através da parede de Trombe.	149
Figura 6.2 - Variação das perdas de calor, $Q_{ht,al}$ , através do envidraçado.	150
Figura 6.3 - Relação entre $\gamma_{al}$ e $\omega$ obtida na aplicação da metodologia de cálculo.	151
Figura 6.4 - Relação entre $\gamma_{al}$ e $\omega$ apresentada na norma ISO 13790:2008.	151
Figura 6.5 - Caudal de ventilação $q_{ve,sw}$ .	152
Figura 6.6 - Variação dos ganhos solares $Q_{sol}$ .	153
Figura 6.7 - Variação do coeficiente de transferência de calor adicional por convecção $\Delta H$ .	154
Figura 6.8 - Variação do coeficiente de transferência de calor $H$ .	154
Figura 6.9 - Variação dos ganhos obtidos por transferência de calor $Q_{trans}$ .	155
Figura 6.10 - Variação dos ganhos totais obtidos através da parede de Trombe, $Q_{total}$ .	156
Figura 6.11 - Variação dos ganhos $Q_{total}$ (a azul), $Q_{sol}$ (a vermelho), e $Q_{trans}$ (a verde).	157
Figura 6.12 - Pormenor da variação dos ganhos $Q_{total}$ (a azul), $Q_{sol}$ (a vermelho), e $Q_{trans}$ (a verde).	157



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Massa volúmica, calor específico e capacidade calorífica de diferentes materiais.	14
Tabela 2.2 - Coeficientes de absorção e reflexão da radiação solar, e emissividade a baixa temperatura de diversos materiais correntes na construção de edifícios.	16
Tabela 2.3 - Tempo de atraso em função do tipo de material.	19
Tabela 3.1 - Espessura recomendada para diferentes paredes de elevada inércia térmica e o seu efeito nas temperaturas interiores.	44
Tabela 3.2 - Relação entre a espessura da parede acumuladora e a área do compartimento.	46
Tabela 4.1 - Ficha de registo do acesso à célula de teste.	91
Tabela 4.2 - Caracterização dos sensores utilizados.	93
Tabela 5.1 - Caracterização do período de ensaio experimental.	115



# Capítulo 1

## Introdução



# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

O panorama energético actual exige que a sociedade moderna inclua nos seus padrões de desenvolvimento o conceito de sustentabilidade, o que implica mudanças a nível económico, ambiental e social, para além de alterações comportamentais a nível individual. Isto significa que o crescimento económico das sociedades deve ser conseguido minimizando o impacte negativo no meio ambiente e na escassez de recursos. O sector da energia é imprescindível para a concretização das mais diversas actividades humanas do quotidiano, o que justifica o aumento da procura, mas não justifica a utilização irracional deste bem, cujo aumento indiscriminado do respectivo consumo afecta de forma inevitável os recursos existentes.

A contribuição decisiva do sector energético no desenvolvimento económico e social, por um lado, e o impacte ambiental comprometedor da sustentabilidade, por outro, exigem a adopção de medidas de eficiência energética, com maior ênfase nos sectores que consomem mais energia. Um dos sectores a nível mundial com maior responsabilidade no elevado consumo de energia é o dos edifícios, sendo responsável por 40% do consumo de energia e por 36% das emissões de CO<sub>2</sub>. Este constitui, portanto um sector fundamental para a intervenção no domínio da eficiência energética [1].

No sentido de reduzir o consumo de energia em edifícios foi publicada em 2002, pela União Europeia (UE), a Directiva Comunitária relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios [2], inserida no âmbito das iniciativas da UE em matéria de alterações climáticas, nomeadamente as obrigações decorrentes do Protocolo de Quioto e da segurança do aprovisionamento energético. Este documento foi criado com o objectivo de melhorar o desempenho energético dos edifícios em concordância com as condições climáticas que caracterizam cada estado-membro, pelo que foi transposto para a regulamentação nacional dos diversos países membros. Em 2010, esta Directiva Comunitária foi revista, tendo sido proposta uma nova versão onde se pretende atingir a designada meta dos “20-20-20”, que consiste em promover a redução das emissões de gases de efeito de estufa em 20%, a redução do consumo de energia em 20% e a produção de 20% da energia através de energias renováveis, até ao ano de 2020 [1, 3].

O cumprimento destes objectivos exige que se adoptem medidas de redução do consumo de energia e de melhoria do desempenho energético de edifícios novos e existentes. Estas medidas podem ser obtidas através da integração de soluções construtivas mais sustentáveis,

nomeadamente recorrendo aos sistemas solares passivos como técnicas de aquecimento e de arrefecimento dos edifícios. Apesar das exigências crescentes a nível europeu e a nível internacional no domínio da eficiência energética, o recurso a sistemas solares passivos ainda não constitui uma prática corrente, sendo poucos os exemplos da sua execução em obra, devendo, no entanto, ser potenciada a sua aplicação, dado o panorama energético actual.

As tecnologias solares passivas mais utilizadas nos edifícios são as relativas aos ganhos solares directos, nomeadamente as relacionadas com a orientação do edifício e com o tipo de envidraçados, apesar de, por vezes, ainda existirem alguns erros relativamente à sua aplicação, o que se deve ao facto de a informação relativa ao seu desempenho energético ainda ser escassa [4]. No que respeita aos sistemas solares passivos de ganho indirecto, como é o caso da parede de Trombe, este problema acentua-se, na medida em que são muito reduzidas as aplicações práticas deste sistema em edifícios e pouco desenvolvidos os processos de cálculo a utilizar em fase de projecto.

Em Portugal, a aplicação da parede de Trombe é quase inexistente devido à falta de informação acerca da integração deste sistema num edifício, quer na fase de projecto, quer na fase de construção [5]. Para que a introdução deste sistema passivo na envolvente de um edifício contribua para a redução das necessidades de aquecimento e de arrefecimento, é essencial que a sua utilização seja prevista logo na fase de projecto e adaptado ao edifício para que desempenhe convenientemente a sua função. No entanto, apesar da existência de diversos estudos nesta área, com o objectivo de otimizar o desempenho da parede de Trombe clássica, as metodologias de cálculo na fase de projecto ainda são escassas.

Da revisão bibliográfica efectuada, a Norma ISO 13790:2008 [6] é um dos poucos documentos que apresenta uma metodologia de cálculo dos ganhos solares e da transferência de calor através da parede de Trombe clássica, cuja aplicação foi adaptada por Martins [5] à situação portuguesa. Apesar destas metodologias constituírem um passo importante para a antevisão do comportamento deste sistema passivo, alguns dos parâmetros introduzidos na formulação necessitam de ser estudados e adaptados. A realização de estudos experimentais e de simulação pode contribuir para a optimização destas metodologias para além de permitir o conhecimento dos diversos parâmetros que condicionam o comportamento térmico da parede de Trombe e cujo desconhecimento constitui um obstáculo à sua aplicação corrente nos edifícios.

### 1.2 Objectivos

Este trabalho de investigação tem como principal objectivo um melhor conhecimento do desempenho térmico da parede de Trombe em situação real, através da realização de trabalho experimental numa célula de teste construída para este efeito e da simulação do seu desempenho térmico ao longo de um determinado período de tempo. O trabalho



experimental desenvolvido consistiu no projecto, construção, instrumentação e monitorização de uma célula de teste em Vila Real que inclui uma parede de Trombe, tendo em vista a análise do seu comportamento térmico sujeito a condições climáticas reais. O estudo do desempenho da parede de Trombe foi também efectuado através do cálculo dinâmico, baseado na metodologia de cálculo apresentada na Norma ISO 13790:2008 [6] e nos dados adquiridos na fase experimental.

### 1.3 Contribuição

Com a realização deste trabalho de investigação foi possível obter um melhor conhecimento do comportamento da parede de Trombe, com base em dados recolhidos experimentalmente e utilizando simulação computacional. A apresentação do funcionamento e das diversas configurações deste sistema solar passivo de ganho indirecto, permite demonstrar a evolução da sua aplicação desde a sua origem até ao presente, para além da identificação dos pontos onde se deve intensificar a investigação.

Considera-se que o trabalho experimental e de simulação desenvolvido constituiu uma mais-valia para o conhecimento do desempenho da parede de Trombe em Portugal, quando sujeita a condições climáticas reais. Esta análise permitirá adaptar e otimizar as características construtivas da parede de Trombe, nomeadamente ao nível das características geométricas e dimensionais dos seus constituintes.

Para além da contribuição a nível científico, pretende-se que o estudo aqui apresentado constitua uma forma de encorajamento da aplicação da parede de Trombe em Portugal e noutros países com condições climáticas semelhantes, como medida de melhoria do desempenho energético dos edifícios.

### 1.4 Organização do trabalho

Para além do presente capítulo, este trabalho de investigação está estruturado em mais seis capítulos.

No Capítulo 2 apresenta-se o estudo dos diversos constituintes (parede acumuladora, envidraçado, caixa-de-ar, sistema de ventilação e dispositivos de sombreamento) da parede de Trombe e do seu funcionamento. Esta análise permite, por um lado, caracterizar cada um desses elementos e, por outro lado, perceber de que forma as especificidades inerentes a cada um deles influenciam o desempenho do sistema como um todo.

No Capítulo 3 são apresentados os diversos estudos desenvolvidos sobre a parede de Trombe e as suas variantes, que foram surgindo ao longo do tempo. A recolha destes estudos permite o conhecimento das diversas aplicações deste sistema, bem como as alterações efectuadas ao conceito tradicional de parede de Trombe, com o intuito de a adaptar à função pretendida.

Para além disso, permite identificar quais os estudos que ainda devem ser realizados neste âmbito.

No Capítulo 4 é proposta uma metodologia de análise do desempenho térmico da parede de Trombe aplicada na prossecução dos objectivos adjacentes a este trabalho de investigação. Para além da explicitação das diversas fases da metodologia experimental referente à concepção da célula de teste com uma parede de Trombe, é também proposta uma metodologia de cálculo dinâmico do seu desempenho e os pressupostos inerentes à sua aplicação.

No Capítulo 5, é efectuada a análise dos resultados obtidos experimentalmente. A aquisição dos dados obtidos através da instrumentação e monitorização da célula de teste permitem a análise das diversas grandezas que influenciam o comportamento térmico da parede de Trombe, nomeadamente as temperaturas ao longo das diversas camadas e o fluxo de calor.

No Capítulo 6, é aplicada a metodologia de simulação proposta no Capítulo 4, recorrendo-se aos dados recolhidos durante a fase experimental. Verifica-se que a conjugação dos valores obtidos experimentalmente com o cálculo dinâmico baseado numa metodologia de cálculo estático permite determinar os ganhos solares obtidos através da parede de Trombe no período de ensaio considerado.

Finalmente, no Capítulo 7 apresentam-se as conclusões finais decorrentes do trabalho de investigação desenvolvido, bem como propostas de trabalho futuro, que permitirão aprofundar o conhecimento deste sistema passivo e o seu contributo para a melhoria do comportamento térmico dos edifícios.

## Capítulo 2

# Funcionamento da Parede de Trombe e dos seus Constituintes



## Capítulo 2

# Funcionamento da Parede de Trombe e dos seus Constituintes

### 2.1 Introdução

A optimização dos elementos construtivos da envolvente deve constituir o primeiro passo para a obtenção de edifícios energeticamente mais eficientes e conseqüentemente mais sustentáveis. O recurso ao aumento do isolamento térmico, à melhoria do desempenho térmico ao nível dos vãos envidraçados, nomeadamente ao nível da caixilharia e das protecções solares, são algumas das medidas a implementar simultaneamente com a integração arquitectónica de outras soluções, tais como os sistemas solares passivos. A localização, orientação e forma do edifício bem como uma área adequada de envidraçados por fachada, são alguns dos factores preponderantes no comportamento térmico de um edifício e constituem técnicas de aproveitamento solar passivo que não devem ser descuradas.

Para além da adopção deste tipo de soluções passivas de ganho directo, a capacidade de armazenamento térmico dos materiais e o fenómeno de transmissão de calor devem ser analisados e aproveitados, pois podem contribuir de forma bastante significativa para a redução do consumo de energia nos edifícios. Estes são factores que caracterizam e influenciam o funcionamento dos sistemas solares passivos de ganho indirecto, como é o caso da parede de Trombe. O estudo do comportamento de cada uma das camadas que compõem este sistema é fundamental para compreender de que forma cada uma delas pode condicionar o seu desempenho. Uma vez que esta técnica solar passiva será alvo de estudo no trabalho de investigação apresentado, neste capítulo será efectuada a caracterização dos seus constituintes, bem como a descrição do seu modo de funcionamento.

### 2.2 Descrição geral

Desde os tempos antigos que as paredes espessas de adobe ou pedra são utilizadas para armazenar o calor durante o dia e libertá-lo lentamente durante a noite, possibilitando assim o aquecimento dos edifícios. Actualmente, esta técnica milenar é por vezes melhorada, através da integração de outros elementos na envolvente dos edifícios, nomeadamente a parede de Trombe, cujo sistema incorpora o armazenamento térmico e a devolução de calor ao interior do compartimento [7].

O conceito de parede de Trombe foi patenteado por Morse em 1881 e desenvolvido e popularizado em 1957 por Félix Trombe e Jacques Michel, que construíram, em 1967, em Odeillo, França, a primeira casa com recurso a este sistema [8], (Figura 2.1 e 2.2) às quais se seguiram outras na mesma localidade. Na Figura 2.1 é possível observar o protótipo da referida casa solar que incorpora uma parede de Trombe construída em betão com 60 cm de espessura.



Figura 2.1 - Protótipo de casa solar criada por Félix Trombe e Jacques Michel, em Odeillo, França [9].

Nas Figuras 2.1 e 2.2 apresentam-se, respectivamente, um corte esquemático e a planta da casa solar, onde é possível observar a constituição da parede de Trombe e a disposição dos compartimentos.

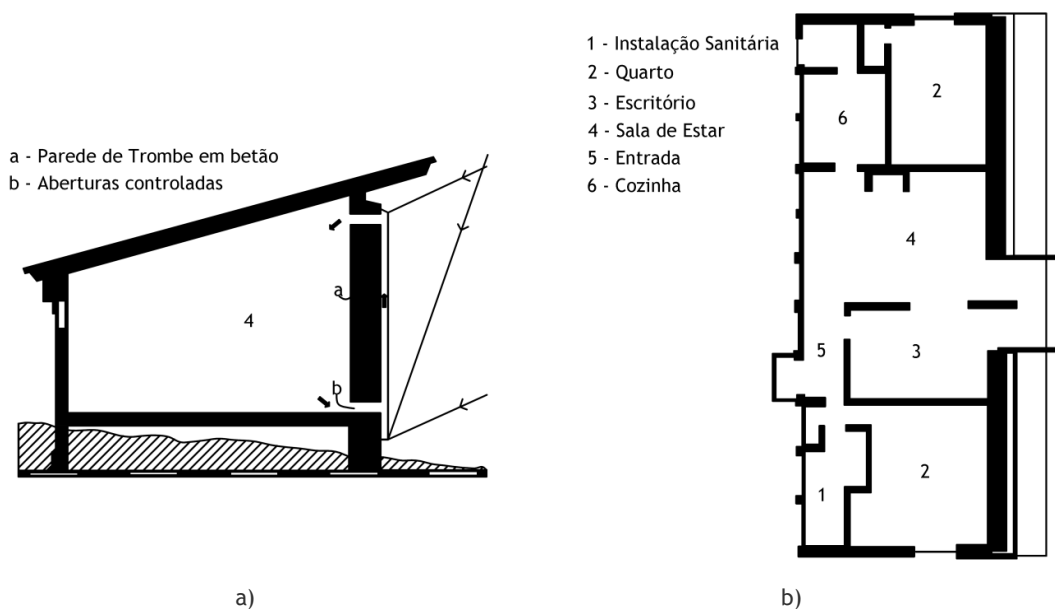


Figura 2.2 - Casa Solar em Odeillo, França: a) corte esquemático; b) planta (adaptado de [9]).

Este sistema é basicamente constituído por um vão orientado no quadrante Sul, que corresponde à exposição solar que permite obter maior radiação solar, sendo colocada no interior uma parede maciça de espessura variável, cuja superfície exterior é geralmente pintada de cor escura. No exterior é colocado um envidraçado, distanciando da parede acumuladora, formando uma caixa-de-ar entre os dois elementos [10]. A concepção clássica desta solução inclui a existência de um sistema de ventilação na parede acumuladora, tal como se ilustra na Figura 2.3b), havendo também paredes de Trombe não ventiladas, quando este sistema não for previsto (Figura 2.3a).

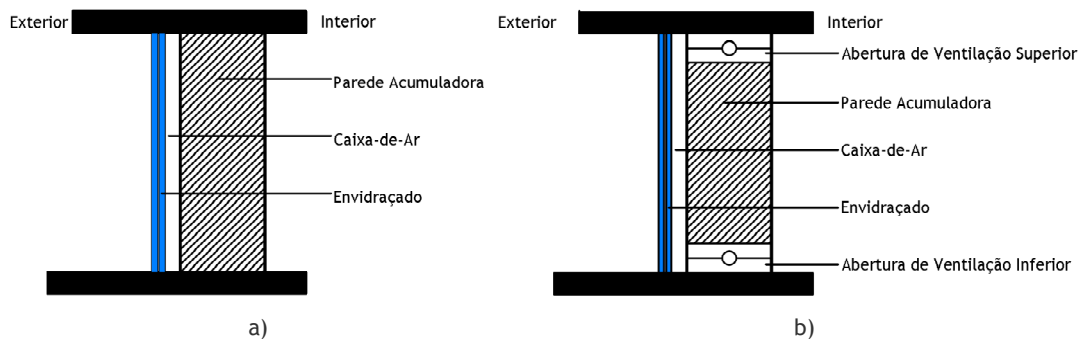


Figura 2.3 - Desenho esquemático da parede de Trombe: a) não ventilada; b) clássica (ventilada).

O seu princípio de funcionamento baseia-se nos fenómenos de transferência de calor, podendo funcionar como um sistema combinado de radiação e convecção, devido à existência de um sistema de ventilação. A radiação solar é absorvida e cedida ao interior do compartimento que serve, por condução através do elemento acumulador (Figura 2.3). A transferência de calor também pode ser realizada por convecção quando são colocadas aberturas no topo e na base deste elemento (Figura 2.3b)), [8]. A energia incidente é assim transferida para o interior do espaço, que será aquecido por intermédio da ventilação natural, garantida pelas aberturas na parede acumuladora [10]. Esta situação potencia este tipo de parede como um sistema solar passivo de aquecimento, sendo no entanto necessário minimizar a possibilidade de sobreaquecimento no período de Verão. A solução passa por introduzir um sistema de ventilação no envidraçado exterior que deverá ser complementado com dispositivos de sombreamento. A melhor forma de reduzir os custos com energia associados à utilização dos edifícios consiste em incorporar estas tecnologias solares passivas aquando da fase de projecto, uma vez que é nesta fase inicial que se poderá assegurar uma correcta integração, quer ao nível do desempenho energético, quer ao nível dos custos associados à sua construção.

No que respeita à introdução de paredes de Trombe na parede exterior da envolvente de um edifício, é fundamental o seu dimensionamento logo na fase de concepção do edifício, dado que os seus componentes devem ser estudados e adaptados à função que se pretende que esta desempenhe no edifício. O conhecimento da sua contribuição ao nível das necessidades de aquecimento e de arrefecimento do edifício deverá constituir a base do seu

dimensionamento, aquando da execução do projecto de comportamento térmico do edifício. Por exemplo, a opção de introduzir ou não orifícios de termocirculação na parede acumuladora depende essencialmente dos períodos em que se necessita de calor [8]. Outras características que deverão ser analisadas dizem respeito à capacidade térmica do material da parede acumuladora e à sua espessura, ao tipo de vidro a colocar pelo exterior, aos dispositivos de oclusão, à espessura da caixa-de-ar e também às dimensões do próprio sistema relativamente à área do compartimento que serve.

As oscilações que ocorrem durante o dia ao nível da temperatura e da radiação solar constituem desafios para a garantia do conforto dos utilizadores dos edifícios. Cada dia pode proporcionar um conjunto de condições que se traduzam em períodos de temperaturas muito elevadas ou bastante reduzidas [11], conduzindo assim à ocorrência de grandes amplitudes térmicas. A integração de soluções passivas, como é o caso da parede de Trombe, tem como objectivo a redução, ou até eliminação, destas oscilações de temperatura para possibilitar a manutenção das condições de conforto.

### 2.3 Constituintes da parede de Trombe

O dimensionamento da parede de Trombe e a optimização do seu desempenho são função das características inerentes a cada um dos seus constituintes e ao seu conjunto. Por um lado é fundamental o conhecimento das capacidades de armazenamento térmico do material que constitui a parede acumuladora, no sentido de se definir o material mais adequado ao edifício em causa e as características climáticas do local de implantação, bem como a espessura necessária para se obter o desfasamento ideal entre o período de acumulação e de libertação de calor para o interior do compartimento. Por outro lado, o envidraçado colocado pelo exterior é o elemento do sistema que permite criar o chamado “efeito de estufa” na caixa-de-ar existente entre este e a parede acumuladora. Neste caso, revelam-se de extrema importância a condutibilidade térmica do vidro a aplicar e a consideração de dispositivos de sombreamento e de ventilação. A espessura da caixa-de-ar deve também ser dimensionada tendo em atenção a quantidade de ar quente que é necessário que se armazene no espaço de ar para que depois possa ser transmitido para o interior do compartimento por condução, radiação e convecção no caso de a parede não ser ventilada, e essencialmente por convecção do ar, caso sejam previstas aberturas de ventilação na parede acumuladora. Se estiver previsto um sistema de ventilação este deverá ser calculado para que as dimensões e localização das aberturas sejam as mais adequadas ao fim em vista. Para um melhor entendimento destes aspectos, apresenta-se de seguida uma análise mais pormenorizada dos constituintes da parede de Trombe clássica e a forma como as suas características e o seu comportamento influenciam o desempenho deste sistema passivo. Esta análise permitirá posteriormente uma melhor compreensão do comportamento da parede de Trombe como um todo. Permitirá também um melhor entendimento dos trabalhos de investigação



desenvolvidos acerca deste sistema passivo, cuja referência será efectuada no capítulo seguinte.

### 2.3.1 Parede acumuladora

A inércia térmica da parede acumuladora é uma das características mais importantes no desempenho da parede de Trombe, uma vez que influencia de forma decisiva a capacidade de armazenamento térmico e de devolução de calor deste sistema passivo. Esta propriedade dos materiais é habitualmente usada como sistema passivo de ganho directo, sendo no entanto aplicada em sistemas solares passivos de ganho indirecto, como é o caso da parede de Trombe.

A inércia térmica dos diferentes elementos construtivos de um edifício pode auxiliar na redução do consumo de energia num edifício, bem como melhorar o conforto e diminuir, ou até eliminar, o recurso a aparelhos de ar condicionado, contribuindo assim para a redução de custos [12]. A inércia térmica constitui portanto, um dos elementos chave destas tecnologias passivas pois pode ser usada no sentido de reduzir as necessidades de aquecimento e de arrefecimento durante o dia e ao longo das diferentes estações do ano, de tal forma que permita o controlo das flutuações de temperatura [13-16]. Na Figura 2.4 pretende-se ilustrar o efeito da massa térmica na estabilização da temperatura interior de um compartimento, relacionando-se o comportamento de elementos construtivos em betão com inércia térmica forte e fraca, perante os valores da temperatura exterior. Uma das conclusões que se pode tirar da sua análise é a redução das oscilações de temperatura no interior do compartimento quando se recorre a elementos de massa elevada.

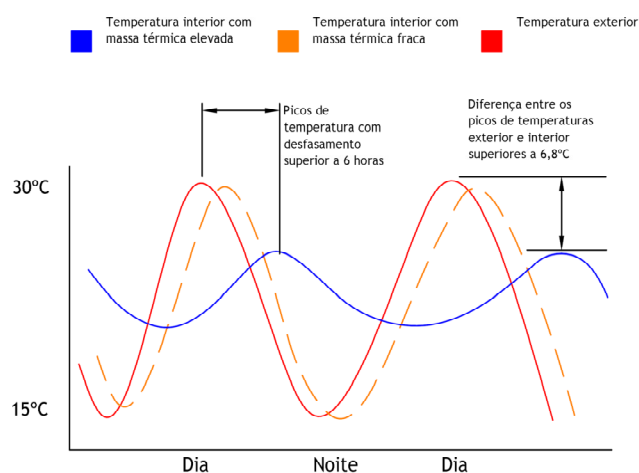


Figura 2.4 - Efeito da massa térmica na estabilização da temperatura interior (adaptado de [17]).

Para além do betão, outros materiais densos, como é o caso do tijolo maciço, são capazes de absorver o calor perante um diferencial de temperatura, e transferi-lo lentamente para o interior. Na Figura 2.5 apresenta-se a comparação entre dois tipos de paredes exteriores de tijolo maciço, numa região do hemisfério Sul. Através da sua análise conclui-se que, à

semelhança do que ocorre para o betão, uma parede de massa elevada de tijolo funciona melhor como estabilizadora de temperaturas interiores, do que uma parede com menor massa.

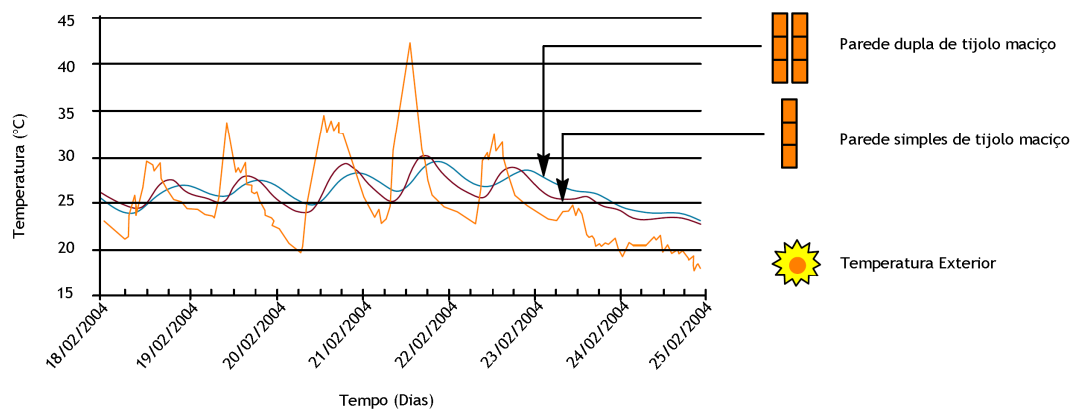


Figura 2.5 - Influência da inércia térmica de paredes de tijolo no valor da temperatura interior (adaptado de [13]).

Materiais como o betão e o tijolo maciço têm portanto uma alta capacidade de armazenamento de calor, uma condutibilidade térmica moderada que permite que o calor seja transferido para o interior do material para posterior armazenamento e emissividade elevada que permite a absorção de radiação em quantidade superior àquela que é reflectida [11, 13]. Na Tabela 2.1 apresentam-se os valores da massa volúmica, do calor específico e da capacidade calorífica de alguns materiais utilizados na construção.

Tabela 2.1 - Massa volúmica, calor específico e capacidade calorífica de diferentes materiais (adaptado de [12]).

Material	Massa Volúmica (Kg/m <sup>3</sup> )	Calor Específico (KJ/kg.K)	Capacidade Calorífica (KJ/m <sup>3</sup> .K)
Água	1000	4,186	4186
Betão	2240	0,92	2060
Tijolo	1700	0,92	1360
Pedra	2000	0,9	1800
Adobe	1550	0,837	1300
Terra armada	2000	0,837	1673
Blocos de terra comprimida	2080	0,837	1740

A selecção do material para construção da parede acumuladora da parede de Trombe deve portanto ter em consideração as suas características térmicas, para além do custo inerente à sua aplicação e do impacte no ambiente.

No que respeita às características térmicas, estas são determinadas em função de quatro propriedades físicas do material que convém analisar: densidade ou massa volúmica, condutibilidade térmica, calor específico e capacidade calorífica. [18, 19]. A densidade permite saber o grau de concentração de massa em determinado volume, enquanto a condutibilidade térmica quantifica a capacidade dos materiais em conduzir o calor, o que significa que materiais com elevada condutibilidade térmica conduzem calor de forma mais rápida do que os materiais com baixa condutibilidade térmica. Esta propriedade é específica de cada material, e depende fortemente da temperatura, uma vez que os materiais se tornam melhores condutores de calor com o aumento da temperatura. A condutibilidade térmica equivale à quantidade de calor transmitida através de uma determinada espessura, numa direcção normal à superfície do material, quando ocorre uma variação de temperatura. O calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de um material ao receber determinada quantidade de calor. Finalmente, a capacidade calorífica permite determinar o calor que é necessário fornecer a um material para induzir neste uma determinada variação de temperatura. Em suma, para que a inércia térmica de um material seja eficaz, é necessário que este apresente uma capacidade calorífica ou térmica elevada, condutibilidade térmica e densidade moderadas e também elevada emissividade [11]. Partindo deste pressuposto, os materiais que devem ser mais utilizados na constituição do elemento acumulador da parede de Trombe são o betão (Figura 2.6a)), a pedra, o tijolo maciço, a terra armada ou os blocos de adobe (Figura 2.6b)) e a água (Figura 2.6c)).

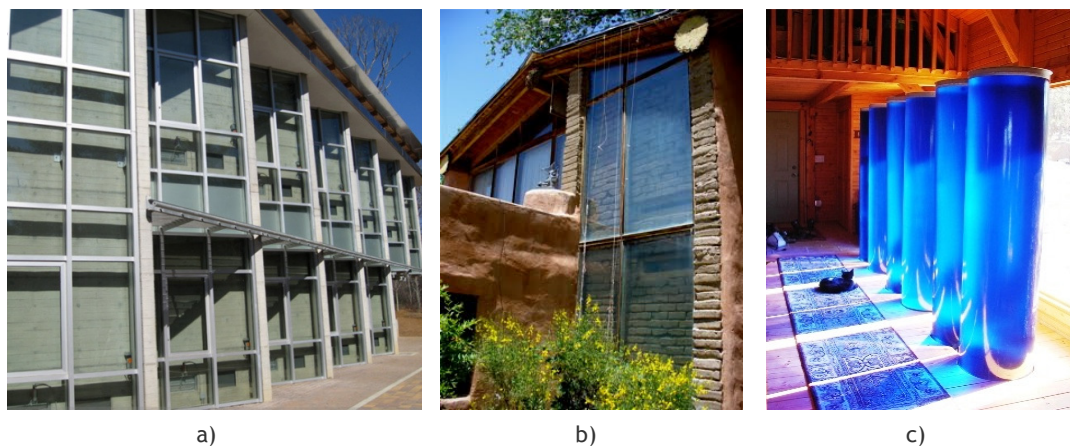


Figura 2.6 - Parede de Trombe: a) em betão [20]; b) em adobe [21]; c) em água [22].

A cor e a textura da superfície exterior da parede acumuladora são características influenciadoras da capacidade de absorção do calor da massa térmica de um material. Certas cores reflectem mais radiação solar e absorvem menos do que outras, ou seja, se uma superfície exterior for pintada de tal forma que a sua emissão na região de ondas longas seja elevada, então o fluxo de calor que chega ao interior do edifício diminui consideravelmente. Por exemplo, a aplicação de cal na superfície permite uma reflectividade inferior à de uma

superfície revestida a alumínio (Tabela 2.2) mas mantém-se mais fria quando exposta à radiação solar devido à sua elevada emissividade a baixas temperaturas [23].

Tabela 2.2 - Coeficientes de absorção e reflexão da radiação solar, e emissividade a baixa temperatura de diversos materiais correntes na construção de edifícios (adaptado de [19]).

Materiais	Absorção da radiação solar	Reflectividade para a radiação solar	Emissividade a baixa temperatura
Materiais de cobertura			
Telhas de barro moldado	0,65-0,80		0,85-0,95
Chapas de fibrocimento		0,29-0,17	
Chapas de alumínio	0,40-0,65		0,20-0,30
Revestimentos de asfalto	0,85-0,98		0,90-0,98
Feltros betuminosos		0,14	
Recobrimentos de argamassas		0,27	
Pinturas com tinta de alumínio	0,30-0,50		0,40-0,60
Caiações	0,20-0,50		0,85-0,95
Materiais de fachada			
Tijolo à vista	0,65-0,80		0,85-0,95
Betão	0,65-0,80		0,85-0,95
Pedra escura à vista	0,65-0,80		0,95-0,95
Pedra clara à vista	0,50-0,70		0,85-0,95
Mármore claro		0,56	0,93
Reboco claro	0,30-0,50		0,85-0,95
Vidraça da janela	0,05	0,08	0,90-0,95
Pinturas - Branca	0,12-0,18		0,89-0,97
Pinturas - Amarela	0,30-0,48		0,74-0,95
Pinturas - Vermelha	0,74		0,96
Pinturas - Verde	0,73		0,95
Pinturas - Preta	0,97		0,96

Um material, cuja superfície seja pintada de preto (Figura 2.7) absorve mais calor que uma pintada de branco e o seu efeito na temperatura de um compartimento pode resultar num aumento de temperatura entre 2°C e 3°C [24]. Superfícies de cor mate, como é o caso das paredes de tijolo, Figura 2.8, apresentam uma superfície com maior absorção da radiação solar, enquanto superfícies brilhantes absorvem menos calor. Uma parede de tijolo exposto, sem reboco, absorve mais calor do que uma parede rebocada totalmente lisa sem aplicação de camada de escurecimento. [25]. Uma parede de água apresenta maior reflexão e maior atraso na transmissão do calor armazenado do que uma de betão, logo a sua capacidade de absorção da radiação solar e de transmissão térmica é diferente [26].



Figura 2.7 - Superfície exterior de uma parede de Trombe pintada de preto [27].



Figura 2.8 - Parede de Trombe em tijolo sem pintura [28].

A massa térmica é habitualmente utilizada como técnica de aquecimento passivo, podendo no entanto ser simultaneamente eficaz como técnica de arrefecimento [29], desde que adequadamente projectada em concordância com os restantes elementos construtivos do edifício. O material pode assim absorver e armazenar o excesso de calor quando a carga térmica do edifício é elevada e libertar energia calorífica quando a carga térmica diminui [11]. No início do dia, perante a acção conjunta da temperatura e da radiação solar, ocorre um aumento de temperatura no paramento exterior relativamente às restantes secções da parede, o que origina uma onda de calor que se propaga em direcção ao paramento interior, cuja temperatura é menor. A velocidade de transmissão do calor é função da massa das sucessivas camadas da parede atravessadas e da respectiva condutibilidade térmica. Cada camada atravessada, em função da sua massa e do seu calor específico, vai subtraindo calor à onda que as atravessa. O calor que é retido em cada uma dessas camadas, vai numa primeira fase elevar a sua temperatura, e mais tarde transmiti-lo para as camadas adjacentes (Figura 2.9). A temperatura e a radiação solar que atinge o paramento exterior são factores influenciadores deste comportamento, uma vez que têm um carácter oscilatório, provocando aumento e redução das temperaturas superficiais, interferindo ao nível do fluxo de calor. Esta situação leva a que, em determinadas alturas do processo, existam secções do interior da parede com temperaturas mais elevadas do que as secções a montante. Esta ocorrência é mais evidente durante a noite e ocasiona uma inversão do fluxo de calor, que passa a efectuar-se do interior para o exterior [14, 19, 30].

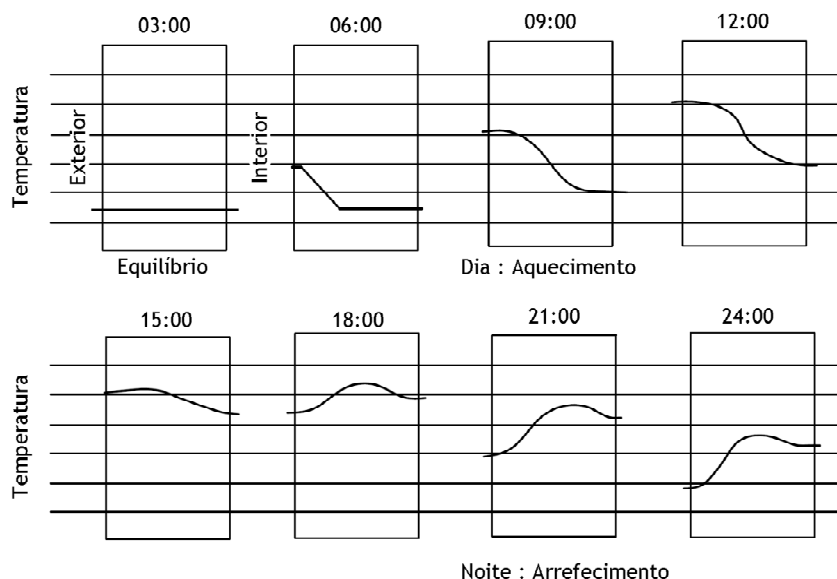


Figura 2.9 - Perfis de temperatura de uma parede pesada ao longo de um dia (adaptado de [19]).

A massa térmica funciona como elemento de aquecimento passivo absorvendo a energia do Sol durante o dia e libertando-a durante a noite (Figura 2.10 a)).

Para que a massa térmica funcione como elemento de arrefecimento passivo é necessário que esta seja combinada com o recurso a ventilação que permita dissipar o calor libertado durante a noite (Figura 2.10b)).

Para ser eficaz, o aproveitamento da inércia térmica dos materiais deve ser conjugado com outras soluções passivas, nomeadamente com a localização e orientação no edifício, localização e dimensões dos envidraçados, dispositivos de sombreamento e ventilação natural [29]. Assim, se esta for usada para aquecimento passivo, deverá receber a melhor exposição solar durante o período de baixas temperaturas, contrariamente ao que deverá acontecer nos períodos de Verão, em que esta situação deverá ser minimizada através de elementos de obstrução.

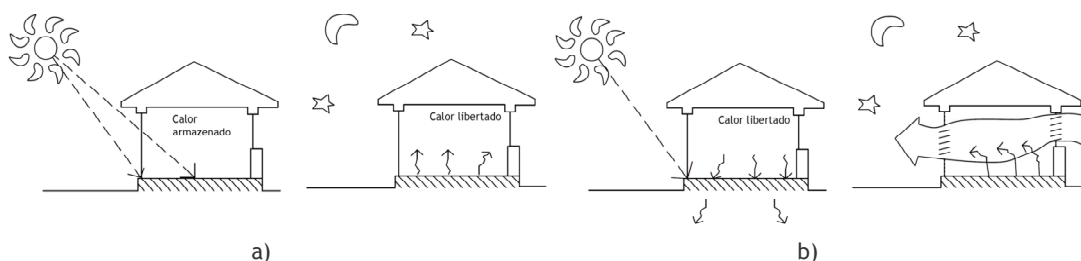


Figura 2.10 - Comportamento da inércia térmica: a) Inverno; b) Verão (adaptado de [30]).

A espessura e o volume do material de armazenamento da parede acumuladora são também factores de extrema importância na escolha da parede acumuladora, uma vez que

influenciam o valor e a flutuação das temperaturas interiores no compartimento. O tempo de atraso depende da capacidade térmica do material e da sua condutibilidade térmica, e apresenta-se como um factor determinante para permitir a devolução nocturna do calor ao edifício. Na Tabela 2.3 estão indicados os tempos de atraso para diferentes tipos de materiais.

Tabela 2.3 - Tempo de atraso em função do tipo de material (adaptado de [12]).

Material (espessura em cm)	Tempo de atraso (horas)
Betão (25)	6,9
Parede dupla de tijolo maciço (22)	6,2
Adobe (25)	9,2
Terra Armada (25)	10,3
Blocos de terra compactada (25)	10,5
Material Arenoso (100)	30 dias

O uso incorrecto da massa térmica pode agravar os valores máximos e mínimos da curva de temperaturas que ocorrem durante um determinado período, afectando assim os níveis de conforto e consequentemente os gastos de energia. Erros de escolha do material e da respectiva massa térmica podem originar libertação de calor durante toda a noite numa situação de elevadas temperaturas durante o Verão, ou absorção e armazenamento de todo o calor produzido durante uma noite de Inverno [30].

### 2.3.2 Envidraçado

A inércia térmica do material da parede acumuladora apenas permite armazenar o calor e libertá-lo posteriormente. Por isso, para melhorar o desempenho térmico da parede acumuladora, é necessário prever a existência de um envidraçado que possibilite a admissão e conservação do calor na caixa-de-ar, durante o dia e a sua condução para o interior, e que não permita que o calor acumulado pelo material da parede acumuladora se dissipe facilmente para o exterior.

O envidraçado é colocado pelo exterior, a uma determinada distância da parede acumuladora. Deste modo forma-se uma caixa-de-ar entre estes dois elementos onde é acumulado calor, dando origem ao fenómeno de efeito de estufa que é característico dos sistemas solares passivos de ganho indirecto. Este elemento desempenha um papel crucial em grande parte dos sistemas colectores solares [18], dada a sua maior ou menor capacidade em reter o calor resultante da radiação solar. Esta capacidade é função das características do próprio envidraçado, nomeadamente da espessura e do tipo de vidro, da sua localização e orientação na envolvente do edifício e da geometria de insolação na zona climática em questão.

O comportamento do envidraçado deve então ser devidamente estudado, quer seja um componente de um sistema de ganho indirecto, no caso de funcionar em simultâneo com a parede acumuladora, da parede de Trombe, quer funcione como um sistema solar passivo de ganho directo. Para que se perceba a importância do envidraçado no desempenho deste sistema passivo, é fundamental conhecer o seu comportamento de forma isolada, apenas como envolvente exterior envidraçada de um edifício. Neste sentido, apresentam-se de seguida alguns conceitos associados à função que habitualmente desempenha nos edifícios.

O envidraçado é um elemento com grande impacto na eficiência energética ao nível da envolvente do edifício, uma vez que pode tornar os espaços muito quentes ou muito frios. No entanto, se for concebido correctamente pode contribuir de forma significativa para a diminuição dos gastos de energia com o aquecimento e o arrefecimento do edifício.

No caso de uma habitação devidamente isolada termicamente, os envidraçados podem ser os elementos responsáveis pela maior quantidade de ganhos ou de perdas de calor, relativamente aos restantes elementos da envolvente. Por exemplo, na situação de Verão, os ganhos através deste elemento construtivo podem ser 100 vezes maiores do que os resultantes da mesma área de parede perfeitamente isolada. Já no Inverno, um metro quadrado de vidro corrente pode permitir mais ganhos do que os produzidos por uma barra de um radiador de aquecimento. No entanto, no período de aquecimento, as perdas de calor podem ser dez vezes superiores às existentes na mesma área de parede com isolamento térmico [31].

A escolha do tipo de envidraçado mais adequado passa pela análise do seu desempenho no que respeita à transferência de calor e pelo conhecimento da natureza do espectro da energia solar e da forma como a energia oriunda do Sol atinge o envidraçado. A radiação transmitida pelo Sol é composta por 2% de radiação ultravioleta, 47% de luz visível e 51% de radiação infra-vermelha [31, 32].

A superfície do Sol emite ondas electromagnéticas e portanto, o espectro electromagnético é a principal fonte de energia provedora de luz e calor. Todos os corpos, incluindo o vidro, emitem e absorvem energia sob a forma de ondas electromagnéticas. A luz visível corresponde à banda entre 380 nm e 780 nm do espectro solar que é recebido pela superfície terrestre e situa-se entre o ultravioleta e o infra-vermelho. A radiação ultravioleta é invisível e corresponde ao espectro abaixo de 380 nm. Os infra-vermelhos estão associados ao calor, uma vez que os corpos, a uma temperatura ambiente, emitem radiação térmica no campo dos infra-vermelhos [33].

Da radiação total incidente no envidraçado, uma parte é transmitida instantaneamente para o interior, outra é reflectida para o exterior e a restante é absorvida pelo vidro. Esta última corresponde à energia acumulada no vidro, da qual uma parte é enviada para o interior e a



outra para o exterior, como radiação infra-vermelha, devido a fenómenos de convecção e radiação, [31, 34]. A quantidade de cada uma destas parcelas relativamente à radiação total incidente representa as propriedades solares ou ópticas do vidro, que se designam por coeficiente de transmissão (ou transmissividade), coeficiente de reflexão (ou reflectividade) e de absorção (ou absorptividade), respectivamente [19, 34].

O coeficiente de transmissão representa a percentagem de radiação que atravessa instantaneamente o vidro e pode ser de dois tipos, a transmissividade solar e a visível. A transmissividade solar representa a percentagem de energia ultra-violeta, visível e infra-vermelha (entre 290 a 2500 nm) que é directamente transmitida através do vidro. A transmissividade visível expressa a percentagem de luz visível (380 a 780 nm) que é transmitida. Quanto maior for, maior será a quantidade de luz no interior e menor o consumo de energia. O coeficiente de reflexão traduz a capacidade do vidro em reflectir parte da radiação solar, ou seja, é a percentagem de luz visível (380 a 780 nm) que é reflectida pela superfície do vidro [32]. Finalmente, a absorção é a percentagem de radiação solar incidente, absorvida pelo vidro, que conduz ao aumento da sua temperatura. Por exemplo, num envidraçado com vidro simples corrente com 3 mm de espessura, verifica-se que 83% da radiação solar é transmitida, 8% reflectida e 9% é absorvida, dos quais 3% são transmitidos por radiação para o interior do compartimento e 6% para o exterior (Figura 2.11), [31, 32].

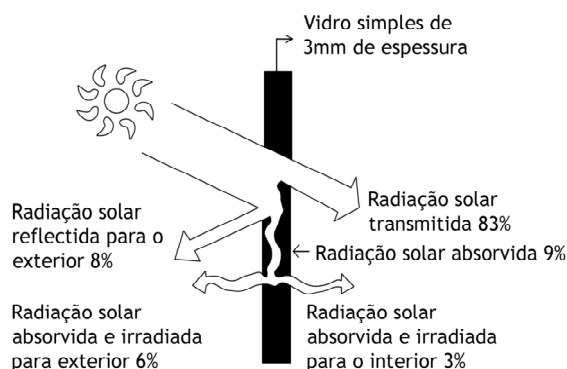


Figura 2.11 - Comportamento do vidro face à radiação solar incidente (adaptado de [31, 32]).

O fluxo de calor através do vidro, como em qualquer outro material, ocorre por condução, convecção e radiação. Quanto maior for o diferencial de temperatura entre os dois ambientes, maior será o fluxo de calor que atravessa os dois espaços. Quando um envidraçado está sujeito a um diferencial de temperatura entre o interior e o exterior, a transferência de calor ocorrerá do espaço a temperatura mais elevada para o espaço a temperatura inferior. Este fluxo é quantificado através da introdução de um parâmetro térmico que traduz a capacidade do material de cada camada do elemento em conduzir o calor. Este parâmetro designa-se por coeficiente de transmissão térmica e é expresso em  $W/m^2\text{°C}$ , e engloba a contabilização dos três mecanismos de transferência de calor acima referidos. Representa portanto, o fluxo de calor por hora, em Watt, por metro quadrado de superfície de

envidraçado, que ocorre para um diferencial de temperatura de 1°C entre o interior e o exterior. A análise da capacidade de condução de calor pode ser efectuada através de um parâmetro inverso ao coeficiente de transmissão térmica, designado por resistência térmica. Quanto maior for a resistência térmica, menor será o calor transferido.

No envidraçado, as correntes de convecção ocorrem junto às faces interior e exterior do vidro e, em vãos com mais do que um pano de vidro, na lâmina de ar de separação entre eles. No interior do vidro, a face que se encontra a uma temperatura mais baixa do que o restante ambiente, arrefece o ar na proximidade, fazendo com que este desça. No exterior, as correntes de ar favorecem o isolamento térmico do envidraçado, apesar de esta melhoria não ser significativa. Na lâmina de ar, o diferencial de temperatura provoca fluxo de calor por convecção, favorável às perdas de calor [34], que deve ser analisado em função da utilização que se pretende dar ao envidraçado, no sentido de aproveitar ou eliminar as trocas de calor que ocorrem por convecção. Se o objectivo for o de melhorar o isolamento térmico do envidraçado, estas trocas podem ser minimizadas recorrendo à adição de mais lâminas de ar, passando, por exemplo, de vidro duplo, a vidro triplo, ou então, substituindo o ar por um gás menos viscoso. Por outro lado, se o envidraçado for um componente de um sistema passivo de ganho indirecto, como é o caso da parede de Trombe, estas alterações devem ser cuidadosamente ajustadas para que a transmissão de calor que se pretende obter através do envidraçado não esteja comprometida, uma vez que a espessura do vidro influencia a quantidade de radiação absorvida. Por exemplo, para um vidro transparente, aumentar a espessura de 3 mm para 6 mm, aumenta a absorção da radiação solar total em cerca de 6%, correspondendo 2% da radiação visível [35].

Para além das propriedades referidas, a emissividade também traduz o comportamento do vidro face à energia solar, uma vez que representa a capacidade do vidro em absorver ou emitir energia a baixa temperatura. Por natureza, o vidro apresenta uma emissividade alta. No entanto, a aplicação de uma película de baixa emissividade pelo exterior do vidro, faz com que o vidro absorva menos energia e reflecta mais energia de volta para o ambiente, reduzindo o seu coeficiente de transmissão térmica. Um vidro com emissividade igual à unidade será um perfeito radiador de energia, ou seja, quanto mais próximo deste valor for a emissividade de um vidro, maior será a energia solar por ele reflectida.

Em suma, a energia solar que atinge o interior do espaço através do envidraçado deve-se a uma componente da radiação solar que o atravessa directamente e a uma componente diferida que resulta da energia que é absorvida e posteriormente transferida para o interior por radiação e convecção. Para contabilizar estas duas componentes recorre-se a um parâmetro designado por factor solar do vidro que representa “o quociente entre a energia solar transmitida através do vidro para o interior e a energia solar nele incidente” [36]. Quanto menor for o factor solar do vidro, menores serão os ganhos solares obtidos. Por

## Capítulo 2 - Funcionamento da Parede de Trombe e dos seus Constituintes

exemplo, um valor de 0,60 significa que 60 % da radiação solar incidente é transmitida para o interior do compartimento e 40 % é devolvida ao ambiente exterior.

Quando se trata de um sistema solar passivo de aquecimento, o valor do factor solar deve ser elevado, ou seja, é necessário um envidraçado que permita a passagem da maior quantidade de radiação solar possível. Muitas vezes, na construção de casas solares passivas é aplicado um vidro com factor solar extremamente baixo, o que pode contrariar de forma decisiva o comportamento de um edifício com recurso a soluções passivas. Para que o desempenho térmico do envidraçado seja optimizado durante os períodos de aquecimento e de arrefecimento, o vidro por si só nem sempre é suficiente, e por isso é necessária a introdução de dispositivos de sombreamento, nomeadamente de protecções amovíveis, às quais está também associado um factor solar. Neste caso, o factor solar do envidraçado contabiliza o factor solar do vidro e o factor solar da protecção, sendo definido segundo o RCCTE como “o quociente entre a energia solar transmitida para o interior através de um vão envidraçado com o respectivo dispositivo de protecção activado e a energia da radiação solar que nele incide.” [36].

Para além das propriedades intrínsecas do envidraçado, também o movimento do Sol influencia de forma decisiva o seu desempenho térmico, pois os ganhos solares através de um envidraçado dependem do ângulo de incidência da radiação solar e consequentemente de possíveis sombras nele projectadas. No Inverno, o percurso do Sol é praticamente perpendicular a um envidraçado localizado numa fachada vertical orientada a Sul durante parte da manhã e o início da tarde, o que permite a entrada da radiação solar directa em maiores quantidades. No Verão, o Sol tem um percurso mais próximo do zénite, o que faz com que os raios solares incidam com ângulos superiores num envidraçado a Sul, minimizando os ganhos solares. Quando a radiação é perpendicular ao vidro, esta é reflectida em quantidades reduzidas. A reflexão aumenta na proporção em que aumenta o ângulo de incidência. O ângulo de incidência para o qual toda a radiação incidente é reflectida é de aproximadamente 87° (Figura 2.12) [19, 35].

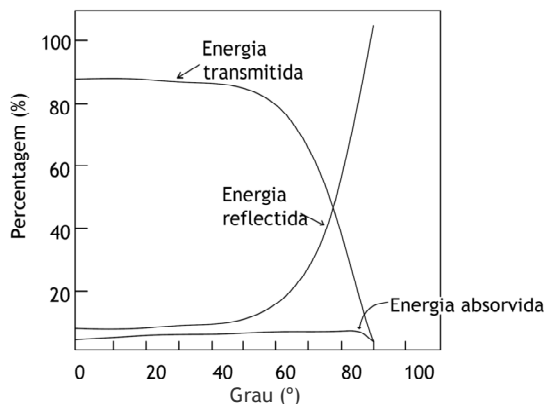


Figura 2.12 - Distribuição percentual da energia incidente para um vidro simples incolor em função do ângulo de incidência (adaptado de [19]).

Perante o exposto, o envidraçado é um componente bastante importante no desempenho térmico da parede de Trombe, uma vez que as suas propriedades influenciam a quantidade de calor que atravessa o vidro, que alcança a caixa-de-ar, que é armazenada na parede acumuladora e que se transmite para o espaço interior.

Como já foi referido, a principal função do envidraçado neste sistema passivo está relacionada com a sua capacidade de transmitir e reter a energia solar de tal forma que esta possa ser absorvida e acumulada na parede de massa elevada. O efeito de estufa criado pelo envidraçado constitui a fonte dos ganhos solares do edifício, em que a absorção e acumulação da energia solar transmitida ocorre junto à envolvente exterior, constituindo assim um colector térmico no edifício. A resistência térmica do vidro influencia a necessidade de aquecimento do espaço interior do edifício, na medida em que a elevada resistência térmica do vidro está relacionada com a diminuição da transmissão da radiação solar [37].

Nas Figuras 2.13, 2.14 e 2.15 são apresentadas diferentes concepções de paredes de Trombe em edifícios residenciais e de serviços, pretendendo dar destaque aos diversos tipos de envidraçados aplicados. Na Figura 2.13 o tipo de vidro utilizado disfarça a existência da parede acumuladora, enquanto na solução de parede apresentada na Figura 2.14, a parede acumuladora é perfeitamente visível. O vidro utilizado pode também incluir a aplicação de uma película na sua superfície exterior que reflecte a radiação solar, funcionando portanto como dispositivo de sombreamento, tal como se observa na Figura 2.15.



Figura 2.13 - O tipo de envidraçado utilizado disfarça a existência da parede de Trombe [38].



Figura 2.14 - Aplicação de vidro transparente na parede de Trombe [39].



Figura 2.15 - Introdução de película reflectora da radiação solar [40].

Para que o sistema de parede de Trombe seja aproveitado ao máximo, a área de envidraçado deve ser igual à área da parede de armazenamento, apesar de esta característica poder ser ajustada em função do uso pretendido [41].

A superfície do vidro, o tipo de vidro, simples ou duplo, a espessura das lâminas de vidro e da lâmina de ar, o material e a permeabilidade da caixilharia do envidraçado, são características que deverão ser ajustadas a cada tipo de parede de Trombe, em função das propriedades dos restantes elementos construtivos que dela fazem parte, bem como das características do edifício e das condições climáticas onde este se localiza.

### 2.3.3 Dispositivos de sombreamento

A colocação de dispositivos de sombreamento na parede de Trombe é fundamental para reduzir os ganhos solares e conseqüentemente as situações de sobreaquecimento que ocorrem durante o Verão, e limitar as perdas de calor durante a noite no Inverno. As funções que se atribuem às protecções solares da parede de Trombe são as requeridas na envolvente de um edifício quando se pretende melhorar o seu desempenho energético, uma vez que, em ambas as situações, as protecções constituem um sistema solar passivo que desempenha um papel fundamental para o controlo da radiação solar que atinge o vão envidraçado. Para que a parede de Trombe tenha um bom desempenho como sistema passivo de aquecimento e para eliminar aspectos negativos que esta pode proporcionar no ambiente interior de um edifício durante o Verão, é essencial a análise e compatibilização dos diversos aspectos que caracterizam os diferentes dispositivos de sombreamento e da sua influência na redução do consumo de energia, quando integrados na envolvente de um edifício.

A escolha dos dispositivos de sombreamento deve basear-se no seu desempenho perante as diferentes posições do Sol ao longo do ano, através da análise das cartas solares. Os sombreamentos podem ser vários, desde os efectuados por elementos naturais, passando pela concepção arquitectónica do edifício, até ao uso de elementos construtivos acessórios, como palas ou estores. Os elementos construtivos de sombreamento estão na sua maioria associados ao exterior, uma vez que são muito mais eficazes do que os utilizados no interior dos edifícios, na medida em reduzem grande parte da radiação solar que atinge o seu interior [42, 43].

Um método bastante comum de sombrear um edifício pelo exterior consiste no aproveitamento das projecções que diversas saliências provocam no edifício, sendo usadas há milhares de anos, nomeadamente através da introdução de varandas, palas, beirais e ombreiras das janelas, constituindo a forma mais simples de controlo dos ganhos solares. No entanto, é necessário ter em atenção que este tipo de sistemas são um obstáculo à radiação solar directa, mas não podem evitar a radiação solar difusa e reflectida, o que exige cuidados adicionais no que respeita ao factor solar do vidro.

Outro aspecto a ter em consideração é o tipo de projecção que estes elementos podem exercer na janela, uma vez que as suas dimensões e a posição que têm relativamente à janela condicionam a zona sombreada e o período em que esta ocorre, o que pode constituir uma limitação na sua aplicação, caso não seja feito um correcto dimensionamento. Por exemplo,

caso se pretenda aproveitar as potencialidades de sombreamento de varandas nos edifícios, estas podem ter diversas dimensões em função da posição das janelas. Se as janelas estiverem bastante espaçadas, as varandas devem ser instaladas ao longo de toda a largura da fachada Sul [42]. As ombreiras e a padieira das janelas podem funcionar como palas verticais e horizontais, respectivamente, provocando sombreamento no envidraçado, mesmo que a sua concepção não inclua uma abordagem racional para controlo da energia solar. Apesar de as saliências descritas anteriormente provocarem sombreamento, aquando do projecto do edifício raramente são pensadas com esse intuito, prevalecendo as questões meramente estéticas. Já quando se fala de palas propriamente ditas, horizontais ou verticais, a sua inserção a nível arquitectónico grande parte das vezes contempla as questões ligadas ao desempenho térmico do edifício. Isto deve-se às exigências térmicas regulamentares que requerem a análise da relação entre as dimensões da pala e da janela. O sobreaquecimento pode então ser controlado através da introdução destes elementos, que devidamente dimensionados, devem sombrear o envidraçado durante o Verão, períodos em que o Sol se desloca a um nível superior, e possibilitar a entrada da energia solar durante o Inverno, quando o Sol se movimenta a um nível inferior. No caso de palas infinitas, a relação deve ser estabelecida entre a profundidade da pala e a altura da janela, pois é o único parâmetro que influencia o sistema. No caso de as palas serem finitas e terem a mesma largura da janela pode resultar uma diferença substancial no factor de sombreamento, dependendo da largura da janela. Estudos realizados demonstram que estas variáveis aumentam a sua influência à medida que aumenta o ângulo da radiação solar, sendo insignificantes quando o Sol se posiciona em frente à janela. Verifica-se também que as palas têm um melhor desempenho se forem colocadas junto a janelas que apresentem a dimensão horizontal muito superior à vertical [44].

A existência deste tipo de saliências no edifício pode ser complementada com a aplicação de outras protecções solares nos envidraçados, exteriores ou interiores, e ajustáveis, que para além de reduzirem os ganhos solares nas situações de sobreaquecimento, contribuem também para evitar as perdas de calor durante a noite na estação de aquecimento. As protecções exteriores podem ser efectuadas recorrendo a grelhas fixas, cuja posição (horizontal, vertical ou inclinada) deve ser escolhida em função da orientação da fachada, bem como através da introdução de estores ou toldos. A introdução de sombreamentos exteriores, como por exemplo portadas e persianas, podem reduzir entre 80% a 90% os ganhos solares [42], o que as torna mais eficazes do que colocadas pelo interior, que provocam uma redução de 15% a 30% [8, 45, 46].

O recurso a cores claras nas protecções exteriores também contribui para a redução dos ganhos solares, dada a sua capacidade de reflectir maior quantidade da radiação solar incidente. [45]. A possibilidade de controlo dos diversos dispositivos de sombreamento é um factor que deve ser contabilizado na optimização do funcionamento das protecções, quer

perante o percurso do Sol, quer tendo em conta as condições do ambiente interior pretendidas. Estudos realizados demonstram que o controlo dos sombreamentos tem um impacto bastante significativo nas necessidades de aquecimento de um edifício, podendo-as reduzir drasticamente para quase 50% [47, 48]. O tipo de material e as propriedades das superfícies destes elementos devem também ser analisadas, uma vez que afectam a transferência de calor através das janelas, verificando-se que protecções exteriores em materiais de massa e capacidade térmicas elevadas absorvem e retêm radiação solar de ondas curtas durante o dia. Mais tarde, o calor acumulado é devolvido ao ambiente exterior em forma de radiação de ondas longas [49].

No que respeita ao sombreamento através da vegetação, desde que correctamente seleccionada e localizada, pode durante o Verão, bloquear a radiação solar e reduzir a energia despendida para arrefecimento. Durante o Inverno, permite aumentar os ganhos solares e portanto diminuir as necessidades de aquecimento. As árvores de folha caduca são um exemplo do tipo de vegetação particularmente benéfica nesta situação. O sombreamento proporcionado pelas árvores permite a redução da luz difusa reflectida pelo céu e por superfícies adjacentes, influenciando as trocas de calor entre o edifício e o meio envolvente. [50]. Na Figura 2.16 apresenta-se a aplicação da vegetação de folha caduca como elemento sombreador de um sistema passivo, neste caso uma estufa, durante a estação de aquecimento e de arrefecimento. Esta habitação foi construída em Portugal, com recurso a sistemas solares passivos de ganho indirecto, possuindo para além da estufa, uma parede de Trombe no piso superior, cujo sombreamento é efectuado por toldos no período de Verão.



Figura 2.16 - Vista Sudeste da Casa Vale Rosal: a) influência da vegetação no Inverno; b) influência da vegetação no Verão [51].

A vegetação é de facto uma ferramenta poderosa na construção sustentável, uma vez que substitui a utilização de outros elementos construtivos concebidos através de técnicas e materiais pouco sustentáveis, sendo dada preferência a elementos naturais, que para além de permitirem a integração ambiental dos edifícios, contribuem para a melhoria da sua eficiência energética. O recurso a vegetação permite também o controlo do impacto dos ventos e da precipitação nos edifícios, podendo contribuir para uma redução até 30% no consumo de energia. No Inverno, o posicionamento correcto de árvores e arbustos protege a

habitação dos ventos frios, permitindo reduzir as perdas de calor entre 10% a 30%. No Verão, para além da sombra criada pela vegetação, o processo de evapotranspiração que ocorre nas folhas das árvores funciona como um sistema de arrefecimento evaporativo, reduzindo significativamente as necessidades de arrefecimento do edifício [52], podendo reduzir as temperaturas em redor, em aproximadamente 5°C [53]. No Inverno, o efeito deste fenómeno é reduzido devido à ausência de folhas, quando se trata de plantas de folha caduca, e devido às baixas temperaturas que caracterizam o ambiente exterior [50]. Outros estudos têm sido desenvolvidos no sentido de analisar o tipo de vegetação que deve ser plantada junto aos edifícios, tendo concluído que estas podem funcionar como regulador de temperatura no interior dos edifícios, para além dos benefícios que acarreta para o ambiente ao nível da redução de CO<sub>2</sub> [52]. No entanto, o impacto ao nível do desempenho térmico do edifício é função do tipo de plantas ou árvores e do respectivo ciclo de crescimento [54].

Nas Figuras 2.17 e 2.18 podem observar-se alguns edifícios com integração de paredes de Trombe e diferentes elementos de sombreamento, nomeadamente palas e lâminas exteriores reguláveis. O tipo de protecção escolhida, para além de funcionar como sistema de sombreamento, pode também disfarçar a existência deste sistema solar passivo, tal como se observa na Figura 2.18, em que a cor da protecção utilizada se confunde com a parede de Trombe ventilada em tijolo.



Figura 2.17 - Dispositivo de sombreamento exterior em parede de Trombe [55].



Figura 2.18 - A existência do sombreamento exterior disfarça a parede de Trombe [55].

Nas Figura 2.19a) e 2.19b) apresentam-se respectivamente a fase de construção de uma parede de Trombe na Índia e o aspecto final após a sua construção, em que a vegetação é utilizada como sistema de sombreamento e também como elemento de integração arquitectónica e ambiental.





Figura 2.19 - Parede de Trombe ventilada numa escola na Índia (*Best Green Building 2002*): a) fase de construção; b) fase de conclusão [56].

### 2.3.4 Caixa-de-ar entre o vidro e a parede acumuladora

A caixa-de-ar existente entre o vidro e a parede acumuladora é outro dos componentes que afecta o desempenho da parede de Trombe. As diversas características inerentes ao espaço de ar devem ser analisadas e optimizadas caso a caso. A espessura e a altura da caixa-de-ar e o tipo de superfícies da parede acumuladora e do envidraçado que delimitam o espaço de ar são factores influenciadores das temperaturas atingidas no interior da mesma, do calor armazenado na parede acumuladora, e consequentemente das temperaturas obtidas no compartimento. Os valores da espessura da caixa-de-ar influenciam a transmissão de calor para o interior do compartimento, quer por condução através da parede de massa elevada, quer por convecção através das aberturas de ventilação. Partindo deste pressuposto, a espessura deste elemento deve ser escolhida de tal forma que permita aumentar a quantidade de calor que aí se acumula, conduzindo ao aumento dos ganhos, e à diminuição das perdas de calor. No entanto, o intervalo de variação desta espessura é bastante variável, tendo em conta a revisão bibliográfica efectuada, o que pode ser devido ao facto de, tal como nos restantes constituintes da parede de Trombe, ser necessário ajustar as suas dimensões em função das condições climáticas e do comportamento pretendido para este sistema passivo.

Nas Figuras 2.20 e 2.21 apresentam-se duas espessuras de caixa-de-ar em paredes de Trombe construídas em diferentes zonas climáticas e com fins distintos. Na Figura 2.20, este sistema foi integrado num edifício de serviços localizado nos EUA, em que é fácil identificar a elevada espessura da caixa-de-ar, visível pelo interior da parede de Trombe. Comparativamente, na casa Shafer em Porto Santo, a espessura da caixa-de-ar é bastante mais reduzida, como se pode observar na Figura 2.21.



Figura 2.20 - Elevada espessura da caixa-de-ar numa parede de Trombe (*OHSU Center for Health and Healing*) [57].



Figura 2.21 - Espessura de caixa-de-ar reduzida na casa Shafer em Porto Santo [58].

Para além da espessura, também a altura da caixa-de-ar influencia a circulação do ar e a respectiva velocidade. A rugosidade e a cor das superfícies que delimitam o canal de ar são características que não devem ser descuradas uma vez que condicionam igualmente a transferência de calor no sistema.

### 2.3.5 Sistema de ventilação

A existência ou não de aberturas de ventilação na parede de Trombe conduz a diferentes designações para este sistema passivo. Caso não esteja previsto qualquer tipo de sistema de ventilação, este designa-se por parede de Trombe não ventilada. Se forem incluídos dispositivos de ventilação, a parede de Trombe passa a designar-se por ventilada. Neste caso, podem existir dois tipos de sistemas de ventilação. As aberturas podem localizar-se apenas na parede acumuladora, cuja situação é referente à parede de Trombe clássica, ou podem existir simultaneamente na parede acumuladora e no envidraçado, designando-se neste trabalho por parede de Trombe duplamente ventilada.

Na parede de Trombe não ventilada, não ocorre circulação de ar e a transmissão de calor para o interior do compartimento ocorre por condução, radiação e convecção através da parede acumuladora, enquanto na parede ventilada o aquecimento ou arrefecimento do espaço ocorre também por convecção do ar através das aberturas existentes na parede acumuladora. Se a parede de Trombe não ventilada for correctamente dimensionada pode fornecer uma quantidade de calor capaz de aquecer o espaço interior durante toda a noite. Parte do calor gerado na caixa-de-ar entre o envidraçado e a parede acumuladora é perdido para o exterior através do envidraçado. Quanto mais elevadas forem as temperaturas no espaço de ar, maiores serão as perdas de calor [41].

Na parede de Trombe clássica, as aberturas de ventilação na base e no topo da parede acumuladora contribuem para a redução das perdas de calor referidas. Neste caso, a temperatura na caixa-de-ar aumenta e o calor entra no compartimento através das aberturas superiores. O ar mais frio sai do compartimento, através dos dispositivos de ventilação inferiores, para a caixa-de-ar, estabelecendo-se um movimento do ar, por termocirculação, eliminando a necessidade de ventilação por meios mecânicos. Uma vez que na parede não ventilada a temperatura na caixa-de-ar atinge valores elevados, a perda de calor através do envidraçado tende a ser maior. Mas se existir o sistema de ventilação na parede acumuladora, a quantidade de calor armazenado na parede acumuladora é menor. No entanto, esta situação também poderá ser um problema, na medida em que poderá conduzir ao sobreaquecimento do espaço interior durante o dia e a um aquecimento muito abaixo das necessidades durante o período nocturno. Ora, para resolver este problema, o sistema de ventilação deverá ser concebido de tal forma que as aberturas sejam fechadas sempre que se mostrar necessário para garantir as temperaturas de conforto no edifício.

É de extrema importância referir nesta fase, a importância da parede de Trombe duplamente ventilada. Tendo em conta que esta parede foi inicialmente concebida para desempenhar a função de sistema passivo de aquecimento, é necessário resolver o problema do sobreaquecimento durante o Verão. Para isso, é fundamental a existência de dispositivos de ventilação pelo exterior, no envidraçado, que permitam efectuar o arrefecimento da caixa-de-ar entre o envidraçado e a parede acumuladora, que deverá ser contemplado juntamente com dispositivos de sombreamento. Se a parede não for duplamente ventilada e apenas existirem aberturas no envidraçado, será necessária a sua colocação na base e no topo do envidraçado para garantir a circulação de ar. Caso a parede seja ventilada nos dois elementos, basta a abertura superior do envidraçado, uma vez que as aberturas na parede acumuladora podem permitir a passagem de ar fresco para a caixa-de-ar.

O dimensionamento das aberturas de ventilação é um factor de extrema relevância para o desempenho da parede de Trombe ventilada. Para além da sua localização, a dimensão das aberturas relativamente à área de parede e a posição relativa entre as várias aberturas são factores condicionadores do fluxo de calor nesta tecnologia passiva.

### **2.4 Modo de funcionamento**

Nos pontos anteriores foram referidas as principais características dos diferentes constituintes da parede de Trombe e a influência que estes exercem no seu desempenho. Perante a descrição isolada de cada um deles, considera-se conveniente referir uma síntese do funcionamento da parede de Trombe como um sistema único, ainda que algumas das suas propriedades já tenham sido referidas. O modo de funcionamento deste sistema passivo será apresentado para a parede de Trombe ventilada ou clássica e para a não ventilada.

Como já foi referido anteriormente a parede de Trombe não ventilada é o sistema mais simples de paredes passivas de acumulação de energia solar. A energia recolhida pelo elemento transparente, o envidraçado, é absorvida e armazenada pela parede de massa elevada cuja superfície é pintada de cor escura. O calor armazenado é transmitido para o interior do compartimento por condução, convecção e processo radiativo transferência de calor é feita lentamente, provocando um atraso na devolução de calor ao ambiente, ou seja, o calor é acumulado na parede durante o dia e gradualmente libertado durante a noite (Figura 2.22). As protecções exteriores são essenciais para eliminar os períodos de sobreaquecimento no Verão e para diminuir as perdas para o exterior durante a noite, no Inverno, quando as temperaturas exteriores diminuem [59, 60].

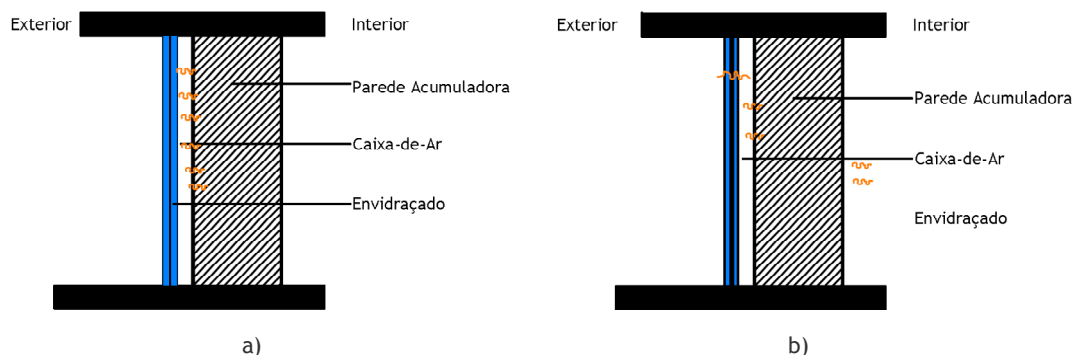


Figura 2.22 - Esquema de funcionamento da parede de Trombe não ventilada: a) durante o dia; b) durante a noite (adaptado de [5, 58]).

A inserção de orifícios de termocirculação na parede acumuladora, no envidraçado ou em ambos os elementos depende dos períodos do dia em que se necessita de calor, podendo estes existir na parede de Trombe, desde que a abertura e fecho dos dispositivos de ventilação seja efectuada de forma adequada. Por exemplo, se for necessário calor durante o dia, as aberturas na parede acumuladora são fundamentais. Quando a parede de Trombe aquece devido à incidência da radiação solar, parte do calor é captado pela parede acumuladora e outra é transferida para a caixa-de-ar entre a parede acumuladora e o envidraçado. O calor absorvido pela parede de massa elevada é transmitido através da parede acumuladora e por convecção do ar quando os orifícios estão abertos, ou apenas por condução, radiação e convecção, se estes permanecerem fechados, tornando a parede de Trombe ventilada mais versátil do que a não ventilada [8, 59]. A convecção do ar permite o aquecimento durante o dia e o calor transmitido por radiação pela parede deverá proporcionar o aquecimento durante a noite. O correcto funcionamento da parede de Trombe ventilada deverá ser garantido durante o dia e a noite nas estações de aquecimento e de arrefecimento, como a seguir se indica.

No Inverno, durante o dia, os dispositivos de ventilação apenas deverão estar abertos quando a temperatura na caixa-de-ar for superior à temperatura do compartimento, e seja necessário o seu aquecimento. Para aproveitar ao máximo a radiação solar incidente os dispositivos de

sombreamento, caso sejam móveis deverão permanecer abertos. Durante a noite, para reduzir as perdas de calor, caso exista dispositivo de protecção móvel, deverá estar fechado, bem como as aberturas de ventilação na parede acumuladora, Figuras 2.23 e 2.24, [8, 58, 59].

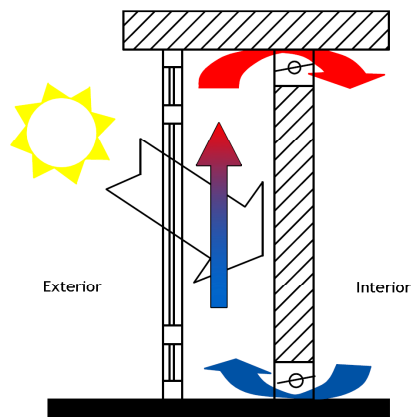


Figura 2.23 - Esquema de funcionamento da parede de Trombe ventilada, durante o dia, no Inverno (adaptado de [5, 8]).

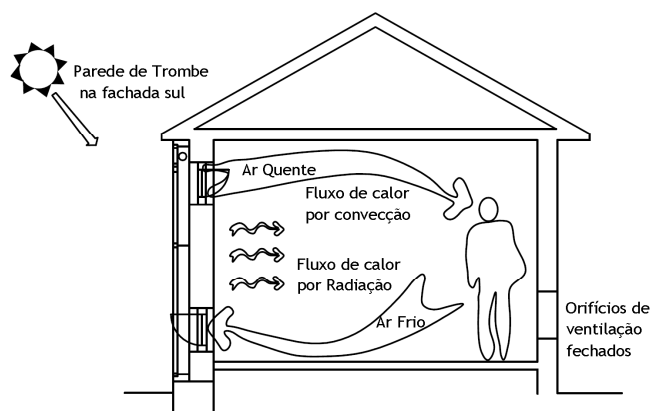


Figura 2.24 - Aquecimento por radiação e convecção durante o período de Inverno (adaptado de [41]).

Durante a noite, para reduzir as perdas de calor, caso exista dispositivo de protecção móvel, deverá estar fechado (Figura 2.25), bem como as aberturas de ventilação na parede acumuladora [8, 58, 59].

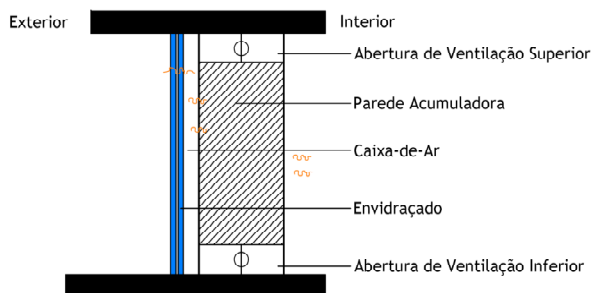


Figura 2.25 - Esquema de funcionamento da parede de Trombe ventilada, durante a noite, no Inverno (adaptado de [5, 8]).

No Verão, durante o dia, os orifícios de ventilação devem permanecer fechados e deverá ser previsto o sombreamento do sistema, recorrendo a diversos dispositivos já referidos anteriormente, tendo em atenção que, quanto mais opaco for o dispositivo menores serão os ganhos solares, e quanto mais clara for a superfície deste elemento, maior será a energia reflectida. Desta forma poderão ser eliminados os efeitos de sobreaquecimento inerentes a este período do ano. Durante a noite, para facilitar o arrefecimento da parede, devem ser abertos os orifícios de ventilação no envidraçado e fechados os existentes na parede acumuladora. O dispositivo de oclusão deve permanecer aberto (Figura 2.26).

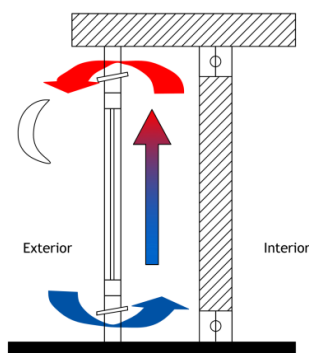


Figura 2.26 - Esquema de funcionamento da parede de Trombe ventilada, durante a noite, no Verão (adaptado de [5, 8]).

A parede de Trombe duplamente ventilada pode também funcionar como bomba de calor de ar quente, favorecendo a ventilação do edifício. Para isso, o orifício superior da parede acumuladora deve estar fechado e o orifício superior do envidraçado deve estar aberto, tal como se mostra na Figura 2.27. Assim, o ar quente do interior do edifício é absorvido pela baixa pressão criada na caixa-de-ar associada a aberturas existentes na fachada oposta, a Norte, para permitir entrada de ar frio (Figura 2.27), [8, 58, 59].

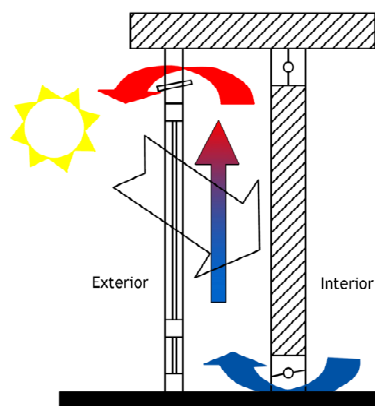


Figura 2.27 - Esquema de funcionamento da parede de Trombe no sentido de favorecer a ventilação no Verão (adaptado de [5, 8]).

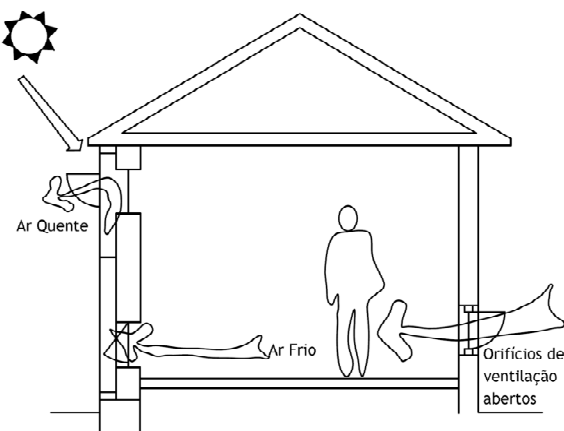


Figura 2.28 - Princípio de funcionamento da parede de Trombe no Verão (adaptado de [41]).

Para que durante o Verão, o efeito de estufa não se faça sentir, as aberturas no envidraçado devem ter área superior às aberturas existentes na parede acumuladora, para permitir que o ar arrefeça. O caudal de ar quente pode regular-se por persianas móveis previstas nas aberturas de termocirculação. Estas podem ainda dispor de redes mosquiteiras para evitar a entrada de insectos, bem como de uma válvula (por exemplo, lâmina de polietileno) colocada nas aberturas superiores para impedir que a parede de Trombe inverta o sentido de circulação do fluxo de ar durante a noite, conduzindo ao arrefecimento do espaço interior. [8, 58].

## 2.5 Integração arquitectónica

A integração da parede de Trombe num edifício foi sempre apresentada como uma das limitações da utilização deste sistema passivo. As primeiras paredes acumuladoras foram criticadas devido ao aspecto escuro que a sua introdução criava na envolvente do edifício. No entanto, a introdução de um elemento transparente para possibilitar o efeito de estufa na caixa-de-ar e aumentar os ganhos através deste sistema, aumentou a sua aceitação a nível arquitectónico. Outro aspecto que condiciona a sua implementação é o facto de as áreas envidraçadas a Sul terem que ser optimizadas no projecto de arquitectura, uma vez que, parte da área que antes poderia ser destinada a vãos envidraçados é ocupada pela parede de Trombe. Por outro lado, os pormenores associados à sua execução são escassos [41], o que cria alguma relutância por parte de construtores na sua aplicação, principalmente em Portugal, em que poucos são os edifícios que integram este sistema na sua envolvente e a informação relativa a estes pormenores é escassa. A Figura 2.29 representa um pormenor construtivo de uma parede de Trombe ventilada na parede acumuladora e no envidraçado.

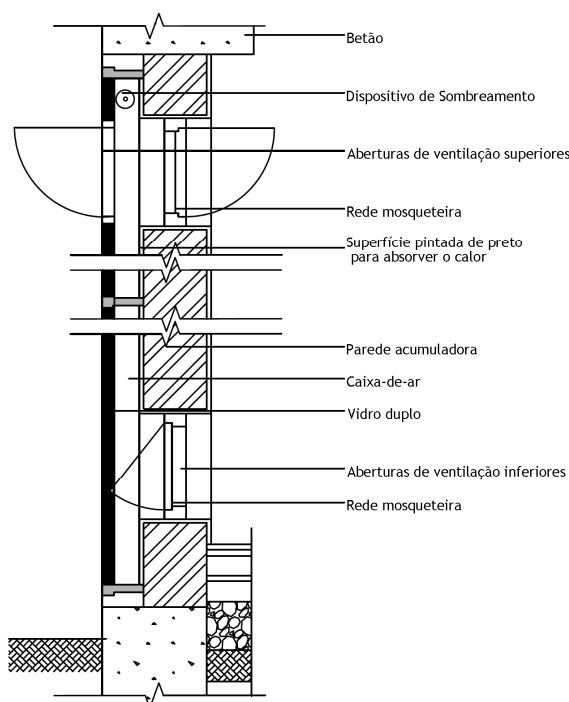


Figura 2.29 - Pormenor construtivo da parede de Trombe [41].

No entanto, as vantagens associadas à parede de Trombe e a evolução que esta tem sofrido relativamente à sua constituição inicial leva a que seja aproveitada e adaptada à arquitectura moderna em alguns edifícios, como se pode observar nas Figuras 2.30 e 2.31.

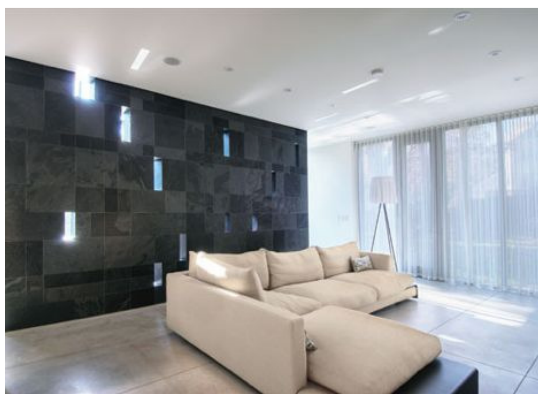


Figura 2.30 - Integração arquitectónica da parede de Trombe numa moradia em Toronto [61].



Figura 2.31 - Aplicação de uma parede de Trombe num edifício bioclimático na Grécia [62].

Apesar das limitações apresentadas, é necessário ter em conta que a integração destes sistemas permite obter um acumulador e libertador de energia, sem qualquer custo adicional, além do inerente ao seu processo construtivo. No entanto, relativamente ao seu desempenho energético, é necessário saber qual poderá ser a contribuição da parede de Trombe que se pretende construir em determinado edifício e qual a configuração de parede que deverá ser aplicada. Por isso, a sua integração na arquitectura do edifício deverá ser estudada logo na fase de projecto do edifício, quer a nível estético quer a nível funcional.

### 2.6 Conclusões

A utilização de sistemas solares passivos permite reduzir o consumo de energia nos edifícios, e a parede de Trombe é um desses sistemas que possibilita o aproveitamento da energia solar através do ganho indirecto. A sua integração nos edifícios pode ser bastante benéfica do ponto de vista térmico, desde que seja adaptada às diversas especificidades desse mesmo edifício, nomeadamente a zona climática onde este se localiza, o tipo de utilização e as suas características arquitectónicas e construtivas. Por isso, para que a parede de Trombe desempenhe correctamente a sua função, é essencial que a sua constituição seja devidamente estudada e dimensionada. O material, a espessura e a área da parede acumuladora devem ser analisados, bem como as características dimensionais da caixa-de-ar. O tipo de envidraçado e os dispositivos de sombreamento devem também ser ajustados ao fim em vista. A definição de um correcto sistema de ventilação é fundamental para a função que se pretende obter da introdução deste sistema passivo, na medida em que influencia de forma significativa a transmissão de calor por convecção. Em suma, o conhecimento das especificidades de cada um dos constituintes da parede de Trombe e a sua influência no sistema é essencial para melhorar o seu desempenho energético como sistema passivo de aquecimento ou de arrefecimento.



## Capítulo 3

### Parede de Trombe: Estudos Desenvolvidos



## Capítulo 3

### Parede de Trombe: Estudos Desenvolvidos

#### 3.1 Introdução

Desde o conceito de parede de Trombe criado por Edward Morse e posteriormente desenvolvido e popularizado por Félix Trombe e Jacques Michel, vários estudos têm sido realizados no sentido de analisar o desempenho da parede de Trombe clássica ou tradicional. Ao longo do tempo, foram surgindo novos conceitos de parede de Trombe, em função dos materiais usados na parede acumuladora, do tipo de envidraçado, do sistema de ventilação adoptado e da introdução de isolamento térmico no sistema. Estas alterações resultam das condições climáticas do local de implantação do edifício e do funcionamento desta tecnologia passiva como sistema de aquecimento ou de arrefecimento.

Neste capítulo pretende-se apresentar estudos desenvolvidos sobre a parede de Trombe clássica e suas variantes, bem como sobre a sua influência no comportamento térmico dos edifícios. Serão também apresentados os estudos realizados acerca da introdução da parede de Trombe na reabilitação energética dos edifícios, para além das metodologias existentes para o cálculo do seu desempenho energético na fase de projecto. Será abordada a aplicação deste sistema solar passivo de ganho indirecto em Portugal, com referência ao trabalho desenvolvido nesta área.

#### 3.2 Parede de Trombe clássica

Diversos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de analisar o desempenho térmico da parede de Trombe clássica, tendo em conta as condições climáticas, as características geométricas dos seus diversos componentes, bem como os fenómenos de transferência de calor que caracterizam este sistema passivo. Para além destas análises, surgem também estudos que comparam e relacionam o desempenho de diversos sistemas passivos, quer de ganho directo, quer de ganho indirecto.

##### 3.2.1 A parede de Trombe clássica e outros sistemas solares passivos

O estudo de diferentes sistemas solares passivos foi apresentado por Raman et al [63], com o objectivo de contribuir para o conhecimento deste tipo de sistemas na Índia, cujos estudos nesta temática são escassos. Neste sentido, apresentam dois modelos passivos, que integram a conjugação de diferentes tipos de sistemas solares passivos, capazes de proporcionar conforto térmico ao longo do ano em zonas com condições climáticas bastante variáveis. Enquanto um dos modelos combina a adopção de duas chaminés solares, o outro modelo inclui

uma parede de Trombe clássica na fachada Sul, o recurso a arrefecimento evaporativo ao nível do telhado e a colocação de isolamento térmico nas restantes paredes. O estudo destes modelos foi realizado através do uso de duas células de teste. Os resultados obtidos para os diferentes períodos do ano nas células de teste, revelaram que o sistema que inclui a parede de Trombe apresenta um elevado potencial de obtenção de conforto térmico numa grande parte do território indiano, bem como de redução do uso de aparelhos de ar condicionado.

Fernandez [64] analisou o desempenho térmico de cinco sistemas solares passivos (ganho directo, parede de Trombe clássica, parede de água, estufa e cobertura de água) como estratégias de aquecimento para as condições climatéricas da parte ocidental dos Estados Unidos (Figura 3.1). O comportamento da parede de Trombe clássica foi analisado através de medições realizadas numa das cinco células de teste utilizadas para a realização deste trabalho, durante a estação de aquecimento de 2002-2003, numa localidade do estado de Indiana, nos EUA. A parede de Trombe era constituída por uma parede acumuladora com 20 cm de espessura, composta por 109 blocos maciços de betão, e tinha uma área de 4,4 m<sup>2</sup>. A parede incluía quatro aberturas, cada uma delas com 0,1 m<sup>2</sup> de área. Os resultados obtidos permitiram concluir que a variação diurna da temperatura é função do tipo de sistema passivo utilizado, tendo-se verificado que os sistemas solares de ganho directo produzem flutuações de temperatura mais elevadas, enquanto as estratégias de ganho indirecto (parede de Trombe e estufas) conduzem a menores variações de temperatura. Os resultados demonstraram também que a parede de Trombe conduz a um ambiente interior extremamente estável, com poucas variações de temperatura e segundo o autor este dado constitui um requisito para a obtenção do conforto térmico.



Figura 3.1 - Alçado Sul das cinco células de teste (da esquerda para a direita): ganho directo, parede de Trombe, parede de água, estufa e cobertura de água [64].

Stazi et al [65] desenvolveram uma análise experimental e numérica para nove sistemas solares passivos diferentes implementados em Ancona, Itália, tendo concluído que a parede

de Trombe é um sistema eficiente para a melhoria do conforto térmico e conseqüentemente para a redução do consumo de energia. Para além de ser o sistema mais adequado para o clima temperado que caracteriza esta região, pode também ser usado como técnica de arrefecimento.

O desempenho energético da parede de Trombe e da cobertura de água foi analisado por Sodha et al [66], cujos sistemas foram submetidos à radiação solar e ao ar atmosférico por um lado, e por outro, ao contacto com um compartimento a uma temperatura constante. Foram efectuados cálculos numéricos para determinação do fluxo de calor e do respectivo desempenho através destes dois sistemas passivos, tendo-se concluído que o aproveitamento da massa térmica através da parede de Trombe é preferível quando se pretende armazenar durante mais tempo o calor, enquanto a utilização da água é adequada para a rápida dissipação de calor para o interior do compartimento.

A integração da parede de Trombe na concepção de um outro sistema passivo de ganho indirecto, neste caso, a estufa, foi estudada por Hassanain et al [67]. A interacção entre estes dois elementos solares passivos de ganho indirecto foi estudada para diversas configurações de estufas e para diferentes constituições da parede acumuladora, nomeadamente no que respeita a diversas dosagens dos constituintes do adobe, bem como a diferentes cores da superfície de absorção. Chegou-se à conclusão que a introdução da parede de Trombe na estufa permite melhorar o desempenho deste sistema.

Também Cuomo et al [68], apresentam uma aproximação analítica que permite calcular o desempenho térmico mensal de um edifício contendo sistemas solares passivos. A análise recaiu sobre edifícios localizados em Itália que possuem paredes de Trombe e estufas. Deste estudo concluíram que a contribuição destes sistemas solares passivos pode ser traduzida por uma função analítica simples usando considerações baseadas nas propriedades da radiação solar e nos diversos parâmetros que caracterizam o edifício e a sua interacção com o clima.

Estudos acerca da transferência de calor em chaminés solares e paredes de Trombe foram realizados por Burek e Habeb [69]. O dispositivo de ensaio utilizado para simular o fluxo de ar nestes dois sistemas solares passivos era composto por um canal aberto vertical, fechado nas laterais, com  $1 \text{ m}^2$ , assemelhando-se a um colectador solar ou a uma chaminé solar. O controlo da quantidade de calor que entrava no canal de ar foi efectuado com recurso a um aquecedor eléctrico. Concluíram que o fluxo de calor no canal depende da quantidade de calor de entrada e da espessura do canal.

Testes realizados pelo “*New York State Energy Reseach & Development Authority*” [70] revelaram a influência da relação entre a área de envidraçado a Sul e a área de parede de Trombe na mesma fachada. Os resultados demonstraram que à medida que a percentagem de parede de Trombe aumenta e a de envidraçados diminui, existe uma tendência crescente da

necessidade de carga de aquecimento, que se deve à redução dos ganhos directos através dos envidraçados, e uma diminuição substancial das necessidades de arrefecimento, resultante também da diminuição dos ganhos directos durante o Verão. No entanto, se a parede de Trombe corresponder a menos de 30% da área de fachada, a sua eficácia diminui e as necessidades de aquecimento aumentam. Como estratégia de aquecimento, os autores sugerem que a área de parede de Trombe deve corresponder a cerca de 30% da área de fachada e os restantes 70% a área de envidraçado para obter o melhor desempenho do sistema. Estudos posteriores revelaram que, com a optimização dos sombreamentos e da ventilação, as necessidades de arrefecimento podem diminuir substancialmente.

Radosavljević et al [71] analisaram o efeito do aquecimento solar passivo numa habitação, recorrendo ao uso combinado de uma parede de Trombe com aberturas de ventilação e de janelas para permitir a insolação directa. A parede de Trombe foi analisada para dois materiais e espessuras da parede acumuladora diferentes, ou seja, 20 cm de tijolo e 45 cm de betão e com diferentes orientações solares. Foram definidos diferentes cenários, tendo em conta espessuras, materiais e orientação da parede de Trombe. Desta análise concluíram que o edifício deve estar orientado de forma a garantir que os sistemas solares passivos se encontrem na fachada Sul para permitir o máximo de aproveitamento solar. Esta solução permite que no edifício seja possível garantir mais de 70% da energia necessária para aquecimento, caso se opte por uma parede acumuladora com 20 cm de espessura.

#### **3.2.2 Características dimensionais e materiais da parede acumuladora**

A espessura e as propriedades térmicas do material da parede acumuladora influenciam a capacidade de armazenamento de calor e o atraso na libertação de calor para o interior do compartimento. Staci et al [65] estudaram o desempenho de uma parede de Trombe, sujeita às condições climáticas de Ancona, em Itália, tendo concluído que o conforto interior está dependente da inércia térmica da parede acumuladora.

Chen et al [72] propõem um modelo matemático que permite prever o fluxo de calor através da parede de Trombe numa casa solar passiva, usando um modelo de rede dimensional de circuito térmico, equações de balanço energético e fórmulas empíricas. Com base neste modelo, foram discutidos os efeitos da espessura, da área e do material da parede acumuladora no desempenho energético da parede de Trombe ventilada na parede acumuladora. Os resultados obtidos demonstram que, durante o dia, cerca de 48% da energia solar é armazenada na parede acumuladora e apenas 20% desse valor é transferido para o interior do compartimento por convecção e condução. Durante a noite, 30% desse calor é devolvido pela parede acumuladora, sendo suficiente para satisfazer parte das necessidades de aquecimento no Inverno. Quanto ao efeito das características geométricas da parede acumuladora, o balanço entre o armazenamento e a devolução de calor através da parede acumuladora diminui com o aumento da sua espessura, diminuindo as flutuações de

temperatura no interior do compartimento. Este balanço térmico aumenta e aproxima-se de um valor constante para um valor de área de superfície de absorção superior a  $7,5 \text{ m}^2$ , o que implica a existência de um valor óptimo. A influência do material da parede acumuladora foi também abordada, tendo sido concluído que a relação entre o armazenamento e a libertação de calor é de cerca de 34% e de 20% para materiais com inércia térmica fraca (madeira), mas assume valores de 47% e 28%, respectivamente, para materiais com inércia térmica elevada, neste caso, o betão, provando que uma inércia térmica elevada aumenta a capacidade de armazenamento e de devolução de calor da parede acumuladora [72].

Outros estudos revelam que o desfasamento da onda de calor devido à parede de Trombe deverá ser de 8 a 12 horas, garantindo assim que o calor absorvido durante as horas de exposição solar seja devolvido durante a noite [73]. No caso de uma parede de Trombe corrente não ventilada, a parede acumuladora deverá ter uma espessura entre 20 e 40 cm, sendo esta espessura definida de modo a que o calor não chegue ao interior do compartimento por condução durante as horas de Sol, mas sim a partir do momento em que este se põe. Por exemplo, numa parede acumuladora com 20 cm de espessura, o calor demorará cerca de 8 a 10 horas a chegar ao interior do compartimento [7].

Outros autores corroboram estes dados referindo que o atraso é normalmente de cerca de uma hora por cada 2,5 cm de espessura de parede, ou seja, numa parede com 20,3 cm de espessura, o calor será libertado cerca de 8 horas após o Sol atingir a superfície exterior [74]. Segundo Nick Baker, citado por Livia Tirone [73], a transferência de calor através de uma parede de Trombe é de aproximadamente 18 minutos por cada cm de espessura da parede, o que se traduz, numa parede acumuladora com 20 cm de betão, num atraso de 6 horas na libertação do calor armazenado. Por exemplo, no Inverno, com o início da absorção da radiação solar por volta das 12 horas, a irradiação de calor para o espaço interior começará por volta das 18 horas. Já segundo Moita [26], para uma parede de betão com valores de condutibilidade entre 1,75 e 2,0  $\text{W/m}^{\circ}\text{K}$ , a espessura deve variar entre 30 e 35 cm, sendo a espessura ideal de 30 cm, enquanto para uma parede de tijolo maciço deve situar-se entre os 25 e os 35 cm. Existe, portanto, uma correlação evidente entre a espessura da parede e as temperaturas interiores.

Na Tabela 3.1 apresentam-se as espessuras da parede acumuladora recomendadas, por outros autores e para outros materiais, demonstrando o efeito da espessura da parede na flutuação das temperaturas interiores.

### Capítulo 3 - Parede de Trombe: Estudos Desenvolvidos

Tabela 3.1 - Espessura recomendada para diferentes paredes de elevada inércia térmica e o seu efeito nas temperaturas interiores (adaptado de [26]).

Material	Coeficiente de Condutibilidade térmica (W/m <sup>2</sup> K)	Espessura de parede aconselhável (cm)	Amplitudes térmicas (K) interiores relacionadas com a espessura da parede (cm)					
			20	30	40	50	60	cm
Tijolo Maciço	0,63	25-35	13	6	4	-	-	K
Betão	1,5	30-40	15	9	5	3	3	K
Clinquer	3,3	40-60	19	13	9	7	5	K
Água	0,58	15 ou mais	10	7	6	5	5	K

Analisando a capacidade de armazenamento térmico em função da duração da insolação para diferentes materiais, cujas superfícies apresentam 90% de absorção, verifica-se que no caso da parede de água, ao fim de 10 horas, esta apresenta ainda 80% de capacidade de acumulação térmica. No caso da parede de betão, ao fim de 3 horas, apresenta 50% de capacidade de acumulação térmica, enquanto ao fim de 6 horas tem ainda 40% [26].

A espessura da parede que acarreta melhor desempenho da parede de Trombe, é portanto função do material utilizado. Khalifa et al [75] estudaram também a capacidade de armazenamento de três materiais diferentes. O comportamento do betão, do sal hidratado e da parafina foram analisados perante condições climáticas reais no Iraque, tendo sido usadas diferentes espessuras para cada parede acumuladora. Concluíram que 8 cm de parede acumuladora com introdução de sal hidratado é capaz de manter o conforto no interior do compartimento com a menor flutuação de temperatura. A altura da parede acumuladora é um factor influenciador do fenómeno de circulação do ar na caixa-de-ar, tendo sido estudado por Khedari et al [76], através de ensaios experimentais. Concluíram que, para uma espessura da caixa-de-ar de 14,50 cm, o fluxo de calor pode aumentar entre 5% a 20% quando comparada com uma espessura de 10 cm. Shtrakov et al [77], criaram um programa de simulação que permite a análise dos fenómenos de transferência de calor através da parede acumuladora e a optimização das suas características construtivas. Consideram que este modelo matemático é essencial para aumentar o conhecimento do processo de transferência de calor em sistemas solares passivos.

O tipo de utilização do edifício é também determinante para a definição da espessura da parede de Trombe. Quando se trata da concepção de uma parede de Trombe para um edifício comercial, por exemplo, as necessidades de calor são mais imediatas, seguindo o horário habitual de um dia de trabalho. Já quando se trata de um edifício residencial, as necessidades ocorrem desde o período da noite até à manhã seguinte. Para o primeiro tipo de edifícios, uma espessura de 20 cm para a parede acumuladora permite uma transferência de calor mais rápida, enquanto para a aplicação residencial é necessária uma espessura mais elevada que retarde a libertação de calor. Estudos realizados indicam que uma parede com cerca de 30 cm é recomendada para esta situação [70].



Os ganhos solares obtidos através da parede de Trombe são variáveis em função das características da parede acumuladora. Ozbalta et al [78] analisaram os ganhos solares obtidos através deste sistema num edifício na Turquia. O comportamento da parede foi estudado para diferentes materiais e espessuras da parede acumuladora (betão armado com 25 cm, tijolo maciço com 19 cm e betão celular com 15 cm), bem como para diferentes cores na superfície de absorção. Concluiu-se que o desempenho da parede de Trombe é função da capacidade de armazenamento e do coeficiente de transmissão térmica da parede acumuladora, tendo a parede acumuladora com 25 cm de betão demonstrado maior capacidade de armazenamento. Da análise da influência da cor das superfícies, os resultados indicaram que os ganhos de calor anuais através da parede de Trombe variaram entre 26,9% e 9,7% para o betão armado, entre 20,5% e 7,1% para o tijolo e entre 13,0% e 4,3% para o betão celular para cores escura e clara, respectivamente.

Martins [5] definiu uma metodologia de cálculo com base na ISO 13790:2008 [6] e analisou os ganhos solares através da parede de Trombe para diferentes espessuras da parede acumuladora em betão, para as estações de aquecimento e de arrefecimento. Concluiu que, no Inverno, no caso da parede de Trombe clássica, com o aumento da espessura da parede acumuladora, aumentam os ganhos solares. Quando os orifícios de ventilação estão fechados, a parede de Trombe clássica funciona como parede de Trombe não ventilada, e com o aumento da espessura da parede de betão, os ganhos diminuem, o que pode ser devido ao aumento do tempo de transferência do calor para o interior do compartimento, pelo facto de ter maior espessura. No Verão o aumento da espessura provoca diminuição nos ganhos solares. A mesma análise foi também efectuada para diferentes materiais da parede acumuladora, o tijolo maciço, o betão e o granito, para uma espessura de 34 cm, tendo-se concluído que a parede de Trombe clássica com 34 cm de tijolo maciço em alvenaria composta, é a que apresenta melhor desempenho no Inverno e no Verão.

A influência da parede de Trombe em adobe no desempenho energético de estufas foi analisada por Hassanaina et al [67]. O material da parede acumuladora era constituído por diferentes tipos de materiais, conferindo diferentes misturas ao adobe, cujo efeito nas temperaturas no interior das estufas foi analisado. Outros estudos foram desenvolvidos no sentido de analisar a influência da superfície de absorção da parede de armazenamento.

O efeito da introdução de um revestimento de absorção na superfície exterior da parede acumuladora foi estudado por Nwachukwu e Okonkwo [79]. O estudo foi realizado tendo em conta diferentes valores do coeficiente de absorção do revestimento. Os resultados demonstram que a transferência de calor no compartimento é melhorada com a aplicação de um revestimento de absorção com elevado coeficiente de absorção e emissividade reduzida, uma vez que contribui para o aumento da capacidade de armazenamento de calor na parede de Trombe. Devem no entanto ser estudadas as diferentes espessuras desta camada bem como outras características inerentes ao seu fabrico. Dado que o tipo de revestimento

absorvente influencia as temperaturas ao longo das diferentes camadas do sistema e no interior dos compartimentos, os autores chamam à atenção para o facto de ser necessário ter em conta que a variação das temperaturas também depende da radiação solar incidente e do fluxo de calor por convecção. O desempenho da parede de Trombe varia em função da posição desta camada. A melhoria obtida por camadas absorventes na parede acumuladora é aproximadamente o dobro da obtida por camadas absorventes colocadas pelo exterior, quando estas substituem envidraçado. Esta situação é facilmente entendida pelo facto de na segunda situação, o absorvente se encontrar numa camada exterior fazendo com que grande parte da energia incidente seja absorvida por este elemento e não pela parede acumuladora. Esta opção só é justificável, ou por motivos financeiros, ou por atribuição de outra função ao absorvente exterior, como no caso da substituição do envidraçado por células fotovoltaicas.

Outro parâmetro influenciador no dimensionamento da parede acumuladora é o volume do compartimento, (Tabela 3.2). Para se manter a sua temperatura interior, durante 24 horas, entre 18°C e 24°C, num dia de Inverno com insolação máxima, é necessário compatibilizar a área da parede de Trombe com a área do compartimento e ainda com as temperaturas médias exteriores na estação de aquecimento [72].

Tabela 3.2 - Relação entre a espessura da parede acumuladora e a área do compartimento (adaptado de [26]).

Dimensionamento de Ganhos Indirectos		
Temperatura média exterior na estação fria (°C)	Área de parede (e vidro), em metros quadrados, necessária por cada metro quadrado de superfície do compartimento	
	Parede maciça	Parede de água
-4	0,6 - 0,9	0,4 - 0,7
-1	0,5 - 0,7	0,35 - 0,55
2	0,4 - 0,6	0,25 - 0,45
5	0,3 - 0,45	0,2 - 0,35
8	0,25 - 0,35	0,15 - 0,25

### 3.2.3 Características do envidraçado

Estudos realizados no sentido de analisar o comportamento do vidro em sistemas de ganho indirecto revelam que a espessura do vidro afecta o fluxo de calor através deste elemento. Foi demonstrado que usando vidro duplo, obtêm-se temperaturas mais elevadas na superfície de absorção da parede acumuladora, comparativamente com o vidro simples. No entanto, quando as temperaturas superficiais são mais baixas nessa superfície, o uso de vidro simples é melhor. Este comportamento deve-se ao facto de, para temperaturas altas na superfície de

absorção do elemento acumulador, a emissividade na superfície pintada de cor escura é bastante elevada. Assim, o vidro duplo é mais eficiente na redução das perdas de calor, do que o vidro simples, para além de ser mais opaco à radiação infra-vermelha [80].

As características térmicas do envidraçado e da parede acumuladora influenciam as temperaturas superficiais e conseqüentemente o fluxo de calor, sendo mais ou menos vantajosas em função das diferentes condições climáticas a que estão sujeitos. Por exemplo, no Inverno, o aumento da resistência térmica do envidraçado é geralmente mais vantajoso, dado que permite reduzir as perdas de calor através do vidro, quando o fluxo de calor se efectua do interior do compartimento para o exterior [81]. Richman e Pressnail [82] introduziram um revestimento de baixa emissividade para diminuir as perdas por radiação para o ambiente exterior. Gan [83] refere que o uso do vidro duplo pode aumentar entre 11 a 17% a taxa de ventilação, quando se prevêem aberturas de ventilação no envidraçado. A influência do vidro foi analisada por Stazi et al [65], tendo concluído que no Inverno o tipo de vidro assume um papel preponderante no desempenho energético da parede de Trombe, dado que as suas características térmicas são fundamentais para reduzir as perdas de calor para o exterior. A análise do vidro simples e do vidro duplo, efectuada também por Salmerón et al [84], permitiu demonstrar que o uso do vidro duplo permite a obtenção de mais ganhos solares, uma vez que reduz as perdas de calor sem reduzir a capacidade de absorção da radiação solar, desaconselhando-se portanto o uso do vidro simples tal como demonstram estudos realizados por Constantinescu [85].

O vidro é conhecido como o material de isolamento transparente mais simples, designados por TIM (*Transparent Insulation Material*). No entanto, para potenciar o efeito de estufa criado pela sua colocação, novas técnicas e materiais têm surgido, com mais ou menos benefícios para o sistema. A primeira hipótese de redução do valor do coeficiente de transmissão térmica,  $U$ , é obtida através do aumento do número de panos de vidro. No entanto, esta opção deve ter em conta o facto de poder diminuir a transmissão da radiação solar, dado que cada camada de vidro irá reflectir parte da energia solar. O uso de películas de baixa emissividade nos panos de vidro pode também reduzir o valor de  $U$  drasticamente, mas também diminuirá a transmissão de calor. No sentido de resolver estes problemas surgem então novos materiais, nomeadamente a utilização de janelas preenchidas com favos de mel ou materiais capilares, orientados perpendicularmente à superfície de absorção. Neste caso, a luz solar reflectida pelo material de enchimento volta para o material absorvente. Resultados similares podem ser obtidos utilizando grânulos de aerogel como enchimento. Para distinguir entre o típico pano de vidro e estes materiais de elevado desempenho utiliza-se a expressão “Isolamento Transparente” (*TI - Transparent Insulation*), caracterizados por valores de  $U$  inferiores a  $1 \text{ W/m}^2\text{C}$  e por uma transmissão de energia superior a 60% [86]. Peuportier desenvolveu estudos teóricos e experimentais, juntamente com Jacques Michel, no sentido de analisar o comportamento de estruturas capilares e favos de mel no aquecimento de edifícios

em França. O seu uso em regiões com condições climáticas adversas, levou-os a concluir que estes materiais de isolamento transparente permitem reduzir 20% das necessidades de aquecimento, evitando a libertação de 2,75 toneladas de CO<sub>2</sub> para a atmosfera [86].

Também Kurtba et al [87] comprovaram a influência do coeficiente de transmissão térmica do envidraçado como um factor importante que afecta a transferência de calor através do sistema. A análise foi efectuada para três valores distintos do coeficiente de transmissão térmica do vidro, cujo valor depende das propriedades do fluido entre os panos de vidro e da espessura do vidro. Demonstraram que, sendo o coeficiente de transmissão térmica proporcional à transferência de calor, as perdas de calor aumentam para valores de  $U$  maiores, considerando o mesmo diferencial de temperatura.

Zamora et al [88] apresentaram um estudo numérico do fluxo de ar na caixa-de-ar, cuja geometria do canal é influenciada pela posição do vidro relativamente à parede acumuladora, tal como se observa na Figura 3.2. O estudo baseou-se na análise efectuada por outros autores, Warrington e Ameel [89] relativamente à geometria apresentada na Figura 3.2 a) e por La Pica et al [90] que desenvolveu investigação acerca da configuração apresentada na Figura 3.2b).

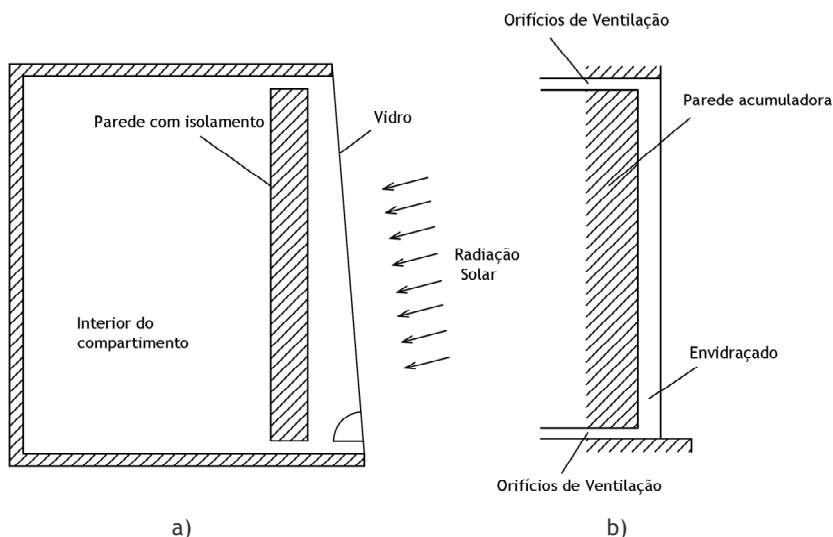


Figura 3.2 - a) e b) Posição do envidraçado na parede de Trombe (adaptado de [88]).

Para além destes factores, é necessário dar atenção a outros elementos do envidraçado da parede de Trombe, nomeadamente à caixilharia, caso exista, no sentido de reduzir as pontes térmicas lineares existentes nas ligações entre os diversos elementos. Os materiais devem então ser escolhidos de forma a evitar perdas de calor por condução. As zonas de ligação entre a caixilharia e a parede devem permitir no mínimo uma dilatação do material de 12 mm, devido às altas temperaturas que ocorrem no espaço de ar entre o envidraçado e a parede acumuladora, que podem atingir 60°, principalmente no caso de paredes de Trombe

não ventiladas. Também devido às altas temperaturas que ocorrem neste sistema passivo, a pintura da caixilharia deve ser capaz de suportar tais valores. No que respeita aos materiais da zona envidraçada, podem ser utilizados o vidro incolor corrente, fibra de vidro, acrílico ou policarbonato, capazes de suportar temperaturas elevadas [91].

#### 3.2.4 Dispositivos de sombreamento

Os dispositivos de sombreamento são um elemento fundamental na garantia do desempenho da parede de Trombe, uma vez que são necessários, quer para evitar a possibilidade de sobreaquecimento no Verão, quer para reduzir as perdas de calor durante as noites de Inverno. No entanto, apesar de este factor ser referido em diferentes estudos como necessário para garantir as condições acima referidas, a investigação relativamente à influência das diferentes características dos diversos tipos de dispositivos é bastante escassa. As dimensões de dispositivos fixos, como por exemplo, palas, a cor, a permeabilidade, a opacidade, a localização e o período de funcionamento dos dispositivos móveis, são algumas das características que condicionam o desempenho térmico da parede de Trombe.

Em 1972, Harold Hay [92] introduziu o conceito de aplicação de um dispositivo amovível numa habitação para melhoria do desempenho de uma parede de Trombe, cujo elemento acumulador era a água, representado na Figura 3.3. Foi utilizado como sombreamento e elemento reflector um painel ajustável, habitualmente movido duas vezes por ano. Este reflectia o Sol para o edifício durante os meses frios e era fechado durante a Primavera para bloquear o calor não desejado quando as temperaturas começavam a aumentar. Quando voltava o tempo frio, este dispositivo era colocado novamente na posição de Inverno.



Figura 3.3 - Dispositivo de sombreamento amovível (*Baer Zome Cluster, Corrales, NM 1972*) [92].

Um estudo realizado por Constantinescu [85] na Roménia, revela que a utilização de protecções exteriores com superfície reflectora numa parede de Trombe permite a obtenção de maiores ganhos energéticos, contrariamente ao que acontece caso a protecção não esteja activa, em que se verifica uma redução dos ganhos solares bastante significativa.

O “*New York State Energy Reseach & Development Authority*” realizou estudos acerca da aplicação de sombreamentos exteriores diversos na parede de Trombe, analisando, nomeadamente comprimentos de projecção de palas fixas, dimensões e número de grelhas fixas ou reguláveis e seu modo de funcionamento. Os testes realizados demonstraram que a aplicação de grelhas contribuem para um melhor desempenho da parede de Trombe do que uma simples pala, o que se deve à melhoria do comportamento relativo ao arrefecimento durante o Verão. Concluíram que as palas apenas protegem o sistema da radiação solar, quando este atinge um o ângulo maior durante o Verão, podendo falhar no sombreamento para ângulos mais baixos do percurso do sol durante o dia. A análise de grelhas permitiu concluir que as que são reguláveis excedem bastante o desempenho das grelhas fixas.

A influência de obstáculos exteriores na obtenção dos ganhos solares através da parede de Trombe foi estudada por Martins [5]. Os obstáculos analisados advêm da forma do edifício, sendo associados a palas verticais, cujo efeito foi analisado para uma parede de Trombe com parede acumuladora de 30 cm de betão. Como seria de esperar, os ganhos solares reduziram significativamente na presença dos obstáculos analisados, o que se torna inconveniente na situação de Inverno. Chen et al [91] apresentaram um estudo acerca da influência da existência de dispositivos de protecção na parede de Trombe, cuja investigação existente na China é bastante reduzida. Foram realizados estudos experimentais recorrendo a célula de teste em que a parede de Trombe apresenta sombreamentos na caixa-de-ar, tendo sido analisado o seu desempenho durante o período de Inverno (Figura 3.4). Foi também discutida, a nível teórico, a optimização do dispositivo de sombreamento na caixa-de-ar no sentido de diminuir as perdas de calor. Finalmente foi analisada a influência dos sombreamentos no conforto térmico do ambiente interior.

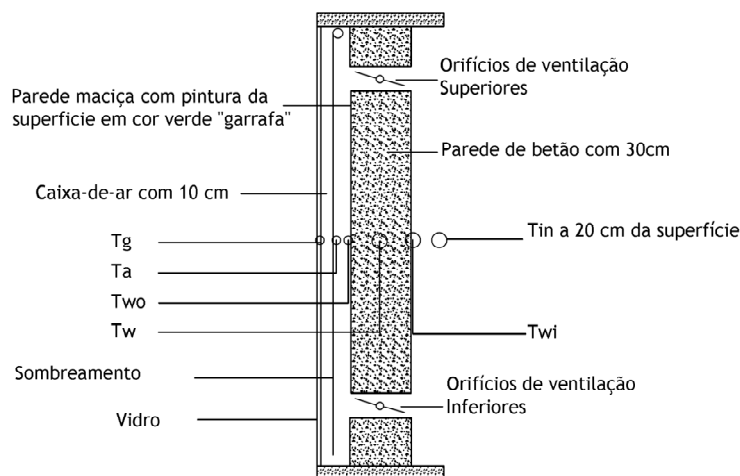


Figura 3.4 - Sombreamento no interior da caixa-de-ar (adaptado de[91]).

Deste estudo concluiu-se que o uso dos sombreamentos na caixa-de-ar é efectivamente uma forma de melhorar o comportamento térmico da parede de Trombe. Os dados experimentais

revelaram que estes dispositivos desempenham um papel importante na optimização do projecto solar passivo. O seu uso pode reduzir as perdas por convecção que ocorrem na caixa-de-ar e prevenir a transferência de calor da parede de Trombe para o exterior. Foram efectuados cálculos que demonstraram que este sistema pode reduzir entre 20% a 40% das perdas de calor na caixa-de-ar durante uma noite de Inverno e aumentar a temperatura superficial exterior da parede de Trombe. Da análise do processo de transferência de calor, verificou-se que as perdas de calor por convecção são preponderantes relativamente às perdas totais de calor, o que significa que este fenómeno de transmissão de calor é a chave para a melhoria do desempenho térmico da parede de Trombe. Diferentes localizações dos dispositivos de sombreamento influenciam a espessura do espaço de ar e consequentemente produzem efeitos importantes na redução das perdas de calor por convecção, cuja posição pode reduzir em cerca de 20% as perdas de calor por convecção. No que respeita ao conforto térmico, concluiu-se que a face interna da caixa-de-ar apresenta uma temperatura superior em 10°C relativamente à face externa, o que demonstra que os sombreamentos produzem um efeito no conforto térmico interior. Jie et al [93] analisaram também o efeito da introdução de sombreamentos na caixa-de-ar, mas em paredes de Trombe clássicas modificadas com introdução de células fotovoltaicas em substituição do envidraçado. A introdução de sombreamentos na parede de Trombe fotovoltaica é aconselhada especialmente no período diurno. Chel et al [94] referiram no seu estudo algumas recomendações para os intervenientes na construção de edifícios de armazenamento de mel na Índia, no que respeita ao uso de protecções solares. Durante o Verão, a parede de Trombe deve estar permanentemente sombreada e isolada através de elementos móveis no sentido de evitar os ganhos solares através deste elemento. Zalewski et al [95] concluíram do seu estudo acerca de diferentes paredes solares, nomeadamente da parede de Trombe clássica, que as vantagens da instalação ou não de protecções solares devem ser analisadas dependendo do local de implantação do sistema e do tipo de parede acumuladora.

#### **3.2.5 Parâmetros influenciadores da transmissão de calor por convecção natural**

Na parede de Trombe clássica, o fluxo de calor por convecção assume grande importância no seu desempenho térmico e consequentemente na influência das necessidades de aquecimento e de arrefecimento do edifício. O efeito de termocirculação existente na caixa-de-ar depende de diversos factores, nomeadamente das dimensões geométricas da caixa-de-ar, ou seja, espessura e largura, do tipo de superfícies das faces laterais que definem o canal de ar e da localização e dimensões das aberturas de ventilação existentes na parede acumuladora.

Akbari e Borgers [96] propuseram expressões para o cálculo da velocidade do ar na caixa-de-ar de uma parede de Trombe. Foi investigada a transferência de calor por convecção natural, em regime laminar, entre as duas superfícies da camada de ar. O método das diferenças finitas foi utilizado para definir as equações de dimensionamento, considerando o ar como um

fluido. Após comparação com resultados experimentais disponíveis, estas foram ajustadas, tendo sido desenvolvidas várias correlações fundamentais para a definição do comportamento da parede, nomeadamente para estimar a espessura da caixa-de-ar, a altura e as temperaturas no seu interior.

A energia solar e o movimento de ar na caixa-de-ar são induzidos pela convecção natural, pelo que os parâmetros associados ao canal de ar são factores que podem afectar o fenómeno de convecção. Um estudo paramétrico realizado por Gan [83] demonstrou que a taxa de ventilação quase não é afectada pela espessura da caixa-de-ar, mas aumenta com a altura da parede.

No entanto, o valor atribuído à largura do espaço de ar entre o envidraçado e a parede acumuladora não é consensual, quando analisado por vários autores. Segundo Alex Wilson [18], se a espessura da caixa-de-ar for reduzida (menos de 4 cm), as perdas de calor serão elevadas, e com a existência de sistema de ventilação, a circulação de ar será restrita, reduzindo a transferência de calor para o interior do edifício. Se a espessura da caixa-de-ar for elevada (superior a 15 cm), as perdas de calor poderão ser elevadas junto da ligação entre o caixilho e o envidraçado e caso os caixilhos sejam de largura considerável podem causar problemas de sombreamento. Segundo Mendonça [8], a espessura deste espaço deve situar-se entre 5 e 20 cm, enquanto para Moita [26] o vidro deve situar-se entre 10 a 15 cm da parede, formando uma zona intermédia de ar que suporta as grandes amplitudes térmicas e que assim contribui para temperaturas mais amenas no interior do compartimento. Torcellini et al [74], refere que a caixa-de-ar deve ter entre 2 a 5 cm de espessura, criando um pequeno espaço de ar, para evitar a perda da radiação térmica obtida durante a exposição solar e potenciar o efeito de estufa. Chen et al [97] investigaram o fluxo de ar numa parede de Trombe e deduziram que o fluxo de ar é função da altura do canal de ar.

Burek e Habeb [69] determinaram experimentalmente as correlações existentes entre os diversos parâmetros que influenciam o fluxo de calor no processo da termocirculação. Para este estudo, foi considerada a variação da espessura do canal, com valores entre 2 e 11 cm. Foram registadas as temperaturas e a velocidade do ar. Concluiu-se que o fluxo de ar através do canal é função do calor de entrada e da espessura do canal e que a eficiência térmica do sistema é função da quantidade de calor que entra no canal, não dependendo da sua espessura.

Imessad e Belhamel [98] apresentaram a simulação do comportamento térmico de uma Parede de Trombe ventilada durante as estações de aquecimento e de arrefecimento. Dois processos teóricos são utilizados para o cálculo da transferência de calor através do fenómeno de termocirculação. A comparação destas duas abordagens teóricas mostra que uma aproximação exponencial da temperatura ao longo da camada de ar se aproxima melhor do fenómeno real. Resultados obtidos por Zamora et al [99] relativamente ao balanço energético



global da parede de Trombe, que incluiu o cálculo da intensidade da radiação solar recebida pelo sistema através da aplicação matemática MatLab, permitiu simular numericamente o fluxo laminar induzido por convecção natural, utilizando o código de “*Phoenix*”.

Chen et al [100] analisaram o fenómeno da transferência de calor através de convecção natural numa parede de Trombe de um edifício solar passivo localizado numa zona de clima quente na China. Foi construída uma célula de teste no campus da Universidade de Tecnologia de Dalian, tendo o estudo realizado acerca da convecção natural sido o primeiro a ser realizado na China. Concluíram que durante o processo de termocirculação, os factores influenciadores da temperatura interior são a intensidade de radiação solar, a temperatura nas superfícies da parede acumuladora e as características do fluxo de calor que atravessa a abertura superior da parede acumuladora. Concluíram também que a transferência de calor por termocirculação através da caixa-de-ar é o factor dominante na afectação da temperatura interior do compartimento, e portanto é extremamente importante na eficiência da parede de Trombe. O fluxo de ar na caixa-de-ar é bastante complexo, devido à transição de regime laminar para turbulento. O fluxo de ar é turbulento, pelo menos a partir de metade da altura da parede quando o sentido do processo de termocirculação é positivo.

O trabalho apresentado por Hami et al [101] consistiu na modelação do fluxo de calor por convecção natural, em regime laminar num edifício situado no sudoeste da Argélia, cujo aquecimento é efectuado através da introdução de uma parede de Trombe. O estudo é efectuado durante um dia típico de Inverno e as equações desenvolvidas pretendem traduzir o movimento de ar e a transferência de calor para o interior do compartimento, sendo resolvidas numericamente através do código *CFD FLUENT*. Foram analisadas a espessura da caixa-de-ar e a estratificação das temperaturas. Os resultados obtidos através da simulação permitiram concluir que os valores das temperaturas que atingem o compartimento são função do fluxo de calor e atingem valores bastante elevados, favoráveis ao conforto térmico no interior do compartimento. No que respeita aos valores de temperatura atingidos neste espaço de ar, estes assumem valores bastante elevados que variam entre 30°C e 60°C [10, 58].

Mezrhab e Rabhi [102] estudaram numericamente a transferência de calor por convecção natural e por radiação térmica entre dois compartimentos cheios de ar e divididos por um elemento divisório vertical com aberturas de ventilação no topo e na base do elemento, cuja situação analisada pretende ser uma representação simplificada da parede de Trombe ventilada na parede acumuladora. Os resultados foram obtidos usando valores reais recolhidos através da introdução de paredes solares. Foi estudado o efeito das aberturas na parede na transferência de calor, sendo o objectivo principal a análise da influência dos valores obtidos por radiação no valor do número de *Nusselt* e no fluxo de ar através das aberturas. Concluíram que as linhas de fluxo de ar e as curvas de temperatura são consideravelmente afectadas pela presença da parede acumuladora, havendo um aumento de fluxo através das

aberturas quando sujeito ao efeito da radiação térmica, o que por sua vez conduz ao aumento do calor transferido entre os dois os dois espaços.

Kurtbaş e Durmuş [87] estudaram a instabilidade do fluxo de calor através da convecção natural na caixa-de-ar de uma parede de Trombe de um edifício, com várias aberturas no topo e na base, de iguais dimensões. Foi analisada a influência do envidraçado e da superfície de absorção na parede ventilada, através de um modelo numérico e de um modelo experimental de reduzidas dimensões para possibilitar a validação dos resultados obtidos. As temperaturas no envidraçado e na superfície de absorção da parede, a variação da velocidade e da transferência de calor na caixa-de-ar foram também estudados. Concluíram que o fluxo de calor através do vidro é um parâmetro influenciador da transferência de calor para o interior e que a velocidade do ar varia em função da posição das aberturas. A velocidade do ar aumenta nas aberturas centrais, diminuindo à medida que se vai afastando das mesmas, em direcção às das extremidades. Na parede de Trombe clássica, segundo Balcomb et al, citado por Wilson [18], 30% do calor que atinge o compartimento é obtido por convecção, enquanto os restantes 70% são garantidos por condução e por radiação.

Uma parede de Trombe ventilada provoca maior variação de temperatura num edifício do que se não for ventilada, uma vez que no interior do compartimento, as temperaturas atingirão valores mais elevados durante o dia e mais reduzidos durante a noite, caso existam aberturas de ventilação. Por essa razão, paredes de Trombe ventiladas são uma solução ideal para edifícios comerciais e de serviços [94, 101]. Assim sendo, a eficiência energética destes dois tipos de parede de Trombe depende da utilização dada a cada um destes sistemas. Uma parede de Trombe não ventilada pode ser suficiente para edifícios residenciais que requerem o aquecimento do espaço interior essencialmente durante a noite. Por exemplo, em climas em que as exigências de aquecimento dos edifícios são elevadas, quer durante o dia, quer durante a noite, é desejável prever um sistema de ganho directo no espaço, que poderá ser garantido pela existência de dispositivos de ventilação na parede de Trombe. Em locais de clima moderado, em que as necessidades de aquecimento durante o dia são inferiores às da noite, é preferível o recurso a um sistema não ventilado [101].

Relativamente ao valor da velocidade na caixa-de-ar, estudos realizados por Salmerón et al [84] permitiram concluir que estes devem rondar os 0,2 m/s, uma vez que valores inferiores diminuem o desempenho da parede e valores superiores contribuem para o seu aumento, mas este incremento não se mostra significativo.

A ventilação natural é um fenómeno bastante importante na melhoria do conforto térmico dos edifícios e na redução do consumo de energia. Vários estudos têm sido desenvolvidos no sentido de potenciar o desempenho deste sistema na garantia da ventilação natural num edifício, tal como a investigação realizada por Liping e Angui [103]. Estes autores realizaram um estudo paramétrico no sentido de prever o fluxo de calor, a distribuição da temperatura e

da velocidade na parede de Trombe, em regime estável. Neste estudo são dadas sugestões de otimização para a concepção da parede de Trombe baseadas no elevado número de resultados obtidos através das simulações. Diferentes modelos de paredes de Trombe, com variação da altura da parede, da largura das aberturas, da espessura da caixa-de-ar e da intensidade de radiação solar foram simulados com utilização de *CFD FLUENT*. Os resultados demonstraram que existe uma relação ideal entre a espessura e a altura da caixa-de-ar da parede de Trombe que permite obter o máximo de ventilação possível, o que se deve à concepção do sistema de ventilação. Pode considerar-se que, na maior parte dos casos, a espessura ideal da caixa-de-ar deve corresponder a aproximadamente 1/10 da altura da caixa-de-ar. Verificou-se também que a espessura ideal da caixa-de-ar para obter o valor máximo de ventilação varia entre 20 e 30 cm.

A largura das aberturas influencia de forma bastante significativa a taxa de ventilação através da parede de Trombe. Por sua vez, a largura ótima das aberturas que possibilita o valor máximo de ventilação, está relacionada com a altura com a espessura da caixa-de-ar. Com o aumento da altura e da espessura da caixa-de-ar, a ventilação aumenta. Quanto à relação entre a área das aberturas de entrada e a altura da caixa-de-ar, esta deve ser de cerca de 3/20. A distribuição da velocidade do ar ao longo da espessura da caixa-de-ar não é uniforme, assumindo valores muito mais elevados na proximidade da parede acumuladora do que no meio da caixa-de-ar. A velocidade no interior do espaço de ar aumenta com o aumento da sua espessura e com o aumento da intensidade de radiação solar. A inversão do fluxo de calor ocorre com o aumento da espessura da caixa-de-ar, aumentando o fluxo de calor à medida que aumenta a espessura da caixa-de-ar.

O fluxo de calor é afectado por vários parâmetros, nomeadamente a radiação solar, as dimensões da caixa-de-ar, a largura dos orifícios de entrada e de saída de ar e a altura da parede de Trombe. O efeito da largura da caixa-de-ar no fluxo da massa de ar é o fenómeno mais complexo. O fluxo da massa de ar aumenta com o aumento da intensidade de radiação solar. Com o aumento da radiação solar, os ganhos solares através da parede acumuladora aumentam, a temperatura do ar no interior da caixa-de-ar aumenta, e o fluxo da massa de ar aumenta também. Provou-se que existe uma relação ótima entre a espessura da caixa-de-ar e a altura da caixa-de-ar, através de várias simulações. Mas esta relação é influenciada pela dimensão das aberturas de entrada e de saída da caixa-de-ar. Quando a altura da parede é de 3 m e a largura das aberturas de entrada é de 10 cm, o fluxo da massa de ar atinge o seu máximo sob condições em que a espessura da caixa-de-ar é de 20 cm para 3 m de altura. Com o aumento da largura das aberturas de entrada, o fluxo da massa de ar na caixa-de-ar é bastante significativo. A espessura ideal da caixa-de-ar deverá ser de 30 cm quando a altura é de 3 m.

Relativamente à área das aberturas de ventilação da parede acumuladora, poucos são os estudos desenvolvidos, verificando-se que as dimensões atribuídas por vários autores não são

unânicos. Balcomb da “*Solar Division of Los Alamos Scientific Laboratories*”, citado por Wilson [18], sugere que a área total das aberturas deve variar entre 1% a 2% da área total da parede de Trombe. Se grande parte da área for ocupada pelas aberturas de ventilação, uma reduzida quantidade de calor será transmitida pela parede acumuladora. Se pelo contrário, as aberturas ocuparem uma área muito reduzida, o calor transmitido por convecção será também reduzido. Já segundo Mendonça [8], a área das aberturas de circulação deverá estar entre 0,5% e 3% da superfície total da parede de Trombe. Segundo outros autores, um melhor desempenho do sistema de ventilação é conseguido sempre que for garantida a maior distância possível entre as aberturas inferior e superior, o que conduz ao aumento do caudal de ventilação. Por outro lado, as aberturas superiores deverão ter pelo menos a mesma área das aberturas inferiores, havendo quem defenda que deveriam ter uma área ligeiramente superior para garantir a circulação de ar quente [94]. Relativamente ao número de aberturas a colocar na base e no topo, quer do envidraçado, quer da parede acumuladora, um maior número de orifícios mais espaçados será mais eficaz do que apenas uma abertura de dimensões superiores no topo e na base, pois o fluxo de calor por convecção será ainda maior. A posição relativa entre as aberturas é também um factor condicionador da passagem de calor. No caso das aberturas superiores, de entrada de ar, estas não devem estar no mesmo alinhamento vertical que as aberturas inferiores, de saída de ar, pois se estas estiverem desalinhadas, o fluxo de calor não se fará de forma tão directa, permitindo que o calor se propague durante mais tempo no compartimento [94].

### 3.3 Parede de Trombe não ventilada

A designação de parede de Trombe não ventilada é aplicada a uma parede solar, cuja parede acumuladora não apresenta orifícios de ventilação. Neste caso, não ocorre fluxo de calor devido ao fenómeno de convecção natural do ar criado na caixa-de-ar. No entanto, em determinados períodos do seu funcionamento, a parede de Trombe clássica, ventilada na parede acumuladora, assume o papel de não ventilada, quando há necessidade de fechar os orifícios de ventilação. Isto significa que os estudos realizados nas paredes de Trombe não ventiladas servem também para analisar o comportamento da parede de Trombe ventilada quando esta situação ocorre.

Relativamente a este tipo de parede, existem alguns estudos ao nível dos materiais da parede acumuladora e do envidraçado, no sentido de potenciar o seu desempenho térmico, quando não se recorre à existência de ventilação no sistema, e este funciona apenas como sistema passivo de aquecimento.

Matuska [104] apresenta o estudo de uma parede não ventilada, com parede acumuladora em tijolo, com 45 cm de espessura, caixa-de-ar de 8 cm, e com isolamento transparente em substituição de um vidro simples, uma vez que combina a sua característica de elevada transmissão óptica com as baixas perdas de calor. Os valores obtidos foram comparados com

diferentes resultados obtidos em estudos de paredes de Trombe desenvolvidos por outros autores. A ferramenta de simulação *ESP-r* foi usada para a modelação dinâmica de paredes de Trombe não ventiladas sujeitas às condições climatéricas da cidade de Praga. O programa de simulação *ESP-r*, originalmente aplicado para a previsão do desempenho dos edifícios, foi validado e adaptado à aplicação de sistemas solares passivos em trabalhos desenvolvidos pelo “*Passive Solar Programme*” (UK Department of Trade and Industry) and *CEC’s PASSYS Project* [105]. Os resultados obtidos foram comparados com uma parede modelo, sem envidraçado, tendo sido também determinados os ganhos solares para cada tipo de envidraçado, quando analisados individualmente. O desempenho térmico de uma parede de Trombe não ventilada pode ser melhorado quando o tradicional pano de vidro simples é substituído pelo material de isolamento transparente (TI), tal como já se referiu anteriormente para o caso da parede de Trombe clássica. Neste caso, é combinado o facto de se tratar de um elemento convencional de isolamento opaco com a característica de colector solar.

A radiação solar que incide na superfície exterior do TI é transmitida para a parede acumuladora cuja superfície é pintada de preto. A parcela de calor que não é transmitida para o interior do compartimento, é devolvida ao exterior devido às perdas através do vidro. No caso dos isolamentos transparentes, estas perdas são bastante mais reduzidas quando comparadas com o habitual vidro. O uso de melhores materiais de isolamento transparente pode diminuir as necessidades de aquecimento, mas por outro lado também podem aumentar as cargas de arrefecimento. Os resultados mostraram o largo potencial destes materiais na redução do consumo de energia nos edifícios. No entanto, a nível económico os resultados não são tão promissores. Os elevados períodos de retorno do investimento obtidos para os diferentes tipos de TI demonstram que a aplicação deste sistema em paredes, quer de edifícios novos, quer de edifícios existentes, não é competitiva, tendo em conta os preços actuais dos combustíveis tradicionais e o custo associado aos materiais de isolamento transparente [104].

Na Roménia, vários grupos de investigação no domínio dos edifícios têm-se debruçado sobre o estudo dos sistemas solares passivos de aquecimento. Constantinescu [85] apresenta a análise, através de modelos matemáticos, de dois sistemas passivos, incluindo a parede de Trombe não ventilada. A análise da parede de Trombe não ventilada foi efectuada para o uso de betão e de blocos de betão leve autoclavado na parede acumuladora, distanciada 60 cm da superfície colectora. O seu comportamento foi estudado para vidro simples e duplo e para a existência ou não de protecções solares, de regulação manual ou automática. Deste estudo concluíram que a solução de parede de Trombe não ventilada, em betão com vidro duplo e protecções exteriores com superfície reflectora é a que apresenta maiores ganhos energéticos. Se a protecção solar não estiver activa, verifica-se redução nos ganhos solares, bastante significativa no caso da parede de betão, cujo desempenho térmico diminui em cerca de 80%.

A parede de Trombe não ventilada é a parede solar mais antiga e apresenta como vantagem a simplicidade do sistema. Como desvantagens apresenta o facto de não ser possível controlar as necessidades de armazenamento de calor e de apresentar fraca resistência térmica global, ou seja, apresenta elevadas perdas durante a noite e durante os períodos em que não existe sol. Por outro lado, é imprescindível o recurso aos sombreamentos para evitar o indesejado sobreaquecimento no Verão [95].

### 3.4 Variantes à parede de Trombe clássica

Diversos estudos têm sido desenvolvidos no sentido de melhorar e adaptar o comportamento da parede de Trombe clássica. Estas melhorias podem ocorrer nomeadamente ao nível da introdução e controlo de aberturas de entrada e de saída de ar no envidraçado, introdução de isolamento térmico na constituição da parede e optimização da caixa-de-ar. Nos pontos seguintes serão indicados algumas das variantes à parede de Trombe bem como as suas diferenças relativamente ao conceito original.

#### 3.4.1 Parede de Trombe duplamente ventilada

A introdução de orifícios de ventilação no envidraçado, para além dos existentes na parede acumuladora, optimiza o desempenho térmico da parede de Trombe, tornando-a benéfica para o aquecimento durante o Inverno e para o arrefecimento no Verão [83, 106].

Gan [83] efectuou estudos acerca do comportamento da parede de Trombe duplamente ventilada para a estação de arrefecimento. A taxa de ventilação resultante do arrefecimento natural foi prevista usando o programa de *CFD (Computacional Fluid Dynamics)*. O modelo obtido foi posteriormente validado de acordo com a literatura revista, tendo sido obtida uma elevada proximidade de valores entre os valores previstos e os obtidos experimentalmente na revisão bibliográfica. Foram analisados diversos parâmetros, nomeadamente, a distância entre a parede e o envidraçado, a dimensão da parede acumuladora, o tipo de envidraçado e a influência da colocação de isolamento térmico. Quando a parede de Trombe é usada para arrefecimento passivo, a taxa de ventilação, induzida pelo efeito de flutuação, aumenta com o aumento da temperatura da parede, com os ganhos solares, com a altura e espessura da parede. Concluiu-se ainda que, se as aberturas interiores e exteriores aumentarem à medida que aumenta a largura da lâmina de ar, a taxa de ventilação também aumenta com a distância entre a parede e o envidraçado. O uso do vidro duplo em substituição do vidro simples reduz as perdas de calor no Inverno e potencia o desempenho da parede de Trombe como sistema passivo de arrefecimento. Verificou também que, para maximizar a taxa de ventilação, a face interior da parede de Trombe deve ser isolada durante o Verão, o que permitirá prevenir efeitos indesejáveis de sobreaquecimento do compartimento, devido à transferência de calor por radiação e por convecção através da parede acumuladora.

O uso da parede de Trombe como uma das formas de ventilar um edifício durante o Verão foi estudado por Ruíz et al [107] com a ajuda de um modelo matemático de diferenças finitas. Um estudo paramétrico permitiu também analisar a influência de diferentes tipos de materiais de parede acumuladora no balanço térmico. O trabalho foi desenvolvido em Espanha e os resultados foram analisados com base na diferença dos graus dia de aquecimento. O modelo foi validado de acordo com o modelo numérico apresentado por Guohui Gan [83], tendo sido encontrada concordância com resultados experimentais.

Na Figura 3.5 apresentam-se de forma esquemática, os modos de funcionamento da parede de Trombe ventilada no Verão estudadas pelos autores.

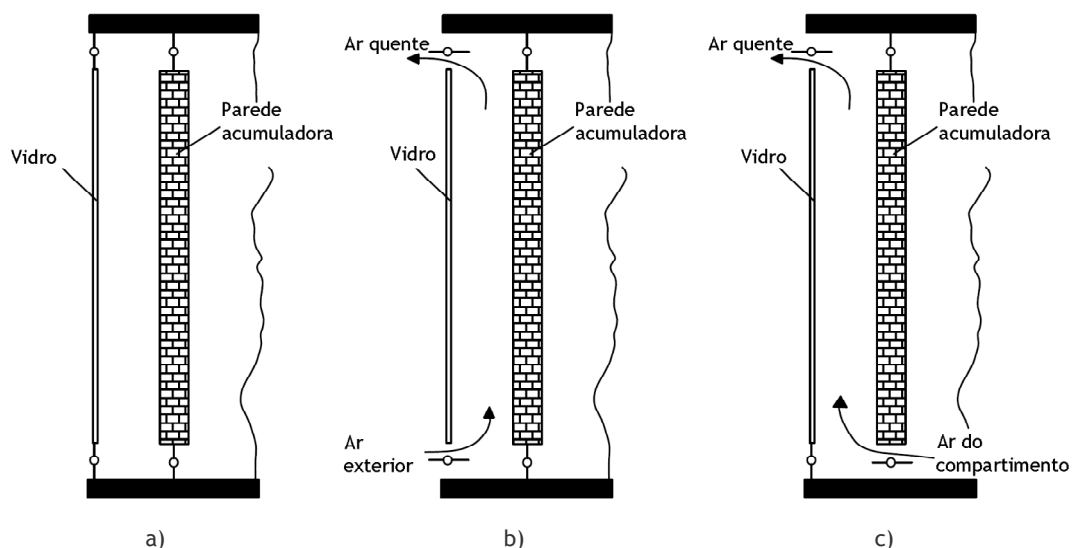


Figura 3.5 - Modos de funcionamento da Parede de Trombe no Verão: a) sistema de ventilação fechado; b) sistema de ventilação aberto no envidraçado; c) abertura de ventilação na base da parede acumuladora e no topo do envidraçado (adaptado de [107]).

A possibilidade de ventilação da parede de Trombe permite obter diversas formas de funcionamento, que afectam o seu comportamento térmico, e que se revela mais relevante em climas de Verão ameno. Para esta situação climática, os dados obtidos recomendam que enquanto houver radiação solar directa ou difusa, a parede deve ter os orifícios de ventilação no envidraçado e na parede acumuladora fechados. Nos restantes casos, o modo de funcionamento deste sistema deverá seguir o representado Figura 3.5c). Este funcionamento aparenta ser o mais eficiente para uma ampla gama de valores de inércia térmica e de condutibilidade da parede acumuladora. Para climas quentes, a posição das aberturas no envidraçado e na parede acumuladora não é tão relevante como nas condições climáticas anteriores, mas a massa térmica e a resistência térmica da parede acumuladora podem ser variáveis decisivas para a melhor combinação de funcionamento das aberturas nos dois panos. A combinação da posição das aberturas referida anteriormente pode ser mais favorável na situação em que a inércia térmica e a resistência térmica da parede acumuladora apresentam

valores mais elevados. Para situações em que estes valores são mais reduzidos, a posição mais favorável das aberturas é garantir que quando existe radiação solar directa ou difusa, estas permanecem de acordo com a Figura 3.5b). Nas restantes situações, o funcionamento deverá seguir o correspondente à posição definida na Figura 3.5c). Deste estudo concluiu-se ainda que o vidro duplo melhora o comportamento térmico da parede, mas revela-se menos importante em climas quentes [107].

#### 3.4.2 Parede de Trombe melhorada com isolamento térmico

Como já se referiu anteriormente, a introdução de isolamento térmico na parede de Trombe clássica é uma das formas de otimizar o seu desempenho. Este pode ser colocado junto à face exterior (Figura 3.7) ou junto à face interior (Figura 3.6) da parede acumuladora. Para aumentar a resistência térmica da parede de Trombe e controlar as necessidades energéticas, é colocada uma camada de isolamento térmico pelo interior da parede acumuladora. No entanto, a presença desta camada faz com toda a energia recolhida seja rapidamente introduzida no compartimento através da camada de ar, havendo um desfasamento bastante curto entre o período de acumulação e de libertação de calor [95].

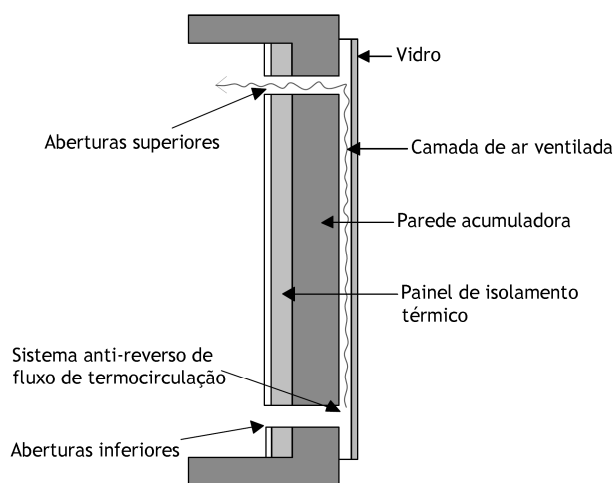


Figura 3.6 - Desenho esquemático da parede de Trombe melhorada com isolamento térmico pelo interior (adaptado de [95]).

Li et al [108] propuseram um modelo matemático de simulação do fluxo de ar na caixa-de-ar de paredes de Trombe deste tipo. Investigação numérica acerca do desempenho do vidro, da espessura da caixa-de-ar da velocidade do ar foi também efectuada. Concluíram que, para a mesma quantidade de fluxo através da parede, a transferência de calor num canal de ar estreito é maior do que num canal com espessura elevada, o que se deve ao facto de a massa de ar ser constante mas a velocidade numa caixa-de-ar estreita é mais elevada. Quanto menor for a velocidade do ar, menor será a transferência de calor por convecção. Por exemplo, para uma caixa-de-ar com 20 cm de espessura, a velocidade do ar que atravessa a parede é maior do que a que ocorre para a espessura de 30 cm, para a mesma velocidade de entrada de ar. [108].



Jie et al [109] apresentaram uma parede de Trombe melhorada, capaz de ser adaptada à construção de edifícios, cujas fachadas incluem isolamento térmico na sua constituição, mas apenas na caixa-de-ar de paredes duplas e pelo interior do edifício, não sendo analisada a situação de isolamento pelo exterior. O estudo foi desenvolvido numa região da China, em que a maior parte dos edifícios apresentam as fachadas isoladas termicamente para combater as temperaturas bastante reduzidas. A parede de Trombe melhorada consiste na colocação de um recobrimento na superfície exterior da parede acumuladora, constituído por um painel fino de aço pintado de preto, sobre o qual se coloca a camada de isolamento térmico, substituindo a habitual superfície pintada de cor escura. Foi desenvolvida uma análise numérica para demonstrar o efeito desta parede de Trombe melhorada no ambiente interior deste tipo de edifícios, comparando-o com o obtido pela parede de Trombe clássica. Foram analisados os dois tipos de parede de Trombe, tendo por base a mesma estratégia de funcionamento, ou seja, mesmo período de funcionamento do sistema de ventilação em ambos os casos. Concluiu-se que as temperaturas no interior dos compartimentos são influenciadas pela introdução da parede de Trombe, sendo a influência da parede de Trombe com isolamento mais significativa. Neste caso, os valores obtidos para a temperatura no interior do compartimento, durante a noite, com este tipo de parede, são superiores aos obtidos para a parede de Trombe clássica, o que revela que a parede de Trombe melhorada permite transferir maior quantidade de calor para o interior. A parede de Trombe melhorada contribui para a diminuição da quantidade de calor absorvida pelas camadas externas devido à existência de isolamento térmico, o que faz com que maior quantidade de calor possa ser ventilada pelas aberturas do espaço de ar. A temperatura no painel de aço é bastante superior à obtida na superfície escura da parede acumuladora da parede de Trombe clássica, o que indica que a ventilação na camada de ar pode transmitir mais calor para o interior do compartimento, uma vez que obterá maior quantidade de calor devido à existência do painel de aço.

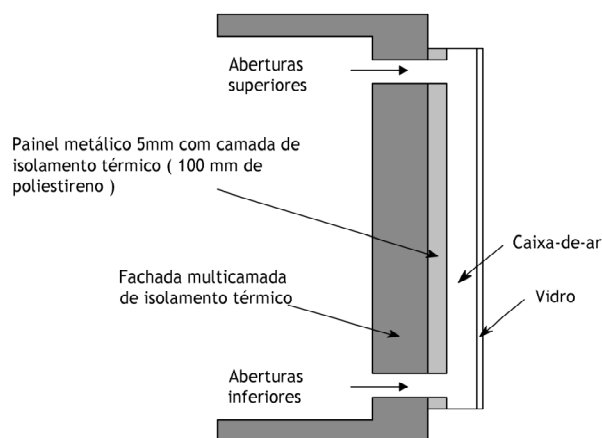


Figura 3.7 - Desenho esquemático da parede de Trombe melhorada com isolamento pelo exterior (adaptado de [109]).

A eficiência da parede de Trombe melhorada no aquecimento do edifício pode ultrapassar os 33,9%, relativamente ao desempenho da parede de Trombe clássica, cuja eficiência é de 21,7%, o que corresponde a um aumento de 56%.

#### 3.4.3 Parede de Trombe-Michel composta

Zalewski et al [110] em colaboração com o arquitecto J. Michel, desenharam e conceberam uma parede solar composta, designada por parede de Trombe-Michel composta (Figura 3.8), similar à parede de Trombe clássica, exceptuando o facto de existir uma parede com isolamento térmico pelo interior da parede acumuladora, e com aberturas de ventilação na base e no topo, o que permite eliminar algumas das desvantagens da parede de Trombe clássica. A parede composta foi construída numa célula de teste numa localidade do Sul de França, sujeita às condições climáticas reais durante dois anos. Foram utilizados termofluxímetros no sentido de determinar as propriedades físicas e térmicas da parede acumuladora. Foi também quantificado o fluxo de calor transferido através da camada de ar para o interior do edifício. O estudo durante o período de Inverno permitiu perceber a importância dos elementos exteriores, tendo sido feitas alterações ao nível dos envidraçados, que foram substituídos por policarbonato alveolado para diminuir as perdas. Durante os períodos de Verão, observou-se a inversão da circulação, tendo sido testados uma película plástica flexível e uma protecção controlada pelo termofluxímetro, no sentido de minimizar este problema. No entanto, verificaram que estas soluções têm vantagens e desvantagens, nomeadamente o uso das protecções monitorizadas, que são mais dispendiosas e consideradas mais complexas de controlar. Os valores obtidos através dos ensaios permitirão definir as correlações entre parâmetros e as características térmicas a incluir num posterior programa de simulação.

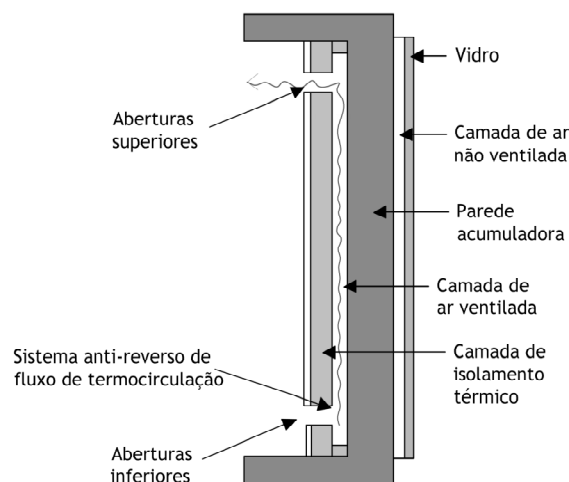


Figura 3.8 - Desenho esquemático da Parede de Trombe - Michel composta (adaptado de [110]).

Em estudos posteriores realizados por Zalewski et al [95] descreve-se o modo de funcionamento de quatro tipos de paredes solares diferentes: a parede de Trombe clássica (ventilada na parede acumuladora); a parede de Trombe com isolamento pelo interior; a parede de Trombe não ventilada e a parede Trombe-Michel, bem como as vantagens e desvantagens destes sistemas. Apresentaram ainda o resultado do desenvolvimento de um programa de simulação numérico validado através de medições experimentais realizadas durante cerca de três anos consecutivos numa célula de teste sujeita a condições climáticas reais.

No que respeita à parede de Trombe-Michel, este estudo permitiu aperfeiçoar o conhecimento do seu modo de funcionamento, para além de dar continuidade aos estudos anteriormente desenvolvidos. Neste sistema, a parede acumuladora absorve parte da energia solar e aquece dada a existência do efeito de estufa, a armazena o calor e transmite-o por condução para o interior do compartimento. Após um determinado período de atraso, dependendo do tipo e espessura da parede, esta energia é transferida por convecção devido ao fenómeno de termocirculação existente na camada de ar entre a parede de massa elevada e a parede com isolamento térmico. Durante os dias sem Sol, no Verão ou durante a noite, as aberturas na camada isolada deverão estar fechadas, bloqueando-se assim a circulação de ar, o que evita a possibilidade de sobreaquecimento e o problema de inversão na circulação do calor, ou seja, do interior para o exterior.

Assim, esta variante à parede de Trombe tradicional apresenta as seguintes vantagens: elevada resistência térmica devido à presença da camada de isolamento e das camadas de ar; ausência de infiltrações de ar frio através da camada exterior envidraçada; necessidades de arrefecimento no Verão limitadas devido à existência da camada de isolamento térmico e ao bloqueamento da circulação do ar na caixa-de-ar ventilada, e se possível abrindo possíveis orifícios na camada de ar exterior; necessidades de calor controladas sempre que se desejar através do controlo da circulação do ar.

A desvantagem desta solução de parede solar reside na necessidade de existir um sistema que previna a inversão da circulação do calor na camada de ar ventilada. Este problema surge quando a parede acumuladora está mais fria do que o ar na camada de ar ventilada. Neste caso, se não existir este sistema de controlo, o ar frio entra no compartimento através da abertura inferior, tal como se processa na parede de Trombe clássica. Os autores consideram que este estudo pode ser vantajoso para projectistas no sentido de decidir qual das configurações de parede solar deverão aplicar em cada situação.

A parede de Trombe clássica e a parede de Trombe-Michel foram também estudadas por Shen et al. [111] através do método das diferenças finitas. Neste trabalho de investigação foram apresentados o estudo térmico destes dois tipos de parede e a comparação dos resultados da simulação através do programa *TRNSYS* com os obtidos pela simulação com o método das

diferenças finitas (*FDM*). A comparação entre comportamento das duas paredes foi também efectuada. O estudo permitiu concluir que, durante todo o período de análise, os valores das amplitudes térmicas foram menores na parede de Trombe composta do que na parede de Trombe clássica. Os autores consideram que o grande passo na investigação foi a criação de um novo modelo de simulação para paredes de Trombe-Michel através do programa *TRNSYS*. A comparação entre as duas paredes tendo em conta os resultados obtidos no *TRNSYS* permitiu tecer diversas conclusões acerca do seu comportamento. Concluíram que os fluxos de calor através da abertura superior e da superfície interior da parede de isolamento térmico que chegam até ao compartimento são os parâmetros mais importantes no estudo efectuado.

Na parede de Trombe clássica, a partir da altura em que a radiação solar entra na caixa-de-ar entre o vidro e a parede acumuladora, a temperatura do fluxo de ar aí existente, é influenciado directamente pela radiação solar, aumentando a sua temperatura. Na parede solar composta (Trombe-Michel) a radiação solar é absorvida pela parede acumuladora e o calor que atravessa a parede entra na caixa-de-ar que separa a parede acumuladora da parede isolada. A parede acumuladora localizada do lado exterior do sistema funciona como obstáculo à passagem de calor quando ocorre inversão de fluxo. Assim, a temperatura da massa de ar que atravessa o orifício superior da parede isolada é menor do que a verificada na parede de Trombe clássica. Desde que a resistência térmica do pano isolado seja maior do que a da parede acumuladora, as amplitudes térmicas na superfície interna da parede interior e o fluxo de calor que atinge o interior do compartimento assumem valores menores na parede composta. Os resultados demonstram que a parede composta apresenta melhor desempenho térmico do que a parede de Trombe clássica em climas frios ou nublados [112].

No sentido de melhorar o comportamento da parede solar composta, Chen [91] analisou a transferência e o fluxo de calor quando se introduz um absorvente poroso no sistema, tendo concluído que a sua inclusão pode contribuir para os ganhos de energia durante a estação de aquecimento. Estudos subsequentes levados a cabo por Chen e Liu [113] permitiram desenvolver um modelo numérico capaz que incluir o efeito do absorvente poroso em duas configurações distintas da parede solar composta. Concluíram, entre outros aspectos, que a permeabilidade, o material e a posição do elemento poroso na parede solar composta contribuem significativamente para o aquecimento do compartimento. Estas características do absorvente poroso devem ser escolhidas adequadamente para evitar a ocorrência de sobreaquecimento e a impossibilidade de aproveitar o calor quando a energia solar está disponível.

#### **3.4.4 Parede de Trombe fotovoltaica**

Jie et al [114] introduziram o conceito de parede de Trombe fotovoltaica, não só para melhorar o seu aspecto estético mas também para capturar o calor. Os autores começaram por desenvolver um modelo teórico de análise do desempenho deste tipo de parede, cujos

resultados obtidos demonstram que a diferença de temperatura verificada entre a situação de se utilizar apenas o envidraçado ou de se substituir este por células fotovoltaicas atinge um valor máximo de 10,6°C. No que respeita ao diferencial de temperaturas no compartimento, com ou sem parede de Trombe fotovoltaica, este atingiu no máximo o valor de 12,3°C durante três dias. Estudos posteriores recaíram na análise da influência da parede de Trombe fotovoltaica num compartimento com envidraçado, tendo-se concluído que a instalação da parede fotovoltaica permite um aumento da temperatura interior do compartimento no máximo de 7,7%, relativamente ao compartimento de referência.

No sentido de validar o modelo matemático para uma parede de Trombe com células fotovoltaicas, Jie et al [106] construíram uma célula de teste com dois compartimentos, tendo sido incluído na fachada de um dos compartimentos a parede com células fotovoltaicas. Os parâmetros analisados foram a temperatura no interior da caixa-de-ar, a temperatura superficial e a eficiência eléctrica do painel fotovoltaico e ainda os valores das temperaturas interiores obtidas nos dois compartimentos da célula de teste. Foi também efectuado um estudo no sentido de determinar as dimensões das aberturas necessárias no período de Inverno para este tipo de parede. O efeito da introdução de uma camada de isolamento térmico e de sombreamentos na caixa-de-ar, bem como o modo de funcionamento do sistema durante as estações de aquecimento e de arrefecimento foram também analisados. Este estudo permitiu concluir que o isolamento térmico é recomendado quer no Verão, quer no Inverno, enquanto a introdução da cortina de sombreamento na parede de Trombe fotovoltaica é aconselhada especialmente no período diurno [93].

Para a análise de paredes de Trombe com introdução de células fotovoltaicas Bin et al [115] recorreram a um modelo térmico de elementos finitos e ao programa *TRNSYS*. Foi estabelecida uma relação entre a área de parede fotovoltaica e as temperaturas obtidas ao longo das camadas da parede. O aumento da área ocupada pelas células fotovoltaicas conduz ao aumento da capacidade eléctrica da parede de Trombe, mas as temperaturas na caixa-de-ar e no interior do compartimento diminuem, o que exige que, para haver uma optimização do sistema, sem prejudicar os valores da temperatura interior, seja feita uma escolha apropriada da área de células fotovoltaicas na parede de Trombe.

Wei et al [116] desenvolveram estudos recentes acerca da aplicação de células fotovoltaicas em substituição do envidraçado. Esta alteração permite a conversão da radiação solar em calor e electricidade simultaneamente. Na fachada onde foi instalada esta versão de parede de Trombe, foi também introduzida uma janela que permite a entrada de calor no compartimento durante o Inverno. Estudos experimentais e de modelação numérica foram realizados para investigar o desempenho deste tipo de parede de Trombe para diferentes tipos de fachadas orientadas a Sul. Dos resultados obtidos, apesar da existência de uma janela na fachada Sul possibilitar a entrada de calor no compartimento, a eficiência térmica da parede de Trombe fotovoltaica é reduzida em cerca de 27%. A substituição do vidro pelas

células fotovoltaicas reduz significativamente a capacidade de transferência de calor da parede de Trombe clássica. Se a parede de Trombe clássica tiver uma superfície de 33,4% ou de 100% de ocupação por células fotovoltaicas, obtém-se uma redução da eficiência energética de 7% e 17%, respectivamente. Quanto à energia eléctrica obtida através deste sistema, esta é proporcional à área de células fotovoltaicas que ocupam a parede de Trombe.

#### 3.4.5 Parede de Trombe modificada

O conceito de parede de Trombe Modificada surgiu no sentido de adaptar a concepção tradicional deste sistema passivo para a ventilação natural dos edifícios [117, 118]. Khedari et al [119] analisaram a feabilidade de uma parede de Trombe modificada (MTW) (Figura 3.9) na redução da transferência de calor nos edifícios e na indução da ventilação natural, sob condições reais, em Bangkok. Este sistema foi construído na fachada Sul de uma célula de teste, sendo constituído por uma parede acumuladora em alvenaria com duas aberturas centrais no topo com 25 cm x 5 cm de área e pintada exteriormente de cor preta mate, uma caixa-de-ar com espessura variável entre 10 e 14 cm, e pelo interior uma placa de gesso, com duas aberturas na base com as dimensões das anteriores.

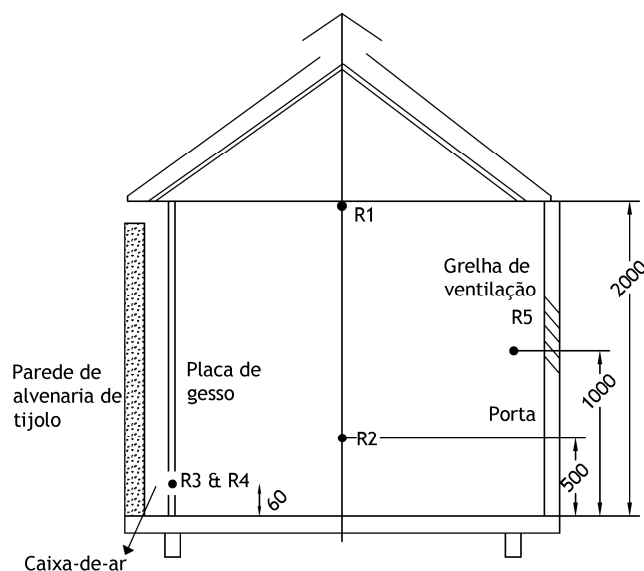


Figura 3.9 - Esquema da ventilação natural de uma habitação com recurso à parede de Trombe modificada (adaptado de [119]).

Foram analisados o efeito da espessura da caixa-de-ar, da cor da superfície da parede exterior, a eficiência do sistema MTW na indução da ventilação natural e o seu comportamento como material de isolamento. Concluiu-se que uma caixa-de-ar com espessura mais elevada e a cor escura da parede acumuladora, conduzem à maior taxa de ventilação natural obtida, mas ainda com valores reduzidos relativamente aos requeridos para a situação de pleno conforto térmico. No entanto, a MTW pode reduzir a transmissão de calor

para o interior do edifício em cerca de 75%, o que leva os autores a recomendá-la como elemento de isolamento. É também uma solução económica uma vez que os materiais usados são materiais de uso corrente na construção. Durante a estação de arrefecimento, quando é necessária a ventilação para melhorar o ambiente interior, as necessidades para arrefecer podem ser reduzidas, levando a um menor consumo de energia.

Khedari et al [120] estudaram também o desempenho de uma nova configuração de parede de Trombe modificada (MTW) designada por parede de Trombe modificada parcialmente envidraçada (PG-MTW), com o intuito de diminuir a acumulação de calor e induzir ventilação natural e simultaneamente permitir iluminação do edifício (Figura 3.10). A MTW foi alterada para duas configurações de PG-MTW. A PG-MTW,g que consiste numa parede acumuladora de alvenaria, incluindo blocos de vidro no pano exterior, tal como se verifica na figura, e com um pano pelo interior constituído por gesso, revestido exteriormente por folha de alumínio e interiormente por um painel de acrílico pelo interior. A caixa-de-ar é de 14 cm e existem aberturas de ventilação nos dois panos da parede com as mesmas dimensões, sendo a abertura inferior na parede interior e a abertura superior na parede exterior acumuladora. A configuração PG-MTW,d é idêntica à anterior, mas os blocos de vidro são substituídos por vidro duplo. Para investigar o desempenho destes dois modelos, foi construída uma célula de teste que incluía estes dois tipos de paredes orientadas a Sul, adjacentes à MTW para posterior comparação.

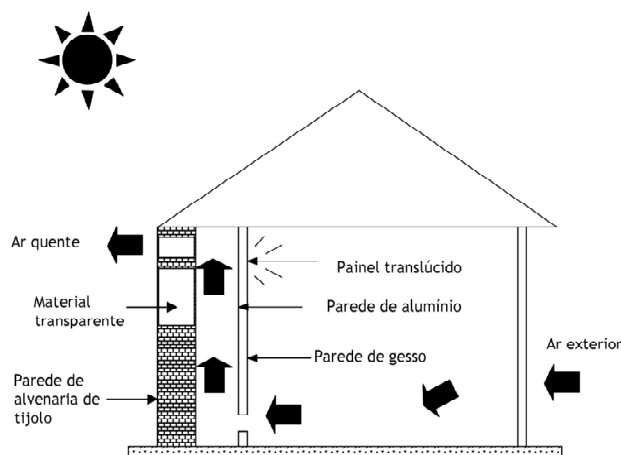


Figura 3.10 - Representação esquemática de funcionamento da parede de Trombe modificada, parcialmente envidraçada (PG-MTW) (adaptado de [120]).

Os resultados deste estudo demonstraram que o sistema PG-MTW com três filas de bloco de vidro, o que corresponde a  $0,36 \text{ cm}^2$  de área, permitiu a maior quantidade de fluxo de ar e iluminação, cerca de  $60$  a  $80 \text{ m}^3/\text{h}$  e  $350$  a  $550 \text{ lux}$ , respectivamente. Este fluxo de ar representa mais 30% do que o obtido através do sistema MTW. Os resultados experimentais da configuração PG-MTW provaram que possui excelente desempenho comparativamente ao sistema MTW. Além dos benefícios ao nível do impacte ambiental e da poupança de energia, este tipo de parede pode desempenhar três funções importantes: elevada taxa de renovação

de ar, iluminação natural suficiente, sem situações de sobreaquecimento uma vez que a temperatura média no interior do compartimento é mais baixa do que a temperatura ambiente em cerca de 3°C a 4°C. Os autores consideram este sistema promissor, dada a disponibilidade de materiais no mercado a um custo relativamente baixo e a configuração do sistema ser de fácil integração na envolvente. Dragicevic e Lambic [4] apresentaram uma análise numérica da eficiência de um outro modelo de parede de Trombe modificada, caracterizada por convecção forçada (Figura 3.11). O sistema considerado comporta um vidro duplo e dois panos de parede separados por um espaço de ar, com orifícios de ventilação de posição variável, que designaram por parede de Trombe modificada. Neste caso foi estudado o efeito da velocidade do ar na caixa-de-ar para diferentes posições das aberturas de ventilação. Para a posição A, o compartimento é aquecido pelo ar quente que circula na caixa-de-ar entre o vidro e o primeiro pano de parede, enquanto com o orifício de ventilação na posição B, parte do calor é transmitido por absorção e condução e outra parte pela circulação do ar que passa da caixa-de-ar entre o vidro e o primeiro pano de parede para o espaço de ar entre os dois panos de parede. No caso C, o compartimento é aquecido devido à ocorrência em simultâneo dos dois processos anteriores. Já na posição D, o compartimento é aquecido sem que a parede esteja em contacto directo com a radiação solar, sendo o calor obtido por radiação e convecção natural da parede acumuladora interior e por circulação do ar aquecido no canal de ar central. O estudo numérico da parede de Trombe modificada foi comparado com a parede de Trombe clássica, sem ventilação. Ambas as paredes eram em betão com um vidro duplo. Concluiu-se que a variação da velocidade do ar na primeira caixa-de-ar em contacto com o envidraçado, a radiação solar e a temperatura ambiente influenciavam a eficiência energética do sistema no aquecimento do compartimento. Para uma radiação solar constante, com o aumento da velocidade do ar nas aberturas de ventilação, a eficiência da parede aumentava.

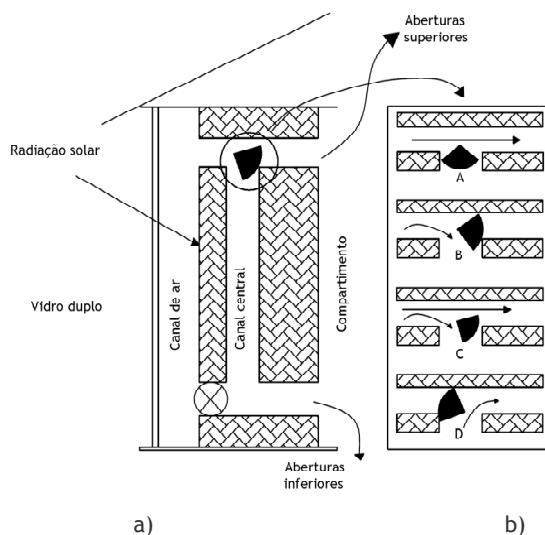


Figura 3.11 - Parede de Trombe modificada: a) representação esquemática; b) posicionamento da abertura de ventilação superior (adaptado de [4]).



### 3.4.6 Parede de Trombe com materiais de mudança de fase (PCM)

O armazenamento de calor latente nos materiais de mudança de fase, universalmente designados pela sua sigla PCM (*Phase Change Materials*), é bastante atractivo devido à sua elevada capacidade de armazenamento. Este assunto tem sido alvo de interesse por parte de investigadores e a sua aplicação para aquecimento e arrefecimento do edifício tem sido desenvolvida desde 1980.

A introdução destes materiais na parede de Trombe pode ser efectuada de duas formas. Por um lado, a energia solar pode ser directamente absorvida e acumulada pela estrutura do edifício, através da incorporação de PCMs encapsulados nos materiais de construção comuns, tais como, betão, reboco, gesso, gesso cartonado e outros materiais de revestimento. Por outro lado, os materiais de construção podem ser directamente impregnados com PCMs sem encapsulamento, como por exemplo a utilização de bloco de vidro com PCMs incorporados [121].

Segundo Pause, citado por Mendonça [8], o funcionamento deste tipo de paredes é bastante simples. Durante os períodos de aumento da temperatura ambiente, o calor é absorvido pelo PCM, efectuando-se a mudança para o estado líquido, enquanto nos períodos de descida da temperatura, ocorre a solidificação do PCM e a consequente libertação de energia em forma de calor. Os PCMs foram aplicados pela primeira vez na concepção de paredes de Trombe data de 1978 e foi realizada por Telkes [122]. A integração destes materiais neste sistema passivo exige o controlo de parâmetros que se assumem fundamentais no desempenho. Um dos parâmetros a controlar é a temperatura de fusão do material, que deverá ser abaixo da temperatura de conforto para o Verão, mas o mais próximo possível desta. A temperatura de solidificação é outro dos parâmetros, devendo situar-se acima da temperatura de conforto para o Inverno, mas o mais próximo possível desta. Por outro lado, o calor libertado ao solidificar deve ser o mais alto possível e o calor absorvido ao liquefazer deve ser o mais alto possível [123]. Kara et al [121] conduziram um trabalho de investigação para determinar o desempenho da parede de Trombe com PCM encapsulados. A parede orientada a Sul é constituída, do interior para o exterior por parede acumuladora, revestimento da parede com PCMs encapsulados, caixa-de-ar e um envidraçado de vidro triplo, designado por TIM (*Transparent Insulation Material*), cujo princípio de funcionamento se pode observar na Figura 3.12.

Uma vez que o ângulo de incidência dos raios solares é menor no Inverno e maior no Verão, a camada de TIM é concebida para que transmita os raios solares com menor ângulo de incidência e reflecta os raios solares com maior ângulo de incidência. Durante os dias de Inverno a radiação solar transmitida através do TIM é absorvida e armazenada pelo revestimento da parede acumuladora com PCMs encapsulados. O calor armazenado é então extraído para o compartimento por circulação de ar através das aberturas. No Verão, grande

parte dos raios solares são reflectidos pelo TIM para evitar a possibilidade de sobreaquecimento.

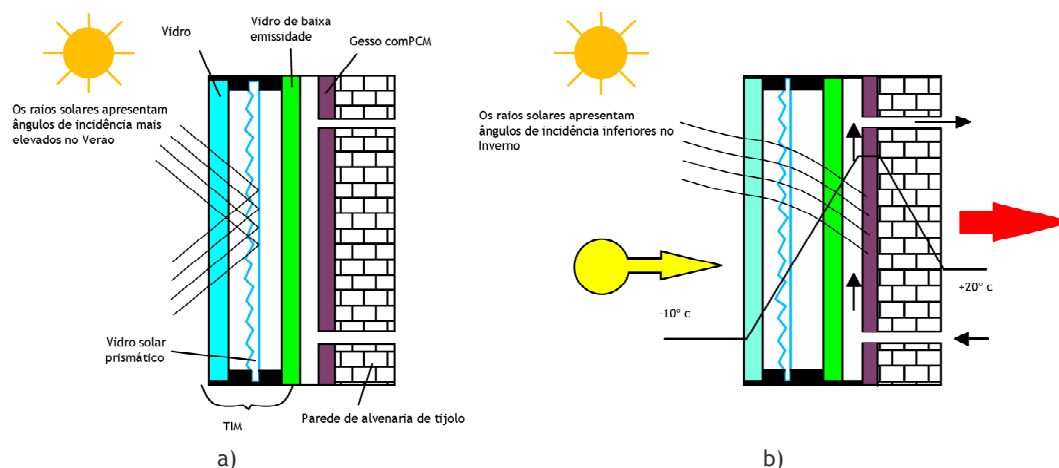


Figura 3.12 - a) Princípio de funcionamento da parede de Trombe com PCM no Verão: não existe acumulação de energia; b) Princípio de funcionamento da parede de Trombe com PCM no Inverno: aquecimento solar passivo (adaptado de [121]).

Os resultados deste estudo permitiram concluir que, com este tipo de parede de Trombe, é possível obter uma eficiência de 30% e 27%, para os meses de Outubro e Novembro, respectivamente.[121]. Dominguez et al [75] substituíram a parede de massa elevada da parede de Trombe clássica por um material mais leve e translúcido também de grande capacidade térmica, como por exemplo blocos de vidro com PCMs incorporados, Figuras 3.13 e 3.14.

Este sistema foi patenteado por Dominguez et al, sendo constituído, do interior para o exterior por parede acumuladora de blocos de vidro contendo PCMs, aberturas de ventilação reguláveis, caixa-de-ar e um envidraçado exterior com sistema manual de ventilação que no Verão deve estar aberto e no Inverno fechado. Deve ainda estar prevista uma abertura de ar na parede Norte para promover a ventilação natural no Verão [124]. No Inverno, a radiação solar incidente atravessa o envidraçado aquecendo o ar existente na caixa-de-ar, que por sua vez aquece o material de mudança de fase constituinte da parede de blocos de vidro, que passa do estado líquido ao estado sólido.

Quando o material de mudança de fase está fundido assume a cor escura [125]. O calor é transferido para o interior do compartimento através das aberturas de ar existentes na parede. No Verão, os orifícios de ventilação exteriores devem estar abertos para promover a ventilação natural do compartimento e evitar o sobreaquecimento do mesmo [124].

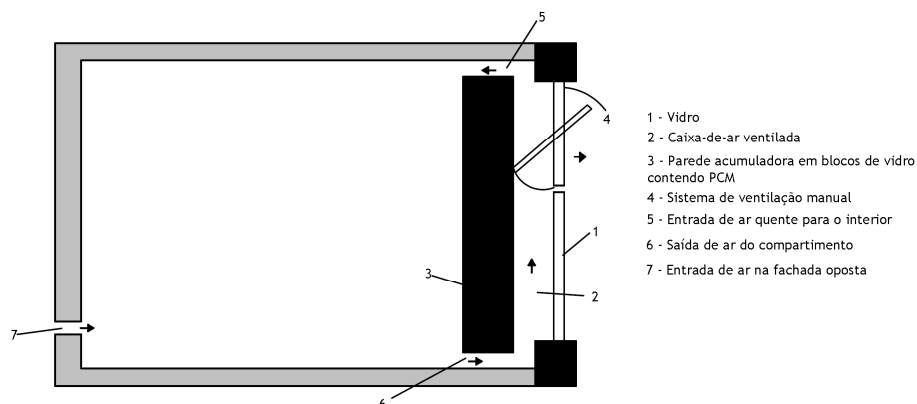


Figura 3.13 - Princípio de funcionamento da parede de Trombe com PCM (adaptado de [75]).

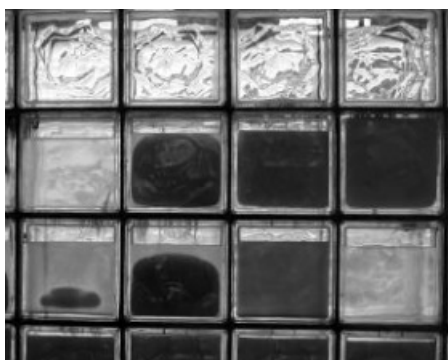


Figura 3.14 - Vista frontal da parede acumuladora com PCM incorporado.

Stritih e Novak [126] estudaram o comportamento de uma parede de Trombe, utilizando como material de mudança de fase a parafina preta. Efectuaram também a análise comparativa de diferentes PCMs, indicando vantagens e desvantagens para cada um deles. O estudo foi efectuado para uma parede de Trombe não ventilada. Também Jabbar et al [75] analisaram o comportamento de três materiais diferentes na parede de Trombe clássica, o betão, o sal hidratado e a parafina. O estudo foi efectuado para diferentes espessuras da parede acumuladora, o que permitiu avaliar as flutuações de temperatura no interior do compartimento em cada uma das situações. Concluíram que 8 cm de espessura de parede com sal hidratado permitia a manutenção da temperatura de conforto com a menor flutuação de temperaturas, comparativamente aos 20 cm de parede de betão e aos 5 cm de parafina.

Principi [127] refere que a camada de PCM pode substituir a parede espessa de massa elevada construída nos materiais tradicionais, como o betão, podendo ser aplicado em fábrica, na concepção de materiais leves. Este tipo de sistema pode armazenar a energia durante o dia e mantê-la a elevadas temperaturas durante o resto da noite, o que permite reduzir o consumo de energia e a perdas pela envolvente.

### 3.4.7 Parede de Trombe em malha (Lattice Wall)

Fang e Li introduziram um novo conceito de parede solar adaptado a partir da parede de Trombe clássica. Trata-se um sistema solar passivo de aquecimento que consiste numa parede com diversas aberturas desalinhadas na parede e que os autores designaram por “Lattice Wall” com abreviatura LPSHW para “*Lattice Passive Solar Heating Wall*”, cuja configuração está indicada na Figura 3.15.

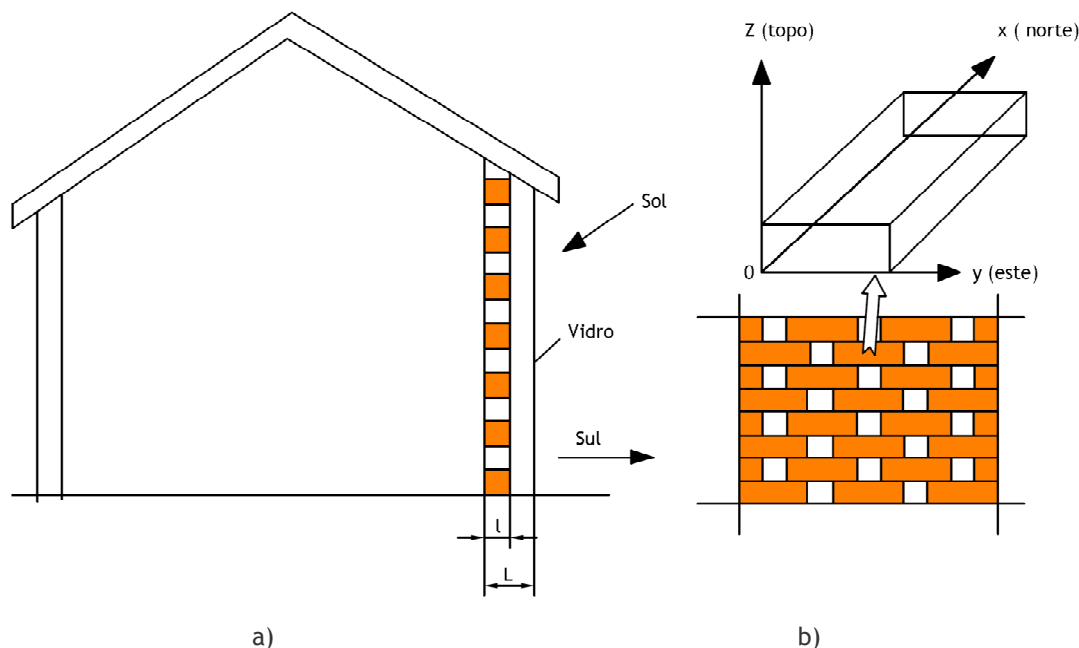


Figura 3.15 - Desenho esquemático da “Lattice Wall” a) perfil transversal; b) vista frontal (adaptado de [128]).

Os primeiros estudos desenvolvidos por Fang basearam-se nos resultados obtidos através de trabalho experimental, tendo sido construídas quatro células de teste na Universidade de Tsinghua na China, para testar o desempenho do sistema LPSHW. A análise comparativa entre o LPSHW e a parede de Trombe demonstrou que esta apresenta mais vantagens do que a parede de Trombe. Anteriormente, no Inverno de 1981, uma habitação de quinta tinha sido adaptada recorrendo a sistemas solares passivos de aquecimento, tendo sido construídos diversos tipos de paredes de armazenamento térmico no sentido de analisar o seu comportamento. Os resultados experimentais mostraram que o LPSHW apresentava melhor desempenho térmico, menos material na sua construção e um aspecto estético mais agradável, quando comparado com a parede de Trombe clássica. Actualmente, o LPSHW é mais usado na China do que qualquer outro tipo de sistema de armazenamento de calor, quando se combina a introdução de sistemas de ganho directo através das janelas com paredes solares. Este tipo de parede é habitualmente construído em tijolos cerâmicos ou blocos de betão, sendo colocado o envidraçado pelo exterior distanciado entre 5 e 10 cm. A sua configuração é mais complexa do que a da parede de Trombe, uma vez que esta possui

aberturas rectangulares de dimensões iguais, e distribuídas uniformemente, enquanto a parede de Trombe pode não ter aberturas de ventilação, ou se estas existirem, serão apenas no topo e na base. A concepção do LPSHW depende da definição dos diversos parâmetros estruturais, e os resultados experimentais não conseguiram explicar por completo o seu desempenho térmico devido à influência da espessura, altura, condutibilidade térmica, emissividade da superfície, área e distribuição das aberturas, bem como características do recobrimento em vidro, o que demonstrou a necessidade de criar um programa de simulação.

Posteriormente, Fang et al apresentaram um modelo matemático considerando o fenómeno tridimensional de condução de calor no LPSHW. Foi desenvolvido um programa de simulação em linguagem *FORTRAN*, posteriormente validado através de dados experimentais. Este programa permite simular e avaliar o desempenho térmico do sistema, para além de permitir analisar o efeito do clima e otimizar a configuração da parede. Foi analisado o efeito do tipo de vidro, da altura da parede, da largura da parede e da porosidade, entre outros. A comparação entre o LPSHW e a parede de Trombe foi também efectuada, sob as mesmas condições, tendo-se verificado que a eficiência térmica do LPSHW é de 30,2% enquanto a da parede de Trombe é de 22,6%.

#### 3.4.8 Parede solar metálica

Na Tailândia, os ganhos solares durante o Verão são a causa do sobreaquecimento do ambiente interior nos edifícios, o que leva à necessidade de criar sistemas construtivos que contribuam para a ventilação natural, evitando o recurso aos sistemas de ar condicionado. Neste sentido, Hirunlabh et al [4], propuseram uma parede solar, baseada no conceito de parede de Trombe, designada por parede solar metálica “*Metallic Solar Wall*” (MSW) (Figura 3.16).

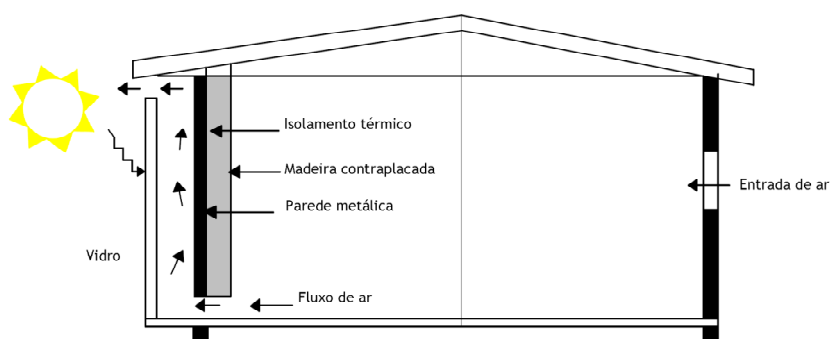


Figura 3.16 - Representação esquemática da integração da parede solar metálica na ventilação natural (adaptado de [4]).

A parede analisada através de trabalho experimental era constituída por uma placa de zinco com 0,04 cm de espessura, micro-fibra com 2,5 cm, e contraplacado de madeira de 0,4 cm. A superfície exterior foi pintada de preto mate e coberta por um vidro com 5 mm de espessura.

No centro da parede são colocadas duas aberturas com dimensões 25 x 5 cm, junto à base da parede, e outras duas são colocadas no topo do vidro. Entre o vidro e a parede metálica, existe uma caixa-de-ar. A concepção experimental da parede permitiu fazer variar a sua altura entre 1 e 2 m, bem como a espessura da caixa-de-ar, entre 10 e 14,5 cm. Os resultados obtidos demonstraram que o sistema MSW pode reduzir significativamente os ganhos solares na habitação, permitindo o aumento da circulação de ar, aumentando assim o conforto térmico. O sistema proposto é económico, dado o reduzido custo dos materiais usados. Este sistema passivo pode também ser usado para desempenhar a função inversa, isto é, fazer admissão de ar quente e injectá-lo na habitação, nas regiões mais frias, de forma a promover o aquecimento durante o período de Inverno [4].

### **3.5 A integração da parede de Trombe na reabilitação de edifícios**

Os sistemas solares passivos podem ser usados como técnica de aquecimento e de arrefecimento na reabilitação energética de edifícios [129], sendo a parede de Trombe um desses sistemas. Da revisão bibliográfica analisada, poucos são os estudos que abordam esta temática. Salmerón et al [84] apresentam como objectivo da sua investigação o estudo de diferentes soluções construtivas que permitam a melhoria da eficiência energética dos edifícios existentes. O estudo passa pela análise individual de várias sistemas passivos de aquecimento e de arrefecimento e posterior adaptação conjunta na reabilitação energética de edifícios existentes. No sentido de comparar e determinar os benefícios após a implementação de cada um dos sistemas, a análise do seu comportamento foi efectuada tendo por base a ISO13790:2004 relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios. A parede de Trombe ventilada na parede acumuladora foi um dos sistemas analisados, no que respeita à influência da velocidade do ar, à relação entre as aberturas de ventilação e à resistência térmica das diferentes camadas do sistema. Ao longo do desenvolvimento do trabalho demonstraram que é possível estudar diferentes elementos construtivos, tradicionais e passivos, individualmente e posteriormente definir linhas de orientação da sua aplicação. Estas orientações permitirão projectar a melhor solução na reabilitação de edifícios existentes.

Com o intuito de incentivar a reabilitação conscienciosa de edifícios existentes em Istambul, Yilmaz e Kundakci [130] apresentaram a primeira investigação em energias renováveis no país, através do uso combinado da parede de Trombe não ventilada com o ganho directo obtido através dos envidraçados. Foi efectuada o estudo do comportamento térmico do edifício existente e do mesmo edifício renovado, sendo feito o estudo comparativo sob condições de transferência de calor instáveis. Por um lado foi estudado o efeito da introdução da parede de Trombe na fachada Sul do edifício. Por outro lado, foi analisada a influência da alteração dos materiais nas fachadas. Posteriormente foram comparados os resultados obtidos nas duas situações, tendo sido demonstrado que a mudança do material da envolvente não

afectou significativamente as condições de temperatura no interior do edifício, nem as temperaturas superficiais interiores, enquanto a introdução da parede de Trombe condicionou bastante o desempenho do edifício.

### **3.6 Cálculo do desempenho térmico da parede de Trombe com base em documentos normativos e regulamentares**

O desempenho térmico da parede de Trombe pode ser analisado recorrendo a diversos métodos, quer sejam experimentais quer sejam de formulação paramétrica, ou ainda recorrendo a programas de simulação, como já foi referido anteriormente. No entanto, é imprescindível a adopção de uma metodologia, o mais universal possível, que permita determinar a influência da introdução deste sistema passivo nas necessidades de aquecimento e de arrefecimento do edifício. Mais ainda se exige pelo facto de existir uma directiva comunitária relativa ao desempenho energético dos edifícios, cuja transposição para os diferentes estados membros implica a adopção de soluções construtivas mais eficientes e sustentáveis. A adopção dos sistemas passivos é uma das formas de conseguir a redução do consumo de energia nos edifícios, desde que estes sejam devidamente dimensionados e ajustados ao edifício em causa. Para isso, é fundamental a existência de metodologias de cálculo, disponíveis através de documentos normativos ou regulamentares que permitam determinar o comportamento térmico de edifícios que integrem este tipo de sistemas passivos, na fase de projecto. A norma europeia e internacional UNE-EN ISO 13790 inclui um conjunto de metodologias de cálculo para a avaliação do desempenho energético e térmico dos edifícios. Este método apresenta diversos detalhes no cálculo do uso de energia para aquecimento e arrefecimento em diferentes zonas do edifício, bem como no cálculo da transferência de calor e dos ganhos solares de elementos construtivos especiais, como é o caso de sistemas passivos de ganho indirecto, mais concretamente da parede de Trombe. Salmerón et al [84] analisaram os benefícios da introdução de alguns sistemas passivos, incluindo a parede de Trombe, recorrendo à metodologia apresentada na versão de 2004 da ISO 13790.

Mais tarde, Ruiz-Pardo et al apresentam uma análise do mesmo documento, no sentido de verificar os modelos matemáticos propostos e a sua implementação nos climas mediterrâneos. Assim, apresentam correcções às formulações apresentadas no documento, e apresentam novas correlações mais adequadas ao clima em questão.

Corrado et al [131] já tinha efectuado a validação da metodologia apresentada na norma e concluiu que os resultados obtidos da sua aplicação representam uma das poucas formas de responder aos requisitos energéticos dos edifícios para aquecimento e arrefecimento, definidos na Directiva Comunitária do Desempenho Energético dos Edifícios. Segundo os autores, nenhum estudo até ao momento tinha sido publicado acerca da validação da metodologia apresentada na ISO:13790 para o cálculo das paredes de Trombe e portanto

apresentaram o desenvolvimento de equações para o seu cálculo, que foram posteriormente comparadas com as definidas na norma. Em Portugal, Martins [5] apresentou uma metodologia de cálculo do desempenho térmico da parede de Trombe, tendo por base a versão mais recente do documento anteriormente referido, ou seja a norma ISO 13790:2008 (E), relativa ao desempenho energético de edifícios e ao cálculo do uso de energia para aquecimento e arrefecimento dos espaços. Neste estudo, foi necessário a adaptação daquele documento para a realidade portuguesa, tendo para isso recorrido ao Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE), em vigor para determinação de alguns parâmetros, bem como para definição de algumas formulações ausentes na norma. A metodologia apresentada foi definida para a parede de Trombe clássica e para a parede de Trombe não ventilada, para as estações de aquecimento e de arrefecimento. Foi ainda introduzida a contribuição da parede de Trombe clássica na aplicação deste Regulamento, aquando da análise da influência deste sistema passivo num edifício de habitação unifamiliar.

### 3.7 Aplicação da parede de Trombe em Portugal

A aplicação do sistema de Parede de Trombe em Portugal é pouco significativa. Por um lado, a maioria dos intervenientes do sector da construção desconhece esta solução ou não possui informação acerca do seu desempenho que lhes permita introduzi-la na envolvente dos edifícios. Por outro lado, a legislação térmica portuguesa refere, ainda que de uma forma bastante breve, a introdução dos sistemas passivos no cálculo do comportamento térmico dos edifícios, mas não indica como deve ser contabilizada como é o caso da parede de Trombe. Este desconhecimento por parte dos projectistas condiciona a utilização deste tipo de soluções na melhoria da eficiência energética dos edifícios, cujo estudo deve iniciar-se logo na fase primordial da concepção do edifício que se refere à fase de projecto.

A escassa aplicação deste sistema é também devida à falta de programas de cálculo ou de simulação em Portugal que permitam prever a influência da sua introdução num edifício. Há alguns anos foi desenvolvido pelo LNEG o programa SLR-P que apresenta e materializa um método de Análise Térmica Simplificada de Edifícios, dando especial atenção aos que incluem sistemas solares passivos, nomeadamente a parede de Trombe. No entanto, o programa não se encontra disponível ao público, por se encontrar em actualização. Para além disso, a falta de informação acerca da construção deste tipo de elemento, nomeadamente no que diz respeito a pormenores construtivos é um factor que limita a sua inclusão na elaboração do projecto do edifício, bem como a execução em obra. Esta situação deve-se ao facto de o trabalho de investigação realizado em Portugal neste domínio ser pouco significativo, comparativamente a outros países, cuja disponibilidade de energia solar para aproveitamento passivo é bastante inferior.

As primeiras iniciativas relativas à introdução de sistemas solares passivos nos edifícios surgiram por volta dos anos 80, quando alguns arquitectos e engenheiros resolveram projectar



edifícios solares passivos, assim designados facto de incorporarem técnicas de aquecimento e de arrefecimento específicas. Um dos primeiros estudos realizados nesta área a título experimental foi a “Casa Termicamente Optimizada” no Porto, construída em 1984, e que apresentava diversos sistemas solares passivos, incluindo a parede de Trombe [132]. Os poucos estudos desenvolvidos referem a aplicação deste sistema em alguns edifícios residenciais e de serviços [10, 73]. No caso dos edifício residenciais, a área da parede de Trombe relativamente à área do compartimento varia entre 1,5% e 9,2%, o que em alguns casos representa uma área bastante significativa em relação à área do compartimento que está em contacto, habitualmente quartos e salas de estar [133].

De acordo com Gonçalves et al [134], a espessura da parede acumuladora das paredes de Trombe existentes em edifícios portugueses varia entre 15 e 40 cm e a maioria delas não inclui sistema de ventilação. Por outro lado, em grande parte dos casos, o vidro utilizado é o vidro simples e no que respeita às protecções solares, quando existem, são fixas ou móveis. Estes autores apresentam ainda alguns exemplos de edifícios residenciais e de serviços que incluem a parede de Trombe na sua envolvente. No que respeita aos edifícios residenciais citam-se as casas solares de Jade, em Nafarros, Sintra, a casa Vale Rosal na Charneca da Caparica, a residência Schafer em Porto Santo, entre outros. Relativamente a edifícios de serviços, é feita referência ao edifício Plea 88 e a um edifício escolar em Mértola [135]. O Edifício Torre Verde em Lisboa, cujo, projecto é da autoria da Arquitecta Lúcia Tirone, investigadora na área, constitui o primeiro edifício bioclimático, construído no Parque das Nações [73].

Apesar de a investigação nesta área se ter iniciado em Portugal há mais de 30 anos, muitos estudos ainda são necessários para evidenciar as potencialidades do uso da parede de Trombe. O uso do vidro simples, a ausência de ventilação na parede acumuladora e de dispositivos de sombreamento nos edifícios em Portugal que integram esta solução demonstram essa necessidade.

Da revisão bibliográfica efectuada, o trabalho desenvolvido por Martins [5] é o único conhecido até ao momento em Portugal, que apresenta uma metodologia de cálculo teórico do desempenho da parede de Trombe (ventilada e não ventilada) baseado num documento normativo que permite antever a influência que esta poderá ter ao nível do comportamento térmico do edifício.

### 3.8 Conclusões

No sentido de otimizar o desempenho térmico da parede de Trombe tradicional ou clássica, vários estudos têm sido realizados, surgindo assim novas soluções construtivas do sistema, nomeadamente ao nível das camadas que o constituem, dos materiais e do sistema de ventilação [93]. Os estudos aqui apresentados revelam que a aplicação deste sistema passivo

é função de diversas variáveis, que devem ser estudadas caso a caso, essencialmente relacionadas com a zona climática onde se localiza o edifício e com o funcionamento da parede como sistema de aquecimento ou de arrefecimento. A maior parte destes estudos recorreram principalmente a modelos de simulação do sistema, havendo também trabalhos de investigação experimental, e outros, mas em menor número, que utilizaram as duas metodologias, no sentido de otimizar e validar os resultados obtidos.

No entanto, a existência de uma metodologia de cálculo analítico generalizada, capaz de ser ajustada e otimizada nas diversas situações constituiria uma mais-valia neste domínio, na medida em que permitiria prever, na fase de projecto, o desempenho da parede de Trombe a integrar na envolvente do edifício. Na revisão efectuada, foi encontrado um documento normativo, a Norma ISO 13790:2008 que permite calcular o desempenho energético dos edifícios, através do cálculo das necessidades de aquecimento e de arrefecimento. Esta norma inclui o cálculo dos ganhos solares e da transferência de calor para uma parede de Trombe clássica, tendo-se verificado no decorrer deste trabalho que a sua aplicação é bastante reduzida e realizada apenas em trabalhos de investigação., Foi realizada uma análise crítica da versão 2004 deste documento aplicada a edifícios sujeitos a climas mediterrâneos e uma adaptação da versão de 2008 do mesmo documento, para análise do desempenho de paredes de Trombe ventiladas e não ventiladas em Portugal.

Prosseguir com a investigação na optimização de uma metodologia que possa auxiliar na previsão do desempenho térmico da parede de Trombe poderá eliminar obstáculos à sua implementação. Em Portugal, sendo este um sistema de reduzida aplicação, o aumento de trabalhos de investigação nesta temática constituirá um incentivo à sua introdução como solução de melhoria do desempenho energético dos edifícios, logo na fase de projecto.

A apresentação neste capítulo dos diversos trabalhos de investigação desenvolvidos em diversos países permite concluir que muitas são as alterações que se podem efectuar na constituição e no funcionamento deste sistema passivo para optimizar o seu desempenho, sendo umas mais complexas do que outras. Estes estudos poderão servir de base para futuras aplicações da parede de Trombe em Portugal, mas também servem para demonstrar que muito há a fazer nesta área no nosso país, começando pelo conhecimento do conceito clássico deste sistema por parte dos diversos agentes da construção.

## Capítulo 4

# Metodologia de Análise do Desempenho Térmico da Parede de Trombe



## Capítulo 4

# Metodologia de Análise do Desempenho Térmico da Parede de Trombe

### 4.1 Introdução

O estudo do desempenho térmico da parede de Trombe é uma tarefa complexa e dependente de diversos factores, nomeadamente os referentes ao fenómeno da transferência de calor e às condições climáticas do ambiente exterior.

Neste trabalho de investigação, a análise do comportamento térmico deste sistema passivo é efectuada recorrendo por um lado, a trabalho experimental e, por outro lado, à adaptação da metodologia de cálculo definida na norma ISO 13790:2008 [6] recorrendo ao programa de simulação MatLab.

A complexidade associada ao comportamento térmico da parede de Trombe exige a compatibilização dos dados obtidos experimentalmente com a metodologia de cálculo utilizada na simulação. A integração deste tipo de elementos construtivos na simulação energética e térmica dos edifícios tem sido alvo de estudo ao longo dos anos. Os estudos desenvolvidos permitiram chegar à conclusão que, mesmo que se consigam definir modelos de simulação destes sistemas construtivos, é importante existirem dados experimentais que permitam a calibração e a melhoria desse modelo, bem como a sua inclusão na simulação global de um edifício [136, 137]. É portanto essencial que estes modelos sejam suportados por medições em situações de clima real que possam ajudar na optimização da modelação deste sistema e assegurar que os resultados fornecidos pelo modelo são realistas [137].

Em 1993, surgiram vários artigos relativos à investigação efectuada ao nível do desempenho térmico com recurso a células de teste sujeitas ao ambiente exterior. A partir dessa altura, os avanços no procedimento dos trabalhos experimentais têm sido significativos, bem como na recolha dos dados e na sua ligação com os trabalhos de modelação e de simulação. Os argumentos subjacentes à utilização de células de teste no exterior continuam a ser relevantes, uma vez que têm em linha de conta as condições dinâmicas a que estão sujeitos os diversos elementos da envolvente do edifício. É claro que a solução mais óbvia e mais próxima da realidade seria testar os componentes quando inseridos num edifício em funcionamento real. No entanto, na prática, esta opção tem-se mostrado extremamente complexa, mesmo em edifícios sem ocupação, dada a dificuldade de mensurar todos os parâmetros de entrada (pormenores construtivos, movimento do ar, modo de funcionamento

dos sistemas de aquecimento e de arrefecimento, etc.) ao nível necessário que permita determinar o desempenho de determinado elemento da envolvente. Assim, o recurso a células de teste sujeitas a condições exteriores, mostra-se fundamental na previsão do desempenho de determinado elemento da envolvente quando integrado num edifício real [138].

Tendo em conta as vantagens resultantes da interacção entre o trabalho experimental e o trabalho de simulação, apresenta-se neste capítulo, a descrição das metodologias experimental e de simulação usadas. A metodologia experimental baseia-se no projecto, construção, instrumentação e monitorização de uma célula de teste que inclui uma parede de Trombe, sujeita a condições climáticas reais, na cidade de Vila Real, mais concretamente no Campus da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, a uma altitude de 458 m e de coordenadas 41°17'11,86''N e 7°44'29,01''W.

Serão apresentados todos os procedimentos e considerações associados ao desenvolvimento de cada uma das etapas do trabalho experimental. Os dados recolhidos experimentalmente serão utilizados na simulação dos ganhos solares obtidos através da introdução da parede de Trombe. Relativamente ao trabalho de simulação do comportamento térmico, é apresentada neste capítulo a metodologia de cálculo utilizada.

### **4.2 Metodologia experimental**

O estudo experimental que permite quantificar as diversas grandezas subjacentes ao comportamento térmico da parede de Trombe, em regime de análise contínua, durante um determinado período de tempo, baseia-se na concepção, instrumentação e monitorização de uma célula de teste que inclui, numa das fachadas, uma parede de Trombe. A concepção da célula de teste inclui, na fase de projecto, a definição das suas características geométricas e construtivas, e posteriormente a sua construção. A instrumentação da célula de teste foi realizada, sempre que se mostrou necessário, durante as fases de construção, especificamente aquando da execução da parede de Trombe, e após a conclusão da sua construção.

Nos pontos seguintes são apresentados os aspectos tomados em consideração durante as fases de projecto e construção da célula de teste, bem como as dificuldades encontradas no decorrer da fase experimental.

#### **4.2.1 Fase de projecto**

##### **4.2.1.1 Configuração da célula de teste**

Na fase de projecto da célula de teste começou-se por analisar os trabalhos de investigação que envolviam resultados experimentais em condições ambientais reais, para caracterizar o desempenho térmico de elementos construtivos, nomeadamente de sistemas passivos [136,

138-140]. Uma das referências nesta área diz respeito ao procedimento que caracteriza as células de teste *PASSYS* desenvolvido pelo *PASLINK Network* a partir do projecto europeu *Passys (Passive Solar Components and Systems Testing)* [139, 141, 142]. Para este tipo de célula foram definidas as suas características geométricas, nomeadamente ao nível da área e do volume do compartimento testado e as características construtivas dos elementos da envolvente. A fachada orientada a Sul inclui o elemento construtivo a analisar. No que respeita aos materiais, destaca-se a elevada espessura de isolamento com 30 cm colocada nos restantes elementos construtivos que não são alvo de análise, para garantir ao máximo a redução da transmissão térmica a partir desses elementos da envolvente. Para além destes elementos, a medição das diversas grandezas associadas ao clima exterior e à transferência de calor através do elemento construtivo em análise são asseguradas pela instrumentação da célula de teste [139, 141, 143, 144]. Apesar de as características deste tipo de células, terem servido de referência à célula de teste implementada para a realização do trabalho experimental, factores económicos não possibilitaram a sua execução tal como definido nas células *PASSYS*, tendo sido por isso necessário ajustar as suas características de tal forma que permitisse o desenvolvimento dos trabalhos. Assim, a célula de teste teve por base a utilização de um contentor de armazenamento construído em aço, cedido por uma empresa de construção, a partir do qual foi concebida a célula de teste.

A escolha do local de implantação da célula de teste resultou da compatibilização do espaço disponível no Campus da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro com a exposição solar mais adequada à realização dos ensaios e com a facilidade de acesso rápido ao referido dispositivo no decorrer dos trabalhos. Esta foi portanto implantada de forma que a parede de Trombe pudesse ser construída orientada a Sul, sendo minimizados os efeitos de sombreamento por obstáculos exteriores. Na Figura 4.1 é possível observar a vista aérea do local de implantação da célula de teste.



Figura 4.1 - Local de implantação da célula de teste (*Google Earth*).

A escolha do contentor que serviu de base à construção da célula de teste permitiu obter características dimensionais próximas das requeridas nas células *PASSYS* (13,8 m<sup>2</sup> de área e

38 m<sup>3</sup> de volume) [142], tendo este as dimensões aproximadas de 6 m x 2,4 m x 2,3 m, perfazendo uma área de cerca de 14 m<sup>2</sup> e um volume aproximado de 32 m<sup>3</sup>. Estas dimensões correspondem à área e volume úteis da célula após a introdução de isolamento térmico nas diversas faces do contentor.

A colocação de isolamento térmico foi necessária para reduzir as perdas e os ganhos através da envolvente do contentor. Uma vez que não era comportável o custo associado à colocação de camadas de isolamento térmico com cerca de 30 cm em todos os elementos da sua envolvente tal como sugerido nas células PASSYS [142], a solução encontrada para resolver o problema passou pela determinação da espessura mínima de isolamento térmico para elementos horizontais e verticais exteriores, de acordo com os valores de referência do coeficiente de transmissão térmica definidos no Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) [36]. Para Vila Real, ou seja para a zona climática I3V2N, os valores de referência são de 0,50 W/m<sup>2</sup>°C para elementos exteriores verticais (paredes) e de 0,40 W/m<sup>2</sup>°C para elementos horizontais (pavimentos e coberturas).

Assim, os valores do coeficiente de transmissão térmica dos elementos construtivos foram calculados segundo a norma ISO 6946:1996 [124] e recorrendo à publicação ITE50 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) [131] para a obtenção dos dados necessários à sua aplicação. Para as paredes exteriores, com excepção da fachada Sul, obteve-se o valor de 7 cm de espessura de poliestireno extrudido (XPS) e para a cobertura e o pavimento 9 cm. No sentido de uniformizar as espessuras de XPS a aplicar nas diferentes faces do contentor, optou-se por colocar placas de isolamento térmico de 4 cm de espessura, o que corresponde à aplicação de 8 cm nas paredes exteriores e de 12 cm na cobertura e no pavimento exteriores. Para estas espessuras de XPS, os valores dos coeficientes de transmissão térmica obtidos foram de 0,43 W/m<sup>2</sup>°C para as paredes exteriores e de 0,30 W/m<sup>2</sup>°C para a cobertura e para o pavimento. Na Figura 4.2 apresenta-se um desenho esquemático das características da célula de teste construída.

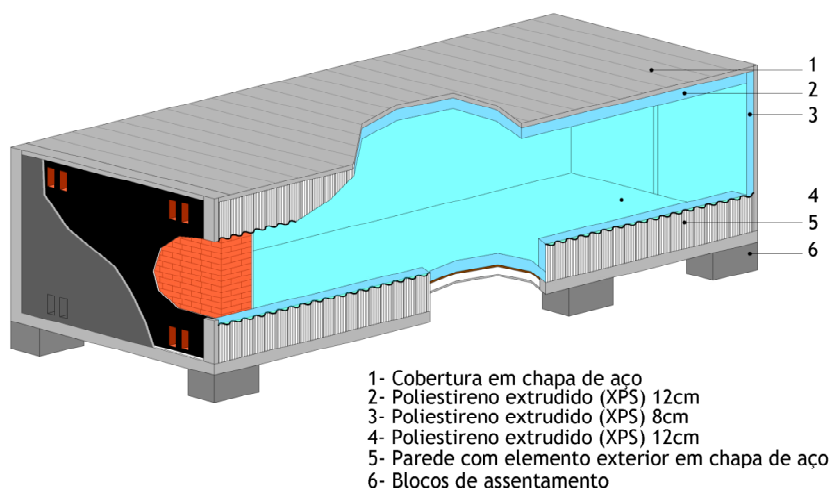


Figura 4.2 - Desenho esquemático da célula de teste.



#### 4.2.1.2 Caracterização da parede de Trombe

Na fase de projecto, foram definidas as características geométricas e construtivas da parede de Trombe a construir com base na revisão bibliográfica efectuada. De acordo com o estudo realizado por Martins [5] para uma parede de Trombe ventilada, o material da parede acumuladora que permite obter melhor desempenho para uma espessura de 34 cm é a alvenaria composta a 1 ½ vez, de tijolo cerâmico maciço, quando comparado com o granito e com o betão. Este estudo foi realizado para a zona climática I3V2N, para as estações de aquecimento e de arrefecimento com base na Norma ISO13790:2008 [6]. No sentido de dar continuidade aos estudos nesta área, optou-se por analisar uma parede de Trombe com as características acima referidas, no que respeita ao material e à espessura da parede acumuladora. A área da parede de Trombe corresponde à área da parede lateral orientada a Sul, com uma área exterior aproximada de 6 m<sup>2</sup>, valor este que se mostra compatível com a área de parede de Trombe necessária por área de compartimento que serve referida na bibliografia estudada, tendo em conta a temperatura média da estação de aquecimento para a zona climática em estudo [5, 67].

No sentido de aumentar a capacidade de absorção da parede acumuladora [23, 24, 78, 79], foi prevista a pintura da sua superfície exterior com tinta preta, cujo coeficiente de absorção é de 0,8.

O sistema de ventilação é garantido pela introdução de quatro aberturas na base e de quatro aberturas no topo da parede acumuladora, tendo sido garantida a maior distância possível entre as aberturas inferiores e superiores para permitir o aumento do caudal de ventilação. Por outro lado, segundo os estudos apresentados no Capítulo 3, um maior número de aberturas com dimensões mais reduzidas é mais adequado do que apenas uma abertura no topo e na base com dimensões superiores, pois aumenta a transferência de calor por convecção [143]. No que respeita à área das aberturas relativamente à área da parede de Trombe e tendo em conta que os estudos realizados a este nível apresentam valores bastante díspares [8, 143], optou-se por garantir que a área das oito aberturas fosse aproximadamente 2% da área da parede de Trombe, tendo cada um dos orifícios cerca de 0,019 m<sup>2</sup> de área, apesar de as aberturas inferiores após a construção, apresentarem uma área ligeiramente inferior, o que segundo a literatura até é desejável [94]. Para analisar a influência das aberturas na transferência de calor através deste sistema passivo, foram previstos tampos de fecho amovíveis para estas aberturas.

A espessura do espaço de ar entre a parede acumuladora e o envidraçado exterior é de cerca de 6 cm, enquadrando-se desta forma nos valores referidos no Capítulo 3, [8, 26], apesar de também relativamente a este parâmetro os resultados obtidos nos diversos estudos serem variáveis.

Quanto ao elemento exterior colector de radiação de solar, foi prevista a colocação de um vidro duplo incolor, de espessuras 5 mm + 12 mm + 5 mm, por forma a possibilitar o armazenamento de energia na caixa-de-ar e a evitar as perdas de calor do interior para o exterior, sempre que ocorra a inversão do fluxo de calor no sistema [65, 84-87, 109].

Neste trabalho não foi utilizado qualquer tipo de caixilharia, uma vez que a existência desta iria diminuir a área útil do envidraçado, o que por sua vez iria contribuir para a redução da capacidade de acumulação de calor na caixa-de-ar, influenciando assim a área necessária de parede de Trombe relativamente à área útil da célula de teste.

No sentido de analisar a influência dos sombreamentos no desempenho da parede de Trombe, foi prevista na fase de projecto a instalação de uma persiana exterior de cor branca, como elemento de obstrução à entrada de radiação solar durante os dias de Verão e da saída de calor para o exterior durante as noites de Inverno [5, 42, 43, 45, 47, 48, 70].

Na Figura 4.3 representa-se esquematicamente as características dimensionais e materiais da parede de Trombe em estudo, acima referidas.

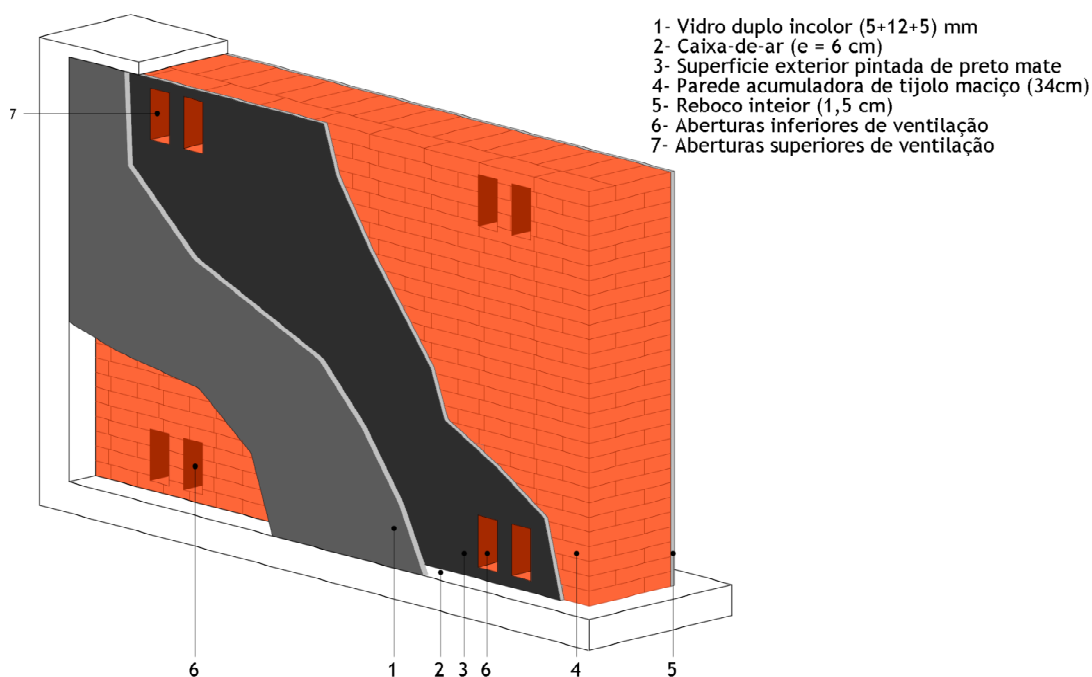


Figura 4.3 - Desenho esquemático da parede de Trombe.

### 4.2.2 Fase de construção

A construção da célula de teste e do respectivo elemento solar passivo em estudo foi efectuada no sentido de garantir o cumprimento das características referidas na secção anterior.

Esta fase iniciou-se com a colocação do contentor no local de implantação previamente definido, com orientação da face onde viria a ser construída a parede de Trombe a Sul. Foi necessário cortar antecipadamente esta parede lateral em aço para posterior execução da parede de Trombe (Figura 4.4 a)). Para evitar o contacto da base do contentor com o solo e para nivelar a sua colocação, recorreu-se a blocos de betão para assentamento do mesmo (Figura 4.4 b)).



Figura 4.4 - Contentor que serviu de base à construção da célula de teste: a) remoção da fachada orientada a Sul; b) blocos de betão para assentamento.

A etapa seguinte consistiu na construção da parede de Trombe em tijolo de barro maciço, tal como se observa na Figura 4.5 a). Aquando da construção da parede acumuladora foi colocado isolamento térmico, na sua envolvente, pelo interior da chapa de aço, excepto no pavimento, de modo a evitar a ocorrência de pontes térmicas lineares (Figura 4.5).



Figura 4.5 - Colocação de isolamento térmico na envolvente: a) paredes exteriores; b) cobertura.

À medida que se foi executando a parede de alvenaria composta, foram sendo criadas as aberturas de ventilação (Figura 4.7) e colocado um sensor de temperatura no interior da parede (Figura 4.6).



Figura 4.6 - Construção das aberturas de ventilação inferiores.



Figura 4.7 - Colocação do sensor de temperatura a meia espessura da parede acumuladora.

Para analisar o efeito das aberturas de ventilação no comportamento térmico da parede de Trombe, foram construídos dois tipos de obturadores para as mesmas, utilizando para isso placas de isolamento térmico em XPS. O primeiro tipo de obturadores construídos foi concebido de forma a tapar cada uma das oito aberturas individualmente (Figura 4.8). No entanto, devido a pequenas irregularidades das aberturas estas não as tampavam completamente, o que permitia infiltrações de ar. Para colmatar esta situação, foi construído o segundo tipo de obturadores, constituído por quatro placas de XPS com 5 cm de espessura, que foram colocadas pelo interior, na frente de cada uma das duas aberturas com tinta magnética (Figura 4.9).

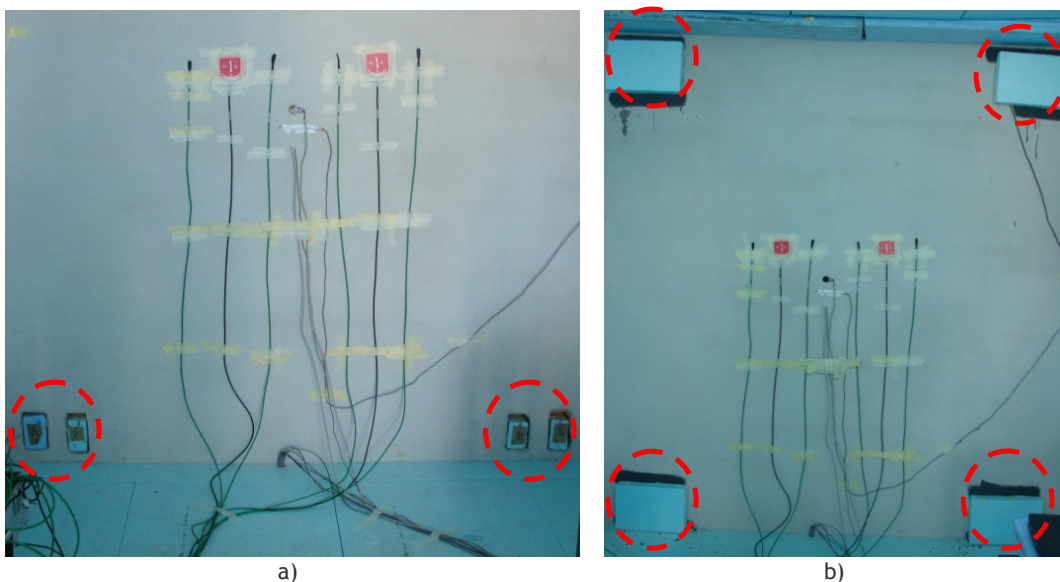


Figura 4.8 - Colocação dos obturadores nas aberturas de ventilação: a) 1º tipo de obturadores; b) 2º tipo de obturadores.

Após a execução da parede acumuladora, procedeu-se à aplicação do reboco pelo exterior e pelo interior.

Como já foi referido, no sentido de reduzir as perdas pela envolvente do contentor, procedeu-se ao isolamento das paredes laterais com XPS de 8 cm, com excepção da orientada a Sul, e da cobertura e pavimento com XPS de 12 cm. As placas aplicadas apresentavam uma espessura de 4 cm, tendo sido colocadas em camadas até perfazer a espessura pretendida para cada elemento da envolvente, com recurso a espuma de poliuretano e dispostas com as juntas desalinhadas em relação à camada anterior.

Tentou-se sempre que possível isolar o contentor, no sentido de minimizar ou evitar as zonas de pontes térmicas. Na Figura 4.9 é visível o isolamento do contentor pelo interior em todos os elementos da envolvente, excepto na parede de Trombe. Na Figura 4.9b) é também possível observar a instalação eléctrica executada no contentor.



Figura 4.9 - Isolamento térmico da envolvente do contentor; a) visualização da espessura de XPS aplicada nas paredes e no pavimento; b) vista interior do contentor.

Concluída esta fase, todos os trabalhos efectuados dizem respeito à conclusão da execução da parede de Trombe. Após a aplicação do reboco exterior, procedeu-se à pintura da superfície exterior da parede acumuladora com a cor preta mate. Nesta fase, foram colocados sensores de temperatura na superfície exterior da parede (Figura 4.10).

Para passar à colocação do envidraçado pelo exterior, foi necessário isolar lateralmente o espaço de ar que viria a ser confinado pela parede acumuladora e pelo vidro, no sentido de reduzir possíveis perdas através da periferia deste espaço que pudessem influenciar a capacidade de acumulação de calor na caixa-de-ar (Figura 4.10). Posteriormente foram colocados outros sensores no espaço de ar criado, cuja descrição será efectuada no ponto referente à instrumentação da célula de teste, tarefa esta que antecedeu a colocação do vidro.

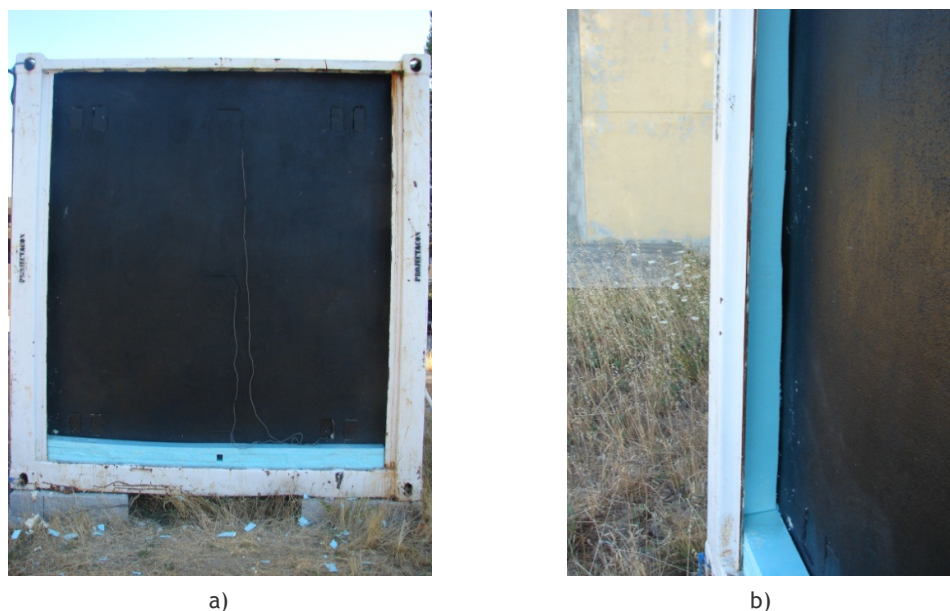


Figura 4.10 - Isolamento térmico em XPS da envolvente da caixa-de-ar: a) pavimento; b) parede.

Tal como referido na fase de projecto, foi prevista a instalação de um dispositivo de sombreamento neste sistema passivo. No entanto, não foi possível atempadamente a instalação da protecção exterior desejada, pelo que foi necessário improvisar o seu efeito, recorrendo para isso à utilização de placas de isolamento térmico em poliestireno extrudido encostadas ao vidro, sempre que se pretendia analisar os seus efeitos (Figura 4.11).

Apesar de todas as limitações inerentes à concepção de um dispositivo experimental, considera-se que foi possível transformar o contentor numa célula de teste, com as características necessárias para estudar o comportamento térmico da parede de Trombe em condições climáticas reais. cujo aspecto final é o apresentado na Figura 4.12.



Figura 4.11 - Dispositivos de sombreamento exteriores utilizados.



Figura 4.12 - Aspecto final da célula de teste.

### 4.2.3 Instrumentação e monitorização

A instrumentação e monitorização da célula de teste sujeita a condições climáticas exteriores reais permitem obter uma recolha contínua dos diversos parâmetros influenciadores do comportamento térmico da parede de Trombe num determinado período de tempo de ensaio. Para isso foram utilizados diversos equipamentos capazes de medir as condições interiores da célula de teste (temperatura e humidade relativa do ar), as condições climáticas exteriores (temperatura do ar, humidade relativa do ar e radiação solar) e alguns parâmetros que caracterizam o desempenho da parede de Trombe, nomeadamente as temperaturas nas diversas camadas e o fluxo de calor.

O período de ensaio alvo de análise neste trabalho de investigação diz respeito ao decorrido entre as 16h20min do dia 11 de Agosto de 2011 e as 17h35min do dia 4 de Novembro de 2011, com tempo de armazenamento de dados de 5 em 5 minutos, permanecendo até à data, a instrumentação e monitorização da célula de teste com o objectivo de dar continuidade aos estudos neste domínio.

No decorrer deste trabalho experimental, existiram diversas circunstâncias influenciadoras dos resultados obtidos, nomeadamente o acesso à célula de teste e a introdução de alterações ao nível da constituição e do funcionamento da parede de Trombe.

No sentido de assinalar todas estas ocorrências foi elaborada uma ficha de registo (Tabela 4.1) onde constam o dia e hora de acesso à célula de teste, o trabalho desenvolvido e a respectiva duração, bem como outras observações, como por exemplo a indicação do estado da porta de acesso (aberta, encostada ou fechada). Nesta ficha ficaram também registados todos os períodos em que foi alterado o sistema de ventilação da parede de Trombe, no que respeita à sua abertura e ao seu fecho, bem como à colocação dos dois tipos de tampos nas aberturas.

Tabela 4.1 - Ficha de registo do acesso à célula de teste.

Acesso à célula de Teste			
Data/hora entrada	Data/hora saída	Trabalhos desenvolvidos	Observações

O mesmo procedimento foi efectuado para a colocação dos sombreamentos exteriores e para algumas situações imprevisíveis inerentes ao trabalho experimental, como por exemplo a falha no funcionamento de alguns sensores de temperatura devido à falta de aderência à superfície. Para além destas anotações, foi efectuado o registo da utilização da câmara de termografia e de recolha e aquisição de dados.

### 4.2.3.1 Equipamentos utilizados

No decorrer do trabalho experimental recorreu-se aos seguintes equipamentos: sensores de temperatura, humidade relativa, radiação solar e fluxo de calor, termofluxímetros, termo-higrómetro, sistemas de aquisição de dados e câmara de termografia. Seguidamente apresentam-se os diversos sensores e equipamentos usados neste trabalho experimental.

#### 4.2.3.1.1 Sensores

A localização e a designação dos diversos sensores utilizados no dispositivo experimental estão representadas de forma esquemática na Figura 4.13 e mais detalhadamente na Tabela 4.2. Nesta tabela são também apresentadas as características técnicas dos diversos sensores.

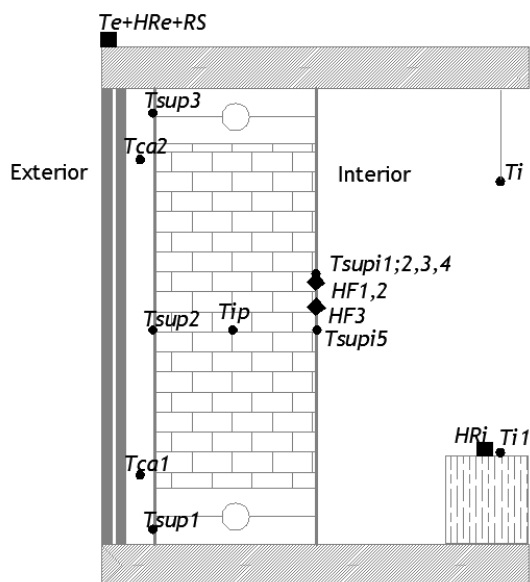


Figura 4.13 - Desenho esquemático da designação e localização dos sensores utilizados.

Os sensores de temperatura foram utilizados para determinar os valores das características dos ambientes exterior e interior à célula de teste, bem como para medição das temperaturas na caixa-de-ar e nas superfícies interior e exterior da parede acumuladora.



Tabela 4.2 - Caracterização dos sensores utilizados.

Designação do sensor	Parâmetro	Unidades	Localização	Tipo de sensor	Resolução
$T_i$	temperatura do ar interior	°C	a meio da célula de teste junto ao tecto a 2 m de altura	TM1 Delta-T	±0,1°C
$T_{i1}$	temperatura do ar interior	°C	a meio da célula de teste a 0,60 m do pavimento	Hanna Instruments	-
$T_e$	temperatura do ar exterior	°C	cobertura	RHA1 Vaisala	±0,1°C
$HR_e$	humidade relativa do ar exterior	%	cobertura	Hanna Instruments	±2%
$HR_i$	humidade relativa do ar interior	%	a meio da célula de teste a 0,60 m do pavimento	BF3 Delta-T	-
$R_S$	Radiação Solar Total	W/m <sup>2</sup>	cobertura	TM1 Delta-T	±5 W/m <sup>2</sup>
$T_{ca1}$	Temperatura na caixa-de-ar	°C	a meia largura da caixa-de-ar e a 0,30 m da base da parede	TM1 Delta-T	±0,1°C
$T_{ca2}$	Temperatura na caixa-de-ar	°C	a meia largura da caixa-de-ar e a 0,30 m do topo da parede	TM1 Delta-T	±0,1°C
$T_{sup1}$	Temperatura superficial exterior da parede acumuladora	°C	superfície exterior da parede acumuladora e a 0,10 m da base da parede	TM1 Delta-T	±0,1°C
$T_{sup2}$	Temperatura superficial exterior da parede acumuladora	°C	superfície exterior da parede acumuladora e a meia altura da parede	TM1 Delta-T	±0,1°C
$T_{sup3}$	Temperatura superficial exterior da parede acumuladora	°C	superfície exterior da parede acumuladora e a 0,10 m do topo da parede	TM1 Delta-T	±0,1°C
$T_{ip}$	Temperatura no interior da parede acumuladora	°C	interior da parede acumuladora, a meio da espessura e da altura da parede	TM1 Delta-T	±0,1°C
$T_{supi1}$	Temperatura superficial interior da parede acumuladora	°C	superfície interior da parede acumuladora a cerca de 1,20 m do pavimento	Hukseflux	-
$T_{supi2}$	Temperatura superficial interior da parede acumuladora	°C	superfície interior da parede acumuladora a cerca de 1,20 m do pavimento	Hukseflux	-
$T_{supi3}$	Temperatura superficial interior da parede acumuladora	°C	superfície interior da parede acumuladora a cerca de 1,20 m do pavimento	Hukseflux	-
$T_{supi4}$	Temperatura superficial interior da parede acumuladora	°C	superfície interior da parede acumuladora a cerca de 1,20 m do pavimento	Hukseflux	-
$T_{supi5}$	Temperatura superficial interior da parede acumuladora	°C	superfície interior da parede acumuladora a meia altura da parede	TM1 Delta-T	±0,1°C
$HF1$	Fluxo de calor	W/m <sup>2</sup>	superfície interior da parede acumuladora a cerca de 1,20 m do pavimento	Hukseflux	50 μV/W/m <sup>2</sup>
$HF2$	Fluxo de calor	W/m <sup>2</sup>	superfície interior da parede acumuladora a cerca de 1,20 m do pavimento	Hukseflux	50 μV/W/m <sup>2</sup>
$HF3$	Fluxo de calor	W/m <sup>2</sup>	superfície interior da parede acumuladora a cerca de 1 m do pavimento	FRM-100 WVNTRONIC	±1,5 W/m <sup>2</sup>

No exterior, junto à cobertura, foi colocado um conjunto de sensores para medir os valores da temperatura exterior ( $T_e$ ), da humidade relativa exterior ( $HRe$ ) e da radiação solar total ( $RS$ ), tal como se pode observar na Figura 4.14. O sensor de radiação usado foi o BF3 da Delta-T com gama de medida entre 0 a 1250 W/m<sup>2</sup>.



Figura 4.14 - Sensor de humidade relativa.

Os equipamentos que foram instalados para esse efeito consistiram num sistema de aquisição de dados da Delta-T onde foram ligados um sensor combinado, RHA1 da Vaisala, (termistor e sensor capacitivo para medida da temperatura e humidade relativa do ar exterior) e vários sensores de temperatura do tipo termistor, TM1 da Delta-T, para medida da temperatura do ar. Na Figura 4.15 compara-se a característica temperatura versus resistência do termistor TM1 comercializado pela Delta-T Devices Ltd. com a curva da temperatura simulada versus resistência. Os valores dos coeficientes a, b e c estão indicados no gráfico e foram determinados de modo a minimizar a soma quadrática dos erros no intervalo de -15 °C a 60 °C, de acordo com os valores (T-R) fornecidos pelo fabricante, em incrementos de 1°C.

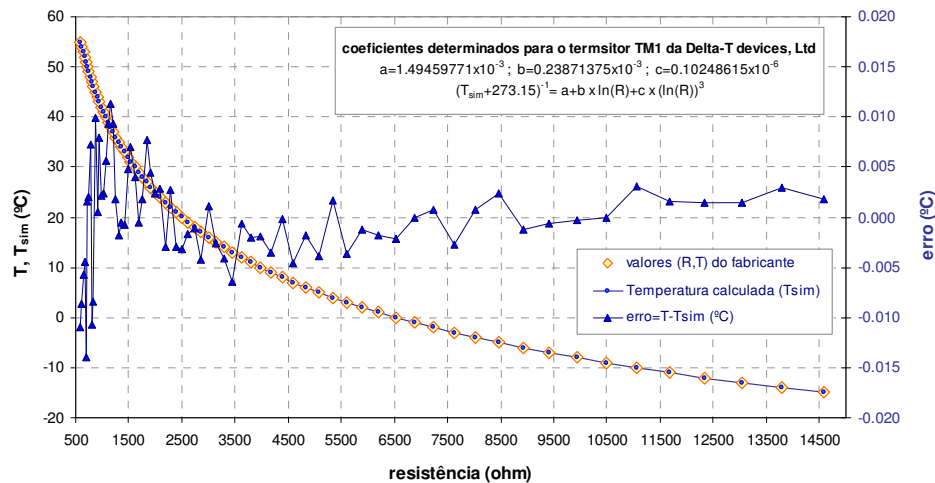


Figura 4.15 - Curvas das temperaturas simulada e especificada pelo fabricante versus resistência para o termistor TM1 da Delta T devices, Ltd.

No interior da célula de teste foram utilizados dois sensores de temperatura ( $T_i$  e  $T_{i1}$ ) colocados a meio do seu comprimento mas a alturas diferentes em relação ao pavimento, representados nas Figura 4.16 e Figura 4.17.

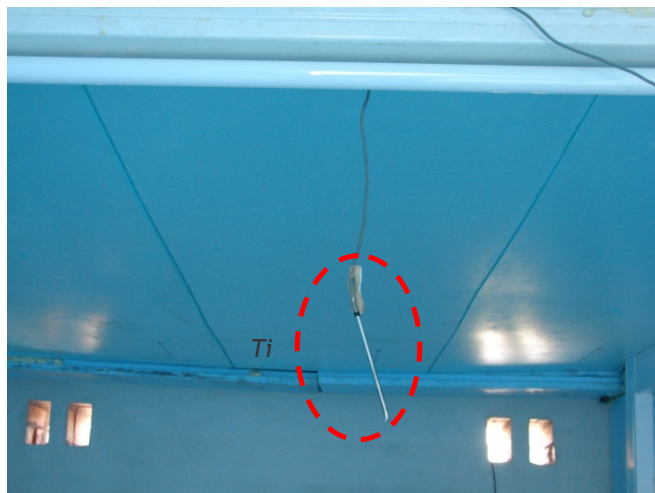


Figura 4.16 - Sensor de temperatura  $T_i$ .

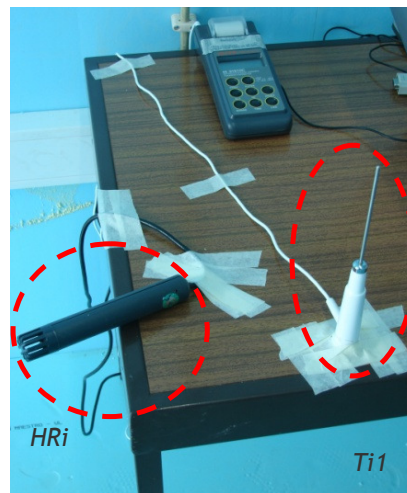


Figura 4.17 - Sondas de temperatura  $T_{i1}$  e de humidade relativa  $H_{Ri}$ .

Para obter os valores das temperaturas ao longo dos constituintes da parede de Trombe, foram colocados dois sensores de temperatura no centro da caixa-de-ar, um junto ao topo ( $T_{ca2}$ ) e outro junto à base ( $T_{ca1}$ ) da parede de Trombe (ver Figuras 4.13 e 4.14 e Tabela 4.2).

Foram também colocados três sensores na superfície exterior da parede acumuladora, ou seja, junto ao espaço de ar, um junto à base ( $T_{sup1}$ ), outro a cerca de meia altura da parede ( $T_{sup2}$ ) e um terceiro junto ao topo da parede ( $T_{sup3}$ ) no sentido de posteriormente se analisar a estratificação das temperaturas na superfície pintada de preto (Figura 4.18).

Para posterior análise do comportamento da parede acumuladora, para além dos sensores acima referidos, foram colocados outros sensores de temperatura. Um deles foi colocado a meio da altura e da espessura da parede ( $T_{ip}$ ) aquando da sua execução e outros cinco foram colocados na sua superfície interior. Foram utilizados quatro sensores de temperatura superficial ( $T_{supi1}$ ,  $T_{supi2}$ ,  $T_{supi3}$  e  $T_{supi4}$ ) colocados junto aos dois termofluxímetros utilizados ( $HF1$  e  $HF2$ ), um do lado esquerdo e outro do lado direito, de cada dos termofluxímetros, para aferir os valores das temperaturas obtidas e para possibilitar a comparação desses valores com os restantes parâmetros medidos. Foi ainda colocado um outro sensor de temperatura superficial a menor altura que o anterior ( $T_{supi5}$ ). Na Figura 4.19 é possível observar os diversos sensores colocados na superfície interior da parede acumuladora.

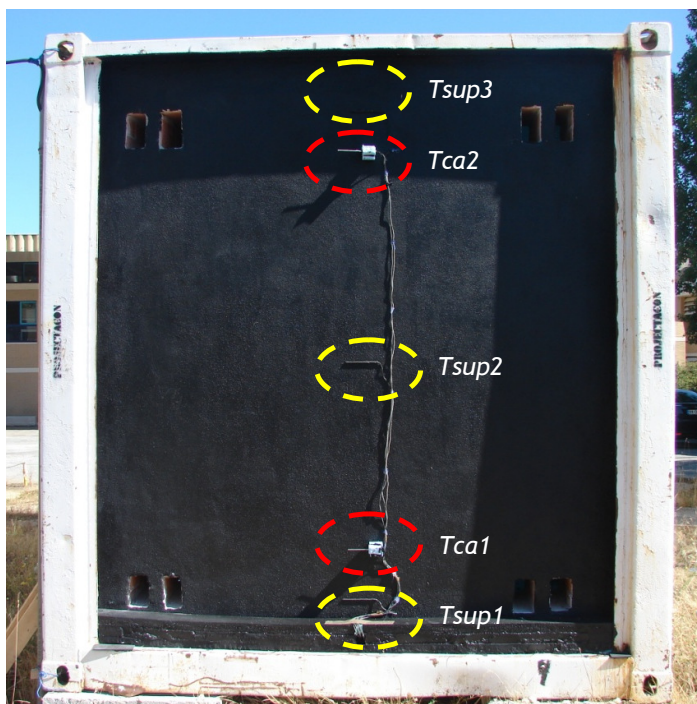


Figura 4.18 - Sensores de temperatura na caixa-de-ar ( $Tca1$  e  $Tca2$ ) e na superfície exterior da parede acumuladora ( $Tsup1$ ,  $Tsup2$  e  $Tsup3$ ).

A precisão do sistema de aquisição de dados, incluindo os sensores, é segundo o fabricante  $\pm 0,1$  °C,  $\pm 2$  %, e  $\pm 5$  W/m<sup>2</sup> para as temperaturas, humidades relativas e radiação solar global, respectivamente. Para determinar o fluxo de calor através da parede foram colocados três sensores na superfície interior da parede acumuladora ( $HF1$ ,  $HF2$  e  $HF3$ ), sendo  $HF1$  e  $HF2$  correspondentes ao termofluxímetro. O sensor de fluxo de calor correspondente a  $HF3$  foi um *FRM-100* da *WVNTRONIC* e tem uma saída em tensão eléctrica com sensibilidade de 52,11 W/(m<sup>2</sup>/mV), sendo a resolução de  $\pm 1,5$  W/m<sup>2</sup>.

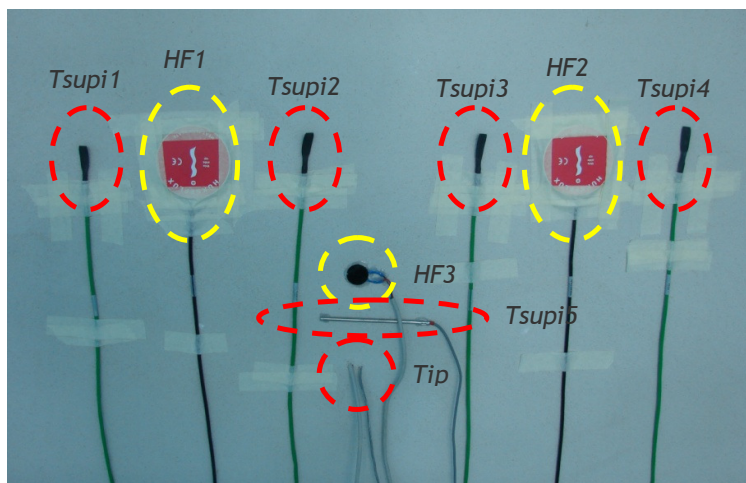


Figura 4.19 - Localização dos sensores de temperatura e de fluxo de calor na superfície interior da parede acumuladora.

No período entre as 17h20min do dia 8 de Setembro de 2011 e as 16h30min do dia 17 de Outubro de 2011, foram colocados dois sensores de temperatura junto às aberturas de ventilação na parede acumuladora, um deles junto à abertura inferior esquerda e outro junto à abertura superior direita, para obter os valores das temperaturas ao longo do dia e perante diversas alterações ao nível do funcionamento da parede, nomeadamente aquando do fecho das aberturas e da colocação de sombreamentos exteriores (Figura 4.20).

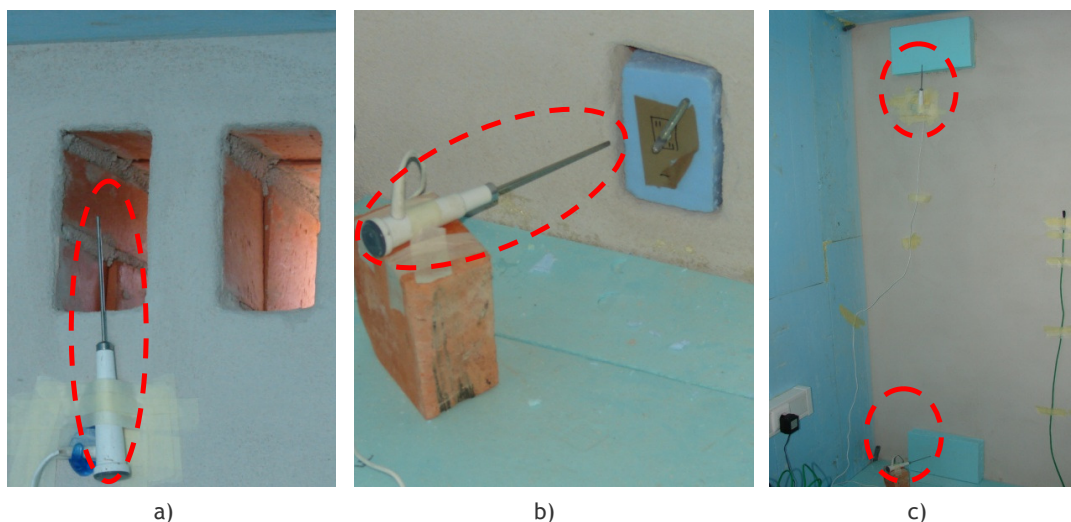


Figura 4.20 - Colocação das sondas de temperatura junto às aberturas de ventilação: a) abertura superior esquerda; b) abertura inferior esquerda com 1º tipo de obturadores; c) aberturas com colocação do 2º tipo de obturadores.

### 4.2.3.1.2 Termofluxímetros

Os termofluxímetros colocados na superfície da parede acumuladora (*HF1* e *HF2*) são constituídos por placas finas, termicamente resistentes, com vários sensores de temperatura distribuídos na sua superfície, para que o sinal eléctrico transmitido pelos sensores esteja directamente relacionado com o fluxo de calor que ocorre através da placa. Os dois termofluxímetros utilizados neste trabalho experimental, da marca *Hukseflux*, modelo *TRYSO1*, são constituídos por um corpo compósito cerâmico/plástico que mantém a sua resistência térmica baixa e que envolve a zona de medição deste equipamento. Na Figura 4.19 pode observar-se os termofluxímetros, para além de outros sensores referidos anteriormente.

### 4.2.3.1.3 Sistemas de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados utilizado para recolher os valores obtidos pelos sensores *Te*, *HRe*, *RS*, *Ti*, *Tca1*, *Tca2*, *Tsup2*, *Tsup1*, *Tsup3*, *Tip*, *Tsupi5* e *HF3*, um *datalogger Delta-T*, foi programado para ler os sinais dos sensores com um intervalo de amostragem de 30s e registar valores médios a cada 5min (Figura 4.21a)). O sistema de aquisição de dados usado é constituído por um *datalogger Delta-T* modelo *DL1* cujas características principais são: 30

canais analógicos, tempos de aquisição programáveis (mínimo de 1 segundo), memória RAM 128 kB. Para recolha de dados dos valores obtidos pelos termofluxímetros *HF1* e *HF2* e pelos sensores de temperatura *Tsupi1*, *Tsupi2*, *Tsupi3* e *Tsupi4*, foi utilizado o *datalogger* da marca Hukseflux apresentado na Figura 4.21b).



Figura 4.21 - Sistema de aquisição de dados: a) *datalogger* Delta-T; b) *datalogger* Hukseflux.

#### 4.2.3.1.4 Termohigrómetro

Para obtenção da temperatura ( $T_{i1}$ ) e da humidade relativa ( $HR_i$ ) do ar no interior à célula de teste foi utilizado um termohigrómetro da *Hanna Instruments*, modelo *HI91610C* (Figura 4.22). Apesar de os valores de humidade relativa interior não serem utilizados no trabalho aqui apresentado, podem auxiliar no desenvolvimento de trabalhos futuros.



Figura 4.22 - Termohigrómetro e sondas de temperatura e humidade relativa do ar interior.

#### 4.2.3.1.5 Câmara de termografia

A câmara de termografia usada, da marca *FLIR System*, modelo *Thermcam SC200* (Figura 4.23), é um equipamento capaz de formar imagens visíveis a partir da emissão dos raios infravermelhos do espectro electromagnético, ou seja, permite retratar um objecto usando a energia térmica irradiada pela superfície desse objecto, convertendo-a num sinal eléctrico e exibindo o resultado como uma imagem térmica apresentada no visor, designada por termograma. Este sistema assemelha-se ao de uma câmara de vídeo, diferenciando-se desta pelo facto de a imagem térmica ser uma reprodução visível de grande comprimento de onda (infra-vermelhos) emitida pela superfície de um objecto [145].

Neste trabalho de investigação foi utilizada uma câmara de termografia portátil, com uma lente de 24°, que incorpora uma máquina digital a cores. Os termogramas obtidos podem ser visualizados e registados, uma vez que esta é acompanhada de um monitor *LCD* externo. Por outro lado, permite capturar e armazenar as imagens num *PC-card* removível, acompanhadas por uma série de dados relativos ao termograma, nomeadamente no que respeita ao objecto em estudo, para além de comentários adicionais que se considerem importantes para a análise dos resultados obtidos [146].

Uma vez que o recurso à termografia permite identificar o padrão de temperaturas superficiais que caracterizam um determinado elemento construtivo, foram registados diversos termogramas para a parede de Trombe ao longo do período do trabalho experimental, nomeadamente para condições climáticas interiores e exteriores distintas e para diferentes formas de operacionalidade do sistema de ventilação da parede acumuladora.



Figura 4.23 - Câmara de termografia utilizada.

### 4.3 Metodologia de simulação térmica

A simulação térmica de edifícios ou dos seus componentes assume um papel de relevo na análise e previsão de parâmetros que caracterizam o comportamento do sistema em estudo. A ligação entre os dados obtidos experimentalmente e as equações utilizadas no programa de simulação é fundamental para a obtenção e aferição dos resultados obtidos durante a fase de modelação.

Neste trabalho de investigação, a simulação térmica da parede de Trombe foi realizada tendo por base o cálculo indicado na Norma ISO 13790:2008 [6] bem como a metodologia apresentada por Martins [5] relativa à contribuição da parede de Trombe ventilada e não ventilada para as estações de aquecimento e de arrefecimento. Uma vez que estas metodologias são utilizadas para cálculo estático, ou seja, é feita uma análise global dos diversos parâmetros em estudo para um determinado período, por exemplo, referente à duração da estação de aquecimento ou de arrefecimento, foi necessário proceder a adaptações da formulação para que a análise pudesse apresentar um carácter dinâmico. Na metodologia aplicada por Martins [5], houve dificuldade na obtenção dos valores de determinados parâmetros que integram algumas das expressões, nomeadamente o valor médio da temperatura a meio da caixa-de-ar, bem como o valor médio das temperaturas exteriores e interiores para as estações em análise.

No presente trabalho, a existência da componente experimental permitiu ultrapassar situações deste tipo, uma vez que foi possível obter os dados em regime contínuo ao longo do período de ensaio.

Nesta secção ponto será apresentada a metodologia utilizada no programa de simulação MatLab para determinação do desempenho térmico da parede de Trombe clássica, sendo calculados os ganhos solares e a transferência de calor. Serão também apresentadas as adaptações efectuadas à metodologia definida por Martins, que permitiram a passagem do cálculo estático para a análise dinâmica do comportamento deste sistema solar passivo no período pretendido.

#### 4.3.1 Formulação

O cálculo do desempenho térmico da parede de Trombe resulta da contribuição dos ganhos e das perdas obtidos por transferência de calor através do envidraçado e da parede acumuladora.

Contabiliza a transferência de calor devido à condução, radiação e convecção através dos seus constituintes e também a transferência de calor por convecção do ar quando é previsto um sistema de ventilação na parede acumuladora.



### 4.3.1.1 Transferência de calor através do envidraçado

De acordo com a norma ISO13790:2008 [6] e com o trabalho desenvolvido por Martins [5] a transferência de calor através do envidraçado resulta no cálculo dos ganhos solares ( $Q_{sol}$ ), que são obtidos pela expressão (1):

$$Q_{sol} = \left( \sum_k \Phi_{sol,mn,k} \right) t + \left( \sum_l (1 - b_{tr,l}) \Phi_{sol,mn,u,l} \right) t \quad [\text{W}] \quad (1)$$

A primeira parcela da expressão,  $\Phi_{sol,mn,k}$ , corresponde ao fluxo de calor devido aos ganhos solares do elemento  $k$ . A segunda parcela da equação, que engloba os parâmetros  $b_{tr,l}$  e  $\Phi_{sol,mn,u,l}$ , diz respeito à contribuição de espaços adjacentes não aquecidos. O parâmetro  $b_{tr,l}$  é o factor de ajuste para a contabilização de espaços adjacentes não aquecidos, definido na norma ISO 13789.

Neste caso, considerando que o compartimento só tem um elemento  $k$ , que corresponde à parede de Trombe, a segunda parcela da equação (1) é desprezada e esta passa a ser definida pela expressão (2):

$$Q_{sol} = \left( \sum_k \Phi_{sol,mn,k} \right) t \quad [\text{W}] \quad (2)$$

No sentido de atribuir carácter dinâmico a esta metodologia de cálculo, o valor de  $t$  corresponde a um período contínuo, ou seja, corresponde ao período de ensaio entre as 16h20min do dia 11 de Agosto de 2011 e as 17h35min do dia 4 de Novembro de 2011, para amostras com um período de armazenamento de 5 minutos.

O valor do fluxo de calor  $\Phi_{sol,mn,k}$  devido aos ganhos solares é dado pela expressão (3):

$$\Phi_{sol,mn,k} = F_{sh,oh,k} A_{sol,k} I_{sol,k} - F_{r,k} \Phi_{r,k} \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Substituindo esta expressão na expressão geral dos ganhos solares, a expressão (2) toma o valor:

$$Q_{sol} = (F_{sh,oh,k} A_{sol,k} I_{sol,k} - F_{r,k} \Phi_{r,k}) t \quad [\text{W}] \quad (4)$$

Onde  $F_{sh,ob,k}$  é o factor de obstrução,  $A_{sol,k}$  é a área efectiva da parede de Trombe,  $I_{sol,k}$  é a radiação solar incidente,  $F_{r,k}$  é o factor de forma entre a parede de Trombe e o céu,  $\Phi_{r,k}$  é o fluxo de calor extra por radiação emitido pela parede de Trombe para o céu.

O factor de obstrução  $F_{sh,ob,k}$  representa a redução da radiação solar que incide no vão envidraçado devido ao sombreamento causado por obstáculos exteriores (do horizonte, verticais e horizontais) determinado através da expressão (5). De acordo com Martins [5] a expressão utilizada é a definida no ponto 4.3.3 do RCCTE [36]:

$$F_{sh,ob,k} = F_h \times F_o \times F_f \quad [W] \quad (5)$$

Sendo  $F_h$  o factor de sombreamento do horizonte por obstruções longínquas exteriores ao edifício ou por outros elementos do edifício,  $F_o$  o factor de sombreamento por elementos horizontais e  $F_f$  o factor de sombreamento por elementos verticais.

Os ganhos solares são calculados tendo em conta a área colectora efectiva dado que a camada de ar é coberta por uma superfície envidraçada. Este parâmetro é designado por  $A_{sol,k}$  e corresponde à área efectiva da parede de Trombe. Dado tratar-se de uma parede de Trombe ventilada, este valor é calculado pela expressão (6).

$$A_{sol,k} = A_{sw} \cdot \alpha \cdot F_{sh,gl} \cdot F_F \cdot g_w \left[ U_0 R_e + \frac{U_0^2 R_i}{U_i U_e} \rho_a c_a \frac{q_{ve,sw}}{A_{sw}} k_{sw} \omega \right] \quad [m^2] \quad (6)$$

Em que  $A_{sw}$  é a área da parede de Trombe, em  $m^2$ , e  $\alpha$  o coeficiente de absorção solar da superfície exterior da parede acumuladora, que neste caso é pintada de preto mate, e cujo valor pode ser obtido através do Quadro V.5 do RCCTE [36]:

O parâmetro  $F_{sh,gl}$  é o factor de redução solar, devido à existência de dispositivos de oclusão nos envidraçados, calculado de acordo com a expressão (7):

$$F_{sh,gl} = \frac{[(1 - f_{sh,with})g_{gl} + f_{sh,with}g_{gl+sh}]}{g_{gl}} \quad (7)$$

Sendo que  $g_{gl}$  corresponde ao factor solar do vidro,  $g_{gl+sh}$  ao factor solar do envidraçado com o dispositivo de oclusão activado a 100% e  $f_{sh,with}$  à fracção do tempo em que protecção está activada.

Nesta fase, procedeu-se à adaptação da equação (6), substituindo o valor de  $F_{sh,gl} \cdot g_w$  por  $g_p$ , que contabiliza a variação do valor do factor solar devido à activação ou não do dispositivo de sombreamento. Assim, a expressão (6) toma a forma apresentada na expressão (8).

$$A_{sol,k} = A_{sw} \cdot \alpha \cdot F_F \cdot g_p \left[ U_0 R_e + \frac{U_0^2 R_i}{U_i U_e} \rho_a c_a \frac{q_{ve,sw}}{A_{sw}} k_{sw} \omega \right] \quad (8)$$

O valor de  $F_F$  corresponde à influência da caixilharia na área efectiva da parede de Trombe, obtida no Quadro IV.5 do RCCTE [36], que neste caso toma o valor 1 dado que o envidraçado exterior não apresenta caixilharia. O termo  $U_0$  é o coeficiente de transmissão térmica da parede de Trombe ventilada, calculado pela expressão (9):

$$U_0 = \frac{1}{R_i + R_l + R_e} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})] \quad (9)$$

Sendo  $R_i$  a resistência térmica interior, entre a camada de ar e o ambiente interior, obtida através da expressão (10):

$$R_i = R_{si} + R_{ei} \quad [(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}] \quad (10)$$

Onde  $R_{si}$  corresponde à resistência térmica superficial interior e  $R_{ei}$  à resistência térmica da parede acumuladora, sendo todos os valores expressos em  $(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) / \text{W}$ .

O valor de  $R_l$  corresponde à resistência térmica da camada de ar e  $R_e$  à resistência térmica exterior, entre a camada de ar e o ambiente exterior, dada pela expressão (11):

$$R_e = R_{se} + R_{ee} \quad [(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{W}] \quad (11)$$

O parâmetro  $R_{se}$  é a resistência térmica superficial exterior e  $R_{ee}$  é a resistência térmica do envidraçado.

Os valores  $U_i$  e  $U_e$  são, respectivamente, os coeficientes de transmissão térmica da parede acumuladora e do envidraçado, determinados de acordo com as expressões (12 e 13), respectivamente.

$$U_i = \frac{1}{R_i + \frac{Rl}{2}} \quad \text{e} \quad U_e = \frac{1}{R_e + \frac{Rl}{2}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})] \quad (12 \text{ e } 13)$$

O valor de  $U_e$  é variável ao longo do período de análise, dado que, contabiliza apenas o envidraçado quando a protecção não está activa e o valor do conjunto sempre que são colocados os dispositivos de sombreamento.

O parâmetro  $\rho_a c_a$  é a capacidade calorífica do ar, em  $J/m^3 \cdot ^\circ C$  e  $q_{ve,sw}$  é o caudal de ar na camada de ar ventilada, calculado pela expressão (14), dado que as aberturas inferiores e as aberturas superiores de ventilação da parede acumuladora apresentam a mesma área.

$$q_{ve,sw} = 0,16 \cdot S \cdot \sqrt{\frac{h_t}{2} (T_i - T_{ca})} \quad [m^3/s] \quad (14)$$

Para o cálculo do caudal de ventilação,  $S$  representa a área do conjunto das quatro aberturas de ventilação, inferiores ou superiores, em  $m^2$ , e  $h_t$  a distância entre os pontos médios das aberturas de ventilação superiores e inferiores, em metros.

O valor do diferencial de temperatura relaciona a temperatura no interior do compartimento,  $T_i$ , com a temperatura média na caixa-de-ar,  $T_{ca}$  obtida a partir da média entre as temperaturas inferior,  $T_{ca1}$ , e superior,  $T_{ca2}$ , em  $^\circ C$ .

O parâmetro  $k_{sw}$  é definido pela expressão (15), cujo valor de  $Z$  é calculado pela expressão (16):

$$k_{sw} = \left[ 1 - \exp\left(\frac{-A_{sw} Z}{\rho_a c_a q_{ve,sw}}\right) \right] \quad (15)$$

$$\frac{1}{Z} = \frac{h_r}{h_c (h_c + 2h_r)} + \frac{1}{U_i + U_e} \quad [W/(m^2 \cdot ^\circ C)] \quad (16)$$

Na expressão de cálculo do  $Z$ ,  $h_r$  é o coeficiente de transferência de calor na superfície da camada de ar por radiação, em  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $h_r$  é igual a  $5\varepsilon$ , sendo  $\varepsilon$  a emissividade do vidro;  $h_c$  é o coeficiente de transferência de calor na superfície da camada de ar por convecção;  $U_i$  e  $U_e$  são os coeficientes de transmissão térmica já referidos anteriormente.

Finalmente, no que respeita aos parâmetros contabilizados para o cálculo da área efectiva,  $\omega$  é calculado através da expressão (17) e representa o factor de utilização de ganhos solares.

$$\omega = 1 - \exp(-2,2\gamma_{al}) \quad (17)$$

Onde  $\gamma_{al}$  corresponde à razão entre os ganhos solares,  $Q_{gn,sw}$ , e as perdas de calor da camada de ar,  $Q_{ht,al}$ , durante o período em análise, obtidos de acordo com as expressões (18) e (19), respectivamente.

$$Q_{gn,sw} = I_{sol,k} A_{sw} \quad [W] \quad (18)$$

Na expressão de cálculo dos ganhos solares,  $I_{sol,k}$  é a radiação solar incidente durante o período de análise, que corresponde à radiação solar obtida através do trabalho experimental, registada de 5 em 5 minutos.  $A_{sw}$  é a área da parede de Trombe, em  $m^2$ .

$$Q_{ht,al} = U_e A_{sw} (Tca - Te) \quad [W] \quad (19)$$

No que respeita ao cálculo das perdas de calor através da caixa-de-ar, estas ocorrem sempre que a temperatura média na caixa-de-ar é superior à existente no ambiente exterior. O tempo de análise corresponde então ao período de amostragem em que  $Tca$  e  $Te$  reúnem estas condições.

Voltando à expressão (4) referente ao cálculo dos ganhos solares através da parede de Trombe, o valor de  $F_{r,k}$  é o factor de forma entre a parede de Trombe e o céu, que de acordo com a ISO 13790:2008 [6] toma o valor de 0,5 dado que o fluxo de calor através do elemento construtivo é na direcção horizontal.

O fluxo de calor extra devido à radiação térmica da parede de Trombe para o céu é definido por  $\Phi_{r,k}$ , em W, e é calculado de acordo com a expressão (20),

$$\Phi_{r,k} = R_{se} U_0 A_{sw} h_r \Delta\theta \quad [W] \quad (20)$$

Correspondendo  $R_{se}$  à resistência térmica superficial exterior, em  $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ;  $U_0$  ao coeficiente de transmissão térmica da parede de Trombe, em  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ , calculado de acordo com a expressão (8);  $A_{sw}$  à área da parede de Trombe, em  $m^2$ ;  $h_r$  ao coeficiente de transferência de calor na superfície da camada de ar por radiação e  $\Delta\theta$  é a diferença entre a temperatura do ar exterior e a temperatura aparente do céu.

Apesar de esta parcela ter sido contabilizada para o cálculo dos ganhos solares, verificou-se que a sua contribuição para o valor global, relativamente à primeira parcela da expressão (4), é muito reduzida pelo que poderia ter sido desprezada.

#### 4.3.1.2 Transferência de calor através da parede acumuladora

A contribuição da transferência de calor atrás da parede acumuladora inclui o cálculo da parcela relativa à transferência de calor numa parede de Trombe não ventilada à qual se adiciona a parcela relativa à convecção natural devido à existência de aberturas de ventilação na parede acumuladora. O coeficiente de transferência de calor é obtido através da expressão (21).

$$H = H_0 + \Delta H \quad [W/^\circ C] \quad (21)$$

O valor de  $H_0$  representa o coeficiente de transferência de calor da parede de Trombe não ventilada, dado pela expressão (22).

$$H_0 = U_0 \cdot A_{sw} \quad [W/^{\circ}C] \quad (22)$$

Sendo  $U_0$  o coeficiente de transmissão térmica da parede de Trombe, em  $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ , já indicado anteriormente e  $A_{sw}$  a área da parede de Trombe, em  $m^2$ .

O facto de a parede de Trombe ser ventilada na parede acumuladora leva à introdução da contribuição do fenómeno de convecção, representada pelo parâmetro  $\Delta H$ . Este corresponde então ao coeficiente de transferência de calor adicional por convecção, devido à parede ser ventilada e é obtido pela expressão (23):

$$\Delta H = \rho_a c_a \cdot q_{ve,sw} \left[ \frac{U_e}{U_i} \right]^2 \delta \cdot k_{sw} \quad [W/^{\circ}C] \quad (23)$$

Todos os parâmetros incluídos no seu cálculo já foram explicitados anteriormente, com excepção do parâmetro  $\delta$ . Este corresponde à razão entre a diferença de temperatura interior e exterior acumulada, quando há ventilação, ao longo do período de cálculo e é obtido através da expressão (24).

$$\delta = 0,3\gamma_{al} + 0,03(0,0003^{\gamma_{al}} - 1) \quad (24)$$

O valor dos ganhos por transferência de calor é obtido pela expressão (25).

$$Q_{trans} = H \cdot A_{sw} (Tca - Ti) \quad [W] \quad (25)$$

Finalmente, para obter os ganhos totais através da parede de Trombe, basta adicionar as parcelas dos ganhos solares e dos ganhos por transferência de calor tal como se mostra na expressão (26).

$$Q_{total} = Q_{sol} + Q_{trans} \quad [W] \quad (26)$$

## 4.4 Conclusões

A metodologia de análise do desempenho da parede de Trombe engloba a fase experimental e a fase de simulação dinâmica do seu comportamento térmico.

Para além das dificuldades económicas e temporais associadas ao trabalho experimental, a opção de construir uma célula de teste com inclusão de uma parede de Trombe na sua

concepção, permitiu adquirir uma série de dados em clima real fundamentais para posteriormente analisar o seu desempenho térmico.

Os valores das diversas grandezas obtidos através da instrumentação e monitorização do dispositivo experimental serão analisados no Capítulo 5. Estes serão também utilizados na aplicação do método de cálculo proposto para determinação do desempenho térmico da parede de Trombe, cujos resultados obtidos da utilização do programa de simulação serão apresentados no Capítulo 6.





## Capítulo 5

# Análise dos Resultados Experimentais



## Capítulo 5

### Análise dos Resultados Experimentais

#### 5.1 Introdução

Com o estudo apresentado neste capítulo, pretende-se contribuir para o conhecimento do comportamento de uma parede de Trombe em condições climáticas idênticas às de Vila Real.

A aquisição de dados resultante da instrumentação e monitorização da célula de teste referente ao período de tempo entre as 16h20min do dia 11 de Agosto de 2011 e as 17h35min do dia 04 de Novembro de 2011, permitiu a obtenção de diversas grandezas físicas fundamentais para a análise do desempenho energético da parede de Trombe. Os dados foram registados de 5 em 5 minutos, totalizando 24496 amostras.

A realização deste trabalho experimental permitiu obter valores de variáveis caracterizadoras das condições climáticas exteriores, das condições no interior da célula de teste e de grandezas associadas ao processo de transferência de calor através da parede de Trombe.

Neste capítulo será efectuada a análise dos dados recolhidos, estabelecendo-se, sempre que possível, uma relação entre eles, com o objectivo de caracterizar o comportamento deste sistema solar passivo no período de tempo considerado.

Neste sentido, será estudada a influência da radiação solar e da temperatura exterior nas temperaturas medidas ao longo dos diversos constituintes da parede de Trombe, nomeadamente na camada de ar, na parede acumuladora e no interior da célula de teste. Este estudo possibilitará ainda a análise da capacidade de armazenamento de calor do sistema, bem como o desfasamento de tempo na libertação de calor para o interior da célula de teste.

O fluxo de calor através desta parede será também alvo de estudo e relacionado com outras grandezas físicas obtidas durante a fase experimental. Será analisada a influência do sistema de ventilação na transferência de calor e nos valores das temperaturas obtidos nas diversas camadas constituintes da parede de Trombe. Este sistema é constituído por 8 aberturas de igual dimensão, quatro na parte inferior da parede acumuladora e quatro na parte superior. Ainda no que respeita ao sistema de ventilação, será analisada a estratificação das temperaturas junto às aberturas inferiores e superiores da parede acumuladora, em função da existência ou não de obturadores.

O papel dos dispositivos de sombreamento na variação dos diversos parâmetros obtidos e consequentemente no comportamento do sistema será também alvo de estudo.

### 5.2 Parâmetros influenciadores do desempenho da parede de Trombe

#### 5.2.1 Condições climáticas exteriores

O ambiente exterior relativo ao período de amostragem é caracterizado por valores de intensidade de radiação solar,  $RS$ , bastante elevados durante grande parte do período de ensaio, o que é espectável dado que grande parte das amostras corresponde à estação de arrefecimento. Os valores desta grandeza medidos no plano horizontal aproximam-se dos  $0,9\text{KW}/\text{m}^2$  nos pontos máximos. O início do mês de Outubro foi caracterizado por temperaturas atípicas para a época, consideradas as mais elevadas dos últimos 50 anos, caracterizado por valores elevados da radiação solar. Durante o final do mês de Outubro de 2011, os valores de  $RS$  começaram a diminuir, apesar de estes valores continuarem a ser mais elevados do que é habitual para esta época do ano. Na Figura 5.1 é possível observar a evolução da radiação solar total (directa + difusa) durante o período experimental.

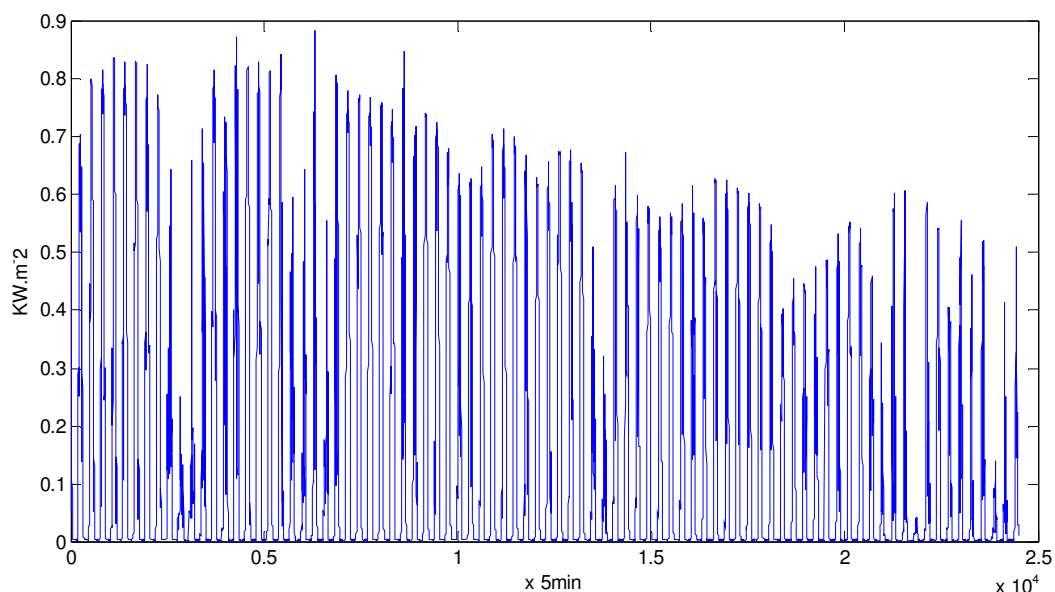


Figura 5.1 - Variação da intensidade de radiação solar total ( $RS$ ) medida na cobertura da célula de teste, segundo um plano horizontal.

Fazendo uma análise em pormenor dos períodos inicial e final das medições (Figura 5.2), constata-se que, no período decorrido entre os dias 5 e 13 de Agosto de 2011, os valores de  $RS$  são bastante mais elevados do que no período final do ensaio, decorrido entre 27 de Outubro e 4 de Novembro de 2011. No primeiro caso, os valores de  $RS$  desenvolvem-se segundo curvas mais uniformes em termos de oscilações, atingindo valores máximos da ordem

## Capítulo 5 - Análise dos Resultados Experimentais

dos  $0,80 \text{ kW/m}^2$ , enquanto no segundo caso, os valores diminuem significativamente e apresentam grandes oscilações, atingindo valores máximos da ordem dos  $0,50 \text{ kW/m}^2$ , e que se deveram à variação verificada na cobertura de nuvens.

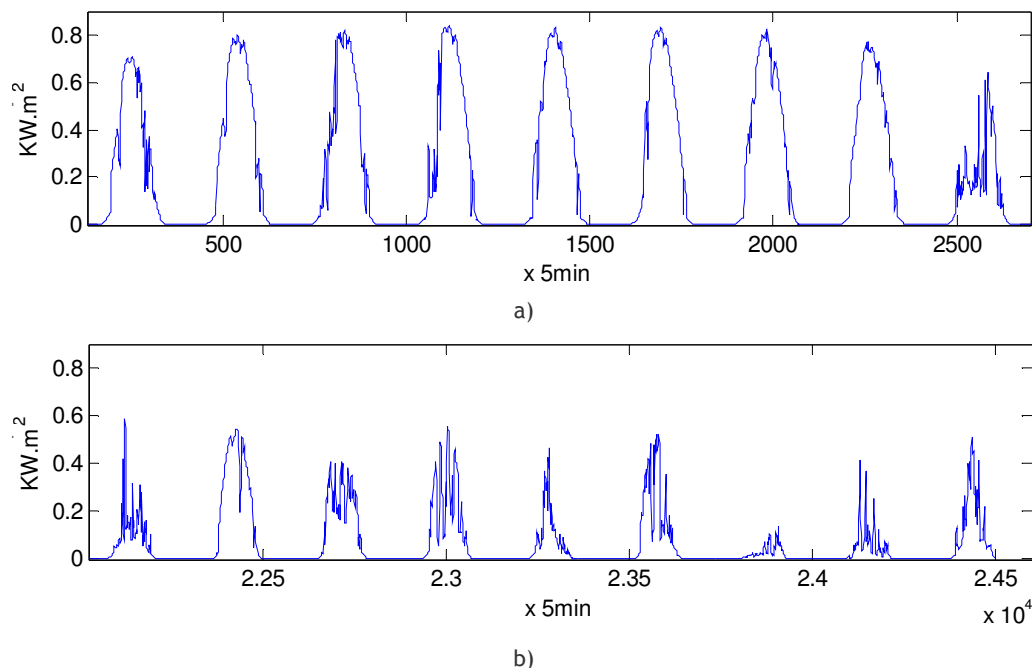


Figura 5.2 - Pormenor da variação da intensidade de radiação solar total (RS) medida num plano horizontal: a) período de 5 a 13 de Agosto de 2011; b) período de 27 de Outubro a 4 de Novembro de 2011

Na Figura 5.3 apresentam-se os valores da temperatura exterior,  $T_e$ . É possível observar que estas temperaturas atingem valores máximos entre os  $30^\circ\text{C}$  e os  $40^\circ\text{C}$  numa elevada quantidade de amostras, reduzindo significativamente nos últimos vinte dias de ensaio. A temperatura exterior assumiu o valor máximo de  $39,73^\circ\text{C}$  no dia 12 de Agosto às 15h25min e o valor mínimo rondou os  $4^\circ\text{C}$ , durante o período nocturno dos últimos dias do mês de Outubro. O valor médio registado para a temperatura exterior foi de  $18,90^\circ\text{C}$ . No mês de Agosto, a temperatura média exterior foi de  $21,80^\circ\text{C}$ , atingindo o valor máximo de  $39,73^\circ\text{C}$  e o mínimo de  $8,97^\circ\text{C}$ . No que respeita ao mês de Setembro, estes valores foram, respectivamente, de  $20,18^\circ\text{C}$ ,  $34,71^\circ\text{C}$  e  $8,25^\circ\text{C}$ , enquanto no mês de Outubro atingiram os valores de  $16,70^\circ\text{C}$ ,  $34,71^\circ\text{C}$  e  $4,02^\circ\text{C}$ , valores estes bastante elevados para a época do ano.

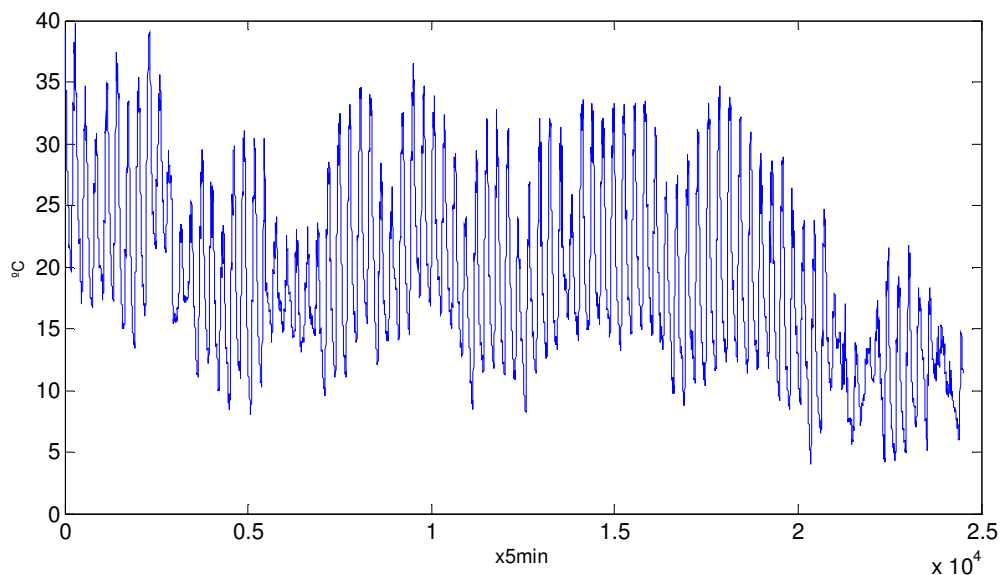


Figura 5.3 - Variação da temperatura exterior ( $T_e$ ).

### 5.2.2 Variação da temperatura na caixa-de-ar entre o vidro e a parede acumuladora

A variação da temperatura na caixa-de-ar entre o vidro e a parede acumuladora depende das condições climáticas exteriores, mais concretamente da radiação solar incidente e da temperatura exterior, bem como das características térmicas do vidro e das características dimensionais e materiais do espaço de ar. Os valores obtidos para a temperatura ao longo da caixa-de-ar, são também influenciados pelo funcionamento do sistema de ventilação existente na parede acumuladora e pela existência ou não de dispositivos de sombreamento exteriores. Os sensores de temperatura do ar foram colocados na parte inferior ( $T_{ca1}$ ) e na parte superior ( $T_{ca2}$ ) da caixa-de-ar.

Na Tabela 5.1 são apresentados os diversos períodos do ensaio tendo em conta as alterações que foram efectuadas ao nível do funcionamento do sistema de ventilação e da colocação de sombreamentos exteriores, com o objectivo de auxiliar na análise dos resultados obtidos. Estão também identificados os números das amostras correspondentes a cada período de ensaio no sentido de facilitar a leitura dos dados apresentados nas figuras constantes deste capítulo.

## Capítulo 5 - Análise dos Resultados Experimentais

Tabela 5.1 - Caracterização do período de ensaio experimental.

Período do ensaio				Caracterização do ensaio					
				Sistema de ventilação				Colocação do dispositivo de sombreamento exterior	
Data de início	N° amostra	Data de fim	N° amostra	Colocação do 1° tipo de obturadores		Colocação do 2° tipo de obturadores			
				Sim	Não	Sim	Não		
11-08-2011 às 16h20min	1	15-09-2011 às 9h00min	9995		X		X		X
15-09-2011 às 9h15min	9996	19-09-2011 às 14h00min	11205	X			X		X
19-09-2011 às 14h35min	11212	04-10-2011 às 16h25min	15554		X	X			X
04-10-2011 às 16h30min	15555	05-10-2011 às 14h35min	15820		X	X		X	
05-10-2011 às 14h40min	15821	06-10-2011 às 08h30min	16035		X		X		X
06-10-2011 às 08h50min	16039	07-10-2011 às 09h00min	16329		X	X		X	
07-10-2011 às 09h05min	16330	07-10-2011 às 13h20min	16381		X	X			X
07-10-2011 às 13h25min	16382	10-10-2011 às 16h40min	17285		X	X		X	
10-10-2011 às 16h45min	17286	11-10-2011 às 14h10min	17543		X	X			X
11-10-2011 às 14h15min	17544	14-10-2011 às 12h25min	18386		X	X		X	
14-10-2011 às 12h30min	18387	15-10-2011 às 08h55min	18632		X	X			X
15-10-2011 às 09h00min	18633	17-10-2011 às 12h00min	19245		X	X		X	
17-10-2011 às 12h05min	19246	17-10-2011 às 15h55min	19292		X	X			X
17-10-2011 às 16h00min	19293	18-10-2011 às 11h05min	19522		X	X		X	
18-10-2011 às 11h10min	19523	02-11-2011 às 16h55min	23912		X	X			X
02-11-2011 às 17h00min	23913	04-11-2011 às 12h15min	24432		X	X		X	
04-11-2011 às 12h20min	24432	04-11-2011 às 16h55min	24488		X	X			X
04-11-2011 às 17h00min	24489	04-11-2011 às 17h35min	24496		X	X		X	

Na Figura 5.4 são apresentados os valores das temperaturas obtidos ao longo de todo o período de ensaio, assim como a diferença entre os mesmos.

Após uma análise imediata dos valores obtidos conclui-se que os valores de  $T_{ca2}$  são sempre superiores a  $T_{ca1}$ , chegando a ultrapassá-los em mais de 19°C durante o período diurno.

No período referente ao mês de Agosto os valores máximos de  $Tca1$  e de  $Tca2$  foram de 54,48°C e 57,92°C, respectivamente, correspondentes às horas de maior intensidade de radiação solar, e os mínimos de 15,10°C e 18,95°C, referentes ao período nocturno, verificando-se no entanto, que o diferencial entre as temperaturas nos dois sensores é de cerca de 3°C durante o período nocturno.

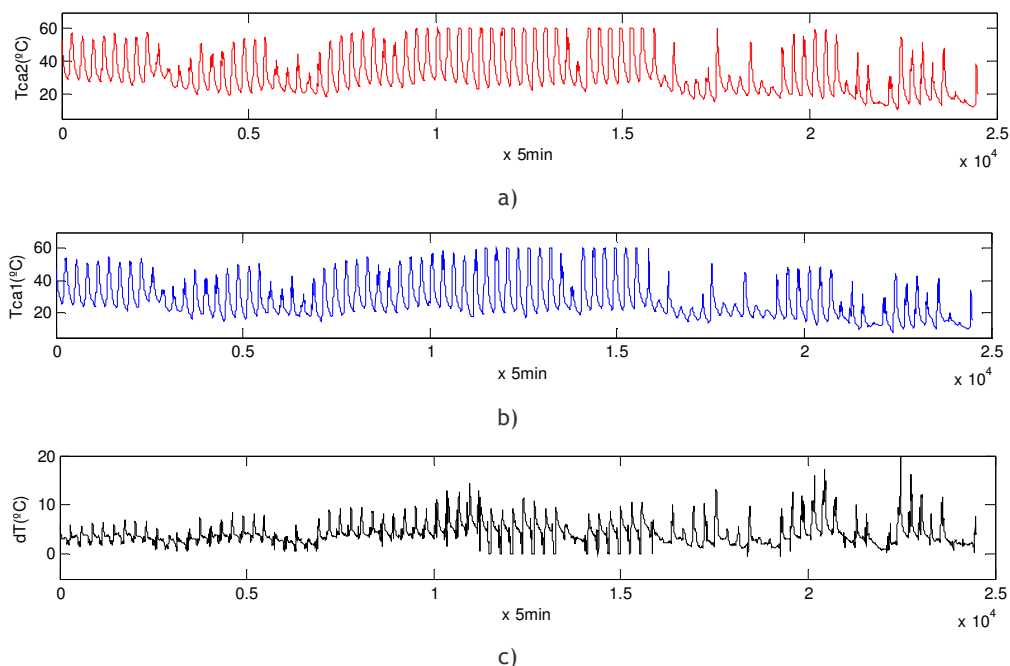


Figura 5.4 - Variação da temperatura na caixa-de-ar: a) temperatura superior ( $Tca2$ ); b) temperatura inferior ( $Tca1$ ); c) diferencial de temperatura  $dT$  ( $Tca2-Tca1$ ).

Em vários períodos de análise, pertencentes aos meses de Setembro e Outubro, os valores de  $Tca1$  e de  $Tca2$  ultrapassaram os 60°C. Uma vez que o sensor de temperatura utilizado não regista valores superiores a 60°C, não foi possível saber em quanto foi ultrapassado esse limite.  $Tca2$  ultrapassou os 60°C entre as 14h50min e as 16h30min do dia 13 de Setembro de 2011. Neste período os orifícios de ventilação estavam abertos e não estava aplicado qualquer dispositivo de sombreamento exterior.

Quando foram colocados os primeiros obturadores nos orifícios de ventilação, o valor de  $Tca2$  ultrapassou os 60°C mais cedo, por volta das 12h15min e manteve-se até por volta das 17h15min. Esta situação repetiu-se entre os dias 15 e 19 de Setembro de 2011 (o que corresponde ao período entre as amostras 10000 e 11200). Esta alteração foi devida ao facto de não haver circulação de ar através das aberturas, ou seja, não há passagem de ar quente por convecção e portanto, é criado o efeito de estufa mais cedo e durante mais tempo na caixa-de-ar, conduzindo ao aumento das temperaturas no seu interior. Neste período os valores mínimos de  $Tca1$  e de  $Tca2$  foram de 16,86°C e de 22,44°C, respectivamente. Neste caso também não foram colocados dispositivos de sombreamento.



Quando se substitui estes obturadores pelo segundo tipo de obturadores, em que não há infiltrações de ar através das aberturas, e mantendo a situação de não existência de dispositivos de sombreamento, os valores de  $Tca2$  superam os 60°C entre as 12h00min e as 18h00min, mas o valor de  $Tca1$  atinge também valores superiores a 60°C entre as 13h00min e entre as 15h00min. Ou seja, quando está impedida a ventilação na parede acumuladora, os valores de  $Tca1$  e  $Tca2$  atingem valores superiores aos 60°C durante um maior período de tempo, relativamente ao período anterior. Esta situação verificou-se em determinadas horas do dia, durante o início da tarde, referentes ao período entre as 14h35min do dia 19 de Setembro de 2011 e as 15h25min do dia 4 de Outubro de 2011, correspondente ao intervalo entre as amostras 11212 e 15554. Neste caso, os valores mínimos de  $Tca1$  e de  $Tca2$  são de 17,49°C e de 21,46°C, respectivamente.

A partir do dia 4 de Outubro, as oscilações dos valores máximos da temperatura aumentam, (Figura 5.4). Isto deve-se ao facto de no período de ensaio a partir das 15555 amostras, se variar a activação do sistema de ventilação e o funcionamento do dispositivo de sombreamento. Os valores mais elevados das temperaturas interiores na caixa-de-ar dizem respeito aos períodos em que não existe dispositivo de sombreamento, enquanto os valores mais baixos se referem à colocação do sombreamento e ao fecho do sistema de ventilação em simultâneo. Por exemplo, entre as 13h25min do dia 7 de Outubro de 2011 e as 16h40min do dia 10 do mesmo mês, os valores de  $Tca1$  e  $Tca2$  atingiram, respectivamente os valores máximos de 45,60°C e de 51,92°C e os mínimos de 14,73°C e 16,86°C, verificando-se em média, um diferencial entre as duas temperaturas de apenas 3,57°C, atingindo durante o dia um diferencial de cerca de 10°C e um de cerca de 1,27°C durante a noite.

No período referido anteriormente, entre as 18h15min do dia 7 de Outubro de 2011 e as 12h55min do dia 9 do mesmo mês, os valores da temperatura na superfície interior da parede acumuladora são superiores aos da temperatura na base da caixa-de-ar, o que se justifica devido à acumulação de calor no sistema durante o período anterior em que as aberturas estiveram fechadas não havendo qualquer tipo de sombreamento. O diferencial entre estas duas temperaturas foi diminuindo gradualmente devido ao fluxo de calor entre a parede acumuladora e a caixa-de-ar até se inverter novamente o sentido do fluxo por volta das 13h00min do mesmo dia, em que  $Tca1$  passa a ser maior do que a temperatura superficial interior da parede acumuladora até às 18h35min, altura a partir da qual se verifica nova inversão de valores até às 12h00min do dia 10 de Outubro. Esta situação retrata a transferência de calor que ocorre durante o dia e a noite quando se trata de uma parede de Trombe não ventilada e que apresenta dispositivos de sombreamento. A utilização do dispositivo de sombreamento durante a noite reduz a transferência de calor entre a caixa-de-ar e o exterior, quando a temperatura na superfície interior é maior do que a da camada de ar e o fluxo tem o sentido do interior para o exterior.

### 5.2.3 Variação da temperatura na parede acumuladora

O fenómeno da transferência de calor anteriormente descrito é influenciado, não só pelo efeito de estufa criado na caixa-de-ar, mas também pela capacidade de armazenamento de calor da parede acumuladora e portanto, pela distribuição de temperaturas ao longo da parede. Os resultados obtidos são apresentados nos sub-pontos seguintes. Serão analisadas as temperaturas nas superfícies exterior e interior da parede acumuladora bem como a sua estratificação ao longo do seu perfil transversal.

#### 5.2.3.1 Temperaturas superficiais exteriores

Os valores das temperaturas na superfície exterior da parede acumuladora foram recolhidos através dos sensores colocados na parte inferior ( $T_{sup1}$ ), na zona central ( $T_{sup2}$ ) e na parte superior ( $T_{sup3}$ ) da parede acumuladora. As curvas das temperaturas na superfície exterior da parede acumuladora são idênticas às que caracterizam a variação de temperatura na caixa-de-ar, mantendo o mesmo padrão de oscilações, apesar de os valores máximos atingidos na superfície acumuladora serem superiores aos da caixa-de-ar, o que se pode observar através das Figuras 5.4 e 5.5.

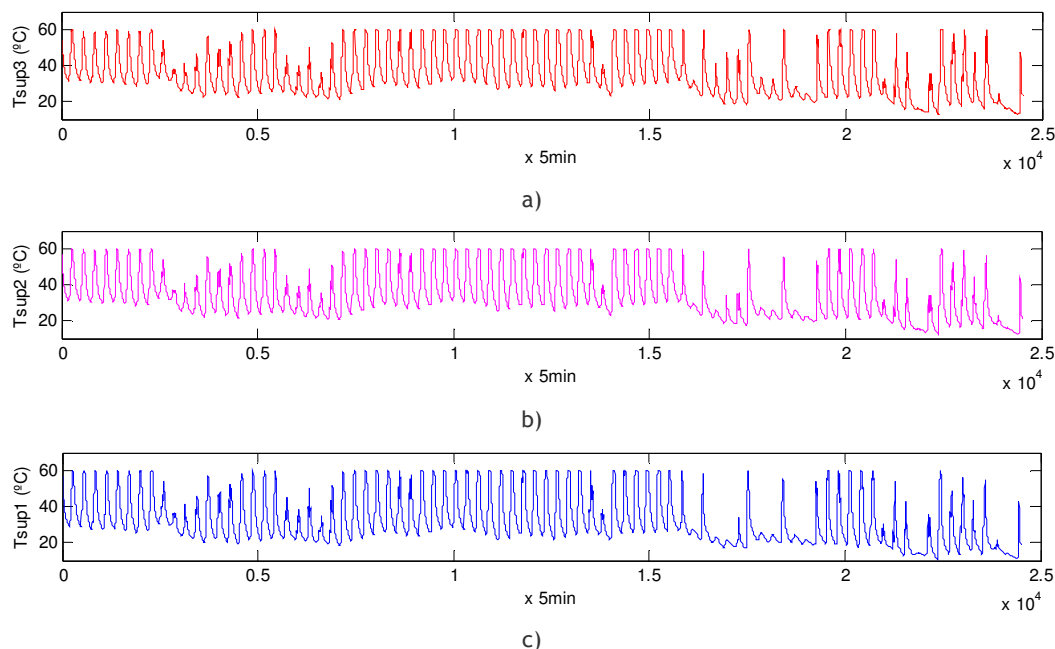


Figura 5.5 - Variação das temperaturas medidas na superfície exterior da parede acumuladora: a) temperatura superior ( $T_{sup3}$ ); b) temperatura central ( $T_{sup2}$ ); c) temperatura inferior ( $T_{sup1}$ ).

Analisando o diferencial de temperaturas entre  $T_{ca1}$  e  $T_{sup1}$ , cujos sensores se encontram próximos da base da parede, verifica-se que  $T_{sup1}$  assume valores superiores aos de  $T_{ca1}$  em grande parte do tempo analisado, apesar de haver situações em que esta situação se inverte, correspondentes ao período da manhã em que se inicia a incidência da radiação solar e a acumulação de calor na caixa-de-ar. No entanto, quando isto acontece, a diferença entre os

valores das duas temperaturas é muito menor do que na situação em que ocorre o contrário, com valores máximos de diferencial de  $-4,48^{\circ}\text{C}$  e de  $17,92^{\circ}\text{C}$ , respectivamente.

No que respeita ao diferencial de temperaturas entre  $T_{ca2}$  e  $T_{sup3}$ , quando  $T_{sup3}$  é superior a  $T_{ca2}$ , ultrapassa-o, no máximo, em  $21,09^{\circ}\text{C}$ . Esta situação ocorre no dia 10 de Outubro de 2011 às 14h00min, altura em que estão colocados o segundo tipo de obturadores nas aberturas e também o dispositivo de sombreamento. Nos dias 9 e 10 de Outubro, entre as 14h00min e as 14h20min, registaram-se os valores mais elevados nos diferenciais entre estas temperaturas.

No período decorrido entre o início do ensaio e o dia 15 de Setembro de 2011, os sensores de temperatura  $T_{sup1}$ ,  $T_{sup2}$  e  $T_{sup3}$  registaram valores superiores a  $60^{\circ}\text{C}$ , verificado entre as 12h00min e as 18h00min. No que respeita aos valores mínimos atingidos,  $T_{sup1}$  atingiu o valor mínimo de  $18,23^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{sup2}$  o valor de  $20,38^{\circ}\text{C}$  e  $T_{sup3}$  o valor de  $20,87^{\circ}\text{C}$ . Pode verificar-se que os valores obtidos nos 3 sensores são bastante próximos. No entanto, existem períodos em que a temperatura no topo da parede acumuladora ( $T_{sup3}$ ) assume valores inferiores às restantes temperaturas superficiais  $T_{sup2}$  e  $T_{sup1}$ . Esta situação ocorre sempre que o ângulo de incidência da radiação solar na célula de teste conduz a existência de sombreamentos na parede de Trombe. Na Figura 5.6 é possível observar a ocorrência de sombreamentos na parede de Trombe, que atingem o sensor de temperatura superficial localizado na parte superior da parede  $T_{sup3}$ .

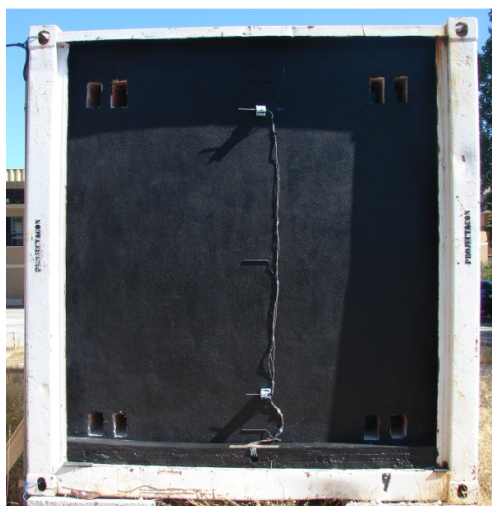


Figura 5.6 - Sombreamentos na superfície exterior da parede acumuladora.

Relembra-se que, durante todo o período acima referido, o sistema de ventilação esteve aberto e não existiu dispositivo de sombreamento. O diferencial de temperatura ao longo da parede não foi muito elevado devido ao facto das aberturas de ventilação terem estado

sempre abertas, possibilitando a circulação do ar entre o interior da célula de teste e a caixa-de-ar.

No dia 19 de Agosto de 2011, as temperaturas  $T_{sup1}$ ,  $T_{sup2}$  e  $T_{sup3}$  ultrapassam, em simultâneo, os 60°C entre as 13h50min e as 16h20min, para valores de temperatura exterior de cerca de 38°C e na caixa-de-ar da ordem dos 53°C junto à base da parede e de 57°C junto ao topo da mesma. No interior, a temperatura registada varia entre os 42°C e os 44°C. Na Figura 5.7, existem regiões com os valores dos diferenciais entre as três temperaturas na superfície da parede acumuladora apresentam-se com o valor zero, o que na realidade não acontece, mas que se deve ao facto de os sensores não registarem valores superiores a 60°C.

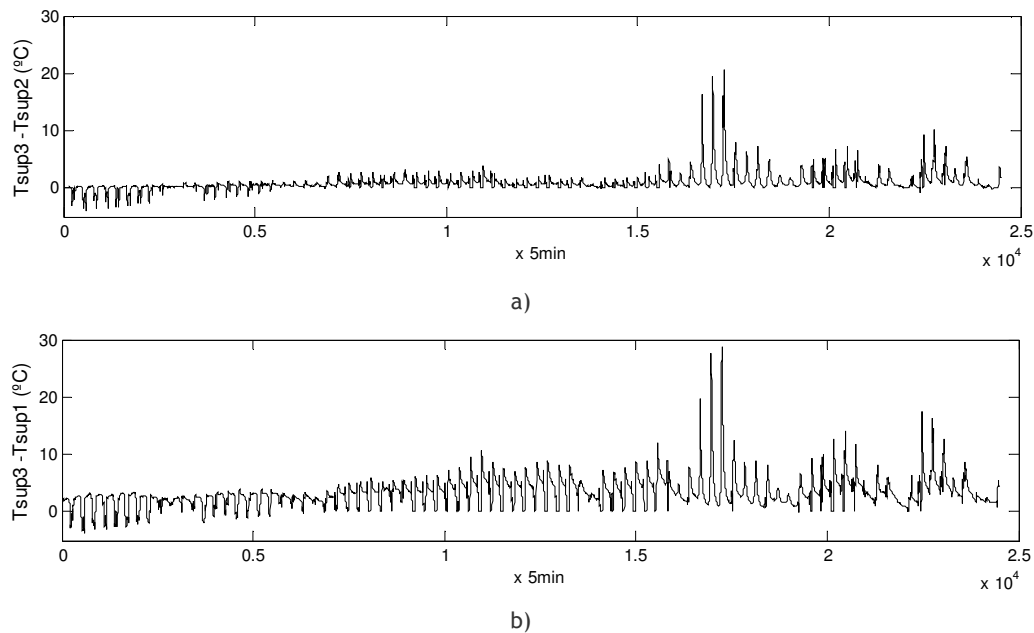


Figura 5.7 - Variação do diferencial de temperaturas medidas na superfície exterior da parede acumuladora: a) diferencial de temperatura  $T_{sup3}-T_{sup2}$ ; b) diferencial de temperatura  $T_{sup3}-T_{sup1}$ .

Os dias que se seguiram até à primeira semana de Setembro de 2011, continuam a ter variações de temperatura significativas ao longo dos dias, mas verifica-se a diminuição da radiação solar total e da temperatura exterior. Entre os dias 6 e 14 de Setembro de 2011, a intensidade de radiação volta a aumentar, tal como a temperatura exterior, o que leva ao aumento das temperaturas superficiais da parede acumuladora, ultrapassando novamente os 60°C.

Quando se coloca o primeiro tipo de obturadores nas aberturas de ventilação, os valores dos diferenciais entre as temperaturas na superfície exterior da parede acumuladora aumentam relativamente ao período anterior, sendo mais significativo entre  $T_{sup1}$  e  $T_{sup3}$ , como seria de esperar, dado que as aberturas estão praticamente fechadas. As temperaturas atingem valores superiores a 60°C durante um período de tempo mais elevado do que na situação

anterior, ocorrendo normalmente entre as 12h00min e as 17h00min. Os valores mínimos atingidos são de 21,31°C na base, 25,11°C no centro e 26,32°C no topo da parede acumuladora. No que respeita à diferença entre as diferentes temperaturas,  $T_{sup3}$  é superior a  $T_{sup1}$  no máximo em 10,72°C e superior a  $T_{sup2}$  em 3,84°C, o que representa diferenciais bastante mais elevados do que no caso da parede de Trombe ventilada. Esta situação demonstra, por um lado, a influência da capacidade de absorção da superfície exterior da parede acumuladora pintada de preto, e por outro lado, a influência do fecho do sistema de ventilação, que evita a circulação de ar por convecção através das aberturas.

A colocação do segundo tipo de obturadores nas aberturas de ventilação foi efectuada entre os dias 19 de Setembro e 4 de Novembro de 2011. Os valores máximos registados para  $T_{sup1}$ ,  $T_{sup2}$  e  $T_{sup3}$  ultrapassam os 60°C e os mínimos são, respectivamente, 21,14°C, 23,14°C e 23,26°C. No que respeita à diferença entre as diferentes temperaturas,  $T_{sup3}$  é superior a  $T_{sup1}$  no máximo em 9,84°C e superior a  $T_{sup2}$  em 2,69°C. Apesar de se evitarem as infiltrações de ar através das aberturas de ventilação, estes valores são ligeiramente mais baixos do que os indicados na situação anterior, uma vez que os valores das temperaturas exteriores e da radiação solar incidente nesta fase do ensaio diminuíram.

Da análise comparativa entre as temperaturas superficiais da parede e as existentes na caixa-de-ar neste período de ensaio, verifica-se que  $T_{sup1}$  chega a ultrapassar  $T_{ca1}$  em 14,24°C e que  $T_{sup3}$  atinge os 5,38°C de diferença relativamente a  $T_{ca2}$ .

Da análise destes dois últimos períodos, conclui-se também que, na situação em que a parede de Trombe não é ventilada, não existem as oscilações de temperatura na superfície da parede acumuladora que caracterizam a parede de Trombe ventilada, em que os diferenciais entre as diferentes temperaturas assumem sinais contrários, em função da direcção do fluxo de calor ao longo do dia. Como se observa na Figura 5.7, a diferença entre  $T_{sup3}$  e  $T_{sup1}$  e entre  $T_{sup3}$  e  $T_{sup2}$ , assumem sempre valores positivos, aumentando a temperatura desde a base até ao topo da parede.

A variação de temperaturas, indicada na Figura 5.6, a partir da amostra n.º 15555, representa a influência da colocação dos dispositivos de sombreamento pelo exterior.

Entre as 16h30min do dia 4 e as 14h35min do dia 5 de Outubro de 2011, foi analisado o efeito do sistema de ventilação fechado e da colocação do dispositivo de sombreamento exterior. Durante este período de análise, os valores da diferença de temperaturas entre  $T_{sup3}$  e  $T_{sup1}$  mantiveram-se elevados, atingindo o máximo de 12,08°C e o mínimo de 4,50°C. Estes valores são ligeiramente superiores aos do período anterior, dada a capacidade de acumulação de calor ocorrida durante esse período, uma vez que o sistema de ventilação estava fechado. A introdução do dispositivo de sombreamento pelo exterior, contribuiu para a redução da

transferência de calor da caixa-de-ar para o exterior através do vidro e conseqüentemente para o aumento do gradiente de temperaturas ao longo da superfície da parede acumuladora.

Entre as 14h40min do dia 5 e as 8h30min do dia 6 de Outubro de 2011, retiram-se os dispositivos de sombreamento exteriores e os obturadores. Como seria de esperar, os diferenciais de temperatura entre  $T_{sup3}$  e  $T_{sup1}$  e entre  $T_{sup3}$  e  $T_{sup2}$ , voltam a diminuir devido ao fenómeno de circulação de ar por convecção através das aberturas de ventilação. Os valores das temperaturas na caixa-de-ar e na superfície da parede acumuladora ultrapassaram os 60°C entre as 15h35min e as 16h35min, mantendo-se acima deste valor, durante cerca de uma hora, no topo da superfície da parede.

Desde o dia 6 de Outubro de 2011 até ao final do período de medição, o sistema de ventilação permaneceu sempre fechado e fez-se variar a existência do dispositivo de sombreamento, o que implicou oscilações na temperatura, como se pode verificar na figura anterior a partir da amostra n.º 16039.

Destacam-se os picos correspondentes aos dias 8, 9 e 10 de Outubro de 2011, caracterizados por valores de temperaturas bastante elevados no sensor colocado no topo da parede acumuladora, num período em que os orifícios de ventilação estão fechados e o dispositivo de sombreamento colocado. Relacionando os valores obtidos neste período com os obtidos em períodos idênticos, verifica-se que estes valores não se enquadram no comportamento esperado para a parede de Trombe. Esta situação deve-se ao facto de, as placas de XPS colocadas como dispositivo de sombreamento se terem deslocado, o que permitiu a incidência da radiação solar numa área reduzida do envidraçado junto à parte superior e conseqüentemente originou valores elevados de  $T_{sup3}$  em determinados períodos do dia. Esta situação justifica os valores reduzidos nas restantes temperaturas superficiais para a mesma hora do dia e o elevado diferencial entre elas. O diferencial de temperatura máximo entre  $T_{sup3}$  e  $T_{sup1}$  é de 28,87°C e entre  $T_{sup3}$  e  $T_{sup2}$  é de 20,55°C. Durante o período nocturno, os valores das temperaturas superficiais aproximam-se, reduzindo-se bastante o diferencial entre elas.

### 5.2.3.2 Perfil transversal de temperaturas

A recolha dos valores das temperaturas a nível transversal na parede acumuladora permite relacionar os valores obtidos a meia altura da superfície exterior da parede acumuladora ( $T_{sup2}$ ), no interior da parede aproximadamente a meio da sua espessura ( $T_{ip}$ ), e na superfície interior da parede acumuladora ( $T_{sup5}$ ). A relação entre os seus valores retrata, para além da influência das grandezas definidas até ao momento, a existência do sistema de ventilação e do dispositivo de sombreamento, a capacidade de armazenamento de calor da parede acumuladora e o atraso na propagação de calor através desse elemento.

Numa primeira abordagem, verifica-se através da Figura 5.8, que, por um lado, os valores obtidos para as temperaturas ao longo da parede acumuladora apresentam um desenvolvimento semelhante às indicadas anteriormente para as temperaturas no interior da caixa-de-ar e na superfície exterior da parede acumuladora. Por outro lado, facilmente se constata que a temperatura superficial exterior, já analisada anteriormente, apresenta valores muito mais elevados do que as temperaturas no meio da parede e na superfície interior da parede acumuladora. Relativamente à temperatura a meio da parede, a cerca de 17 cm, verifica-se que, considerando todo o período experimental, os valores máximos rondam os 40°C, atingindo um máximo de 42,40°C e um mínimo de 13,42°C. O valor máximo ocorreu no dia 3 de Outubro entre as 20h35min e as 21h40min, período durante o qual foram colocados os primeiros obturadores nas aberturas e não foram activados os dispositivos de sombreamento exteriores. O valor mínimo é referente ao período final do ensaio experimental, mais concretamente no dia 4 de Novembro de 2011 às 13h15min. Apesar de este período corresponder à parede de Trombe não ventilada e à ausência de sombreamentos exteriores, é também caracterizado pela redução das temperaturas do ar exterior e pela diminuição da intensidade de radiação solar, o que justifica o valor baixo obtido. Na superfície interior da parede, atinge-se valores inferiores aos da temperatura no interior da parede acumuladora, cujos valores máximo e mínimo são de 38,54°C e de 11,85°C, respectivamente.

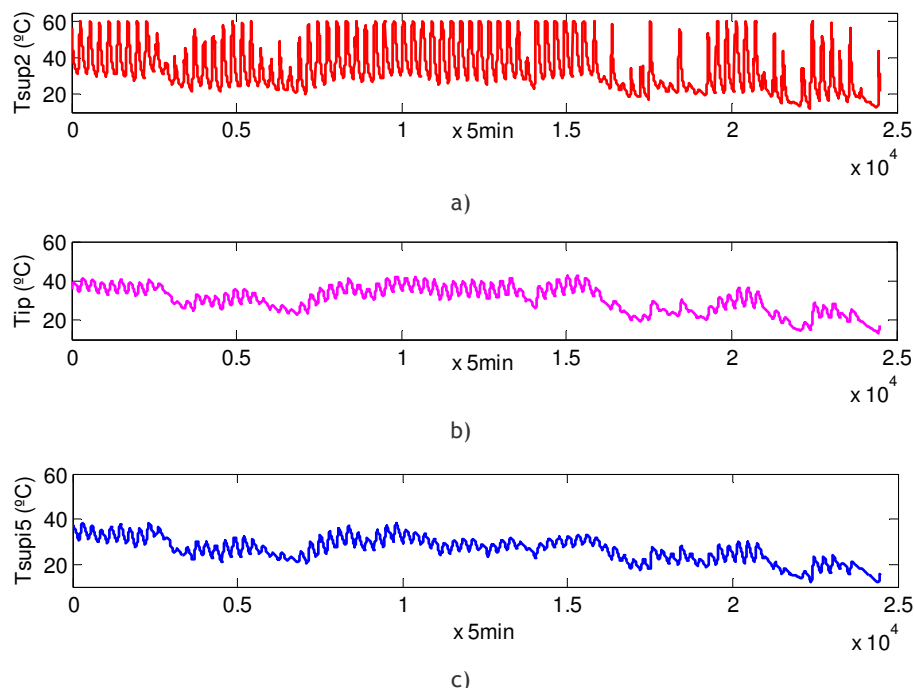


Figura 5.8 - Variação do diferencial de temperaturas medidas ao longo do perfil transversal da parede acumuladora: a) temperatura superficial exterior ( $T_{sup2}$ ); b) Temperatura no interior da parede ( $T_{ip}$ ); c) Temperatura superficial interior ( $T_{supi5}$ ).

No que respeita ao diferencial de temperaturas entre os diversos pontos de análise da parede acumuladora, verifica-se que o valor máximo obtido entre a superfície exterior e a meia espessura da parede é de 42,54°C e o mínimo é de 8,42°C, sendo este último correspondente ao período do ensaio em que a temperatura no interior da parede é maior do que na superfície exterior. Da análise comparativa entre as temperaturas nas superfícies exterior e interior da parede, verifica-se que o diferencial é no máximo de 40,55°C e no mínimo -0,60°C. Observa-se ainda que a diferença entre as temperaturas no interior da parede e na superfície interior apresenta valores bastante mais baixos do que os anteriores, atingindo no máximo 11,03°C e no mínimo -3,70°C. Os valores negativos no diferencial de temperatura indicam a inversão do fluxo de calor, do interior para o exterior, sempre que as temperaturas no interior são superiores às temperaturas na caixa-de-ar, o que se verifica durante o período nocturno (Figura 5.9). Estes valores permitem também concluir que a variação das temperaturas ao longo do perfil transversal da parede acumuladora não é proporcional à espessura da mesma, verificando-se um decréscimo bastante acentuado nos valores quando se transita da superfície exterior para o meio da parede acumuladora. Esta situação justifica-se pelo facto de a superfície exterior da parede ser pintada de preto, o que aumenta a absorção da parede, para além de estar em contacto com um espaço onde ocorre o efeito de estufa. Quanto aos valores das temperaturas na passagem do meio da parede para a superfície interior, o decréscimo é bastante menor e os valores obtidos são condicionados pelas características térmicas da parede acumuladora, nomeadamente a sua inércia térmica e a capacidade de armazenamento do tijolo maciço. Convém ainda referir que os valores obtidos para as temperaturas, principalmente nas camadas superficiais, são também influenciados pelo fenómeno de convecção do ar quando a parede de Trombe é ventilada.

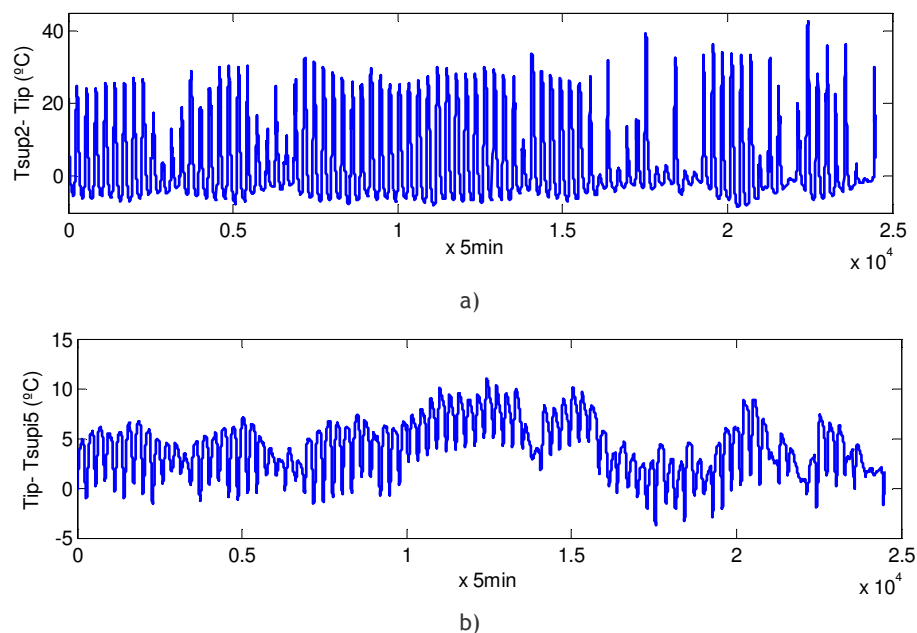


Figura 5.9 - Variação do diferencial entre as temperaturas medidas ao longo do perfil transversal da parede acumuladora: a) diferencial de temperatura  $T_{sup2} - T_{ip}$ ; b) diferencial de temperatura  $T_{ip} - T_{supi5}$ .



### 5.2.3.3 Temperaturas superficiais interiores

O recurso à câmara de termografia permitiu obter termogramas representativos da variação das temperaturas ao longo da superfície interior da parede acumuladora. Serão apresentados alguns dos termogramas recolhidos durante o período experimental para a situação de parede de Trombe ventilada e não ventilada.

No ponto anterior foi apresentada a análise das temperaturas ao longo do perfil transversal da parede acumuladora, em zonas pontuais das suas camadas, correspondentes à localização dos sensores de temperatura. Com base nos termogramas recolhidos é possível analisar o gradiente de temperaturas ao longo da superfície interior da parede acumuladora e junto às aberturas, para diversos períodos do dia e com activação ou não do sistema de ventilação.

Na Figura 5.10 apresenta-se o termograma recolhido às 18h30min do dia 13 de Setembro de 2011, cuja imagem reflecte a estratificação das temperaturas superficiais entre o topo e o meio da parede acumuladora (Figura 5.10) para a situação de parede de Trombe ventilada.

Os valores máximo e mínimo das temperaturas superficiais da parede acumuladora são, respectivamente de 31,90°C e 38,20°C. Pela análise do gradiente de cores, pode concluir-se que a meio da parede, os valores da temperatura rondam os 36,00°C, valores estes que se aproximam do valor de 36,51°C recolhido pelo sensor de temperatura *Tsupi5*. Verifica-se ainda que as temperaturas superficiais aumentam desde o meio até ao topo da parede, dada a proximidade das aberturas de ventilação a partir das quais se dá a passagem de ar quente.

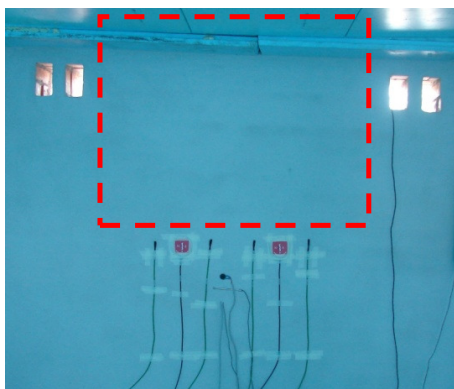


Figura 5.10 - Zona da parede referente ao termograma da Figura 5.11.

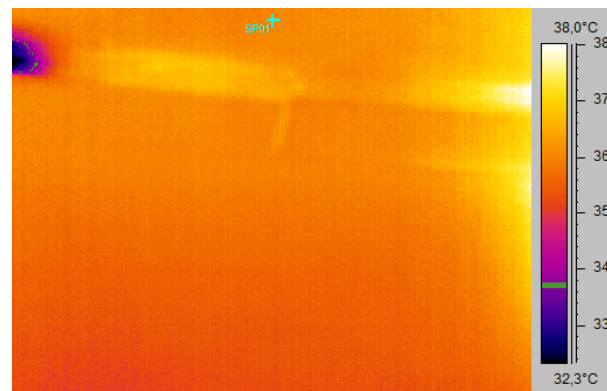


Figura 5.11 - Termograma recolhido às 18h30min do dia 13 de Setembro de 2011.

Nos termogramas apresentados na Figura 5.12 pode analisar-se as temperaturas superficiais junto às aberturas superiores e inferiores recolhidos no mesmo período que o apresentado anteriormente. Da análise dos termogramas relativos às temperaturas superficiais na proximidade das aberturas (Figura 5.12) verifica-se que os valores obtidos para as extremidades esquerda e direita do topo da parede são bastante semelhantes, obtendo-se

valores mínimos e máximos de temperaturas respectivamente de, 34,90°C e 51,30°C, junto às aberturas do lado esquerdo (Figura 5.12a)), e de 35,90°C e 49,20°C, junto das aberturas do lado direito (Figura 5.12b)).

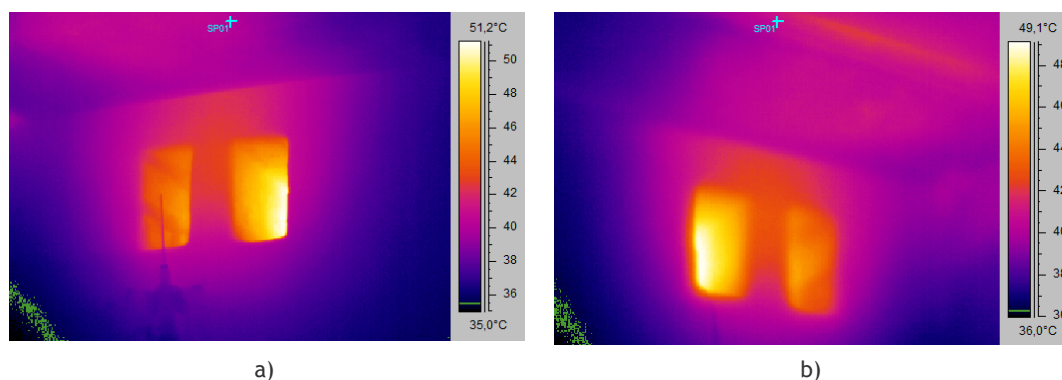


Figura 5.12 - Termogramas recolhidos na proximidade das aberturas superiores, às 18h30min do dia 13 de Setembro de 2011: a) laterais esquerdas; b) laterais direitas.

Da observação da Figura 5.13 referente aos termogramas que abrangem as aberturas inferiores, constata-se que os valores mínimos e máximos das temperaturas superficiais são, respectivamente de, 29,70°C e 35,10°C junto às aberturas do lado esquerdo (Figura 5.13a)), e de 29,30°C e 35°C junto às aberturas do lado direito (Figura 5.13b)), existindo um diferencial bastante significativo entre a base e o topo da parede acumuladora, que corrobora as análises dos diferenciais de temperaturas efectuadas anteriormente para este período.

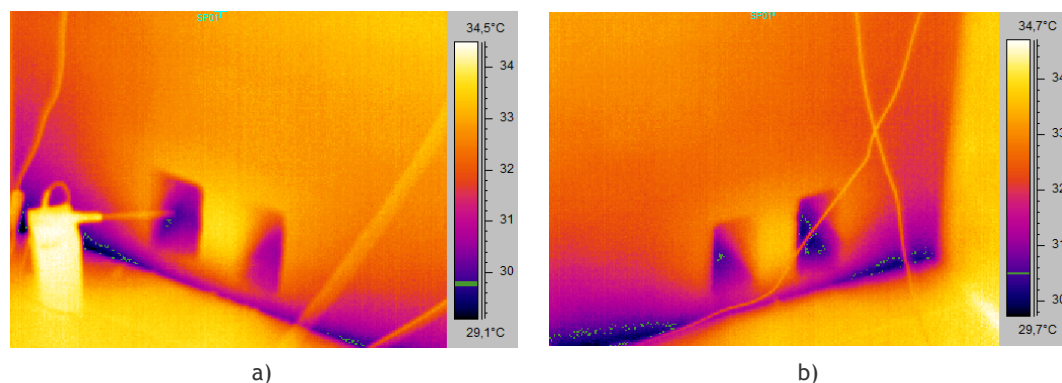


Figura 5.13 - Termogramas recolhidos na proximidade das aberturas inferiores, às 18h30min do dia 13 de Setembro de 2011: a) laterais esquerdas; b) laterais direitas.

Como seria de esperar, os valores das temperaturas aumentam à medida nos aproximamos das aberturas de ventilação, atingindo valores máximos de 51,30°C na abertura da extremidade esquerda e de 34,90°C junto às aberturas laterais direitas. Ainda durante o período experimental da parede de Trombe ventilada, foram recolhidas imagens termográficas para o período da manhã. A Figura 5.14 reflecte a estratificação das temperaturas superficiais da parede acumuladora no dia 14 de Setembro de 2011 às

09h50min. De acordo com a análise termográfica, os valores mínimos das temperaturas superficiais ao longo da parede rondam os 25°C e os máximos os 33°C. Na zona central, o valor da temperatura ronda os 30°C, valor este que está em concordância com o medido pelo sensor de temperatura *Tsupi5*.

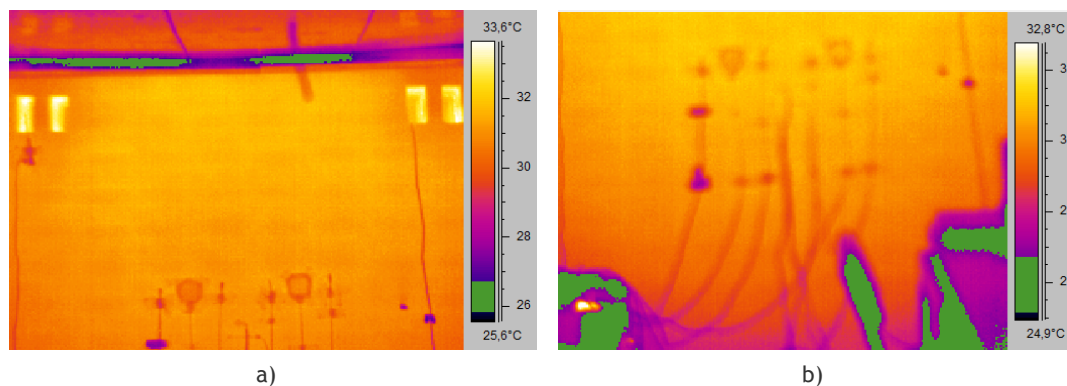


Figura 5.14 - Termogramas recolhidos às 09h50min do dia 14 de Setembro de 2011:a) zona superior da parede acumuladora; b) zona central da parede acumuladora.

No mesmo dia, por voltas das 19h45min foram recolhidos os termogramas apresentados na Figura 5.15 referentes às extremidades esquerda e direita da parede. Da sua observação constata-se que os valores das temperaturas superficiais são mais baixos junto à parte inferior da parede acumuladora, atingindo valores entre os 34°C e os 35°C. No centro da parede, o valor da temperatura superficial aproxima-se dos 37°C, tal como se confirma através do sensor de temperatura *Tsupi5*.

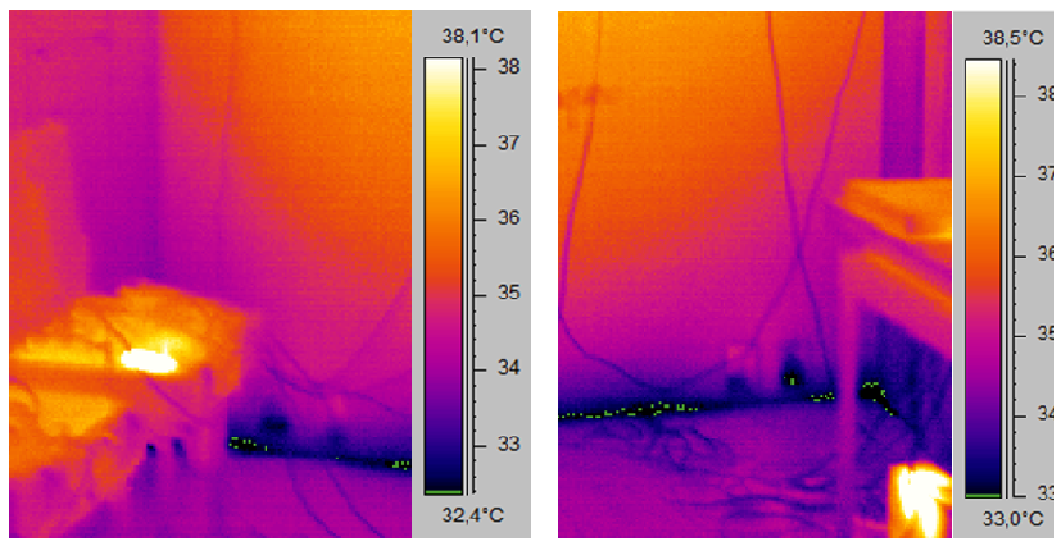


Figura 5.15 - Termogramas recolhidos às 19h45min do dia 14 de Setembro de 2011:a) zona lateral esquerda da parede acumuladora; b) zona lateral direita da parede acumuladora.

No dia 19 de Setembro de 2011 foram também recolhidos alguns termogramas que representam a distribuição da temperatura ao longo da superfície interior da parede

acumuladora quando se colocaram os primeiros obturadores nas aberturas de ventilação. Na Figura 5.16 é possível observar os termogramas recolhidos durante as 11h00min desse dia, junto às aberturas inferiores e superiores, respectivamente. A partir da escala de cores associada a cada termograma verifica-se que, junto à aberturas inferiores (Figura 5.16a)) o valor mínimo da temperatura superficial na parede é de aproximadamente 20°C, aumentando para cerca de 25°C nas proximidades do centro da parede. De acordo com o sensor de temperatura  $T_{supi5}$ , o valor da temperatura para este momento do ensaio é de 24,82°C. Relativamente aos valores das temperaturas na proximidade das aberturas superiores, os valores destas aumentam relativamente às anteriores, rondando, na zona circundante a estas os 30°C (Figura 5.16b)).

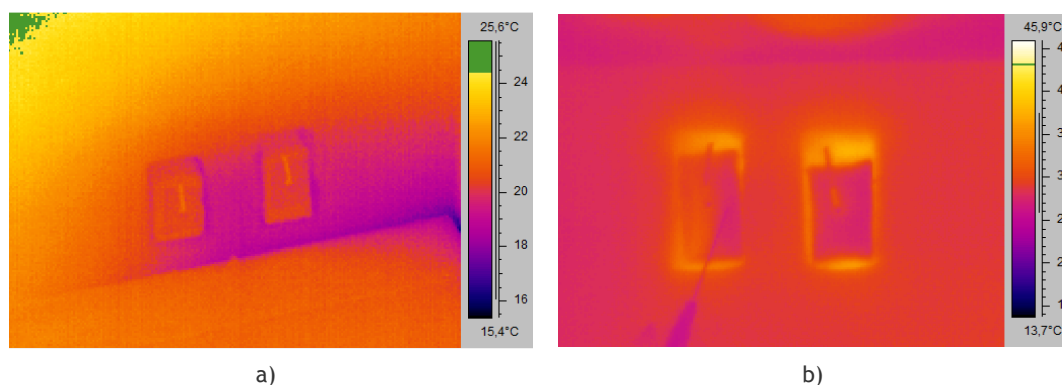


Figura 5.16 - Termogramas recolhidos às 11h00min do dia 19 de Setembro de 2011: a) próximo das aberturas inferiores do lado direito; b) próximo das aberturas superiores do lado esquerdo.

A análise termográfica efectuada permitiu estabelecer um padrão de temperaturas superficiais característico da superfície interior da parede acumuladora, para períodos específicos do ensaio experimental. A comparação dos dados obtidos através dos termogramas como os obtidos através da monitorização contribuem para o conhecimento do desempenho da parede de Trombe e podem ser utilizados posteriormente para dar continuidade aos trabalhos nesta área.

### 5.2.4. Desfasamento na devolução de calor

Para além de se relacionar as temperaturas ao longo da parede é também essencial analisar o efeito da propagação de calor através da parede acumuladora, o que possibilitará em trabalhos futuros otimizar o funcionamento da parede de Trombe em função do contributo que se pretende que esta tenha para o aquecimento ou para o arrefecimento dos edifícios.

Com o objectivo de determinar o tempo de atraso entre algumas das grandezas físicas medidas, calculou-se a correlação,  $R_{yu}^N(\tau)$ , entre os sinais em estudo, aqui designados por  $u(k)$  e  $y(k)$  para as  $N$  amostras de acordo com a expressão:

$$R_{yu}^N(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=\tau}^N y(k) \cdot u(k - \tau) \quad (27)$$

A título exemplificativo ilustra-se na Figura 5.17 dois sinais que foram gerados com o propósito de ilustrar a aplicação desta metodologia na determinação do tempo de atraso entre os dois sinais. A curva a azul ilustra um sinal ( $u$ ) pseudo-aleatório com distribuição normal, com 250 amostras, que foi criado para gerar um outro sinal ( $y$ ) de acordo com a lei:

$$y(c,1) = 3 \cdot *u(c - 10,1)$$

e cujo código é o seguinte:

```
u = randn(250,1);  
  
y = u(1:10,1)  
  
for c=11:250  
  
y(c,1) = 3 * u(c - 10,1)  
  
end
```

em que o sinal  $y$  é uma versão linear com atraso 10 do sinal  $u$ .

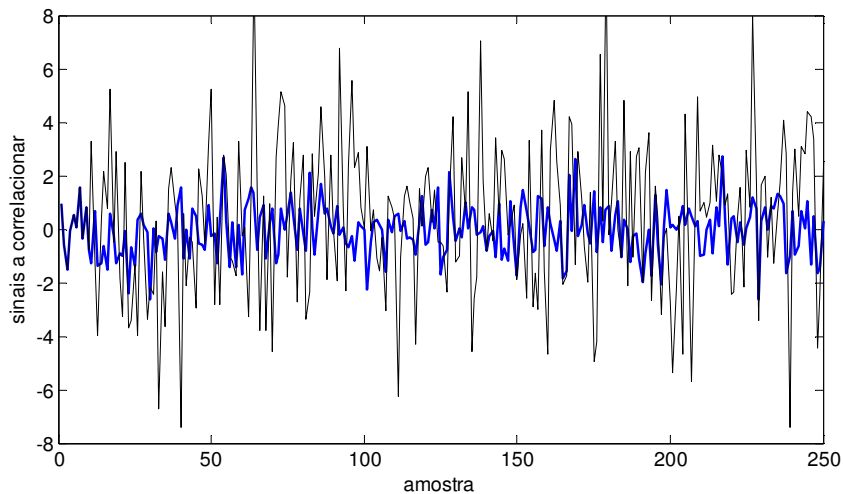


Figura 5.17 - Variação dos sinais  $u$  (a azul) e  $y$  (a preto).

Na Figura 5.18 apresenta-se graficamente o resultado da correlação entre os sinais  $u$  e  $y$ , sendo possível observar-se a existência de um máximo para  $\tau = 10$ , o que, de acordo com a equação (27), corresponde ao valor do atraso entre o sinal de saída  $y$  e o sinal de entrada  $u$ .

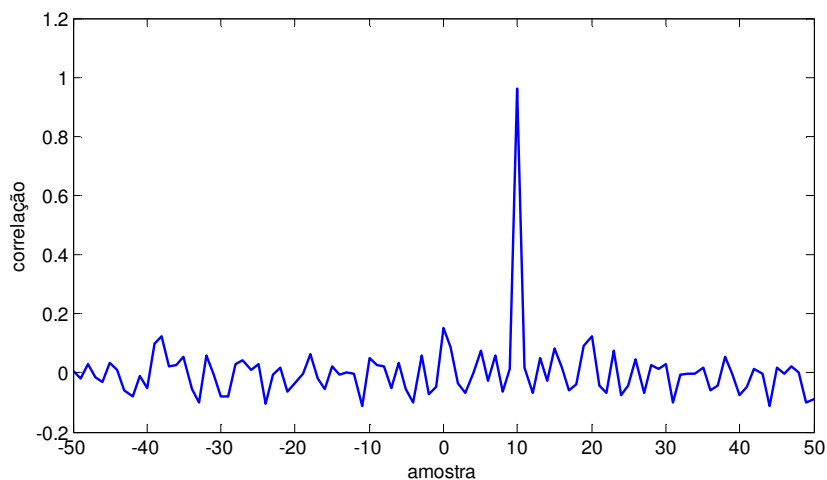


Figura 5.18 - Correlação utilizada na determinação do atraso entre os dois sinais.

Através desta metodologia, efectuou-se o cálculo do atraso na propagação de calor entre a altura em que incide a radiação solar no envidraçado e a altura em que este atinge a superfície interior da parede acumuladora. Esta análise foi efectuada para os dois períodos distintos do ensaio experimental, um deles correspondente à situação de parede de Trombe não ventilada e o outro à de ventilada. Em ambos os casos, o dispositivo de sombreamento não estava colocado. No que respeita à parede de Trombe não ventilada, o atraso na propagação de calor é de cerca de 300 minutos, ou seja, cerca de 5 horas (Figura 5.19). Relativamente à parede de Trombe ventilada, o valor deste desfasamento reduz para 100 minutos, o que corresponde a uma 1h36min, tal como se identifica na Figura 5.20.

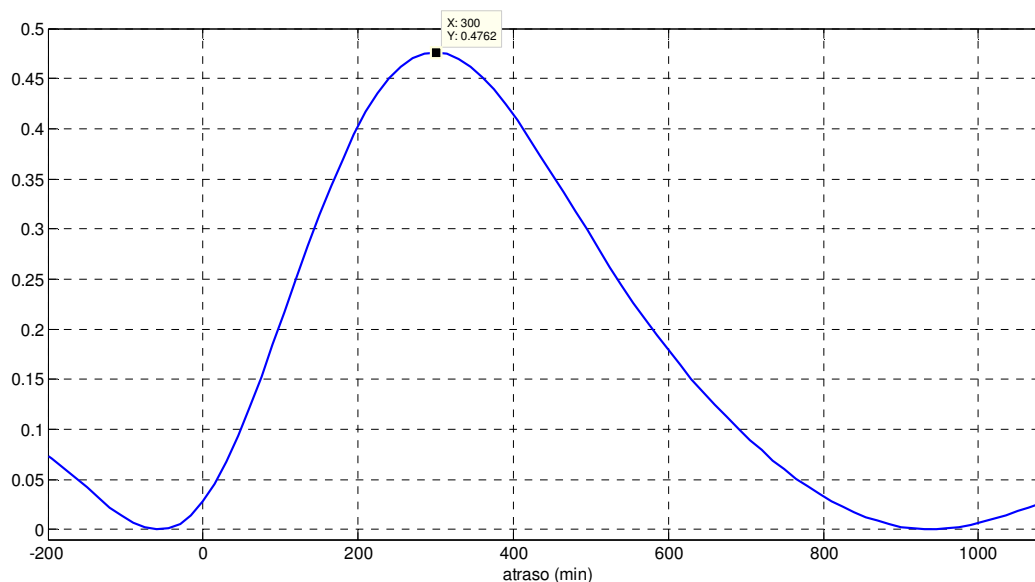


Figura 5.19 - Atraso entre os sinais da radiação solar total e a temperatura superficial interior da parede de Trombe não ventilada.

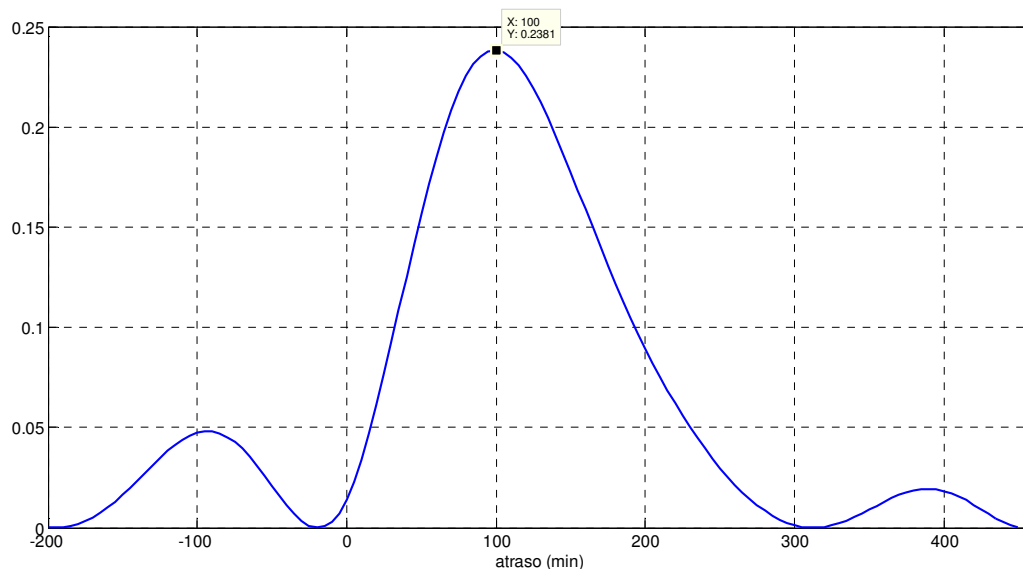


Figura 5.20 - Atraso entre os sinais da radiação solar total e a temperatura superficial interior da parede de Trombe ventilada.

Na primeira situação, a transferência de calor ocorre por condução, radiação e convecção através da parede acumuladora. Na segunda situação, a este fenómeno de transferência de calor acrescenta-se o efeito da convecção do ar através da termocirculação devido à existência de aberturas na parede acumuladora, o que justifica a redução no tempo de desfasamento na devolução de calor ao interior da célula de teste.

O conhecimento desta característica da parede de Trombe permite adaptar a sua constituição e o seu funcionamento à função que se pretende que esta desempenhe no edifício. O valor do desfasamento deve ser ajustado ao período do dia e à estação do ano. Para além das características térmicas do material constituinte da parede acumuladora, o funcionamento do sistema de ventilação desempenha um papel fundamental na optimização do valor do desfasamento, uma vez que o fenómeno de convecção do ar associado à existência de aberturas de ventilação condiciona o armazenamento de ar quente na caixa-de-ar e consequentemente os valores das temperaturas ao longo da parede acumuladora.

### 5.2.5 Temperatura e velocidade do ar nas aberturas de ventilação

#### 5.2.5.1 Variação da temperatura

A influência do sistema de ventilação no desempenho da parede de Trombe tem sido analisada ao longo deste capítulo, para a situação de parede de Trombe ventilada e não ventilada. Foi demonstrado até ao momento, de que forma a existência de aberturas de ventilação na parede acumuladora condiciona os valores das temperaturas obtidas através dos diversos sensores colocados nos diversos pontos dos constituintes da parede de Trombe.

Como se referiu no Capítulo 4, foram colocadas sondas de temperatura pelo interior da célula de teste, junto às aberturas laterais esquerdas, mais concretamente, junto a uma das aberturas superiores e junto a uma das aberturas inferiores. Estas medições foram efectuadas entre as 17h20min do dia 8 de Setembro e as 16h30min do dia 17 de Outubro de 2011. Durante este período, os valores das temperaturas junto às referidas aberturas foram influenciados pela alteração do funcionamento do sistema de ventilação e pela colocação dos dispositivos de sombreamento exteriores, para além das condições climáticas exteriores e das características geométricas e materiais da parede de Trombe.

Na Figura 5.21 é possível observar a variação da temperatura nas aberturas superior e inferior esquerdas, representadas para um período de 11222 amostras, que no período de ensaio experimental se enquadra entre as amostras n.º 8077 e 19299. A variação das temperaturas nas duas aberturas permite analisar, por um lado, o diferencial de temperaturas, e por outro lado, a influência do funcionamento do sistema de ventilação e da colocação dos dispositivos de sombreamento exteriores.

No que respeita ao diferencial de temperaturas, verifica-se que o valor da temperatura na abertura superior assume valores mais elevados do que na abertura inferior, ao longo de praticamente todo o período de análise. Os valores máximos obtidos nas duas aberturas foram respectivamente de 56,60°C e 38,50°C e o mínimo de 16,60°C em ambas as aberturas. O diferencial máximo de temperaturas atingido é de 20,70°C e o mínimo é de -2,70°C, constatando-se que a temperatura na abertura inferior assume, neste último caso, valores superiores aos existentes na abertura superior. Estes valores foram obtidos para situações distintas da parede de Trombe, correspondendo o primeiro à situação de parede de Trombe ventilada às 14h40min do dia 13 de Setembro de 2011 e o segundo à de parede de Trombe não ventilada às 17h00min do dia 19 do referente mês. Em ambas as situações não estava colocado o dispositivo de sombreamento exterior.

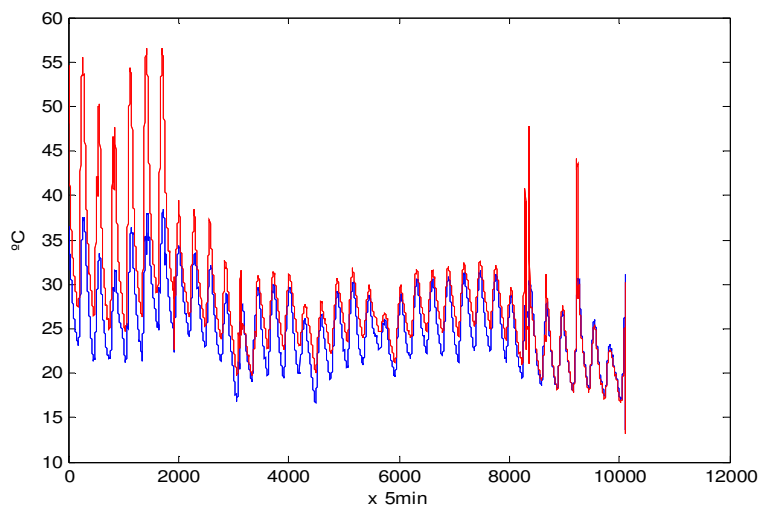


Figura 5.21 - Variação dos valores das temperaturas na abertura superior esquerda (a vermelho) e na abertura inferior esquerda (a azul).



Os valores das temperaturas registados até cerca das 2000 amostras retratam os valores das temperaturas nas aberturas quando a parede de Trombe é ventilada e não existe sombreamentos exteriores. Como se pode constatar o diferencial de temperatura entre as aberturas é bastante elevado, destacando-se do restante período de ensaio. Esta situação deve-se ao movimento de ar quente que ocorre na caixa-de-ar e que, devido ao fenómeno de convecção, atinge o interior da célula de teste através da abertura superior. Estes valores elevados registam-se durante o período diurno, verificando-se que durante o período nocturno, o diferencial entre as duas temperaturas diminui significativamente. Os valores obtidos para as duas temperaturas durante o período nocturno são elevados, rondando os valores mínimos de 21°C nas aberturas inferiores e de 25°C nas superiores.

No período referente às 1209 amostras seguintes, foram colocados os primeiros obturadores nas aberturas de ventilação, em que se constata a aproximação dos valores das temperaturas nas aberturas superior e inferior, cujos valores máximo e mínimo do diferencial são de 5,60°C e de 0,80°C, ainda que na abertura superior ocorram temperaturas do ar ligeiramente superiores. Apesar de o primeiro tipo de obturadores permitir infiltrações de ar, a transferência de calor é essencialmente função das características da parede acumuladora.

Quando se introduz os segundos obturadores e são colocados os dispositivos de sombreamento exteriores, os valores das temperaturas nas aberturas mantêm-se muito próximos. A introdução dos dispositivos de sombreamento contribuiu para o armazenamento do calor acumulado na caixa-de-ar imediatamente antes da sua colocação. A partir desta altura, o calor acumulado na caixa-de-ar foi libertado gradualmente para o interior da célula de teste, o que traduz o efeito da capacidade térmica do material e a capacidade da protecção exterior de impedir o fluxo de calor do interior da célula de teste para o exterior. Nos restantes valores das temperaturas junto às aberturas, para a situação de parede de Trombe não ventilada, destacam-se os picos de temperaturas na abertura superior, visíveis entre as amostras nº 8000 e 10000 na Figura 5.21, que caracterizam o aumento bastante evidente das temperaturas na abertura superior quando se retiram os sombreamentos exteriores.

Nos termogramas apresentados nas Figuras 5.12 e 5.13 é possível observar, para além da estratificação das temperaturas superficiais na parede acumuladora, os valores da temperatura junto às aberturas superior e inferior para diferentes períodos do ensaio experimental. Os valores apresentados nos termogramas anteriores permitem confirmar o diferencial de valores entre as temperaturas nas aberturas, e a sua diminuição quando se colocaram os obturadores nas aberturas de ventilação.

### 5.2.5.2 Velocidade do ar

A velocidade do ar através das aberturas é um parâmetro que influencia o caudal de ventilação e consequentemente o fluxo de calor através da parede de Trombe. Para conhecer a ordem de grandeza dos valores da velocidade do ar através das aberturas e a sua variação,

recorreu-se a um termoanemometro. Com o termoanemómetro foram efectuadas medições no dia 14 de Setembro de 2011 por volta das 12h00min, em nove pontos de cada uma das aberturas superiores e inferiores. Apesar de estas medições não terem sido efectuadas continuamente ao longo do período de ensaio experimental, permitiram obter para aquele instante, a estratificação da velocidade do ar nas diferentes aberturas.

Tendo em conta que os valores obtidos nas oito aberturas eram similares, apesar de nas aberturas inferiores serem ligeiramente inferiores, apresenta-se na Figura 5.22 a variação dos valores da velocidade do ar obtidos na segunda abertura superior do lado esquerdo da parede.

De acordo com os valores medidos, constata-se que os valores da velocidade do ar aumentam, na diagonal, desde a base até ao topo da abertura de ventilação, e os valores variam entre cerca de 0,10 m/s e 0,40 m/s.

Os valores da velocidade do ar através das aberturas permitem obter os valores do caudal de ventilação através das aberturas. Os valores obtidos para o caudal através de um das aberturas variam entre 0,002 m<sup>3</sup>/s e 0,008 m<sup>3</sup>/s para o período considerado.

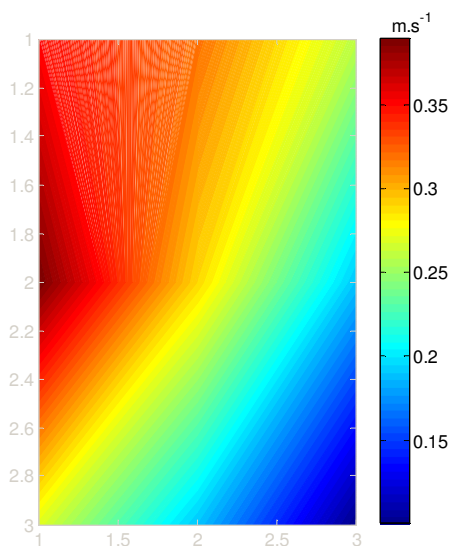


Figura 5.22 - Variação da velocidade do ar na 2ª abertura superior esquerda.

### 5.2.6 Condições climáticas interiores

No que respeita às condições climáticas no interior da célula de teste, a análise dos valores da temperatura interior são fundamentais para perceber a contribuição da parede de Trombe para a sua variação. Na Figura 5.23 pretende-se mostrar a evolução da temperatura no interior da célula de teste,  $T_i$ , representada a vermelho, e da temperatura no exterior,  $T_e$ , representada a azul. A diferença entre estas temperaturas é representada a preto.

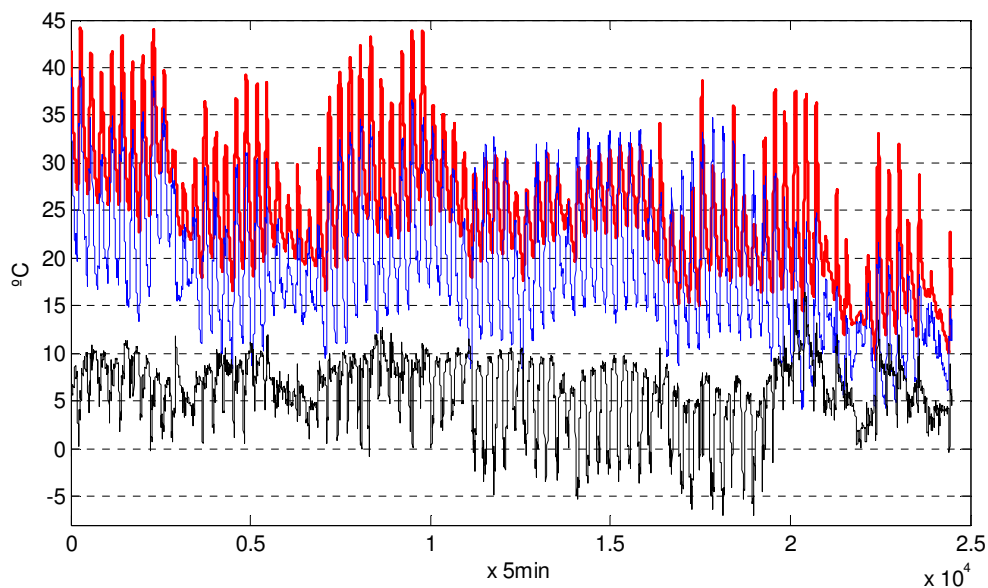


Figura 5.23 - Variação da temperatura do ar no interior da célula de teste,  $T_i$  (a vermelho), do ar exterior,  $T_e$  (a azul) e do diferencial entre as temperaturas  $T_i$  e  $T_e$  (a preto).

Da análise da Figura 5.23 constata-se que o valor de  $T_i$  varia entre os 9,38°C e os 44,08°C, enquanto o valor de  $T_e$  apresenta uma variação entre 4,02°C e 39,73°C. Constata-se assim que no interior, e em grande parte do período de ensaio, a temperatura atinge valores superiores aos obtidos no exterior, quer a nível dos valores mínimos, quer dos máximos. Pode observar-se no entanto, que há dias em que ocorre inversão no sinal da temperatura, ou seja, o valor de  $T_e$  passa a ser superior ao de  $T_i$ . Esta diferença de valores é influenciada pelo comportamento da parede de Trombe perante diversas situações, nomeadamente perante a abertura e fecho do sistema de ventilação e também a colocação de sombreamento exterior.

Tome-se como exemplo, os valores das temperaturas obtidos entre as 17h00min do dia 11 de Agosto de 2011 e as 9h10min do dia 15 de Setembro de 2011, que correspondem aproximadamente às primeiras 10000 amostras, representadas na Figura 5.23. Neste período, os orifícios de ventilação existentes na parede acumuladora estavam abertos, o que levou a que os valores de  $T_i$  fossem sempre superiores aos valores de  $T_e$ . Neste período o valor de  $T_i$  chegou a superar o valor de  $T_e$  em 12,79°C, e o valor médio do diferencial entre as duas temperaturas atingiu os 7,29°C. O valor máximo do diferencial de temperatura entre  $T_i$  e  $T_e$  é de cerca de 8°C entre as 2h00min e as 7h00min. Entre as 9h45 e as 11h15min do dia 12 de Agosto de 2011, a diferença entre as temperaturas é quase nula ou inferior a 1°C. Os valores mais elevados do diferencial ocorrem durante o período da tarde, entre as 13h00min e as 16h00min, ou durante a noite e madrugada, em que  $T_i$  apresenta valores superiores a  $T_e$  em aproximadamente 11°C.

A colocação do primeiro tipo de obturadores nas aberturas de ventilação, que permitiam a passagem de alguma quantidade de ar, ocorreu entre as 9h15min do dia 15 de Setembro e as 14h00min do dia 19 de Setembro. A sua colocação permitiu concluir que a temperatura no interior continuava a ser mais elevada, em média, cerca de 7°C, do que a existente no exterior. Esta situação deve-se ao facto de ocorrer ainda uma transferência de calor por convecção através das aberturas significativa, dado que as aberturas de ventilação não se encontravam totalmente obstruídas. Aquando da colocação do segundo tipo de obturadores, em que não existia passagem de calor por efeito de termocirculação, verifica-se inversão no sinal das temperaturas, ou seja, o valor de  $T_e$  assume valores superiores a  $T_i$ . Esta situação é observável na figura anterior no período entre as amostras nº 11200 e as 16000. Neste período, a diferença entre as duas temperaturas, é em média, 4,96°C, sendo que a temperatura no exterior pode atingir no máximo mais 5,38°C do que a ocorrida no interior.

A colocação de sombreamentos pelo exterior também contribuiu para os valores obtidos na temperatura interior e conseqüentemente para o diferencial entre esta e a temperatura exterior. A partir do dia 4 de Outubro de 2011 às 16h30m, foi introduzido o sombreamento, combinado com a abertura ou fecho do sistema de ventilação.

Por exemplo, no período entre as 13h25m do dia 7 de Outubro e as 16h40m do dia 10 do mesmo mês, os orifícios de ventilação permaneceram fechados e foram colocadas as placas de isolamento térmico pelo exterior. Nesta altura verificou-se que, no primeiro dia,  $T_i$  assume valores superiores a  $T_e$  mas a diferença entre eles vai diminuindo, até que cerca das 12h00min do dia seguinte,  $T_e$  passa ser superior a  $T_i$  até ao final da tarde. A partir desta altura,  $T_i$  volta a ser superior a  $T_e$ , mas o diferencial vai diminuindo até às 10h00min do dia seguinte, voltando  $T_e$  a ser superior até ao final da tarde. Nos períodos em que  $T_i$  é superior a  $T_e$  a diferença entre eles pode atingir os 10°C, o que se verifica durante a noite e que permite concluir que a existência do sombreamento colocado pelo exterior e o facto de o sistema de ventilação estar fechado evita que haja inversão do fluxo de calor, do interior da célula de teste para o ambiente exterior. Na situação em que  $T_e$  se apresenta superior a  $T_i$ , a diferença entre eles atinge os 6,45°C e corresponde à altura do dia, em que a colocação de isolamento pelo exterior reduz a transferência de calor por condução.

No período entre as 19500 e as 23900 amostras, verifica-se através da figura, que os valores de  $T_i$  voltam a ser bastante superiores aos de  $T_e$ . Esta situação ocorre entre os dias 18 de Outubro e 2 de Novembro de 2011 em que as aberturas permanecem fechadas e não está colocado o sombreamento exterior. Os valores de  $T_i$  chegam a ser superiores a  $T_e$  em 16°C, mas no período em que a situação se inverte  $T_e$  apenas supera  $T_i$  em 1,42°C no máximo. Durante a noite, a temperatura no interior é superior à existente no exterior cerca de 9°C. Estes valores demonstram a capacidade da parede de Trombe em armazenar o calor durante o dia e em libertá-lo durante a noite. Apesar de durante a noite não ter sido colocado o

dispositivo de obstrução, o facto de os orifícios de ventilação permanecerem fechados reduziu a transferência de calor do interior para o exterior.

### 5.2.7 Fluxo de calor através da parede de Trombe

Neste ponto será apresentada uma análise global dos resultados obtidos experimentalmente, cuja descrição foi efectuada de forma detalhada nos pontos anteriores. Será também introduzida nesta análise uma das grandezas físicas medidas experimentalmente, que se trata do fluxo de calor através da parede de Trombe. Na Figura 5.24 apresenta-se a variação do fluxo de calor medido durante o período experimental.

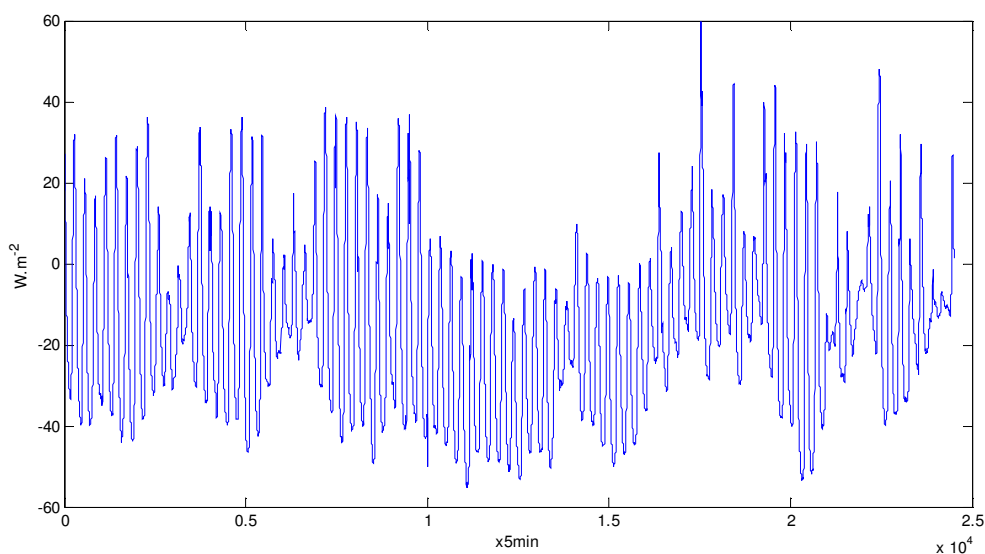


Figura 5.24 - Variação do fluxo de calor através da parede de Trombe.

A relação entre esta grandeza e as restantes medidas durante a fase experimental será detalhada para o período de ensaio entre as 15000 e as 20000 amostras (Figura 5.25). Para este período de amostragem são apresentadas as condições climáticas exteriores e interiores. A influência do funcionamento do sistema de ventilação e da colocação dos dispositivos de sombreamento é também analisada.

Na Figura 5.25 são apresentados, para o referido período de amostragem, os valores do fluxo de calor médio resultante dos valores medidos pelos termofluxímetros *HF1* e *HF2*, os valores da radiação solar total incidente *RS* e os valores da temperatura exterior *Te*. Incluem-se também os valores da temperatura superficial exterior a meio da parede acumuladora medidos através do sensor *Tsup2* e os valores da temperatura superficial interior média da parede acumuladora obtidos através dos sensores de temperatura *Tsupi1* e *Tsupi3*, associados aos termofluxímetros.

O funcionamento do sistema de ventilação está identificado em percentagem, correspondendo o valor de 100% à situação em que os orifícios de ventilação se encontram totalmente abertos. No que respeita aos dispositivos de sombreamento exteriores, a percentagem de 100% significa que foram colocadas as placas de XPS pelo exterior. É também apresentada a variação da temperatura no interior da célula de teste,  $T_i$ , resultante dos efeitos acima mencionados. Os valores apresentados na Figura 5.25 correspondem ao período de ensaio entre as 18h15min do dia 2 e as 02h55min do dia 20 de Outubro de 2011.

Da análise da Figura 5.25, constata-se que os valores do fluxo de calor através da parede de Trombe apresentam bastantes oscilações, quer em termos de valor máximo atingido, quer em termos de sentido. No início do período em análise, definido entre as 18h25min do dia 2 e as 16h25min do dia 4 de Outubro de 2011, o valor do fluxo de calor assume valores negativos e elevados, atingindo o valor máximo de  $-50,11 \text{ W/m}^2$  e o mínimo de  $-2,93 \text{ W/m}^2$ , e valores positivos muito reduzidos. O sinal negativo deve-se ao facto de o fluxo de calor se efectuar do exterior para o interior da célula de teste.

Neste período, o sistema de ventilação encontra-se fechado e não está colocado o dispositivo de sombreamento. Desde as 18h15min do dia 2 até por volta das 7h00min do dia 3 de Outubro de 2011, a diferença entre as temperaturas exterior,  $T_e$ , e a temperatura interior,  $T_i$ , vai aumentando gradualmente, verificando-se que  $T_i$  ultrapassa  $T_e$  até  $9,76^\circ\text{C}$  no máximo, valor este que ocorre durante a madrugada. A partir das 7h00min, o diferencial entre as duas temperaturas vai diminuindo, e a partir das 11h25min,  $T_e$  aumenta, tornando-se superior a  $T_i$ , atingindo o valor máximo do diferencial em  $3,39^\circ\text{C}$  por volta das 13h40min. A partir deste momento,  $T_e$  volta a diminuir, repetindo-se o processo anteriormente descrito.

O funcionamento da parede de Trombe neste período não pode ser individualizado dos fenómenos ocorridos durante o período antecessor, caracterizado pelo facto de a parede de Trombe ser ventilada e não existir dispositivo de sombreamento exterior. Esta situação potencia a acumulação de calor no interior do compartimento devido à passagem de calor através das aberturas de ventilação, o que influencia o fluxo de calor no período seguinte. O valor elevado da temperatura superficial exterior da parede acumuladora é justificativo do sucedido, uma vez que os valores acima dos  $60^\circ\text{C}$  são uma continuidade dos valores obtidos no período em que a parede de Trombe era ventilada.

No que respeita à relação entre a temperatura superficial interior da parede acumuladora e a temperatura interior, os valores máximos atingidos em cada uma delas, mantêm-se bastante próximos. À situação de parede de Trombe não ventilada, acrescenta-se o efeito da colocação do sombreamento exterior, entre o dia 4 de Outubro às 16h30min e as 14h35min do dia 5 do mesmo mês, o que conduz a uma redução do fluxo de calor durante o período nocturno, ainda que pouco significativa.

A partir da amostra nº 16039, é analisado o desempenho térmico da parede de Trombe não ventilada, sob influência da existência ou não de sombreamentos exteriores. Neste período destacam-se os valores mais elevados do fluxo de calor, em que os dois picos correspondentes ao valor máximo positivo são registados quando não está colocado o dispositivo de sombreamento pelo exterior. Este período situa-se entre as amostras nº 17286 e 18632, e corresponde às medições efectuadas entre os dias 10 e 15 de Outubro de 2011. O fluxo de calor atinge o valor máximo positivo de  $57,60 \text{ W/m}^2$  às 14h20min do dia 11 de Outubro e o mínimo negativo de  $-28,50 \text{ W/m}^2$  às 7h40min do dia 12 de Outubro de 2011.

A influência da colocação dos dispositivos de sombreamento é visível de uma forma bastante significativa nos valores da temperatura superficial exterior da parede acumuladora, que ultrapassam o valor dos  $60^\circ\text{C}$ , quando estes estão ausentes. Quando estes estão colocados, os valores de  $T_{sup2}$  reduzem-se para valores inferiores a  $30^\circ\text{C}$ . Estas diferenças destacam-se também nos valores da temperatura superficial interior da parede acumuladora e da temperatura interior, sendo mais significativas nos valores de  $T_i$ , verificando-se que este assume o valor máximo de  $38,65^\circ\text{C}$  para o valor máximo de fluxo de calor indicado anteriormente.

No período nocturno, aquando da colocação do dispositivo de sombreamento, os valores mínimos de  $T_i$  rondam os  $20^\circ\text{C}$ , mais próximo do período da madrugada, o que se mostra benéfico na garantia do conforto interior da célula de teste.

A análise da variação do fluxo de calor contribui para o conhecimento do desempenho da parede de Trombe, na medida em que demonstra como esta se comporta perante os diversos factores que a influenciam e permite conhecer a forma como esta influencia as condições climáticas interiores da célula de teste.

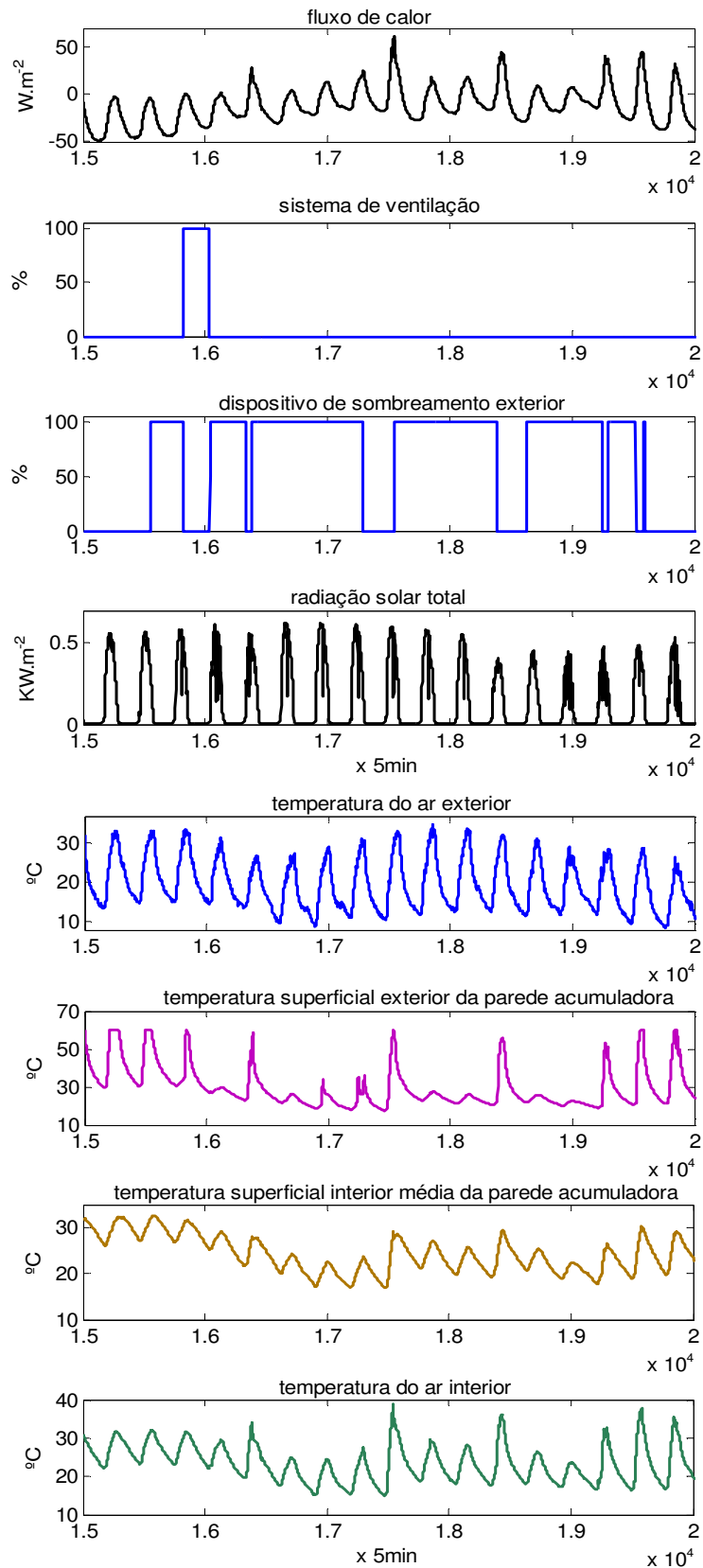


Figura 5.25 - Variáveis influenciadoras do desempenho da parede de Trombe.



### 5.3 Conclusões

A análise dos valores obtidos para as diversas grandezas medidas durante o trabalho experimental contribuiu para o conhecimento do desempenho térmico da parede de Trombe sujeita a condições climáticas reais. Durante esta análise, para além da influência das condições climáticas exteriores, foi também contabilizado o efeito do funcionamento do sistema de ventilação e da colocação dos dispositivos de sombreamento pelo exterior.

Este estudo permitiu concluir que estas variáveis influenciam de forma significativa o comportamento térmico da parede de Trombe e consequentemente os valores das temperaturas no interior da célula de teste. Esta influência é visível na variação dos valores do fluxo de calor através da parede de Trombe, obtidos nos diferentes períodos do trabalho experimental, bem como através dos valores das temperaturas medidas em diversos pontos dos seus constituintes.

A título exemplificativo, apresenta-se na Figura 5.26 os diagramas de temperaturas que caracterizam a variação da temperatura ao longo da parede de Trombe, bem como as temperaturas exteriores e interiores obtidas para três horas distintas do dia, e para as diversas situações de funcionamento do sistema de ventilação e do dispositivo de sombreamento exterior. A apresentação destes diagramas de temperaturas retrata o comportamento típico da parede de Trombe nas diferentes situações analisadas neste capítulo.

A ausência de controlo do funcionamento da parede de Trombe nas diversas situações permitiu analisar a transferência de calor através do sistema e a contribuição do fenómeno de convecção natural no seu funcionamento.

A análise do comportamento térmico da parede de Trombe durante um dia da estação de arrefecimento permitiu concluir que o fecho do sistema de ventilação e a colocação dos dispositivos de sombreamento são fundamentais durante o dia para reduzir os ganhos solares através da parede de Trombe. Durante a noite, a parede de Trombe deve ser ventilada e os dispositivos de sombreamento abertos para permitir a circulação do ar quente do interior para o exterior, e reduzir as temperaturas elevadas no interior do compartimento.

Concluiu-se também que, no caso da parede de Trombe não ventilada, os valores das temperaturas na caixa-de-ar são mais elevados do que no caso da parede de Trombe ventilada. Esta situação deve-se à existência do efeito de estufa na caixa-de-ar, que contribui para a aumento das temperaturas superficiais na parede acumuladora, e cujos valores ultrapassam os 60°C, podendo ser superiores às temperaturas na camada de ar em cerca de 10°C.

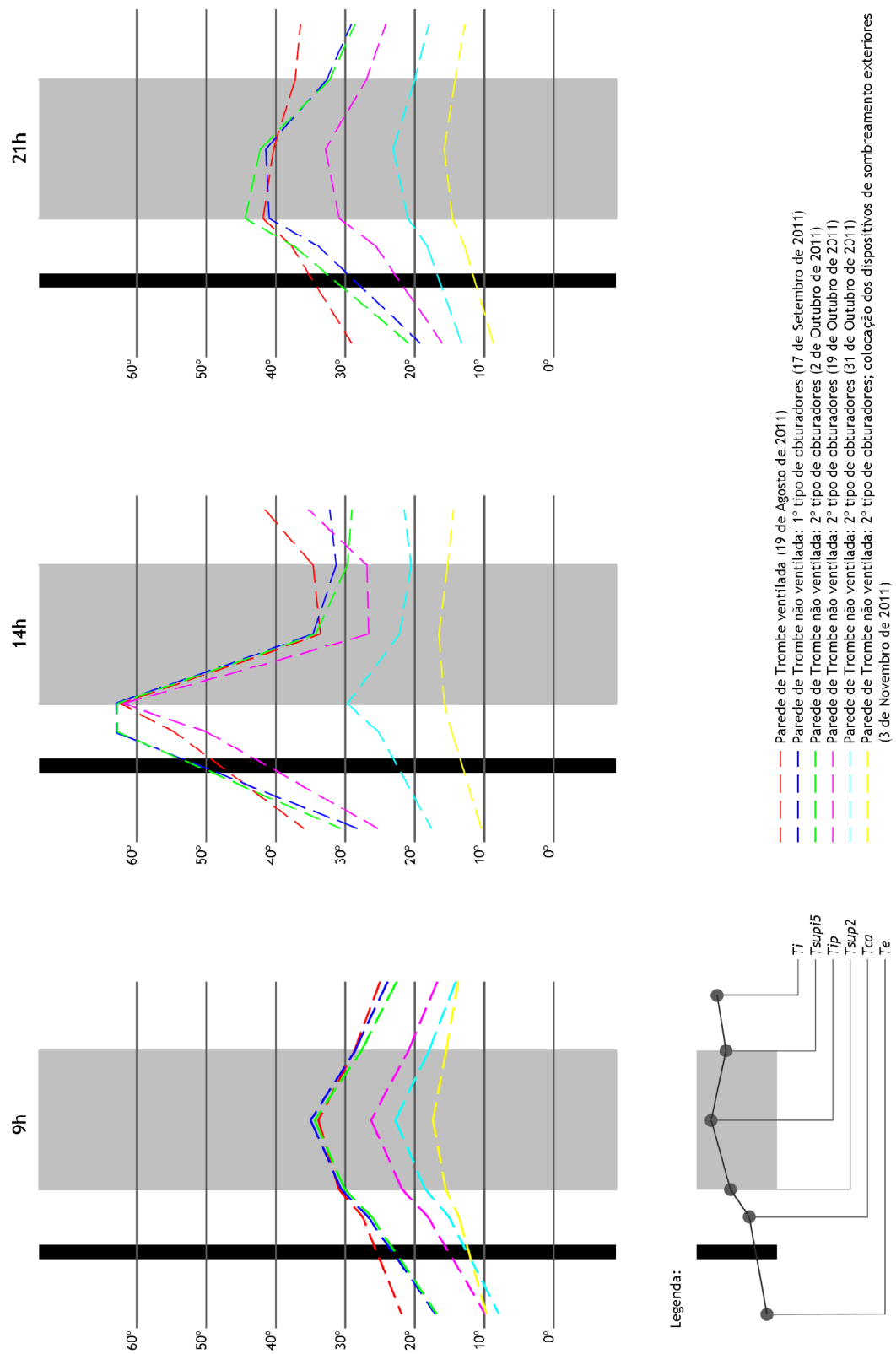


Figura 5.26 - Diagrama de temperaturas na parede de Trombe.

O estudo do comportamento térmico da parede de Trombe na estação de aquecimento mostrou que a existência do sistema de ventilação é essencial para aumentar os ganhos solares e, por consequência, a importante contribuição deste sistema passivo para o aquecimento do espaço interior. Este deve permanecer aberto durante o dia para permitir a circulação de ar quente e deve ser fechado durante a noite para impedir a inversão do fluxo de ar quente do interior para o exterior. Apesar de com o sistema de parede de Trombe não ventilada se conseguir obter temperaturas interiores a rondar os 20°C de temperatura de conforto, os resultados obtidos permitem confirmar que a ventilada é mais eficaz.

O dispositivo de sombreamento exterior é essencial para manter a temperatura no interior da célula de teste e para reduzir o fluxo de calor através da parede de Trombe.

A análise apresentada neste capítulo permitiu também colmatar algumas lacunas no conhecimento do desempenho da parede de Trombe, nomeadamente as existentes ao nível da estratificação das temperaturas na caixa-de-ar, na parede acumuladora e nas aberturas de ventilação.

O desfasamento na devolução de calor foi também analisado, tendo-se concluído que no caso da parede de Trombe não ventilada, a libertação de calor para o interior da célula de teste é muito mais tardia do que no caso de esta ser ventilada.

Os resultados experimentais apresentados neste capítulo serão utilizados na aplicação da metodologia de cálculo dinâmico do desempenho térmico da parede de Trombe apresentada no Capítulo 6.



## Capítulo 6

# Cálculo do Desempenho Térmico da Parede de Trombe



## Capítulo 6

# Cálculo do Desempenho Térmico da Parede de Trombe

### 6.1 Introdução

A instrumentação e a monitorização da célula de teste apresentadas no capítulo anterior permitiram a obtenção de valores das várias grandezas físicas associadas ao comportamento térmico da parede de Trombe, quando sujeita às condições climáticas da cidade de Vila Real.

Os resultados obtidos durante o trabalho experimental foram utilizados na aplicação da metodologia de cálculo do desempenho térmico da parede de Trombe, apresentada no Capítulo 4, baseada na Norma ISO 13790:2008 [6] e na adaptação deste documento à realidade portuguesa, efectuado por Martins [5].

O carácter dinâmico atribuído à metodologia de cálculo definida neste trabalho implicou a adaptação das expressões de cálculo estático da metodologia de base.

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através da implementação desta metodologia, recorrendo ao programa de simulação MatLab, bem como as simplificações efectuadas para garantir a aplicabilidade dos modelos de simulação dinâmicos que foram implementados.

A aplicação desta metodologia contribuirá para o conhecimento da variação do comportamento dinâmico dos ganhos solares e das perdas de calor através deste elemento solar passivo, referente ao período de realização do ensaio experimental. Permitirá também analisar, de modo dinâmico, a influência das diversas formas de transferência de calor no desempenho térmico da parede de Trombe, nomeadamente da transmissão de calor por condução e por convecção do ar através das aberturas de ventilação.

### 6.2 Implementação da metodologia de cálculo no programa de simulação MatLab

#### 6.2.1 Condições de aplicação

Neste ponto apresentam-se as adaptações que foram necessárias efectuar na metodologia de cálculo do desempenho da parede de Trombe para possibilitar a sua análise dinâmica.

A primeira adaptação foi efectuada na determinação da transferência de calor através do envidraçado da parede de Trombe. Um dos parâmetros contabilizados é o fluxo de calor devido aos ganhos solares, que depende da área efectiva da parede de Trombe,  $A_{sol,k}$ , que por sua vez, é função do parâmetro  $\omega$ , parâmetro este que representa o factor de utilização dos ganhos solares. Tendo em conta que este valor depende da relação entre os ganhos solares,  $Q_{g,sw}$ , e as perdas de calor da camada de ar, entre o vidro e a parede acumuladora, para o exterior,  $Q_{ht,al}$ , identificado pelo parâmetro  $\gamma_{al}$ , foi necessário reduzir o número de amostras, eliminando aquelas em que a parcela  $Q_{ht,al}$  assume os valores nulos. Assim, os resultados experimentais incluídos no cálculo referem-se aos períodos de ensaio em que a temperatura na camada de ar é superior à do ar exterior, o que constitui uma perda, dado o sentido do fluxo de calor se efectuar da caixa-de-ar para o exterior.

Ainda no que se refere à expressão de cálculo das perdas,  $Q_{ht,al}$ , foi necessário efectuar algumas alterações, no que respeita ao valor do coeficiente de transmissão térmica do envidraçado,  $U_e$ . Este parâmetro pode assumir dois valores diferentes, durante o período de análise, em função da existência ou não de dispositivos de sombreamento exteriores. Foi portanto necessário incluir esta variação ao longo do período analisado, quer na expressão de  $Q_{ht,al}$ , bem como em todas as outras expressões que o utilizam.

Para calcular o valor do factor solar,  $g_p$ , foi também necessário definir os intervalos de variação em função da activação do dispositivo de sombreamento exterior.

No cálculo do caudal de ventilação,  $q_{ve,sw}$ , foram restringidas as amostras a incluir na sua análise, de tal forma que não fossem obtidos diferenciais de temperatura negativos na aplicação da sua expressão. Pois segundo o método usado só devem ser contabilizados os caudais que passam para o interior da célula de teste. Isto significa que o cálculo só deve ser efectuado para os períodos em que o valor da temperatura no interior da célula de teste,  $T_i$ , apresenta valores superiores aos da temperatura na caixa-de-ar,  $T_{ca}$ .

No que respeita ao cálculo dos ganhos solares por transferência de calor através da parede de Trombe, algumas das simplificações referidas anteriormente são aqui aplicáveis, nomeadamente no que respeita ao cálculo dos parâmetros incluídos na expressão de cálculo da transferência de calor por convecção através das aberturas de ventilação, designado por  $\Delta H$ .

Estas condições de aplicação da metodologia de cálculo limitaram o número de amostras obtidas durante o período experimental, tendo sido utilizadas 21725 das 24496 amostras. Estas adaptações de cálculo foram realizadas no sentido de tornar válidos os intervalos de aplicação das diversas expressões matemáticas quando aplicadas com carácter dinâmico.



## 6.2.2 Análise dos resultados obtidos

Os resultados obtidos da aplicação da metodologia de cálculo do desempenho térmico da parede de Trombe são analisados em seguida, nomeadamente diversas grandezas físicas associadas à determinação da transferência de calor através do envidraçado e da parede acumuladora, tal como os ganhos solares e as perdas de calor, tendo em conta a influência do funcionamento do sistema de ventilação e a colocação dos dispositivos de sombreamento.

### 6.2.2.1 Transferência de calor através do envidraçado

Os resultados obtidos da aplicação da metodologia de cálculo do desempenho térmico da parede de Trombe são analisados em seguida, nomeadamente diversas grandezas físicas associadas à determinação da transferência de calor através do envidraçado e da parede acumuladora, tal como os ganhos solares e as perdas de calor, tendo em conta a influência do funcionamento do sistema de ventilação e a colocação dos dispositivos de sombreamento.

#### 6.2.2.1.1 Ganhos solares

Da observação da Figura 6.1 verifica-se que a variação dos ganhos solares  $Q_{g_{n,sw}}$  é função da intensidade de radiação solar total incidente na parede de Trombe, uma vez que a área da parede de Trombe é constante, sendo visível a proporcionalidade directa entre a variação de  $Q_{g_{n,sw}}$  e a variação de  $RS$  apresentada na Figura 5.1.

Os resultados obtidos permitem concluir que durante os períodos de maior intensidade da radiação solar total incidente, correspondente aos dias da estação de arrefecimento obtêm-se valores dos ganhos solares que ultrapassam os 2000 W, o que se traduz em ganhos solares de cerca de 143 W/m<sup>2</sup> de área da célula de teste. Verifica-se ainda, através da Figura 6.1. que nos dias finais do período de análise, correspondente a dias da estação de arrefecimento, os valores dos ganhos solares diminuem, devido à diminuição da intensidade de radiação solar total que caracteriza esta época do ano.

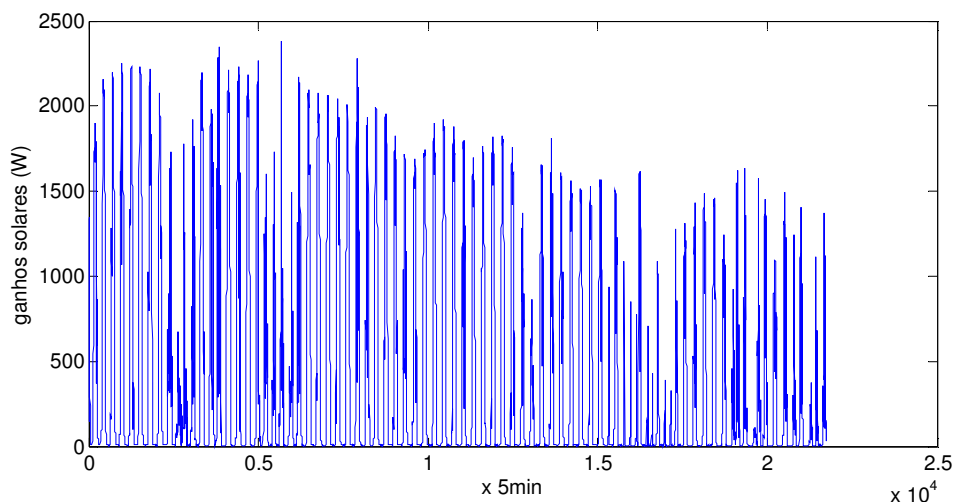


Figura 6.1 - Variação dos ganhos solares,  $Q_{g_{n,sw}}$ , através da parede de Trombe.

### 6.2.2.1.2 Perdas de calor

No que respeita ao cálculo das perdas de calor através do envidraçado,  $Q_{ht,al}$ , que ocorrem sempre que a temperatura do ar na caixa-de-ar é superior à do ar exterior, verifica-se que estas são influenciadas pelo funcionamento do sistema de ventilação e pela existência dos dispositivos de sombreamento exteriores.

No gráfico da Figura 6.2 é visível a variação das perdas de calor em função dessas modificações no funcionamento da parede de Trombe. Entre o início do período da análise e cerca das 10000 amostras, verifica-se que as perdas de calor atingem o máximo de 400 W durante o dia. Estes valores são obtidos para a situação em que a parede de Trombe é ventilada e não estão colocados dispositivos de sombreamento pelo exterior. Comparando os resultados apresentados na Figura 6.2 com os da Figura 6.1, verifica-se que neste período os ganhos solares ultrapassam os valores das perdas de calor através do envidraçado.

No período entre as 10000 e as 15000 amostras, o valor de  $Q_{ht,al}$  aumenta, uma vez que foram colocados obturadores nas aberturas de ventilação, o que fez com que aumentasse a temperatura na caixa-de-ar, apresentando valores muito mais elevados do que no exterior.

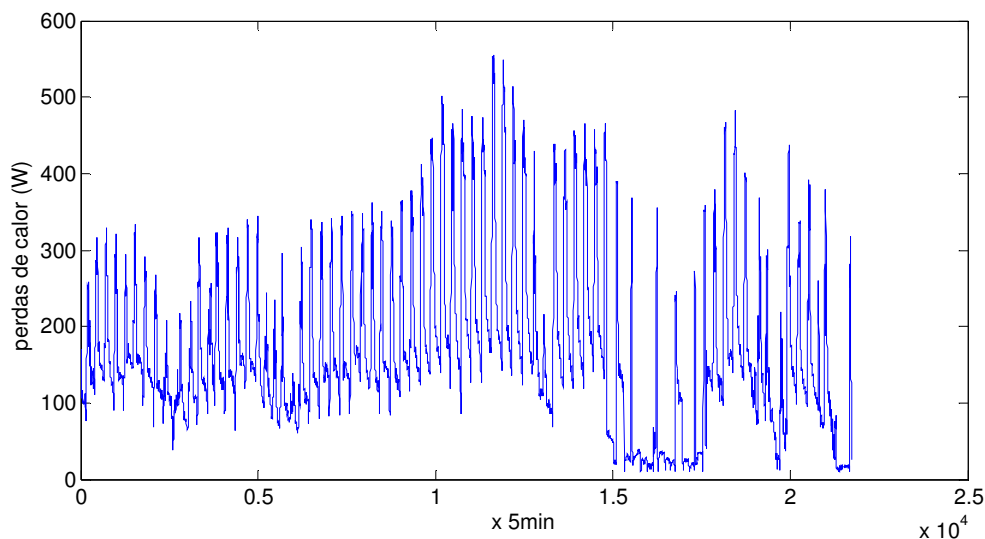


Figura 6.2 - Variação das perdas de calor,  $Q_{ht,al}$ , através do envidraçado.

Os valores mais baixos das perdas de calor correspondem ao período representado na Figura 6.2 entre cerca das 15000 e das 17500 amostras. Esta situação deve-se ao facto de durante este período os orifícios de ventilação estarem fechados e de se haver alternância na colocação dos dispositivos de sombreamento.

Verifica-se que a colocação do dispositivo de sombreamento exterior durante o período nocturno reduziu em muito as perdas de calor para o exterior, sendo quase nulas, quando comparadas com a ordem de grandeza dos restantes valores obtidos. Neste período, o facto

de ter havido diminuição da radiação solar incidente também contribuiu para a diminuição dos ganhos solares e das perdas de calor.

A partir desta altura até ao final do período em análise, os valores obtidos representam a variação das perdas de calor pelo envidraçado da parede de Trombe não ventilada sujeita à variação do funcionamento dos sombreamentos exteriores. O aumento dos valores das perdas de calor neste último período foi devido ao facto de dispositivos de sombreamento exteriores não estarem colocados. Neste período o valor das perdas de calor aumentou durante a noite, que mostra que durante estes dias da estação de aquecimento, os sombreamentos exteriores deveriam estar activados.

Estes resultados mostram que o sistema de ventilação e a existência de sombreamentos exteriores influencia de forma significativa o valor das perdas de calor, pelo que o seu período de funcionamento deve ser adequadamente ajustado de modo automático para as diferentes situações apresentadas.

### 6.2.2.1.3 Factor de utilização dos ganhos solares

A partir da relação entre os valores de  $Q_{g,n,sw}$  e  $Q_{ht,al}$  obtém-se o valor do parâmetro  $\gamma_{al}$ , cujo cálculo permite a obtenção do parâmetro  $\omega$ . O parâmetro  $\omega$  irá afectar o valor da área efectiva da parede de Trombe,  $A_{sol,k}$ , na medida em que este representa o factor de utilização dos ganhos solares. Na Figura 6.3 apresenta-se o gráfico que relaciona os valores de  $\gamma_{al}$  e  $\omega$ . A sua variação está em concordância com a apresentada na norma ISO 13790:2008 [6] (Figura 6.4).

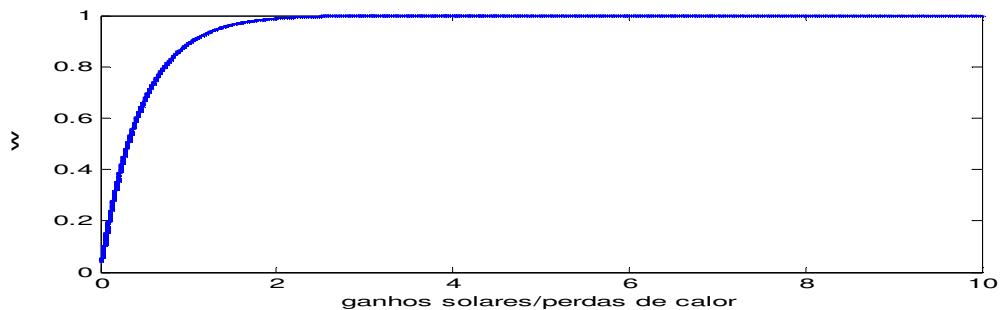


Figura 6.3 - Relação entre  $\gamma_{al}$  e  $\omega$  obtida na aplicação da metodologia de cálculo.

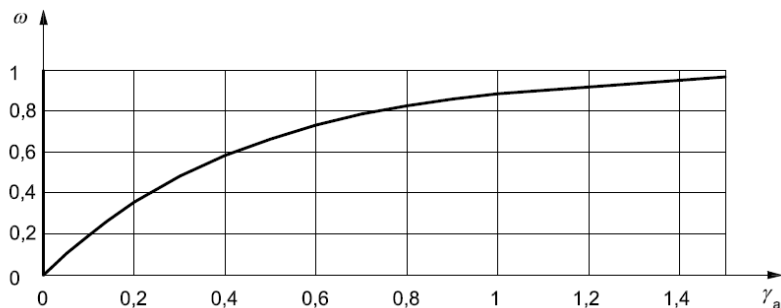


Figura 6.4 - Relação entre  $\gamma_{al}$  e  $\omega$  obtida apresentada na norma ISO 13790:2008 [6].

### 6.2.2.1.4 Caudal de ventilação

Outro dos parâmetros influenciador dos ganhos solares obtidos resultantes da transferência de calor através do envidraçado é o caudal de ventilação,  $q_{ve,sw}$ , entre o interior da célula de teste e a caixa-de-ar, devido à existência de aberturas de ventilação.

Os resultados obtidos permitem concluir que, no caso da parede de Trombe ser ventilada e não existir dispositivo de sombreamento os valores máximos obtidos rondam os  $0,025 \text{ m}^3/\text{s}$ , tal como se observa na Figura 6.5.

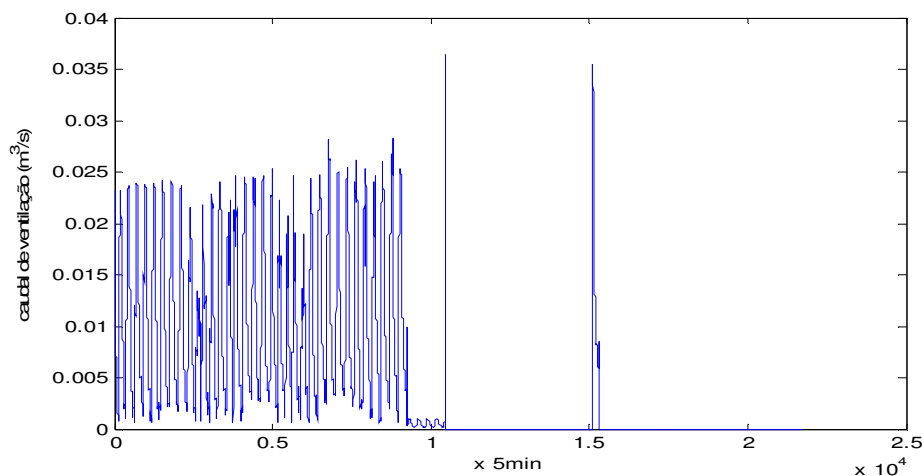


Figura 6.5 - Caudal de ventilação  $q_{ve,sw}$ .

Comparando estes valores do caudal de ventilação com os referidos no Capítulo 5 aquando da análise da velocidade do ar através de uma das aberturas, conclui-se que estes são da mesma ordem de grandeza. Os resultados obtidos no Capítulo 5 mostraram que, para um dia específico pertencente ao mesmo período de análise, o caudal de ventilação medido nas aberturas inferiores varia entre  $0,008 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $0,032 \text{ m}^3/\text{s}$ . Mais ainda, constatou-se que os valores medidos são concordantes com os valores calculados com o modelo de simulação dinâmico que foi implementado. Apesar de não ter sido possível medir experimentalmente a variação do caudal de ventilação nas aberturas, ao longo de todo o período experimental, os valores obtidos levam a concluir que os resultados da aplicação da metodologia de cálculo dinâmico estão de acordo com os obtidos sob condições climáticas reais.

Relativamente aos restantes períodos de análise, a observação da Figura 6.5 mostra que, nos períodos em que o sistema de ventilação se encontra fechado, os valores do caudal de ventilação são nulos, tal como seria de esperar. O pico da curva de variação de  $q_{ve,sw}$  corresponde a um dos dias em que se retirou o segundo tipo de obturadores e não estava colocado qualquer dispositivo de sombreamento exterior. O valor máximo atingido nesta situação rondou os  $0,035 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 6.2.2.1.5 Ganhos solares totais

Os valores obtidos para os diversos parâmetros acima referidos permitiram simular o comportamento dinâmico dos ganhos solares  $Q_{sol}$  decorrentes da transferência de calor através do envidraçado. Na Figura 6.6 é possível observar o comportamento de  $Q_{sol}$ , verificando-se que os valores máximos obtidos rondam os 600 W e referem-se ao período em que a parede de Trombe é ventilada e em que as condições exteriores são caracterizadas por valores elevados da radiação solar total.

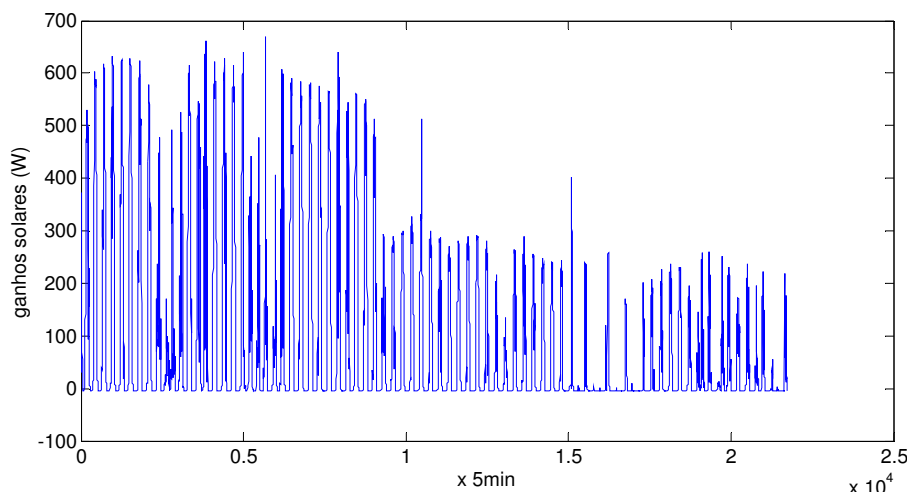


Figura 6.6 - Variação dos ganhos obtidos por transferência de calor  $Q_{sol}$ .

Como seria de esperar, os valores diminuem quando a parede de Trombe é não ventilada e são praticamente nulos quando os dispositivos de sombreamento estão colocados.

Nos últimos dias de análise, correspondentes à estação de aquecimento, os valores máximos atingem os 300 W, mas estes valores podem ser superiores, caso se optimize o funcionamento da parede de Trombe, através da activação do sistema de ventilação durante o período diurno e da colocação do dispositivo de oclusão durante o período nocturno.

### 6.2.2.2 Transferência de calor através da parede acumuladora

O valor dos ganhos obtidos por transferência de calor,  $Q_{transf}$ , através da parede acumuladora tem em consideração a transferência de calor por condução, convecção e radiação através da parede de Trombe sem aberturas de ventilação (grandeza  $H_o$ ), e também a contribuição da transferência de calor devido à existência de aberturas de ventilação na parede acumuladora (grandeza  $\Delta H$ ). Nos pontos seguintes será apresentada a variação de cada uma destas grandezas físicas e a sua contribuição para o valor da transferência de calor através da parede acumuladora.

### 6.2.2.2.1 Coeficiente de transferência de calor

O coeficiente de transferência de calor através da parede de Trombe não ventilada, sem dispositivos de sombreamento exterior, é designado por  $H_o$  e contabiliza a contribuição de todas as camadas que a constituem. Este valor foi considerado constante e calculado a partir do coeficiente de transmissão térmica da parede de Trombe não ventilada,  $U_o$ , e da respectiva área. A contribuição da transferência de calor devido à existência de aberturas de ventilação,  $\Delta H$ , (Figura 6.7) foi considerada variável. uma vez que é calculada em função do caudal de ventilação através das aberturas,  $q_{ve,sw}$ , e do valor do coeficiente de transmissão térmica do elemento do lado exterior  $U_e$ , que pode ser apenas relativo ao vidro, ou o vidro e à adição do dispositivo de sombreamento exterior.

As Figuras 6.7 e 6.8 permitem verificar a importância da contribuição da transferência de calor através das aberturas no valor final do coeficiente de transferência de calor através da parede acumuladora. Este valor é preponderante na determinação do valor global da transferência de calor através da parede acumuladora. Por exemplo, nas Figuras 6.7 e 6.8, verifica-se que para a amostra nº 5000, o valor do coeficiente de transferência de calor devido à convecção do ar através das aberturas ronda os 60 W/°C para o valor global do coeficiente de transferência de calor  $H$  é de cerca de 65 W/°C.

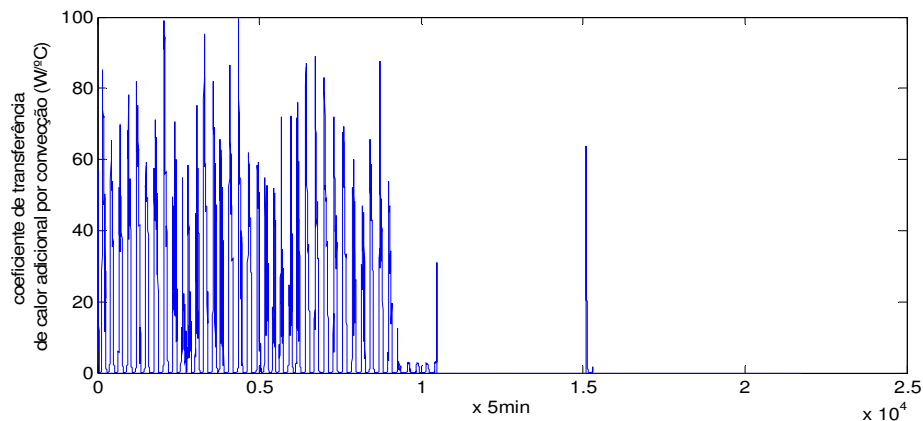


Figura 6.7 - Variação do coeficiente de transferência de calor adicional por convecção  $\Delta H$ .

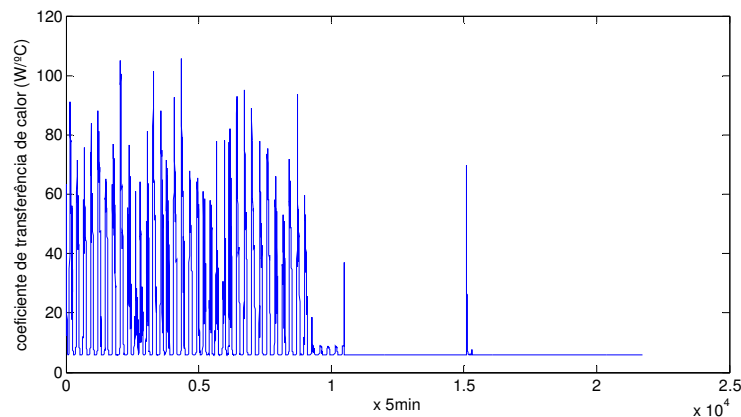


Figura 6.8 - Variação do coeficiente de transferência de calor  $H$ .

### 6.2.2.2 Ganhos solares totais

Calculado o valor do coeficiente de transferência de calor é possível obter o valor dos ganhos por transferência de calor,  $Q_{trans}$ , através da parede acumuladora, cuja variação ao longo do tempo se apresenta na Figura 6.9. Os valores obtidos são também função da área da parede de Trombe e do diferencial de temperatura entre a caixa-de-ar e a temperatura no interior da célula de teste.

À semelhança do que se verificou para as grandezas físicas já analisadas, os valores dos ganhos devido à transferência de calor através da parede acumuladora devem-se em grande parte à contribuição da existência de um sistema de ventilação que, em funcionamento e sem o efeito dos dispositivos de sombreamento, assume valores máximos da ordem dos 6000 W na estação de arrefecimento. Quando as aberturas de ventilação existentes na parede acumuladora se encontram fechadas, o valor dos ganhos é função apenas das características térmicas do material da parede acumuladora, diminuindo significativamente o seu valor máximo para cerca de 1500 W, verificável aproximadamente entre as amostras n.º 9000 e 15000. Quando se adiciona a este efeito a colocação do dispositivo de sombreamento exterior, a partir da amostra n.º 16000, os ganhos solares diminuem e atingem o valor máximo de cerca de 800 W.

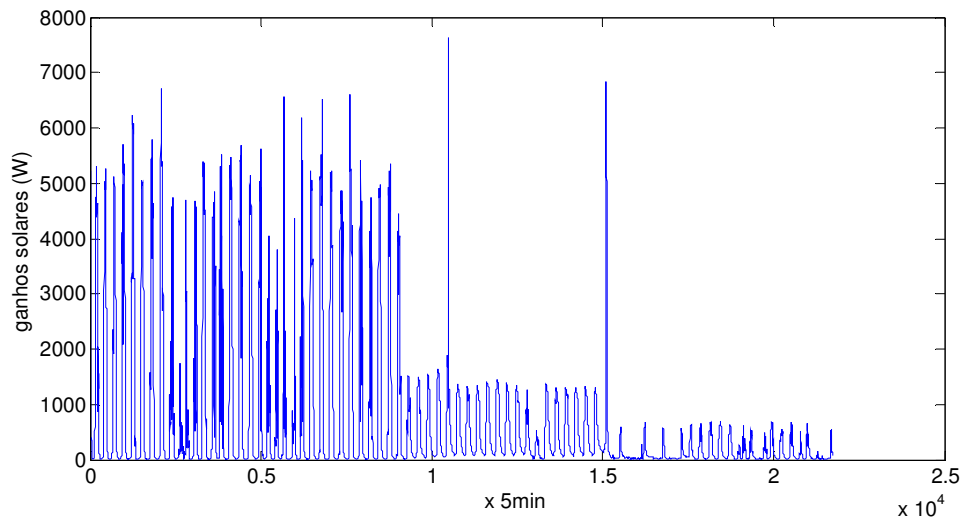


Figura 6.9 - Variação dos ganhos obtidos por transferência de calor  $Q_{trans}$ .

### 6.2.2.3 Desempenho térmico da parede de Trombe

A metodologia de cálculo aplicada permitiu determinar os ganhos totais,  $Q_{total}$ , obtidos através da parede de Trombe sujeita às condições climáticas de Vila Real, mediante a adição das duas parcelas, apresentadas anteriormente, referentes aos ganhos por transferência de calor através do envidraçado,  $Q_{sol}$ , e aos ganhos por transferência de calor através da parede acumuladora,  $Q_{trans}$ .

Os valores dos ganhos totais apresentam valores máximos da ordem dos 7000 W durante os dias do período correspondente à estação de arrefecimento, para a situação de parede de Trombe ventilada (Figura 6.10).

Quando se colocam os obturadores nas aberturas de ventilação os valores decrescem significativamente, atingindo valores máximos a rondar os 1000 W, o que demonstra o efeito favorável do fecho do sistema de ventilação durante o período diurno. No que respeita aos últimos dias do período de análise, inseridos na estação de aquecimento, os valores dos ganhos solares totais são bastante inferiores aos obtidos nos restantes períodos analisados, contrariamente ao desejado para a estação em análise. Esta situação deve-se ao facto de, quer o funcionamento do sistema de ventilação, quer a activação dos sombreamentos exteriores, não terem sido ajustados adequadamente ao longo do dia. No entanto, esta ausência de controlo do funcionamento da parede de Trombe foi propositada, com o intuito de perceber melhor a influência destes dois mecanismos de regulação (ventilação e sombreamento) sobre as diversas grandezas físicas medidas.

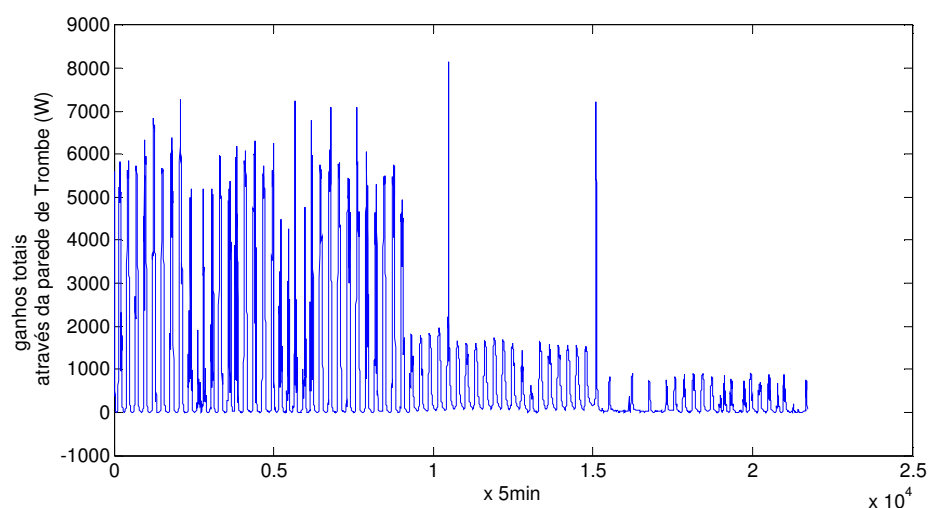


Figura 6.10 - Variação dos ganhos totais obtidos através da parede de Trombe,  $Q_{total}$ .

A aplicação desta metodologia de cálculo permitiu ainda a comparação entre a contribuição dos valores de  $Q_{sol}$  e  $Q_{trans}$  no resultado final do desempenho da parede de Trombe. Na Figura 6.11, apresenta-se o comportamento dinâmico de cada uma destas grandezas, onde é possível observar a contribuição de cada uma delas para o valor final de  $Q_{total}$ , destacando-se os elevados valores de  $Q_{trans}$  relativamente a  $Q_{sol}$ .



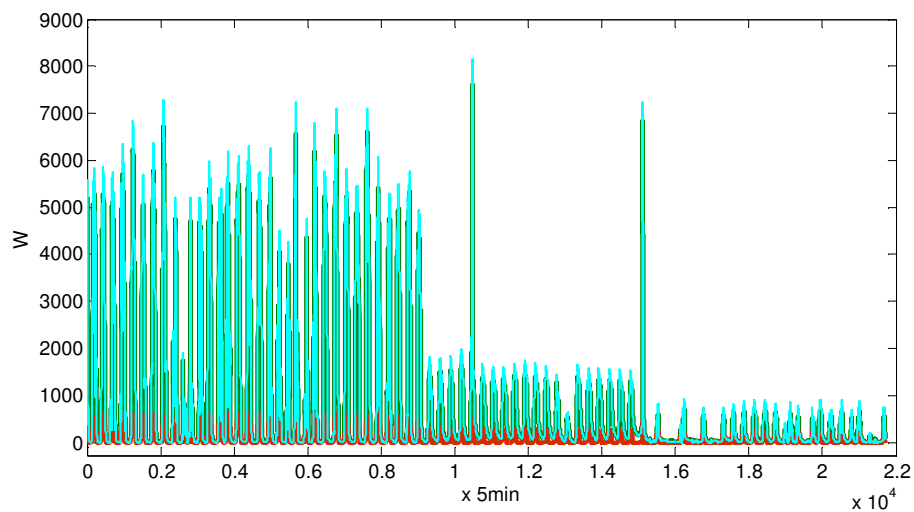


Figura 6.11 - Variação dos ganhos  $Q_{total}$  (a azul),  $Q_{sol}$  (a vermelho), e  $Q_{trans}$  (a verde).

A Figura 6.12 permite observar em detalhe a variação destas grandezas entre o período temporal compreendido entre as amostras n.º 8000 e 10000, onde se confirma a aproximação dos valores de  $Q_{total}$  e de  $Q_{trans}$  e se verifica com mais pormenor a reduzida contribuição de  $Q_{sol}$ .

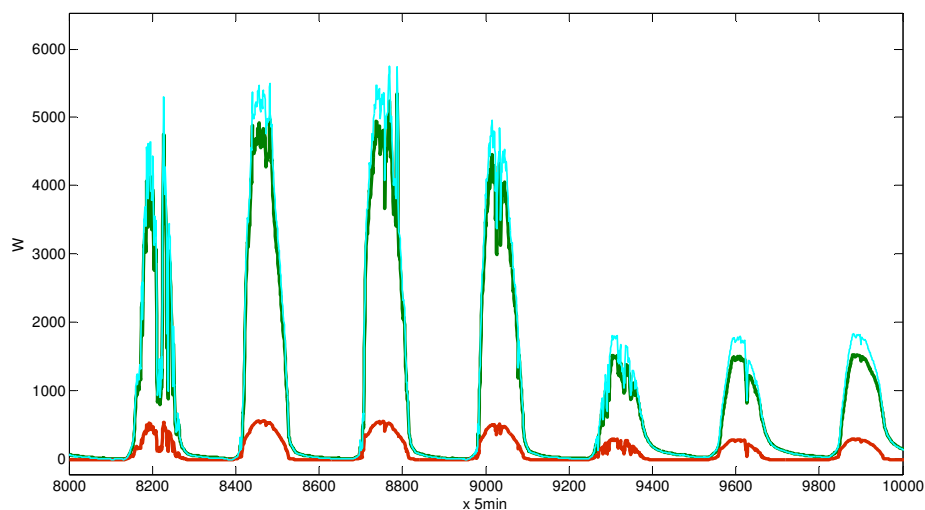


Figura 6.12 - Pormenor da variação dos ganhos  $Q_{total}$  (a azul),  $Q_{sol}$  (a vermelho), e  $Q_{trans}$  (a verde).

A comparação dos valores dos ganhos obtidos por transferência de calor através do envidraçado e através da parede acumuladora poderá contribuir para a melhoria do desempenho da parede de Trombe através da optimização das suas características construtivas, quer ao nível das propriedades do envidraçado, quer da parede acumuladora.

### 6.3 Conclusões

A metodologia de cálculo do desempenho térmico da parede de Trombe apresentada neste capítulo permitiu analisar o seu comportamento dinâmico perante as condições climáticas reais em Vila Real e os mecanismos de actuação exercidos (ventilação e sombreamento). Os dados experimentais, registados com intervalos de tempo de 5 minutos ao longo da duração do ensaio, bem como outras medidas que foram efectuadas de modo esporádico permitiram testar e validar os modelos de simulação que foram implementados em ambiente de programação MatLab. Como foi referido na secção 6.2.2.1, os valores do caudal de ventilação não puderam ser registados ao longo de todo o ensaio, tendo-se realizado algumas medições em instantes de tempo específicos. Estas medidas foram comparadas com os valores calculados com o modelo de simulação implementado tendo-se revelado concordantes para os instantes de tempo em análise, o que permitiu validar este modelo em concreto. É ainda de referir que no sentido de garantir a aplicabilidade das diferentes expressões matemáticas associadas à metodologia de cálculo apresentada neste capítulo foi necessário efectuar algumas adaptações, nomeadamente no que respeita ao seu intervalo de variação, o que conduziu à redução do número de amostras a considerar no cálculo, relativamente às obtidas durante o período experimental.

A aplicação da metodologia proposta permitiu obter a variação dos ganhos através da parede de Trombe ao longo do período de análise, e conhecer a contribuição da transferência de calor através do envidraçado e da parede acumuladora para os valores obtidos. Verificou-se também que a existência de aberturas de ventilação na parede acumuladora e a colocação dos sombreamentos exteriores influenciam de forma bastante significativa o valor dos ganhos totais através da parede de Trombe. Esta análise permite definir o funcionamento destes elementos durante as estações de aquecimento e de arrefecimento e durante os períodos diurno e nocturno.

A utilização do cálculo dinâmico através do programa de simulação MatLab mostrou-se bastante vantajosa, na medida em que o comportamento térmico da parede de Trombe pode ser analisado para qualquer instante, para além de ser possível alterar os valores dos diversos factores influenciadores do seu desempenho com facilidade, nomeadamente as condições climáticas exteriores e as características dimensionais e materiais da parede acumuladora.

Considera-se que a metodologia de cálculo apresentada neste capítulo constitui uma contribuição relevante para o conhecimento do comportamento da parede de Trombe, permitindo saber a sua contribuição no desempenho energético de um edifício, quando integrada como elemento da sua envolvente, para além da possibilidade da sua optimização para diferentes situações de funcionamento.

Esta metodologia poderá também ser aplicada na fase de projecto e possibilitar a previsão do comportamento da parede de Trombe em função da zona climática e das suas características construtivas. Para além disto, os modelos de simulação implementados poderão constituir uma ferramenta importante para desenvolver soluções de automação e controlo automático eficientes, pois permitirão calcular os sinais de actuação óptimos a aplicar aos sistemas de ventilação e de sombreamento.



## Capítulo 7

### Conclusões e Trabalho Futuro



## Capítulo 7

### Conclusões e Trabalho Futuro

#### 7.1 Conclusões finais

A necessidade de redução do consumo de energia nos edifícios exige que se adoptem medidas de melhoria do desempenho energético de edifícios novos e existentes. Uma das formas de alcançar este objectivo é a integração de soluções construtivas mais sustentáveis nos edifícios, como por exemplo, os sistemas solares passivos.

Apesar de o aproveitamento da energia solar através deste tipo de sistemas ser uma técnica bastante antiga, a verdade é que foi caindo em desuso ao longo do tempo. Só recentemente, com o aumento da preocupação com as questões ambientais e com o aprovisionamento energético, é que estas técnicas voltaram a ser integradas nos edifícios, no sentido de contribuir para a sua eficiência energética.

No entanto, o recurso aos sistemas solares passivos ainda não constitui uma prática corrente, sendo os mais utilizados referentes a soluções de ganhos directos, relacionadas com a orientação do edifício e com a área de envidraçados por fachada. Pelo contrário, a aplicação dos sistemas solares passivos de ganho indirecto é bastante reduzida.

A parede de Trombe é um sistema de ganho indirecto e a sua integração na envolvente dos edifícios é escassa devido à falta de informação por parte dos diversos intervenientes do sector da construção, no que respeita ao seu desempenho energético e às suas características construtivas. Para que a introdução deste sistema passivo seja eficaz é imperativo o conhecimento das características dimensionais e materiais dos seus constituintes.

A aplicação deste sistema em Portugal é pouco significativa, os casos conhecidos da sua integração revelam que nem sempre foram os mais adequados face às condições climáticas que caracterizam o nosso país e os estudos desenvolvidos sobre esta matéria são escassos. Assim é essencial a realização de trabalho de investigação que permita aumentar o conhecimento do desempenho térmico da parede de Trombe.

Com o objectivo de contribuir para o desenvolvimento dos estudos neste âmbito, foram propostas neste trabalho de investigação uma metodologia de análise experimental do desempenho térmico da parede de Trombe e uma metodologia de simulação do desempenho térmico da parede de Trombe, sujeita a condições climáticas reais. O trabalho experimental foi realizado numa célula de teste construída para o efeito, na cidade de Vila Real.

No que respeita à fase experimental, procedeu-se ao projecto, construção, instrumentação e monitorização de um dispositivo experimental, constituído por uma célula de teste que incluiu a construção de uma parede de Trombe na fachada orientada a Sul. A monitorização da célula de teste permitiu adquirir uma série de dados em clima real fundamentais para posterior análise do desempenho térmico da parede de Trombe. Para além das grandezas físicas associadas às condições climáticas exteriores, foi também possível obter os valores das temperaturas na camada de ar e na parede acumuladora, bem como do fluxo de calor através desta parede. Foram também recolhidos os dados relativos à variação da temperatura do ar interior na célula de teste. O período de ensaio decorreu entre as 16h20min do dia 11 de Agosto de 2011 e as 17h35min do dia 4 de Novembro de 2011. Através da análise dos valores obtidos para as diversas grandezas físicas medidas durante este período de ensaio, contribuiu para o conhecimento do desempenho térmico da parede de Trombe, sujeita a condições climáticas reais referentes à estação de arrefecimento e de aquecimento.

A análise dos resultados obtidos experimentalmente foi efectuada tendo em conta o funcionamento do sistema de ventilação e a introdução de dispositivos de sombreamento exteriores. Verificou-se que estes elementos influenciam de forma decisiva o comportamento térmico da parede de Trombe e consequentemente, os valores das temperaturas nas várias camadas do sistema, o fluxo de calor e as temperaturas do ar interior.

A realização do trabalho experimental constituiu assim um relevante contributo para a avaliação do desempenho térmico deste sistema passivo, nomeadamente no que respeita à estratificação das temperaturas na caixa-de-ar, na parede acumuladora e nas aberturas de ventilação. A análise dos resultados experimentais permitiu concluir que as temperaturas na caixa-de-ar assumem valores mais elevados quando o sistema de ventilação se encontra fechado, contribuindo consequentemente para o aumento da temperatura na superfície exterior da parede acumuladora. Verificou-se também, através dos valores das temperaturas recolhidos junto às aberturas, que os valores da temperatura nas aberturas superiores assumem valores mais elevados do que os registados junto às aberturas inferiores, quando a parede de Trombe é ventilada. Aquando da introdução dos obturadores nas aberturas o diferencial entre as temperaturas apresentou uma redução bastante significativa, uma vez que a transferência de calor através das aberturas deixou de se realizar.

Os resultados experimentais possibilitaram ainda a análise de uma propriedade importante da parede de Trombe que diz respeito ao desfasamento no tempo de devolução do calor ao interior da célula de teste. Foi possível determinar este valor para a parede de Trombe ventilada e não ventilada, tendo-se concluído que a libertação de calor para o interior da célula de teste é cerca de três vezes mais tardia quando esta é não ventilada.

Para além da análise experimental foi proposta e aplicada uma metodologia de cálculo do desempenho térmico da parede de Trombe com carácter dinâmico, baseada na formulação



estática definida na Norma ISO 13790:2008 [6] e no estudo desenvolvido por Martins [5]. Esta metodologia permitiu analisar o comportamento dinâmico do sistema perante as condições climáticas reais a que esteve sujeito durante o período experimental e os mecanismos de actuação exercidos, respeitantes à ventilação e ao sombreamento. Os dados experimentais obtidos foram utilizados na aplicação desta metodologia e permitiram testar e validar os modelos de simulação que foram implementados em ambiente de programação MatLab. No decorrer da aplicação desta metodologia mostrou-se necessário efectuar algumas adaptações para garantir a aplicabilidade das expressões matemáticas que a constituem, resultando na redução do número de amostras consideradas no cálculo. Os resultados obtidos com os modelos de simulação revelaram-se concordantes com os obtidos experimentalmente.

A sua aplicação permitiu obter a variação dos ganhos totais da parede de Trombe ao longo de período de análise e conhecer o contributo da transferência de calor através do envidraçado e da parede acumuladora para o seu desempenho térmico. Convém aqui realçar o facto de a análise dinâmica efectuada ter permitido obter os valores dos ganhos através da parede de Trombe em cada instante, cuja integração ao longo do tempo permite a obtenção de um valor global dos ganhos totais para um determinado período. A possibilidade de obter curvas de variação dos ganhos totais através da parede de Trombe permitirá ajustar de uma forma mais eficaz o seu funcionamento a cada período, o que não é possível fazer obtendo um valor global dos ganhos totais obtido apenas por cálculo estático. No que respeita à ordem de grandeza dos valores obtidos para os ganhos totais através do cálculo dinâmico, verificou-se que estes são concordantes com os obtidos através do cálculo estático definido na Norma ISO13790:2008 [6] e aplicado por Martins [5].

Esta metodologia de cálculo dinâmico permitiu portanto analisar o seu desempenho em qualquer instante, em função das condições climáticas exteriores e também do funcionamento do sistema de ventilação e dos sombreamentos exteriores, bem como definir o comportamento que deve ter a parede de Trombe nas estações de aquecimento e de arrefecimento, e no período diurno e nocturno.

Além disso, os modelos de simulação implementados poderão contribuir para o desenvolvimento de soluções de automação e controlo automático da parede de Trombe, no que respeita à actuação do sistema de ventilação e dos dispositivos de sombreamento, de forma a otimizar o desempenho térmico desta parede.

Considera-se que o trabalho de investigação aqui apresentado constitui um contributo válido no que respeita ao desempenho térmico da parede de Trombe, uma vez que contribui para o desenvolvimento do conhecimento científico neste domínio, quer a nível nacional, quer a nível internacional.

Por um lado, a realização do trabalho experimental contribuiu para o conhecimento do desempenho térmico da parede de Trombe em condições climáticas reais na cidade de Vila Real, podendo os resultados obtidos para as diferentes grandezas físicas ser indicadores do seu comportamento noutras regiões de clima semelhante.

Por outro lado, a aplicação da metodologia de cálculo dinâmico proposta permitiu quantificar a variação dos ganhos obtidos através da parede de Trombe e conhecer a influência das diversas variáveis influenciadoras do seu desempenho térmico.

Por fim, considera-se que o trabalho desenvolvido poderá contribuir para a sensibilização dos diversos agentes do sector da construção relativamente à integração deste sistema solar passivo nos edifícios. A metodologia de análise do desempenho térmico da parede de Trombe poderá constituir uma ferramenta de auxílio aos projectistas, pois permitirá antever a sua contribuição quando aplicada a um edifício.

### 7.2 Trabalho futuro

O trabalho desenvolvido contribuiu para o desenvolvimento do conhecimento do desempenho térmico da parede de Trombe mas permitiu também definir diversas linhas de acção para a prossecução dos trabalhos de investigação neste domínio. Os trabalhos experimentais ainda se encontram em curso, dado que se pretende dar continuidade à caracterização do comportamento deste sistema passivo. Com base nos dados obtidos através do trabalho experimental e de simulação dinâmica, pretende-se a curto prazo desenvolver modelos de automação e de controlo automáticos da parede de Trombe, no que respeita à actuação eficiente do sistema de ventilação e dos dispositivos de sombreamento, perante as condições do clima interior pretendidas.

Para além destes trabalhos, outros poderão ser realizados com o objectivo de contribuir para um melhor conhecimento científico da parede de Trombe, tais como:

- Estudo experimental da parede de Trombe sujeita a outras condições climáticas exteriores reais, no sentido de analisar a variação das diversas grandezas físicas associadas ao seu desempenho térmico. A obtenção dos seus valores para diferentes climas poderá contribuir para a definição da solução construtiva óptima de parede de Trombe a integrar em edifícios localizados em diferentes regiões;
- Estudo experimental de outras configurações de parede de Trombe, utilizando outros materiais na parede acumuladora e no envidraçado. Este estudo poderá contribuir para a melhoria do desempenho térmico da parede de Trombe e para a sua optimização face à função pretendida. A influência das espessuras do vidro, da caixa-de-ar e da parede acumuladora também poderão ser analisadas;

- Estudo experimental da parede de Trombe duplamente ventilada para determinar o seu comportamento como sistema solar passivo de arrefecimento. A análise sob condições climáticas reais permitirá saber qual deverá ser o funcionamento das aberturas de ventilação na parede acumuladora e no envidraçado na estação de arrefecimento durante os diferentes períodos do dia;
- Análise da contribuição da transferência de calor por convecção em paredes de Trombe ventiladas. O estudo do fenómeno de circulação do ar na camada de ar poderá contribuir para a optimização das dimensões da caixa-de-ar e da localização, número e dimensões das aberturas de ventilação;
- Análise da influência de diversos tipos de dispositivos de sombreamento no desempenho térmico da parede de Trombe. Sendo os dispositivos de sombreamento fundamentais para evitar o sobreaquecimento no Verão e a transferência de calor do interior para o exterior durante as noites de Inverno, o estudo de diversos tipos de sombreamentos exteriores, fixos ou móveis, nomeadamente de persianas e palas pode auxiliar na optimização do comportamento térmico da parede de Trombe. A influência da vegetação como elemento de sombreamento poderá também ser analisada no sentido de contribuir para o aumento da sustentabilidade na construção;
- Definição de um programa de simulação térmica de uso fácil e que possa ser aplicado a diferentes tipos de paredes de Trombe em diferentes climas. A definição deste programa poderá facilitar a previsão do comportamento térmico da parede de Trombe na fase de projecto do edifício e facilitar a sua integração com os restantes elementos construtivos;
- Contabilização da influência da parede de Trombe na aplicação da regulamentação térmica de edifícios. A integração destes elementos especiais nos documentos regulamentares poderá incentivar a introdução de sistemas solares passivos na melhoria do desempenho térmico dos edifícios.



## Referências Bibliográficas

- [1] European Commission - *Energy Efficiency in Buildings*. [Consultado em: Fevereiro de 2011]. Disponível em: [http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/buildings\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/buildings/buildings_en.htm)
- [2] Parlamento Europeu e do Conselho - *Directiva 2002/91/CE relativa ao Desempenho Energético dos Edifícios*. 16 Dez 2002. [Consultado em: Fevereiro de 2011]. Disponível em: [http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/site/pt/oj/2003/L\\_001/L\\_00120030104pt00650071.pdf](http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/site/pt/oj/2003/L_001/L_00120030104pt00650071.pdf)
- [3] REN - *Relatório sobre Segurança de Abastecimento ao nível da Produção de Electricidade - Análise intercalar - Período 2009-2020*. Sumário Executivo Abril de 2008. [Consultado em: Novembro de 2011]. Disponível em: <http://www.centrodeinformacao.ren.pt/PT/publicacoes/PublicacoesGerais/Relat%C3%B3rio%20Intercalar%20sobre%20Seguran%C3%A7a%20de%20Abastecimento%20ao%20n%C3%ADvel%20da%20Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20Electricidade%20-2009-2020%20-%20Sum%C3%A1rio%20Executivo.pdf>
- [4] Dragicevic, S. and Lambic, M. (2009), *Numerical Study of a Modified Trombe Wall Solar Collector System*. *Thermal Science*, 13 pp 195-204.
- [5] Martins, A. (2010), *Contribuição da Parede de Trombe na Redução do Consumo Energético dos Edifícios*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- [6] ISO 13790:2008 (E) (2008), *Energy Performance of Buildings - Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling*.
- [7] Torcellini, P. and Pless, S. (2004), *Trombe Walls in Low-Energy Buildings: Practical Experiences*. Proceedings of the World Renewable Energy Congress VII and Expo Denver, Colorado, August 29 - September 3, 2004. [Consultado em: Maio de 2009]. Disponível em: <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/36277.pdf>
- [8] Mendonça, P. (2005), *Habitar sob uma Segunda Pele: Estratégias para a Redução do Impacto Ambiental de Construções Solares Passivas em Climas Temperados*; Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade do Minho. [Consultado em Junho 2010]. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/4250/9/TeseDoutMendonca9.pdf>
- [9] *Trombe Wall Case Studies. The Solar House, Odeillo, France*. 18 de Janeiro de 2011. [Consultado em Março 2011]. Disponível em: <http://jjureidini.wordpress.com/2011/01/18/trombe-wall-case-studies>
- [10] Gonçalves, H. e Graça, J. (2004), *Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal*. INETI, Lisboa, Novembro de 2004. [Consultado em Maio 2009]. Disponível em: <http://repositorio.lneg.pt/handle/10400.9/1323>
- [11] Haglund, B. and Rathmann, K., *Thermal Mass in Passive Solar and Energy-Conserving Buildings*. Vital Signs Curriculum Materials Project. [Consultado em Junho de 2010]. Disponível em:

- [http://arch.ced.berkeley.edu/vitalsigns/res/downloads/rp/thermal\\_mass/mass-sml.pdf](http://arch.ced.berkeley.edu/vitalsigns/res/downloads/rp/thermal_mass/mass-sml.pdf)
- [12] Baggs, D. and Mortensen, N., *Thermal Mass in Building Design*. [Consultado em Outubro de 2011]. Disponível em: <http://www.yourbuilding.org/library/DES04.pdf>
- [13] *The Role of Thermal Mass in Energy-Efficient House Design*. Background Paper of Austral Bricks Published July 2006. [Consultado em Julho de 2011]. Disponível em: [http://www.fullbrick.com.au/pdfs/Thermal\\_Mass\\_Background\\_Paper.pdf](http://www.fullbrick.com.au/pdfs/Thermal_Mass_Background_Paper.pdf)
- [14] Gilbert, J. and Koster, U. (2010), *Phase Change Materials. New thermal mass solution for low inertia buildings*. Passive room climate and energy management. DuPont™ Energain® PCM guidebook, Edition: December 2010. [Consultado em Agosto 2011]. Disponível em: [http://energain.co.uk/Energain/en\\_GB/assets/downloads/documentation/download/DuPont\\_Energain\\_PCM\\_Guidebook\\_December\\_2010.pdf](http://energain.co.uk/Energain/en_GB/assets/downloads/documentation/download/DuPont_Energain_PCM_Guidebook_December_2010.pdf)
- [15] Balaras, C.A. (1996), *The Role of Thermal Mass on the Cooling Load of Buildings. An Overview of Computational Methods*. Energy and Buildings Vol. 24 pp 1-10
- [16] Zhu, L., Hurt, R., Correia, D. and Boehm, R. (2009), *Detailed Energy Saving Performance Analyses on Thermal Mass Walls Demonstrated in a Zero Energy House*. Energy and Buildings 41 pp 303-310
- [17] Cement Concrete & Aggregates Australia, Concrete the responsible choice, *Thermal Mass Benefits for Housing*. Briefing 12, April 2010. [Consultado em Outubro de 2011] Disponível em: <http://www.ccaa.com.au/sustainability/document3.pdf>
- [18] Wilson, A., *Thermal Storage Wall Design Manual*. New Mexico Solar Energy Association in Santa Fee . Published in 1979. [Consultado em Agosto de 2010].
- [19] Rodrigues, A., Piedade, A. e Braga, A., *Térmica de Edifícios*, Edições Orion, 1ª Edição, Março de 2009, págs. 90,96,98,141,142,158-163,181-184,226,227,246-249,260-269,349.
- [20] *Trombe wall*. [Consultado em Agosto de 2011]. Disponível em: <http://www.ccaa.com.au/sustainability/document3.pdf>
- [21] *A Solar House*. May 2010 [Consultado em Junho de 2011]. Disponível em: <http://altbuildblog.blogspot.com/2010/05/solar-house.html>
- [22] Solar Components Corporation, *Thermal Storage Tubes*. [Consultado em Junho de 2011]. Disponível em: <http://www.solar-components.com/tubes.htm>
- [23] Salunke, V. and Kishore, V.V.N. (....), *Elements of Passive Solar Architecture 7*. Energy-Environment Technology Division, T ERI, New Delhi. [Consultado em Agosto de 2011]. Disponível em: [http://216.144.196.28/elearn/ren\\_en/pdf/week\\_47.pdf](http://216.144.196.28/elearn/ren_en/pdf/week_47.pdf)
- [24] Sustainable Energy Authority Victoria, *Thermal Mass*. Info fact sheet [Consultado em Agosto de 2011]. Disponível em: [http://www.sustainability.vic.gov.au/resources/documents/Thermal\\_mass.pdf](http://www.sustainability.vic.gov.au/resources/documents/Thermal_mass.pdf)
- [25] Sustainable Energy Authority Victoria, Energy Smart Housing Manual, *Thermal Mass*. [Consultado em Agosto de 2011]. Disponível em: <http://www.sustainability.vic.gov.au/resources/documents/ESHousingManualCh061.pdf>

- [26] Moita, F., *Energia Solar Passiva*, Argumentum, 2ª Edição, Dezembro de 2010, Direcção Geral de Energia e Geologia
- [27]. *Power House: Trombe Wall*. [Consultado em Julho de 2011]. Disponível em: <http://powerhousetv.com/Energy-EfficientLiving/BuildingRemodeling/026741>
- [28] Renewable Energy and Sustainability Forum, *Trombe Wall*. [Consultado em Julho de 2011]. Disponível em: <http://www.navitron.org.uk/forum/index.php?topic=13585.15>
- [29] The Authority of Sustainable Buildings, *Passive Design: Thermal Mass*. [Consultado em Agosto de 2011]. Disponível em: <http://www.level.org.nz>
- [30] *Technical Manual- Design for Lifestyle and the Future: Passive Design, Thermal Mass*. [Consultado em Agosto de 2010]. Disponível em: <http://www.yourhome.gov.au/technical/fs49.html>
- [31] *Technical Manual- Design for Lifestyle and the Future: Passive Design, Glazing*. [Consultado em Agosto de 2010]. Disponível em: <http://www.yourhome.gov.au/technical/fs410.html>
- [32] *Glass Handbook*. [Consultado em Outubro de 2011]. Disponível em: <http://www.gjames.com.au/brochure/glasshandbook.pdf>.
- [33] *Claccividros, Características Técnicas*. [Consultado em Setembro de 2011]. Disponível em: <http://www.claccividros.com.br/Sobreovidro/Caracteristicastécnicas.html>
- [34] Sirgado, J. (2010), *Análise do Impacte dos Vãos Envidraçados no Desempenho Térmico dos Edifícios*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.
- [35] Wasley, J. and Utzinger M. (1996), *Glazing Performance*. Johnson Controls Institute for Environmental Quality in Architecture, School of Architecture and Urban Planning, University of Wisconsin- Milwaukee. [Consultado em Setembro de 2011] Disponível em: <http://arch.ced.berkeley.edu/vitalsigns/res/downloads/rp/glazing/glaz2-bg.pdf>
- [36] Decreto-lei n.º 80/06, *Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios* - RCCTE, 4 Abril 2006.
- [37] Kisilewicz, T. (2009), *Glazed Building Wall as a Solar Thermal Collector*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. IX N°1. [Consultado em Setembro de 2011]. Disponível em: <http://www.acme.pwr.wroc.pl/repository/233/online.pdf>
- [38] *Green Passive Solar Magazine*. [Consultado em Agosto de 2011]. Disponível em: <http://greenpassivesolar.com/about/>
- [39] *It's All in the Details: Trombe Wall*. [Consultado em Agosto de 2011]. Disponível em: <http://greenpassivesolar.com/about/>
- [40] Jacobs Wiper: Service Provider Center. [Consultado em Agosto de 2011]. Disponível em: <http://www.jacobswyper.com/work/biotech-pharmaceutical/service-provider-center/>
- [41] *Principles of Energy Conscious Design, Chapter 3*. [Consultado em Setembro de 2011]. Disponível em: <http://mnre.gov.in/booklets/solar-energy/ch3.pdf>
- [42] Wulfinghoff, D.R. (1999), *Reducing Cooling Load: Windows & Skylights - Install External Shading Devices Appropriate for Each Exposure of the Glazing*. Energy Efficiency

- Manual [Consultado em Setembro de 2011] Disponível em: <http://www.energybooks.com/pdf/919929.pdf>
- [43] Hien, W.N. and Istiadji, A.D. (2003), *Effects of External Shading Devices on Daylighting and Natural Ventilation*. Proceedings of the Eighth International IBPSA Conference Eindhoven, Netherlands August 11-14. [Consultado em Outubro de 2011]. Disponível em: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03\\_0475\\_482.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03_0475_482.pdf)
- [44] Corrado, V., Serra, V. and Vosilla, A. (2004), *Performance Analysis of External Shading Devices*. Proceedings of the Plea2004 - The 21th Conference on Passive and Low Energy Architecture. Eindhoven, The Netherlands, 19 - 22, September [Consultado em Outubro de 2011] Disponível em: <http://www.arct.cam.ac.uk/PLEA/ConferenceResources/PLEA2004/Proceedings/p1139final.pdf>
- [45] *Energy Smart Housing Manual. Windows*. Sustainable Energy Authority Victoria 2002. [Consultado em Setembro de 2011]. Disponível em: <http://www.sustainability.vic.gov.au/resources/documents/ESHousingManualCh05.pdf>
- [46] G. Kim, H.S.L., Tae Sub Lim and Jeong Tai Kim, *Assessment of Shading Devices on the Thermal Performance of Residential Buildings*.
- [47] Chua K.J. and Chou S.K., *Evaluating the Performance of Shading Devices and Glazing Types to Promote Energy Efficiency of Residential Buildings*. Building Simulation, Vol. 3, Number 3, pp. 181-194.
- [48] Athienitis, A.T.a.A.K., *Shading as an active component for solar control: an integrated approach at the early design stage*. Solar Buildings Research Network, Centre for Building Studies, Department of Building, Civil and Environmental Engineering, Concordia University, Montreal, Canada.
- [49] Gutierrez, G.C.R. and Labaki, L.C. (2007), *An Experimental Study of Shading Devices: Orientation Typology and Material*. ASHRAE.
- [50] Berkeley, H. (2002), *Shade Trees Reduce Building Energy Use and CO<sub>2</sub> Emissions from Power Plants*. Heat Island Group, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkley, CA 94720, USA
- [51] Casa Solar Passiva de Vale Rosal . [Consultado em Agosto de 2011]. Disponível em: <http://arquitectologia.org/Descs/Clifaut10.htm>.
- [52] Papadakis, G., Tsamis, P., Kuritsis, S. (2001), *An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings*. Energy and Buildings, 33 pp 831-836
- [53] Kamal, M.A. (2010), *A Study on Shading of Buildings as a Preventive Measure for Passive Cooling and Energy Conservation in Buildings* International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Vol. 10 No: 06. [Consultado em Setembro de 2011]. Disponível em: <http://www.ijens.org/102406-5252%20IJCEE-IJENS.pdf>
- [54] Lam, M.,IP, K. and Miller, A. (2005), *Thermal Shading Effect Of Climbing Plants On Glazed Facades*. Proceedings of the 2005 World Sustainable Building Conference, Tokyo, 27-29 September 2005 (SB05Tokyo). [Consultado em Outubro de 2011]. Disponível em: <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB3183.pdf>
- [55] *Derrière la vitre de ce mur Trombe, on distingue l'appareil en briques de terre crue Maison des Vins de Bandol (83)*



- [56] *Trombe Wall*. [Consultado em Setembro de 2011]. Disponível em: <http://www.superstock.com/stock-photography/trombe+wall>
- [57] *Energy Strategies in the OHSU Center for Health and Healing*. [Consultado em Outubro de 2011]. Disponível em: <http://www.brightworks.net/projectdetail.php?id=38>
- [58] Costa, J.; *A Evolução da Arquitectura Bioclimática - Contributo para a Sustentabilidade Arquitectónica e Urbana*; Tese de Doutoramento, Universidade Portucalense, 2008.
- [59] Education of Architects in Solar Energy and Environment, *Passive Solar Walls*. [Consultado em Fevereiro de 2010]. Disponível em: [http://www-cenerg.ensmp.fr/ease/passive\\_solar.pdf](http://www-cenerg.ensmp.fr/ease/passive_solar.pdf)
- [60] Rocheta, V.; Farinha, F.; *Práticas de Projecto e Construtivas para a Construção Sustentável*; Congresso Construção 2007 - 3º Congresso Nacional, Coimbra, 2007.
- [61] *The Trombe Wall: Low Tech Solar Design Makes a Comeback*. [Consultado em Dezembro de 2010]. Disponível em: [http://www-cenerg.ensmp.fr/ease/passive\\_solar.pdf](http://www-cenerg.ensmp.fr/ease/passive_solar.pdf)
- [62] *Contemporary bioclimatic design*. [Consultado em Dezembro de 2010]. Disponível em: [http://www.engelvoelkers.com/gr/athens-north/stamata/contemporary-bioclimatic-design-608558.151120\\_exp/?language=en&elang=en](http://www.engelvoelkers.com/gr/athens-north/stamata/contemporary-bioclimatic-design-608558.151120_exp/?language=en&elang=en)
- [63] Raman, P., Mande, S., and Kishore, V.(2001), *A Passive Solar System for Thermal Comfort Conditioning of Buildings in Composite Climates*. Solar Energy, Vol. 70 No. 4 pp 319-329
- [64] Fernández-González, A. (2006), *Analysis of the Thermal Performance and Comfort Conditions Produced by Five Different Passive Solar Heating Strategies in the United States Midwest*. Solar Energy
- [65] Stazi, F., Perna, C.D., Filiaci, C. and Stazi, A. (2008), *The Solar Wall in the Italian Climates*. World Academy of Science, Engineering and Technology, 37
- [66] Sodha, M., Kaushik S., Nayak J. (1981), *Performance of Trombe Walls and Roof Pond Systems*. Applied Energy 175-191.
- [67] Hassanain, A.A., Hokam, E.M. and Mallick, T.K. (2010), *Effect of Solar Storage Wall on the Passive Solar Heating Constructions*. Energy and Buildings
- [68] Cuomo, V., Fontana, F. and Serio, C. (1985), *Trombe walls and Green-Houses: An Analytical Approach to Long-term Performances Analysis*. Revue Phys. Appl. 20 pp 589-598
- [69] Burek, S.A.M. and Habeb, A. (2007), *Air Flow and Thermal Efficiency Characteristics in Solar Chimneys and Trombe Walls*. Energy and Buildings, 39 pp 128-135
- [70] New York State Energy Research & Development Authority. *High Performance House. Best Practices Guide. Design Intelligence for Energy Performance in Single Family Homes*. [Consultado em Junho de 2011]. Disponível em: [http://nyserda.ny.gov/en/Page-Sections/Research-and-Development/Buildings-Research/-/media/Files/Publications/Research/Other%20Technical%20Reports/best\\_practices\\_guide.ashx](http://nyserda.ny.gov/en/Page-Sections/Research-and-Development/Buildings-Research/-/media/Files/Publications/Research/Other%20Technical%20Reports/best_practices_guide.ashx)

- [71] Radosavljević, J., Lambić, M. and Pavlović, T. (2004), *Thermodynamic Designing of a Solar Block of Flats with a Trombe's Wall with Ventuce Holes*. Facta Universitatis, Series: Physics, Chemistry and Technology, Vol. 3 No. 1 pp 27-34
- [72] Bin, C., Cuiying C. and Wenxiu, Y. (2006), *A Calculation Model of Passive Solar House with Trombe Wall*. Renewable Energy Proceedings
- [73] Tirone, L., *Construção Sustentável - Soluções Eficientes Hoje, a nossa Riqueza de Amanhã*, 2007.
- [74] Torcellini, P., Pless, S., Crawley, D., *Solar Technologies & The Building Envelope*. [Consultado em Maio de 2011]. Disponível em: <http://www.ashrae.org/publications/detail/16969>
- [75] Khalifa, A.N. and Abbas, E.F., *The Optimum Thickness of Some Thermal Storage Materials used for Solar Space Heating*.
- [76] Khedari, J. , Kaewruang, S. , Pratinthong, N. and Hirunlabh, J.(1999) *Natural Ventilation of Houses by a Trombe Wall under the Climatic Conditions in Thailand*, International Journal of Ambient Energy, 20: 2, 85 – 94
- [77] Shtrakov, S. and Stoilov, A. (2005), *New Approach for Finite Difference Method for Thermal Analysis of Passive Solar Systems*.
- [78] Özbalta, T.G. and Kartal, S. (2010), Heat gain through Trombe wall using solar energy in a cold region of Turkey. Scientific Research and Essays, Vol. 5 (18), pp 2768-2778
- [79] Nwachukwu, N.P. and Okonkwo, W.I. (2007), *Effect of an Absorptive Coating on Solar Energy Storage in a Trombe wall System*. Energy and Buildings, 40 pp 371-374
- [80] Hirunlabh, J., Kongduang, W., Namprakai, P. and Khedari, J. (1998), *Study of Natural Ventilation of Houses by a Metallic Solar Wall under Tropical Climate*. Renewable Energy 18 109-119
- [81] Chan, H., Riffat, S.B. and Zhu ,J. (2009), *Review of Passive Solar Heating and Cooling Technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14 pp 781-789
- [82] Richman, R., Pressnail, K. (2009), *A More Sustainable Curtain Wall System: Analytical Modeling of the Solar Dynamic Buffer Zone (SDBZ) Curtain Wall*. Building and Environment, 44, pp 1-10
- [83] Gan, G. (1997), *A Parametric Study of Trombe Walls or Passive Cooling of Buildings*. Energy and buildings, 27 pp 37-43
- [84] Salmerón, J.M., Sánchez, F., Ruiz, Á., González, R. and Álvarez, S. (2005), *Improving Ventilation and Envelope Characteristics in Order to Decrease the Energy Consumption in Existing Buildings*. International Conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment”, May 2005, Santorini, Greece
- [85] Constantinescu, D. (2007), *Theoretical and Experimental Analysis of Two Passive Solar Heating Systems*. ConstructII, No. 1
- [86] Peuportier, B. *L'isolation Transparente: Une Nouvelle Technologie Au Service Du Solaire Thermique*. Journee d'étude du 14 Avril 1993: Connaissance et utilisation du rayonnement solaire: Evolution, Nouveautés, Retombées Pratiques, École des Mines, Centre d'Énergétique.

- [87] Kurtbaşı, İ. and Durmuş, A. (2007), *Unsteady Heat Transfer by Natural Convection in the Cavity of a Passive Heating Room*. International Journal of Thermal Sciences, 47 pp 1026-1042
- [88] Zamora, B. and Kaiser, A. (2009), *Thermal and Dynamic Optimization of the Convective Flow in Trombe Wall Shaped Channels by Numerical Investigation*. Heat Mass Transfer, 45 pp 1393-1407
- [89] Warrington, R., Ameel T. (1995) *Experimental Studies of Natural Convection in Partitioned Enclosures with a Trombe Wall Geometry*. ASME J. Solar Energy Eng, 117:16-21
- [90] La Pica A., Rodono G., Volpes R (1993) *An Experimental Investigation on Natural Convection of Air in a Vertical Channel*. Int J Heat Mass Transf, 36:611-616
- [91] Chen, B., Chen, X., Ding, Y.H. and Jia, X. (2006), *Shading Effects on the Winter Thermal Performance of The Trombe Wall Air Gap: An experimental study in Dalian*. Renewable Energy, 31 pp 1961-1971
- [92] *Heavy insulated drum doors raised and lowered daily. Baer Zome Cluster*. [Consultado em Junho de 2011] Disponível em: <http://zomeworks.com/files/sunbenderTM/reflector-shades.pdf>.
- [93] Ji, J., Yi, Hua, He, W. and Pei, G. (2007), *PV-Trombe Wall Design for Buildings in Composite Climates*. Journal of Solar Energy Engineering, November, Vol. 129
- [94] Chel, A., Nayak, J.K. and Kaushik, G. (2008), *Energy Conservation in Honey Storage Building Using Trombe Wall*. Energy and Buildings, 40 pp 1643-1650
- [95] Zalewski, L., Lassue, S., Duthoit, B. and Butez, M. (2002), *Study of Solar Walls – Validating a Simulation Model*. Building and Environment 37 pp 109-121
- [96] Akbari, H. (1978), *Free Convective Laminar Flow Within the Trombe Wall Channel*. Lawrence Berkeley National Laboratory. [Consultado em Janeiro de 2011]. Disponível (<http://escholarship.org/uc/item/9fv8k0gk>)
- [97] Chen, D., Chaturvedi, S., Mohieldin, T. (1994), *An Approximate Method for Calculating Laminar Natural Convective Motion in a Trombe wall Channel*, Energy 19 (2) pp 259-268.
- [98] Imessad, K. et Belhamel, M. (1999), *Evaluation des Performances d'un Mur Trombe*. Rev. Energ. Ren.: Valorisation pp 195-198
- [99] Blas Zamora, Molina-Niñirola L. y Viedma A., (2002), *Estudio Numérico del Flujo Inducido por Convección Natural en una Pared Trombe*. Rev. Int. Mét. Num. Cál. di. Ing. Vol. 18 2 pp 227-242
- [100] Chen, B., Zhao, J., Chen, C. and Zhuang, Z. (2006), *Experimental Investigation of Natural Convection in Trombe Wall Systems*. Proceedings of the Sixth International Conference for Enhanced Building Operations, Shenzhen, China, November
- [101] Hami, K., Draoui, B. et. Hami O. (2010), *Modelisation d'un Systeme de Chauffage Passive par la Technique d'un Mur Trombe*. Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Energétique
- [102] Mezrhab, A. and Rabhi, M. (2008), *Modeling of the Thermal Transfers in an Enclosure of the Trombe Wall Type*. Thermodynamic analysis in renewable energy.

- [103] Liping, W and Angui, L. (2006), *A Numerical Study of Trombe Wall for Enhancing Stack Ventilation in Buildings*. Proceedings of the 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, September
- [104] Matuska, T., *A simple Trombe Wall: Comparison of Different Glazings*. [Consultado em Janeiro de 2011]. Disponível em: [http://ptp.irb.hr/upload/mape/kuca/35\\_Tomas\\_Matuska\\_Simple\\_Trombe\\_Wall\\_A\\_Comparison\\_Of\\_Different.pdf](http://ptp.irb.hr/upload/mape/kuca/35_Tomas_Matuska_Simple_Trombe_Wall_A_Comparison_Of_Different.pdf)
- [105] Clarke, J.(1997), *The ESP-r System for Building Energy Simulation*, User Guide Version 9 Series, ESRU Manual U97/1, University of Strathclyde, Glasgow.
- [106] Jie, J., Hua, Y., Gang, P., Bin, J. and Wei, He (2007), *Study of PV-Trombe Wall Assisted with DC Fan*. Building and Environment 42 pp 3529-3539
- [107] Ruiz, Á., Salmerón, J.M., Sánchez, F., González, R. and Álvarez, S. (2005), *A Calculation Model for Trombe Walls and its Use as a Passive Cooling Technique*. International Conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment”, May, Santorini, Greece
- [108] Li, Y., Duanmu, X., Sun, Y., Li, J. and Jia, H. (2007), *Study on the Air Movement Character in Solar Wall System*. Proceedings of the Building Simulation 2007
- [109] Jie, J., ChengLong, L., Wei, S., HanCheng, Y., Wei, H., and Gang, Pei (2009), *An Improved Approach for the Application of Trombe Wall System to Building Construction with Selective Thermo-insulation Façades*. Chinese Sci Bull, 2009, 54: 1949-1956, doi: 10.1007/s11434-009-0353-6
- [110] Zalewski, L., Chantant, M., Lassue, S. and Duthoit, B (1996), *Experimental Thermal Study of a Solar Wall of Composite Type*. Energy and Buildings 25 pp 7-18
- [111] Shen, J., Lassue, S., Zalewski, L. and Huang, D. (2006), Numerical Study on Thermal Behavior of Classical or Composite Trombe Solar Walls.
- [112] Shen, J., Lassue, S., Zalewski, L. and Huang, D. (2007), Numerical Study of Classical and Composite Solar Walls by TRNSYS. Journal of Thermal Science, Vol. 16, No. 1 pp 46-55
- [113] Chen, W. and Liu, W. (2007), *Numerical Analysis of Heat Transfer in a Passive Solar Composite Wall with Porous Absorber*.
- [114] Jie, J., Hua, Y., Gang, P. and Jianping, L. (2007), *Study of PV-Trombe Wall Installed in a Fenestrated Room with Heat Storage*. Applied Thermal Engineering, 27 pp 1507-1515
- [115] Jiang, B., Ji, J. and Yi, H. (2008), *The Influence of PV Coverage Ratio on Thermal and Electrical Performance of Photovoltaic-Trombe wall*. Renewable Energy, 33 pp 2491-2498
- [116] Sun, W., Ji, J., Luo, C. and He, W. (2011), *Performance of PV-Trombe Wall in Winter Correlated with South Façade Design*. Applied Energy, 88 pp 224-231
- [117] Khedari, J., Kaewruang, S., Hirunlabh, J. and Pratinthong, N., *Natural Ventilation of Houses by Trombe Wall*.
- [118] Pratinthong, N., Lertsatitthanakorn, C., Hirunlabh, J. and Khedari, J., *Feasibility Study of Inducing Natural Ventilation and Reducing Heat Transmitted Into Housing by Using a Modified Trombe Wall*.

- [119] Khedari, J., Lertsatitthanakorn, C., Pratinthong, N. and Hirunlabh, J. (1998), *The Modified Trombe Wall: A simple ventilation means and an efficient insulating material*. International Journal of Ambient Energy, 19: 2 pp 104-110
- [120] Khedari, J., Pongsatirat, C., Puangsombut, W. and Hirunlabh, J. (2005) *Experimental Performance of a Partially-Glazed Modified Trombe Wall*. International Journal of Ambient Energy, 26: 1 pp 27-36
- [121] Kara, Y.A., Çırakman, A.K. and Arslantürk, C. (2009), *Solar Energy Storage in Building Structure for Solar Space Heating*. International Conference and Exhibition on Green Energy & Sustainability for Arid Regions & Mediterranean Countries
- [122] Telkes, M. (1978), *Trombe Wall With Phase Change Storage Material*. Proceedings of the 2nd National passive solar conference, E.U.A.
- [123] Silva, P.; *Análise do Comportamento Térmico da Construções não Convencionais através de Simulação em VisualDOE*; Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2004.
- [124] ISO 6946:1996 (E) - *Building Components and Building Elements - Thermal Resistance and Thermal Transmittance - Calculation method*, 1996.
- [125] Dominguez M.; Pinillos J. M.; García, C.; Guitérrez P. *Sistema Passivo de Climatización - Patent de Invention nº 9900558*; Espanha, 18 Março 1999.
- [126] Stritih, U. and Novak, P. (2002), *Thermal Storage of Solar Energy in the Wall for Building Ventilation*. IEA, ECES IA Annex 17, Advanced thermal energy storage techniques - Feasibility studies and demonstration projects. 2nd Workshop, April, Ljubljana, Slovenia
- [127] Paolo Principi Prof. Eng., R.F.D.E., *Passive Solar Wall Integrated With a Latent Storage Layer*.
- [128] Fang, X. and Li, Y. (2000), Numerical Simulation and Sensitivity analysis of Lattice Passive Solar Heating Walls. Solar Energy, Vol. 69 No. 1 pp. 55-66
- [129] Calderaro, V. and Agnoli, S. (2006), *Passive Heating and Cooling Strategies in an Approaches of Retrofit in Rome*. Energy and Buildings, 39 pp 875-885
- [130] Yilmaz, Z. and Kundakci, A.B. (2006), *An Approach for Energy Conscious Renovation of Residential Buildings in Istanbul by Trombe Wall System*. Building and Environment, 43 pp 508-517
- [131] Santos, C.; Matias, L.; *Coeficientes de Transmissão Térmica de Elementos da Envoltura dos Edifícios*, ITE50, LNEC, 2006.
- [132] *Casa Termicamente Optimizada*, [consultado em Agosto de 2010]. Disponível em: <http://www.adeporti.eu>.
- [133] Martins, Analisa; Briga-Sá, Ana; Paiva, Anabela (2010) - *Characteristics of the Trombe Wall and its Application in Portugal* - 37th IAHS World Congress on Housing Science, Santander, Espanha, 26-29 Outubro 2010. Santander: Universidad de Cantabria.
- [134] Passive-On, *A Norma Passivhaus em Climas Quentes da Europa: Directrizes de projecto de casas confortáveis de baixo custo energético, Parte 2: Propostas nacionais em detalhe: Passivhaus Portugal, Julho de 2007*. 2007.

- [135] Lanham, A., Gama, P. e Braz, R., *Arquitetura Bioclimática, Perspectivas de inovação e futuro*. 2004
- [136] Jiménez, M.J.a.M., H., *Models for Describing the Thermal Characteristics of Building Components*. Building and Environment 43 pp 152-162, 2008.
- [137] Leal, V.a.M., E., *The Role of the PASLINK Test Cell in the Modelling and Integrated Simulation of an Innovative Window*. Building and Environment, 43 pp. 217-227, 2008.
- [138] Strachan, P.A.a.B., P.H., *Outdoor testing, analysis and modelling of building components*. Building and Environment 43 pp 127-128, 2008.
- [139] Baker, P.H.a.D., H.A.L., *PASLINK and Dynamic Outdoor Testing of Building components*. Building and Environment 43 pp 143-151, 2008.
- [140] Strachan, P.A., *Role of Simulation in Performance Assessment of Building Components*.
- [141] Baker, P.H., *Round Robin Testing of Building Components Using the Paslink Test Facilities: Quality Assurance in Testing and Analysis*.
- [142] Baker, P.H.a.D., H.A.L., *PASLINK and Dynamic Outdoor Testing of Thermal and Solar Properties of Building Components*.
- [143] Strachan, P., *Model Validation using the PASSYS Test Cells*. Building and Environment, Vol. 28 No. 2 pp. 153-165, 1993.
- [144] Hahne, E.a.P., R., *Improvements on Passys Test Cells*. Solar Energy, Vol. 58 No. 4-6 pp. 239-246, 1996.
- [145] Hart, J.M. (1991), *A Pratical Guide to Infra-red Thermography for building surveys*. Building Research Establishment Report. Watford, Inglaterra.
- [146] Hart, J.M. (1991), *A Pratical Guide to Infra-red Thermography for building surveys*, Watford, Inglaterra: Building Research Establishment Report.