



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

Avaliação do Desempenho Térmico de Paredes de Trombe em Pedra

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Construções

Autor

André Manuel Assunção Alves

Orientadores

Professora Doutora Andreia Sofia Carvalho Pereira

Professor Doutor Diogo Manuel Rosa Mateus

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

Coimbra, julho, 2014

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem a ajuda e contributo de algumas pessoas às quais dirijo os meus profundos agradecimentos.

Agradeço aos meus orientadores, Professora Andreia Sofia Carvalho Pereira, por todas as indicações teóricas e metodológicas desde o início do trabalho, pela partilha de conhecimento e por todos os ensinamentos transmitidos, e ao Professor Diogo Manuel Rosa Mateus, pela disponibilidade, colaboração e conhecimento transmitido.

Aos meus colegas e amigos, com quem passei grandes e bons momentos durante a minha vida académica.

Agradeço acima de tudo aos meus pais, por me terem ajudado e proporcionado a minha formação académica, e pelo apoio e educação que me deram desde sempre.

RESUMO

Portugal enfrenta enormes desafios impostos pela actual situação económica e social no sector da construção civil. As crescentes necessidades na eficiência e sustentabilidade dos edifícios ao nível energético condicionam cada vez mais a concepção da envolvente dos edifícios, em particular das paredes e dos vãos, sendo necessário encontrar novas soluções construtivas e/ou melhorar as já existentes.

Uma solução há muito conhecida dos profissionais do setor, mas pouco utilizada na construção corrente, o sistema parede de Trombe apresenta-se com potencial para reduzir os consumos energéticos ligados à climatização dos espaços interiores, uma vez que permite aproveitar a energia solar para introduzir ganhos térmicos.

No presente trabalho pretende-se avaliar o desempenho térmico de paredes de Trombe para temperaturas interiores, em que o elemento acumulador é composto por pedra natural. Para tal, recorreu-se à modelação numérica através do programa *DesignBuilder* para simular paredes de Trombe em pedra com diferentes espessuras, variação do material construtivo, assim como dos vários componentes que constituem a parede. As simulações foram realizadas para meses da estação de inverno e de verão, na cidade de Coimbra.

Palavras-chave: Parede de Trombe, *DesignBuilder*

ABSTRACT

Nowadays, Portugal faces enormous challenges posed by the current economic and social situation in the construction sector. As far as energy is concerned, the growing needs in buildings' efficiency and sustainability affect the design of the building envelope more and more, particularly walls and openings. Thus, it is necessary to find new construction solutions and / or improve the existing ones.

The Trombe wall system has been a long renowned solution by main professionals, however it is not often used in current construction. This solution has potential to reduce energetic consumption concerning inside spaces cooling, since it is possible to take advantage of solar energy in order to obtain thermal gains.

In this paper we intend to evaluate the thermal performance of Trombe walls for indoor temperatures, in which the accumulator element is made of natural stone. For that purpose, we made use of a numerical modeling software – *DesignBuilder* – in order to simulate stone Trombe walls with different thicknesses, material constructive variation as well as several wall components. The simulations procedures were performed for the months of winter and summer season, in the city of Coimbra.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE QUADROS	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivo e metodologia.....	2
1.3 Estrutura do Documento	3
2 SISTEMAS SOLARES PASSIVOS	4
2.1 Introdução	4
2.2 Sistemas de aquecimento solar passivo	5
2.2.1 Ganho Direto	5
2.2.2 Ganho Indireto.....	6
2.2.3 Ganho Isolado.....	8
3 PAREDE DE TROMBE.....	10
3.1 Introdução	10
3.2 Componentes de uma parede de Trombe.....	11
3.2.1 Parede Acumuladora.....	11
3.2.2 Caixa-de-ar	12
3.2.3 Envidraçado	13
3.2.4 Dispositivos de sombreamento.....	14
3.2.5 Sistemas de ventilação.....	15
3.3 Vantagens e Desvantagens da parede de Trombe.....	16
3.3.1 Vantagens	16
3.3.2 Desvantagens	17
3.4 Parede de Trombe não ventilada.....	17
3.5 Parede de Trombe ventilada.....	18
3.6 Parede de Trombe-Michel composta	18
3.7 Parede de Trombe fotovoltaica	19
3.8 Parede de Trombe com materiais de mudança de fase (PCMs).....	20
3.9 Parede de Trombe com isolante transparente	22
3.10 Parede de Trombe em malha.....	23

3.11	Inércia térmica.....	24
3.12	Atraso Térmico.....	25
3.12.1	Caso de elemento homogéneo	26
3.12.2	Caso de elemento heterogéneo	27
3.13	Calor específico.....	27
4	CONTRIBUIÇÃO PAREDE DE TROMBE – CASOS DE ESTUDO	28
4.1	Comparação entre parede de Trombe com soluções de referência.....	32
4.2	Variação de espessura da parede acumuladora	36
4.3	Variação de espessura da caixa-de-ar	37
4.4	Variação do tipo de vidro.....	39
4.5	Variação da cor	41
4.6	Variação do material construtivo	43
4.7	Introdução de dispositivos de sombreamento	45
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Representação esquemática de sistemas de ganho direto [6].....	5
Figura 2.2 – Representação esquemática de sistemas de ganho indireto [6].....	6
Figura 2.3 – Representação esquemática de sistemas de ganho isolado [6].....	8
Figura 3.1 – Exemplo de uma parede de Trombe [9] [10].	11
Figura 3.2 – Parede de Trombe: a) em betão [12], b) em tijolo [13], c) em pedra [9], d) em pedra preta [14].....	12
Figura 3.3 – Exemplo de caixa-de-ar numa parede de Trombe [17].....	13
Figura 3.4 – Exemplo de sistemas de sombreamento. a) Pala exterior [20], b) Estores [21]. .	15
Figura 3.5 – Exemplo de sistema de sombreamento com árvore de folha caduca.	15
Figura 3.6 – Sistema de ventilação duplamente ventilado. Adaptado de [9].	16
Figura 3.7 – Exemplo de funcionamento de uma parede de Trombe não ventilada [22].....	17
Figura 3.8 – Exemplo de funcionamento de uma parede de Trombe ventilada [22].	18
Figura 3.9 – Parede de Trombe-Michel composta. Adaptado de Shen et al [24].....	19
Figura 3.10 – Parede de Trombe fotovoltaica. Adaptado de Martins [25].....	20
Figura 3.11 – Parede fotovoltaica do edifício solar XXI do INETI [26].....	20
Figura 3.12 – Constituição e funcionamento de uma parede de Trombe com PCMs encapsulados: a) verão, b) inverno. Adaptado de Kara et al [28].....	21
Figura 3.13 – Constituição e funcionamento de uma parede de Trombe com PCMs incorporados nos materiais. Adaptado de Dominguez et al [29].....	22
Figura 3.14 – Parede de Trombe com PCMs incorporados nos materiais [27].....	22
Figura 3.15 – Isolamento transparente [15].....	23
Figura 3.16 – Parede de Trombe em malha. Adaptado de Fang et al [30].....	24
Figura 3.17 – Efeito da massa térmica na estabilização da temperatura interior. Adaptado de [32].....	25
Figura 4.1 – Geometria do compartimento 10 × 10 m.	28
Figura 4.2 – Geometria do compartimento 3 × 30 m.	29
Figura 4.3 – Valores da radiação solar no mês de dezembro.	31
Figura 4.4 – Valores da radiação no mês de junho.....	31

Figura 4.5 – Distribuição da temperatura interior com e sem parede de Trombe para a geometria 10×10 m com ganho interno de 12 W/m^2 , considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	33
Figura 4.6 – Distribuição das temperaturas interiores com e sem parede de Trombe para a geometria 3×30 m com ganho interno de 12 W/m^2 , considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	34
Figura 4.7 – Distribuição das temperaturas interiores com e sem parede de Trombe para a geometria 10×10 m com ganho interno de 6 W/m^2 , considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	35
Figura 4.8 – Distribuição das temperaturas interiores com e sem parede de Trombe para a geometria 3×30 m com ganho interno de 6 W/m^2 , considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	35
Figura 4.9 – Distribuição da temperatura interior fazendo variar a espessura da parede acumuladora com geometria 10×10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	36
Figura 4.10 – Distribuição da temperatura interior fazendo variar a espessura da parede acumuladora com geometria 3×30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	37
Figura 4.11 – Distribuição da temperatura interior com variação de espessura da caixa-de-ar com geometria 10×10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	38
Figura 4.12 – Distribuição da temperatura interior com variação de espessura da caixa-de-ar com geometria 3×30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	39
Figura 4.13 – Distribuição da temperatura interior com vidro simples e vidro duplo com geometria 10×10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	40
Figura 4.14 – Distribuição da temperatura interior com vidro simples e vidro duplo com geometria 3×30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	41
Figura 4.15 – Distribuição da temperatura interior com pedra branca e pedra preta com geometria 10×10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	42
Figura 4.16 – Distribuição da temperatura interior com pedra branca e pedra preta com geometria 3×30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	43

Figura 4.17 – Distribuição da temperatura interior com variação de material com geometria 10 × 10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	44
Figura 4.18 – Distribuição da temperatura interior com variação de material com geometria 3 × 30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	44
Figura 4.19 – Efeito do atraso térmico com isolamento pelo interior no compartimento: a) 10 × 10 m, b) 3 × 30 m.	45
Figura 4.20 – Distribuição das temperaturas interiores com introdução de palas com geometria 10 × 10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	46
Figura 4.21 – Distribuição das temperaturas interiores com introdução de palas com geometria 3 × 30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	47
Figura 4.22 – Distribuição das temperaturas interiores com introdução de estore pelo interior e exterior com geometria 10 × 10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	48
Figura 4.23 – Distribuição das temperaturas interiores com introdução de estore pelo interior e exterior com geometria 3 × 30 m considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.	49

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Relação da temperatura média exterior com o envidraçado necessário em sistemas de ganho direto [6].	6
Quadro 2.2 – Relação da temperatura média exterior com a área de parede necessária por cada m ² de piso em sistemas de ganho indireto [6].	7
Quadro 2.3 – Relação da temperatura média exterior com a área de captação em m ² (vidro) por m ² de piso adjacente [6].	8
Quadro 4.1 – Propriedades dos materiais utilizados.....	30
Quadro 4.2 – Parâmetros térmicos dos materiais utilizados.....	30

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

A energia, nas suas mais variadas formas, é indispensável a todas as actividades do Homem e constitui um fator crítico para o desenvolvimento económico e social. Atualmente, a satisfação das necessidades energéticas do mundo assenta sobretudo na exploração dos combustíveis fósseis. O problema é que estas necessidades têm vindo a aumentar, ao passo que as reservas se esgotam a um ritmo acelerado [1].

A nível nacional, Portugal têm poucos recursos energéticos fósseis endógenos, designadamente petróleo, carvão e gás natural, que garantem as necessidades energéticas da maioria dos países. A falta de recursos fósseis encaminha para uma grande utilização de energia proveniente do exterior. Em 2012, cerca de 78% da energia consumida foi importada, sendo 75% a partir desses recursos. A taxa de dependência energética tem vindo a decrescer desde 2005, sendo o valor mais elevado sido registado em 2005 devido a um ano hidrológico muito seco, e como consequência uma baixa produtividade das centrais hídricas [2].

Em 2012, o consumo dos setores de actividade económica comparativamente ao consumo global de energia em Portugal foi de 32,5% na indústria, 35,7% nos transportes, 17% no setor doméstico, 12% nos serviços e 2,6% na agricultura e pescas, sendo os setores da indústria e dos transportes os maiores consumidores da energia final [2].

Uma alternativa a esta situação é o aumento da eficiência energética no consumo de energia e o aproveitamento do potencial de energias renováveis, que em Portugal é assinalável, com destaque para a energia solar, eólica, hídrica e da biomassa [1].

A energia e a sua utilização mais eficiente assumem uma importância indiscutível na operacionalização do desenvolvimento sustentável, sendo essencial que se criem estratégias e iniciativas de longo prazo, que possibilitem o melhor aproveitamento dos recursos energéticos [1].

Um dos factores para a sustentabilidade energética é melhorar o desempenho dos edifícios, e para isso é preciso tomar medidas de eficiência energética. Nesse contexto surge a Diretiva n.º 2010/31/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Maio de 2010, relativa aos

desempenhos energéticos dos edifícios. Essa Diretiva foi transposta para a legislação portuguesa para o Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de Agosto, que promove a melhoria do desempenho energético dos edifícios através do sistema certificação energética dos edifícios (SCE), que inclui o regulamento de desempenho energético dos edifícios de habitação (REH), e o regulamento de desempenho energético dos edifícios de comércio e serviços (RECS) [3].

O REH estabelece os requisitos para os edifícios de habitação novos ou sujeitos a intervenção, parâmetros e metodologias de caracterização do seu desempenho energético e dos seus sistemas técnicos, no sentido de promover a melhoria do respectivo comportamento térmico e a minimização do risco de ocorrência de condensações superficiais nos elementos da envolvente [3].

No RECS estão descritas regras a analisar em projeto, construção, intervenção e manutenção de edifícios de comércio e serviços bem como os requisitos para a caracterização do seu desempenho, no sentido de promover a eficiência energética e a qualidade do ar interior. Para edifícios novos ou com necessidade de grandes intervenções, estão presentes requisitos de qualidade térmica da envolvente, e de concepção e de instalação dos sistemas técnicos [3].

Existem várias formas de aproveitar a energia solar e uma das soluções, é a utilização de um sistema de aquecimento solar passivo de ganho indireto, designado por parede de Trombe, que permite a captação de energia solar para fazer o aquecimento do espaço interior. Este sistema tem a capacidade de acumular o calor durante o dia e de o transmitir de noite para o interior dos espaços, funcionando como radiadores gratuitos no inverno.

1.2 Objetivo e metodologia

A presente dissertação tem como objetivo avaliar do ponto de vista térmico, o desempenho de uma parede de Trombe.

Para fazer essa avaliação, recorreu-se ao programa Designbuilder para simular alguns casos de estudo, de modo a avaliar o contributo que uma parede de Trombe pode conceder para o aquecimento de espaços interiores. Foram realizadas diversas simulações considerando diversas disposições construtivas tais como variação de material, variação da espessura da parede acumuladora, da caixa-de-ar e do envidraçado. Foram também introduzidos estores e uma protecção solar (pala) no edifício.

1.3 Estrutura do Documento

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. No capítulo um é feito um pequeno enquadramento do tema. No capítulo dois são referenciados os sistemas solares passivos, dando-se destaque aos sistemas de aquecimento solar passivo assim como a sua classificação, pois é nesta temática que se insere o sistema parede de Trombe.

No capítulo três são indicados os constituintes de uma parede de Trombe, as suas variantes, e alguns parâmetros essenciais para o presente estudo deste trabalho. O capítulo quatro é a análise de todos os resultados obtidos no trabalho realizado, onde estão descritos os procedimentos utilizados com uma pequena crítica no final. O capítulo cinco contém as considerações finais/conclusão.

2 SISTEMAS SOLARES PASSIVOS

2.1 Introdução

A energia solar pode ser aproveitada de diversas formas nos edifícios. O seu aproveitamento pode ser feito de duas formas distintas, através de sistemas ativos ou passivos.

Os sistemas ativos (SA) são dispositivos “artificiais” que se instalam para fazer a captação da radiação solar. Painéis solares são um exemplo deste tipo de sistema, em que o seu funcionamento é muito simples. A energia solar incidente no painel é captada aquecendo um fluido (água) de transferência de calor que se encontra dentro do painel. O fluido após sofrer o aquecimento circula em circuito fechado e é transportado com a ajuda de uma bomba através de tubos isolados para um reservatório. Este sistema é a solução mais usual para o aquecimento de águas sanitárias (AQS) [4].

Os sistemas passivos (SP) são dispositivos de captação que fazem parte da solução construtiva dos edifícios que permitem contribuir para o seu aquecimento ou arrefecimento. No inverno estes sistemas são denominados de sistemas de aquecimento passivo e no verão de sistemas de arrefecimento passivo [4].

Os sistemas de aquecimento solar passivo devem ser incorporados durante a fase inicial do projeto, visto que utilizam vários componentes do edifício para recolher, armazenar e distribuir os ganhos solares adquiridos de modo a reduzir as necessidades de aquecimento do espaço. São determinantes na redução de consumo de energia resultante dos sistemas de aquecimento convencional, substituindo os combustíveis fósseis e reduzindo a poluição ambiental no setor da construção.

Segundo Gonçalves e Graça [5], a introdução desta estratégia (SP) pode reduzir o consumo de energia para aquecimento entre 25% a 75% durante o ciclo de vida, comparado com um edifício que não considere o sistema solar passivo na sua concepção.

Existem três tipos de sistemas para a implementação do aquecimento solar passivo que podem ser classificados da seguinte forma:

- Ganho Direto;
- Ganho Indireto;
- Ganho Isolado.

Estes sistemas são descritos nas próximas secções do presente capítulo.

2.2 Sistemas de aquecimento solar passivo

2.2.1 Ganho Direto

Os sistemas de ganho direto são a abordagem mais simples e mais utilizada. Através dos vãos envidraçados, captam a radiação solar para o interior do espaço (Figura 2.1) [6].

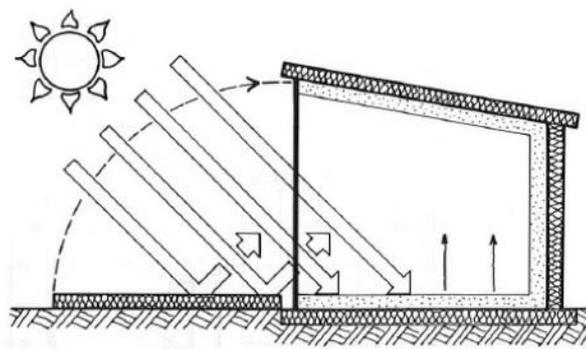


Figura 2.1 – Representação esquemática de sistemas de ganho direto [6].

Sendo a capacidade do ar em absorver a energia solar ser praticamente nula, o espaço deverá ser constituído por materiais densos com grande capacidade de armazenamento térmico e com elevado poder de absorção de radiação (tons escuros). Durante o período diurno, a massa térmica absorve o calor resultante da incidência da radiação, para que no período noturno a liberte para o espaço interior [6].

Os envidraçados são um elemento fundamental para o aquecimento do espaço, pelo que se deverá ter atenção ao seu dimensionamento, assim como ao seu sombreamento no verão, para precaver o sobreaquecimento interior. O vidro terá de ter um coeficiente de transmissão térmica elevado para ter um grande desempenho. De modo a evitar perdas térmicas no período em que o aquecimento é mais necessário, a utilização de persianas é uma solução a ter em conta para o isolamento.

Segundo Mazria (1979), o Quadro 2.1 estabelece uma relação de referência entre a temperatura média exterior no inverno, com a dimensão máxima dos vãos envidraçados e a superfície de piso que servem [6].

Quadro 2.1 – Relação da temperatura média exterior com o envidraçado necessário em sistemas de ganho direto [6].

Temperatura média exterior no inverno (°C)	Área de vidro em m ² necessária para cada m ² de piso
-4	0,32
-1	0,28
+2	0,24
+5	0,20
+8	0,16

2.2.2 Ganho Indireto

Nos sistemas de ganho indireto o aquecimento do espaço interior é feito indiretamente. Estes sistemas consistem na captação da energia solar por meio de uma parede acumuladora, constituída por materiais densos (betão, tijolo maciço, pedra), situada entre o espaço que se pretende aquecer e o envidraçado exterior (Figura 2.2) [6].

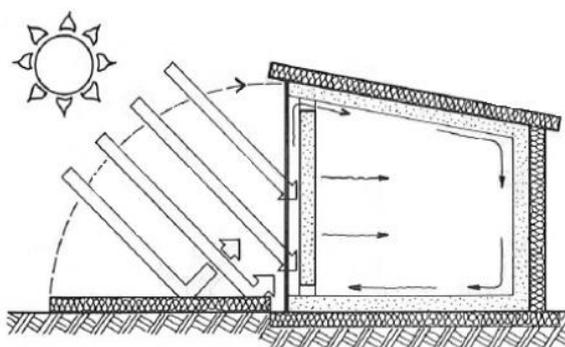


Figura 2.2 – Representação esquemática de sistemas de ganho indireto [6].

Segundo Moita [6], a energia solar absorvida com este sistema pode ser transmitida diretamente para o espaço interior por ventilação ou com desfasamento no tempo, de maneira a colmatar as necessidades de aquecimento numa altura explícita do dia, funcionando por condução, dependendo do material e espessura da parede, sendo designada por “parede de armazenamento”. A espessura da parede desempenha um papel essencial no comportamento

deste sistema, uma vez que condiciona a quantidade de calor fornecida ao espaço e a sua distribuição temporal.

A parede de armazenamento pode ser constituída, como foi referido anteriormente, por materiais densos, mas pode ser executada por outro tipo de material que permita a acumulação térmica. A utilização de água permite uma capacidade de armazenamento dez e cinco vezes superior em relação a uma parede de alvenaria e a uma parede de betão respetivamente, devido ao seu calor específico. Existe uma diferença entre estas duas paredes. No caso da parede de água, esta consegue fazer uma transferência de calor muito mais rápida [7].

No caso de uma parede acumuladora designada por “parede de Trombe”, assunto alvo de estudo no presente trabalho, conter orifícios de ventilação nas partes inferior e superior da parede acumuladora, o ar quente existente na caixa-de-ar aquece o espaço interior por convecção natural, ou por condução, caso os orifícios estejam fechados. O vidro que compõe essa zona intermédia ou de “estufa” deve situar-se entre os 10 cm e 15 cm da parede acumuladora para que possa suportar as amplitudes térmicas entre o interior e o exterior, de modo a contribuir para um ambiente mais ameno no interior do espaço. É possível relacionar as áreas de parede de captação com a superfície do piso a aquecer, segundo as temperaturas médias exteriores no Inverno de modo a manter uma temperatura constante durante o dia inteiro entre os 18 °C e os 24 °C [6].

Quadro 2.2 – Relação da temperatura média exterior com a área de parede necessária por cada m² de piso em sistemas de ganho indireto [6].

Temperatura média exterior no inverno (°C)	Área de parede em m ² necessária por cada m ² de piso	
	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	0,20 - 0,35
+8	0,25 - 0,35	0,15 - 0,25

Ao contrário dos sistemas de ganho direto, este sistema (parede de Trombe) não só previne em grande parte o sobreaquecimento do espaço pelo controlo possível do sistema, como possibilita temperaturas estáveis em termos de conforto nos dias de eventual fraca radiação.

2.2.3 Ganho Isolado

Nos sistemas de ganho isolado, os seus princípios térmicos são uma combinação dos sistemas estudados anteriormente. Nem a captação de raios solares, nem o armazenamento se encontram nas áreas habitadas do edifício, mas sim numa zona isolada normalmente denominada de “estufa”. A “estufa” permite a transmissão de ganhos ao espaço adjacente por condução, ou caso haja aberturas entre as divisões, por convecção [6].

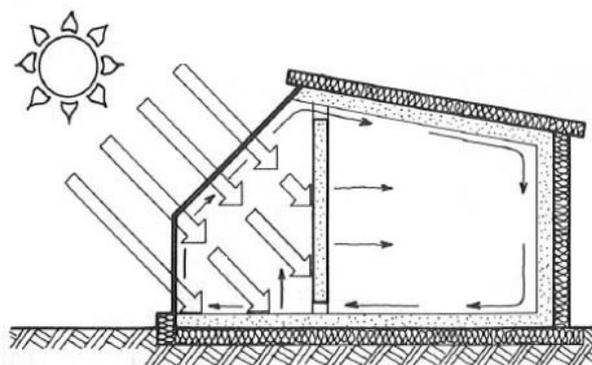


Figura 2.3 – Representação esquemática de sistemas de ganho isolado [6].

Este sistema é particularmente interessante de ser utilizado em zonas com maior percentagem de dias com céu encoberto, uma vez que possibilita ganhos consideráveis provenientes da radiação difusa, pela grande superfície de envidraçados descobertos. Este sistema permite cumprir a função de zona tampão à zona contígua a esta, contribuindo para a redução das suas perdas energéticas. De modo a evitar as perdas pelo próprio espaço da “estufa” deverão ser considerados mecanismos de isolamento nocturno, à semelhança dos sistemas de ganho direto. Deve ser no entanto alvo de um desenho cuidado, principalmente no seu dimensionamento e orientação para que se alcance o equilíbrio necessário entre a área de captação e a massa de armazenamento térmico existente.

Quadro 2.3 – Relação da temperatura média exterior com a área de captação em m^2 (vidro) por m^2 de piso adjacente [6].

Temperatura média exterior no inverno (°C)	Área de captação solar em m^2 (vidro) por m^2 de piso adjacente	
	Parede maciça	Parede de água
-4	0,8 - 1,3	0,6 - 1,0
-1	0,6 - 1,2	0,5 - 0,8
+2	0,5 - 0,9	0,4 - 0,7
+5	0,4 - 0,7	0,3 - 0,5
+7	0,3 - 0,5	0,2 - 0,4

A introdução desta estratégia deve ser ponderada de acordo com as condições climáticas específicas do local, como a temperatura exterior, o vento e principalmente a radiação solar, uma vez que a captação da radiação é um fator essencial para uma maior eficiência de implementação.

3 PAREDE DE TROMBE

3.1 Introdução

A parede de Trombe foi desenvolvida como um elemento arquitectónico pelo engenheiro francês Félix Trombe e pelo arquitecto Jacques Michel, que popularizaram o sistema de aquecimento na década de 60. Mas a ideia é mais antiga. A parede de massa térmica foi explorada pela primeira vez por Edward S. Morse e patenteada por ele em 1881 [8].

Esta parede é basicamente uma pequena "estufa", que é constituída por um vidro exterior orientado a sul, uma caixa-de-ar, e uma parede de grande densidade e espessura, que lhe garante grande inércia térmica. Normalmente estas paredes são construídas em pedra, tijolo maciço ou betão.

São de construção simples, tratando-se assim de um sistema capaz de absorver a energia do sol, armazená-la no interior da parede devido à sua inércia térmica, e irradiar o calor para dentro da divisão adjacente durante a noite, ou quando for necessário, através de fenómenos de transferência de calor (condução ou convecção).

As paredes de Trombe são particularmente eficazes em locais com forte radiação solar com mudanças bruscas de temperatura durante a noite. São uma excelente forma de usar a energia solar para aquecer um espaço interior. Esta solução contribui para aumentar o conforto térmico e para reduzir as necessidades energéticas dos edifícios habitacionais com alçados orientados a sul, pois é nesta posição que é possível captar a maior intensidade da radiação solar (período entre o final da manhã e o início da tarde). Esta orientação favorece a baixa altitude solar (inverno), sem prejudicar o conforto com ganhos indiretos excessivos durante o verão. Não necessitam de manutenção e funcionam como radiadores gratuitos, aquecendo os espaços em que se encontram sempre que haja sol no inverno.

A integração da parede de Trombe na arquitectura é simples, visto que do lado exterior passa por uma janela normal (Figura 3.1 a)). Se a parede de Trombe não estiver programada em projeto, a sua posterior inclusão pode não se enquadrar na arquitectura do edifício (Figura 3.1 b)).



Figura 3.1 – Exemplo de uma parede de Trombe [9] [10].

Nas próximas secções do presente capítulo vão ser analisadas com detalhe as componentes de uma parede de Trombe.

3.2 Componentes de uma parede de Trombe

O dimensionamento da parede de Trombe e a optimização do seu desempenho tem como base as características de cada um dos seus constituintes e do seu conjunto. É essencial conhecer a capacidade de armazenamento térmico do material que constitui a parede acumuladora, a condutibilidade térmica do vidro, e a aplicação/ponderação de dispositivos de sombreamento e ventilação [11].

3.2.1 Parede Acumuladora

A parede acumuladora consiste numa parede de armazenamento térmico sem aberturas para a circulação do ar entre o interior do compartimento e a caixa-de-ar. É normalmente constituída por materiais com elevada densidade, como por exemplo o betão, tijolo maciço ou quase maciço e pedra (Figura 3.2 a), b), c)), pois são materiais com grande capacidade de armazenamento de calor, uma condutibilidade térmica elevada que permite que o calor seja transferido para o interior do material para posterior armazenamento, e emissividade elevada, que consiste na capacidade de emissão de energia por radiação da sua superfície, que permite a absorção de radiação em quantidade superior àquela que é refletida [11].

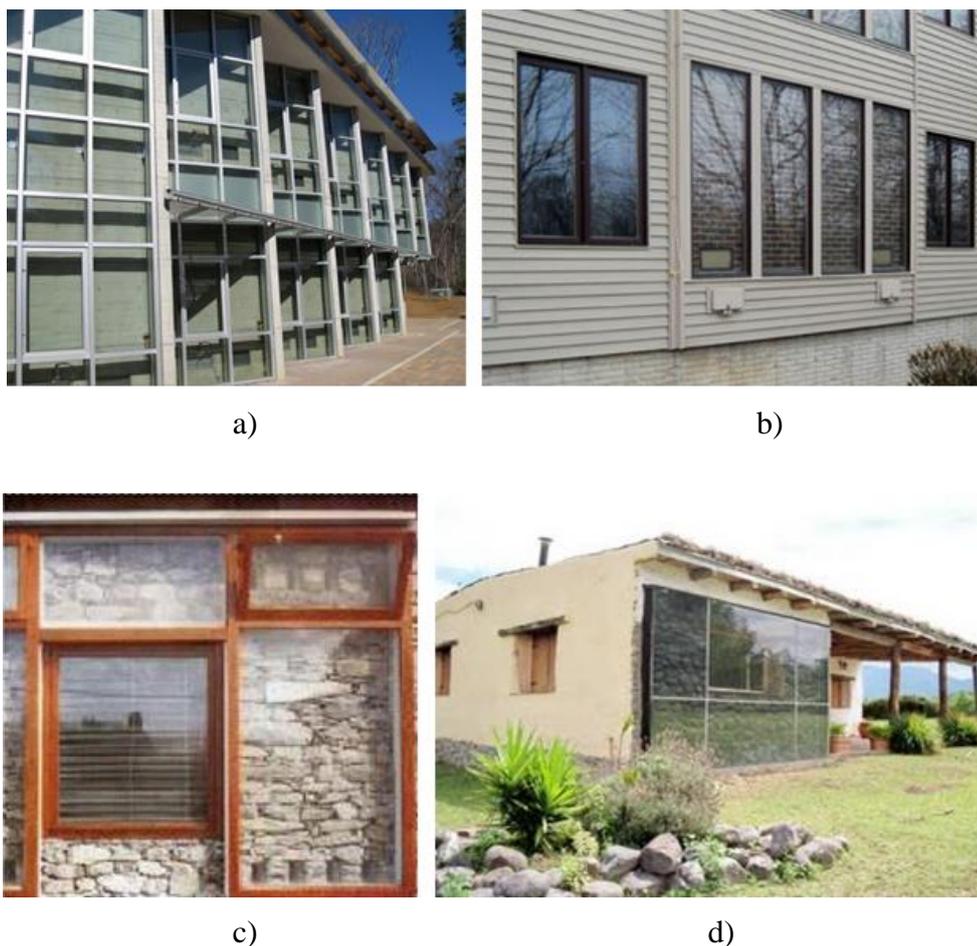


Figura 3.2 – Parede de Trombe: a) em betão [12], b) em tijolo [13], c) em pedra [9], d) em pedra preta [14].

A cor é uma característica importante para a capacidade de absorção de calor da massa térmica do material. A face exterior da parede acumuladora deve ser pintada com uma cor escura para potenciar a absorção de energia (Figura 3.2 d)). Uma superfície cujo material esteja pintado de cor escura absorve mais calor que uma pintada de cor clara, e o seu efeito na temperatura de um compartimento pode resultar num aumento de temperatura entre 2 °C e 3 °C.

A espessura da parede acumuladora deve variar em função das propriedades do material (densidade, calor específico e condutibilidade térmica) e do atraso térmico pretendido, sendo este o fator determinante para conseguir a devolução nocturna do calor ao edifício.

3.2.2 Caixa-de-ar

A caixa-de-ar é a abertura que fica entre a parede acumuladora e o envidraçado exterior (Figura 3.3). É nela que fica armazenado o calor proveniente da radiação solar incidente.

Serve para evitar a perda da radiação térmica que vai sendo ganha pela exposição solar durante o dia e potenciar o efeito de estufa.

A espessura da caixa-de-ar não tem uma medida *standard*, pois para Mendonça [15], a caixa-de-ar deve ter entre 5 a 20 cm de espessura, segundo Torcellini [16] esta deve ter de 2 a 5 cm e para Moita [6] deve ter entre 10 a 15 cm.

Os valores da espessura da caixa-de-ar têm uma grande influência na 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, caso existam [11].

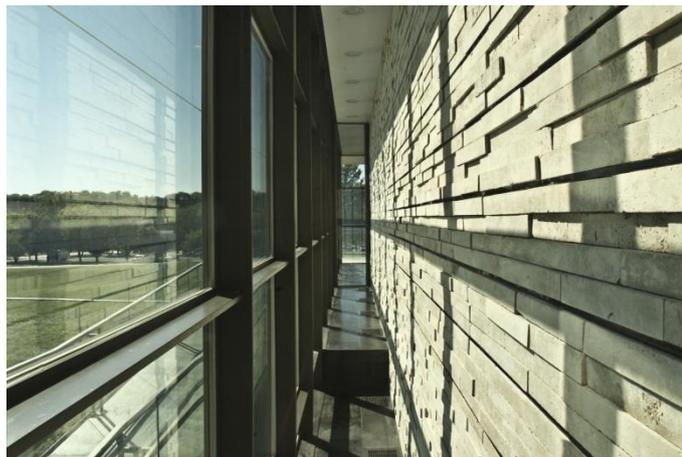


Figura 3.3 – Exemplo de caixa-de-ar numa parede de Trombe [17].

3.2.3 Envidraçado

O envidraçado é o elemento construtivo que fica no exterior da parede de Trombe, pois é nele que incide a radiação solar que depois se transfere para a caixa-de-ar.

Para que o vidro tenha um bom desempenho térmico, deverá ter-se em atenção algumas características chave, nomeadamente o coeficiente de transmissão térmica, U , o fator solar, g , e a transmitância α (solar e visível) [18], sendo U , a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente, por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que o elemento separa, g , o valor da relação entre a energia solar transmitida para o interior através do vão envidraçado e a radiação solar nele incidente, e α , a fração da luz incidente com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra de matéria.

Um dos fatores com papel crucial neste elemento é a espessura e o tipo de vidro. Podem ser utilizados vidros simples ou vidros duplos. Como foi referido anteriormente, o coeficiente de

transmissão térmica (U) tem um papel fundamental no desempenho do vidro. Um vidro duplo tem melhor desempenho térmico que um vidro simples, pois o seu coeficiente de transmissão térmica é menor. Estes valores podem ser consultados nas tabelas do LNEC, LNEC – ITE 50. A localização e orientação na envolvente do edifício e da geometria da insolação na zona climática em questão também devem ser considerados no estudo deste elemento.

É importante também analisar o material que envolve o vidro, a caixilharia. Este elemento tem um grande papel no que diz respeito à estanquidade e à operacionalidade do mesmo. O caixilho influencia para além do comportamento térmico, a resistência, a durabilidade e até a estética. Geralmente os materiais escolhidos para a concepção dos caixilhos são a madeira, o metal e o polímero PVC (policloreto de vinil). A gama de valores para os coeficientes de transmissão térmica da madeira situa-se entre os 2 a $2,5 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, para o metal de $10,5 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (sem corte térmico) e $5,5 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (com corte térmico) e para o PVC anda na ordem dos $1,7 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ [19].

3.2.4 Dispositivos de sombreamento

O dimensionamento dos dispositivos de sombreamento deve ser uma medida a ter em consideração para o controlo dos ganhos solares. A parede de Trombe não dispensa uma proteção solar pelo exterior, para que este sistema só produza calor quando é necessário.

Existem diversos tipos de sombreamento solar para os edifícios. Palas exteriores ou estores são os elementos mais utilizados para conceber o sombreamento. No caso de utilização de palas (Figura 3.4 a)), essas deverão impedir a radiação solar de verão de atingir o vidro, não permitindo assim a acumulação de calor, pois no inverno a incidência solar é bastante mais horizontal que no verão [15]. A Figura 3.4 b) mostra a utilização de estores.

Um outro tipo de dispositivo de sombreamento é a utilização de vegetação. Árvores de folha caduca podem ser utilizadas para proporcionar sombra onde há benefícios sazonais, pois no verão impossibilitam o excesso de incidência de radiação solar e no inverno aumentam os ganhos solares (Figura 3.5) [11].



Figura 3.4 – Exemplo de sistemas de sombreamento. a) Pala exterior [20], b) Estores [21].

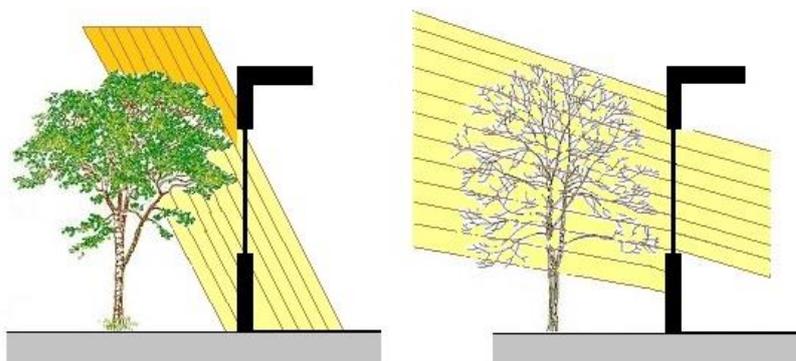


Figura 3.5 – Exemplo de sistema de sombreamento com árvore de folha caduca.

3.2.5 Sistemas de ventilação

Com a introdução de ventilação existem diferentes designações para este sistema passivo. Se a parede acumuladora não tiver sistemas de ventilação, designa-se por parede de Trombe não ventilada (PTNV). Se forem incluídos sistemas de ventilação, o sistema passa a designar-se por parede de Trombe ventilada (PTV).

Os sistemas de ventilação podem localizar-se na parede acumuladora através de pequenas aberturas, ou podem existir simultaneamente na parede acumuladora e no envidraçado, designando-se por parede de Trombe duplamente ventilada (Figura 3.6) [11].



Figura 3.6 – Sistema de ventilação duplamente ventilado. Adaptado de [9].

Com os sistemas de ventilação temos uma maior rapidez na introdução de ar quente no compartimento. A massa de ar quente que se encontra na caixa-de-ar entra através das aberturas superiores, por ser menos densa, e sai pelas aberturas inferiores, estabelecendo um movimento de ar por termo-circulação, eliminando a necessidade de ventilação por meios mecânicos.

Os sistemas de ventilação podem ser projetados de maneira a que possam ser abertos ou fechados quando necessário, para não haver um sobreaquecimento ou arrefecimento do espaço interior nas respectivas estações. No caso da parede de Trombe duplamente ventilada, o envidraçado deve conter ventilação para permitir o arrefecimento da caixa-de-ar na estação quente [11].

3.3 Vantagens e Desvantagens da parede de Trombe

3.3.1 Vantagens

- Reduz o consumo de energia para o aquecimento (vantagens económicas),
- Atuam como aquecedores no inverno,
- As oscilações de temperatura no interior da habitação são menores, aumentando o conforto interior das habitações ao longo do ano,
- Sistema de aquecimento passivo de baixa manutenção.

3.3.2 Desvantagens

- No verão, caso não sejam aplicadas soluções de sombreamento eficazes (palas de sombreamento/persianas) provocam sobreaquecimento do espaço,
- A espessura elevada da parede diminui o espaço útil da habitação,
- As perdas térmicas noturnas costumam ser elevadas,
- As paredes de armazenamento impedem as vistas para o exterior, e com isso a ausência de iluminação natural.

Seguidamente serão expostas várias soluções de concepção de uma parede de Trombe.

3.4 Parede de Trombe não ventilada

A parede de Trombe não ventilada é composta por uma parede acumuladora, por uma caixa-de-ar e por um vão envidraçado. Esta parede acumuladora não apresenta sistemas de ventilação, não havendo circulação de ar dentro da caixa-de-ar. A transmissão de calor para dentro do compartimento dá-se por fenómenos de condução através da parede acumuladora. A face interior da parede deve ser estucada e pintada, ficando com um aspecto idêntico a qualquer outra parede da habitação.

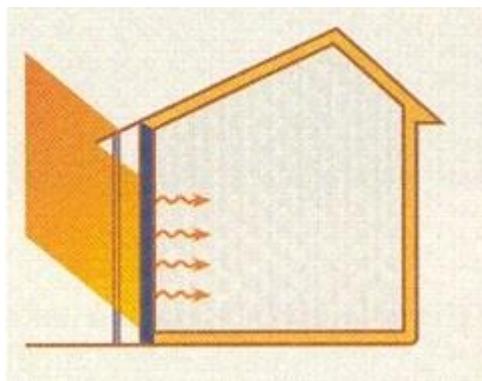


Figura 3.7 – Exemplo de funcionamento de uma parede de Trombe não ventilada [22].

Os raios solares atravessam o envidraçado e aquecem a zona de armazenamento (caixa-de-ar). O calor que se reúne nesse espaço, vai ao longo do tempo aquecendo a parede, libertando mais tarde o calor para o interior da habitação. Este é um processo que se dá por condução, e o tempo que o calor demora a ser transferido para o interior, depende do material e da espessura da parede.

A parede de Trombe não ventilada é recomendável para espaços com ocupação nocturna devido ao processo de transferência de calor. Numa habitação, a zona aconselhada para a implementação deste sistema é o quarto, visto ser a divisão na qual os habitantes ocupam e frequentam em horários noturnos.

3.5 Parede de Trombe ventilada

A parede de Trombe ventilada consiste numa pequena modificação em relação à solução anteriormente descrita, através da introdução de aberturas para ventilação na parte superior e inferior da parede acumuladora (Figura 3.8).

A radiação solar atravessa o envidraçado situado no exterior da parede de Trombe, aquecendo-a. O calor absorvido pela parede é transmitido posteriormente por convecção e condução com as aberturas abertas, ou apenas por condução caso as aberturas estejam fechadas. Com as aberturas abertas, o espaço pode ter assim um aquecimento mais rápido através da simples circulação de ar quente na caixa-de-ar [23]. As aberturas de ventilação devem conter um sistema que possibilitem o controlo do fluxo para evitar o sobreaquecimento do espaço.

A utilização da solução parede de Trombe ventilada é aconselhável para os espaços de ocupação diurna porque o calor é transmitido para o interior da habitação mais rapidamente comparativamente com as paredes de Trombe não ventiladas.

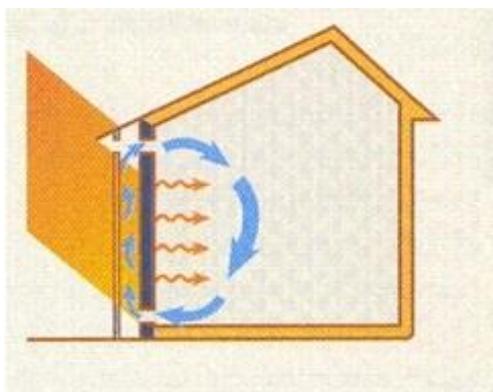


Figura 3.8 – Exemplo de funcionamento de uma parede de Trombe ventilada [22].

3.6 Parede de Trombe-Michel composta

A parede de Trombe-Michel composta (Figura 3.9) é semelhante a uma parede de Trombe clássica (PTV) mas difere num pormenor, com a introdução de isolante na parte de trás da

parede acumuladora. A vantagem da introdução do isolamento é fazer com que as perdas de calor sejam diminuídas.

Shen et al [24] apresentam um estudo onde comparam a parede de Trombe clássica e a parede de Trombe-Michel composta, e chegam à conclusão que a parede de Trombe-Michel tem melhor comportamento térmico que a parede de Trombe clássica.

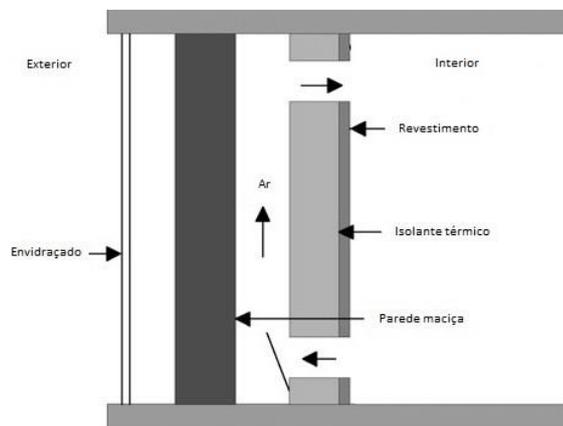


Figura 3.9 – Parede de Trombe-Michel composta. Adaptado de Shen et al [24]

3.7 Parede de Trombe fotovoltaica

Segundo Martins [25], a parede de Trombe fotovoltaica difere da parede de Trombe clássica com a introdução de um vidro com células fotovoltaicas, em substituição do envidraçado normal e com opção de isolamento térmico na parede acumuladora (Figura 3.10) [18].

Parte da radiação incidente é absorvida pela parede acumuladora, enquanto que a outra é acumulada no painel de vidro. A transferência da massa de ar quente para o interior do compartimento dá-se por condução através da parede acumuladora ou então por convecção através das aberturas de ventilação. Esta parede tem uma vantagem, aproveita o painel de vidro para a produção de energia elétrica. Exemplo de uma parede de Trombe fotovoltaica na Figura 3.11.

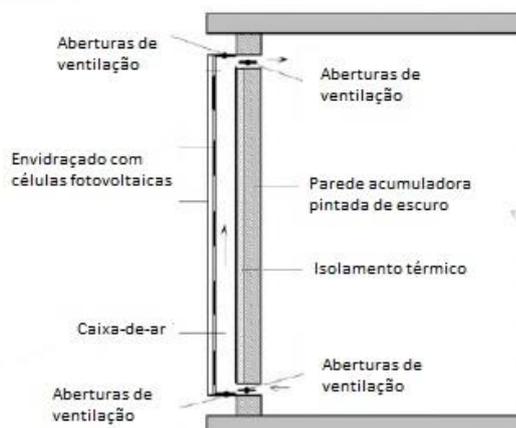


Figura 3.10 – Parede de Trombe fotovoltaica. Adaptado de Martins [25].



Figura 3.11 – Parede fotovoltaica do edifício solar XXI do INETI [26].

3.8 Parede de Trombe com materiais de mudança de fase (PCMs)

Os PCMs, abreviatura de *Phase Change Materials*, são materiais com capacidade de armazenamento de energia calorífica, sendo esta liberta consoante a mudança de fase. Durante os períodos de aumento da temperatura, à medida que se dá a mudança para o estado líquido, o calor é absorvido pelo PCM. Quando há uma diminuição de temperatura, dá-se a solidificação do PCM e a conseqüente libertação de energia em forma de calor [27].

A parede de Trombe com materiais de mudança de fase PCMs pode ser concebida de duas formas. Incorporando PCMs encapsulados nos materiais de construção, como por exemplo o betão, placas de gesso, materiais de revestimento de paredes, em que a energia solar é absorvida diretamente pela estrutura do edifício, ou então pela introdução de PCMs sem encapsulamento nos materiais utilizados, como por exemplo o tijolo de vidro [25].

Ao projetar uma parede de Trombe com PCMs, é fundamental ter em conta a temperatura de fusão e de solidificação do material. Ambas as temperaturas devem ser próximas das respectivas temperaturas de conforto. A temperatura de fusão deve ser abaixo da temperatura de conforto para o verão, ao passo que a temperatura de solidificação deve ser acima da temperatura de conforto para o inverno. O calor libertado ao solidificar e o calor absorvido ao liquefazer devem ser o mais alto possível [23].

A parede de Trombe com PCMs encapsulados é constituída por uma parede acumuladora com revestimento com PCMs encapsulados, caixa-de-ar e um envidraçado triplo que contenha materiais de isolamento transparente, designado por TIM (*Transparent Insolation Material*) (Figura 3.12) [23] [25].

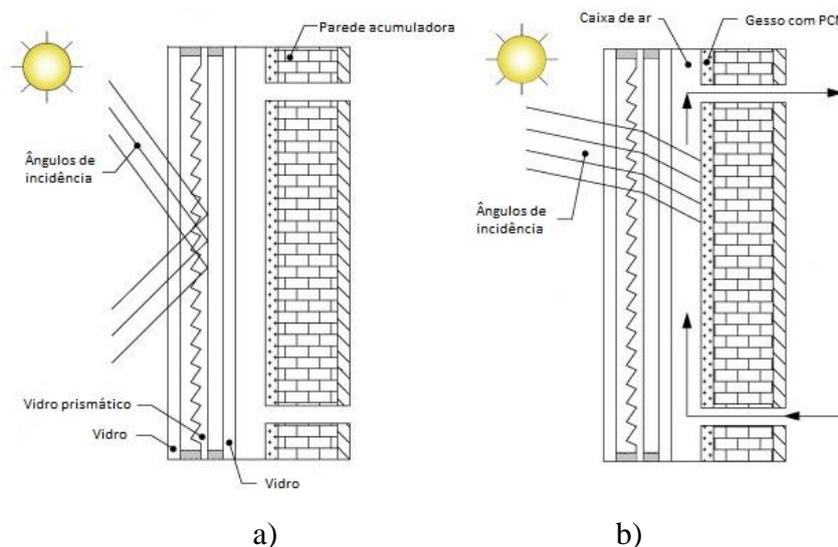


Figura 3.12 – Constituição e funcionamento de uma parede de Trombe com PCMs encapsulados: a) verão, b) inverno. Adaptado de Kara et al [28].

Como se pode observar pela Figura 3.12, os ângulos de incidência dos raios solares são mais pequenos no inverno do que no verão, e como tal, o TIM é projectado para que transmita os raios solares com menor ângulo de incidência e reflita os raios solares com maior ângulo de incidência para evitar o sobreaquecimento do espaço. Durante o Inverno a radiação é absorvida pelo TIM, acumulando o calor no revestimento da parede acumuladora com PCMs encapsulados. A circulação do ar quente para dentro do compartimento faz-se através das aberturas existentes na parede [23] [25].

Uma segunda solução para incorporar PCMs na parede de Trombe é a utilização de blocos de vidro, que se assemelha a uma parede de Trombe clássica. Trata-se de uma solução mais leve e translúcida, em comparação com os materiais normalmente utilizados. Esta parede é constituída por uma parede acumuladora de blocos de vidro (com PCMs incorporados) com

aberturas de ar reguláveis, caixa-de-ar, envidraçado exterior com um sistema manual de ventilação, que no Verão deve estar aberto e no Inverno fechado (Figura 3.13) [23] [27].

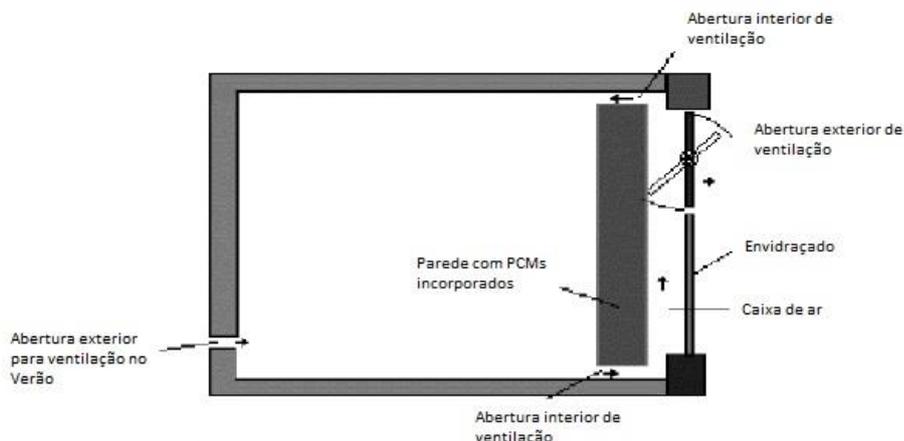


Figura 3.13 – Constituição e funcionamento de uma parede de Trombe com PCMs incorporados nos materiais. Adaptado de Dominguez et al [29]

Os raios solares incidentes atravessam o envidraçado aquecendo o ar que se encontra na caixa-de-ar e conseqüentemente a parede acumuladora constituída por blocos de vidro. Quando o material fica fundido, fica escuro. O calor é transferido para o interior do compartimento através das aberturas existentes na parede acumuladora.



Figura 3.14 – Parede de Trombe com PCMs incorporados nos materiais [27].

3.9 Parede de Trombe com isolante transparente

A parede de Trombe com isolante transparente é parecida à parede de Trombe clássica apenas diferenciando no material utilizado no pano exterior da parede. Em vez do tradicional envidraçado, neste tipo de parede utiliza-se um isolamento transparente. Este deve ser

protegido pelo exterior com vidro ou com plásticos resistentes, como policarbonato ou tetrafluoretileno etileno (ETFE) (Figura 3.15) [15].

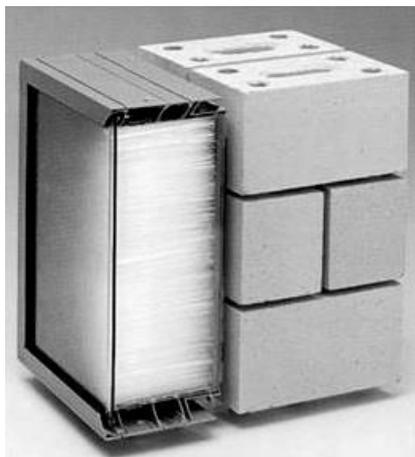


Figura 3.15 – Isolamento transparente [15].

A espessura destas paredes deve ser dimensionada de forma a evidenciar o atraso térmico apropriado e se possível, completar eventuais ganhos directos. Deve ser avaliada de acordo com as condições específicas do local a ser implementada e do tipo de isolamento. Mendonça [15] refere que a espessura de isolamento térmico transparente situa-se entre 4 a 8 cm e a sua resistência térmica deve variar entre 0.8 a 1.6 m² K/W.

Esta solução revela-se bastante viável tendo em conta que os materiais de isolamento transparente combinam boas propriedades de transmissão com elevada resistência térmica. A nível estético, como não formam condensações tão facilmente têm um efeito mais agradável que o vidro convencional. Um fator que pode danificar o isolamento e criar problemas de conforto são as altas temperaturas que se formam na face exterior da parede acumuladora, pelo que o sobreaquecimento deste, deve ser prevenido no verão com sistemas de sombreamento [15].

3.10 Parede de Trombe em malha

A parede de Trombe em malha, estudada por Fang et al [30] é constituída por uma parede interior em malha de tijolos cerâmicos ou blocos de betão, caixa-de-ar de 50 a 100 mm e envidraçado exterior. A malha da parede constitui um reticulado de blocos e aberturas de circulação de ar distribuídas uniformemente (Figura 3.16) [23].

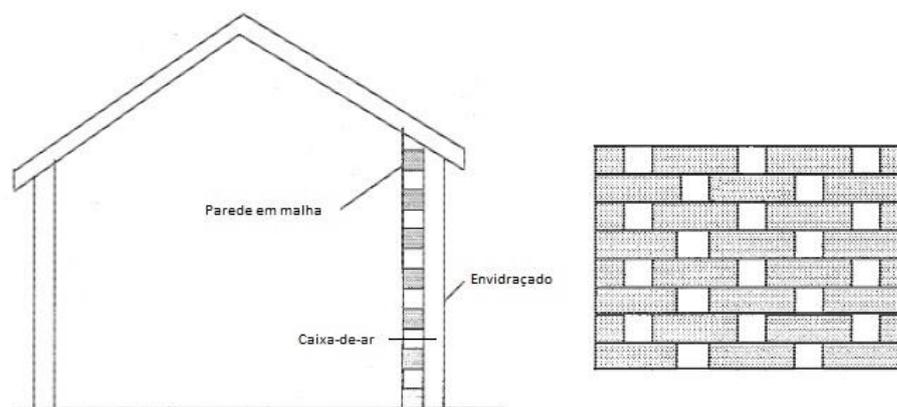


Figura 3.16 – Parede de Trombe em malha. Adaptado de Fang et al [30].

A parede de Trombe em malha foi comparada com a parede de Trombe clássica, obtendo-se uma eficiência de 30,2% para a parede de Trombe em malha e de 22,6% para a parede de Trombe clássica [23].

3.11 Inércia térmica

A inércia térmica é a capacidade que um corpo tem de absorver energia e de libertá-la durante um intervalo de tempo de acordo com as características físicas, dimensionais e ambientais. Se a temperatura de um corpo subir lentamente, diz-se que tem uma grande inércia térmica. Se a temperatura do corpo subir rapidamente, o corpo tem baixa inércia térmica [31].

A inércia térmica é muito importante nos edifícios. Se estes reagirem rapidamente à radiação solar, aquecem o espaço rapidamente durante o dia e arrefecem-no rapidamente à noite, têm baixa inércia térmica, ao passo que edifícios com grande inércia térmica mantêm-se mais tempo frescos durante o dia, enquanto armazenam o calor que vão libertar lentamente durante a noite. Através da Figura 3.17 pode confirmar-se essa ideia. Comparando a temperatura exterior com a temperatura interior com baixa e elevada massa térmica, chega-se à conclusão que num compartimento com elevada massa térmica são atingidas temperaturas interiores menores, pois as temperaturas dos corpos que constituem o interior sobem lentamente, e com isso formam temperaturas interiores mais baixas.

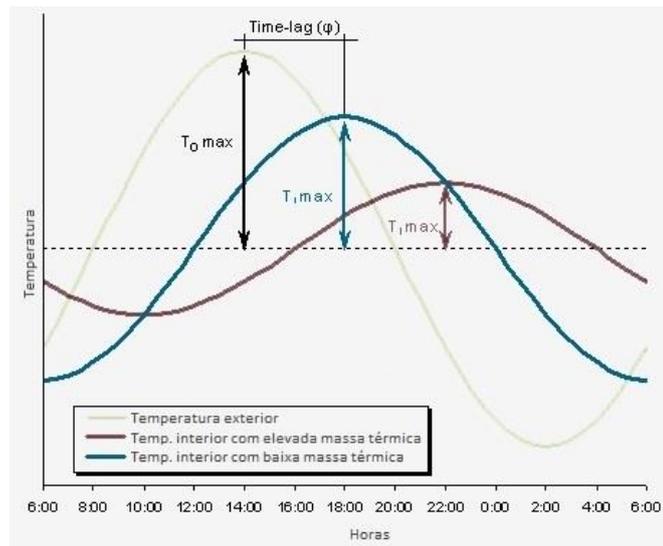


Figura 3.17 – Efeito da massa térmica na estabilização da temperatura interior. Adaptado de [32]

Para efeitos do regulamento foram definidas três classes de inércia térmica: forte, média e fraca. A classe da inércia térmica resulta do cálculo da massa superficial útil por metro quadrado de área de pavimento cuja definição, cálculo e terminologia empregue vêm descritos no n.º 6 do despacho n.º 15793-K/2013 do DL118/2013 de 20 de Agosto [31].

Através da expressão (1), conseguimos determinar a inercia térmica da fracção.

$$It = \frac{\sum M_{si} * r * S_i}{A_p} \quad (1)$$

Em que:

M_{si} - Massa superficial útil do elemento i , (Kg/m^2)

r - Factor de redução da massa superficial útil

S_i - Área da superfície interior do elemento i , (m^2)

A_p - Área interior útil de pavimento, (m^2)

3.12 Atraso Térmico

O atraso térmico pode ser definido como o tempo decorrido entre uma variação térmica em um meio e a sua manifestação na superfície oposta de um elemento construtivo submetido a

um regime periódico de transmissão de calor. O atraso térmico depende da resistência e capacidade térmica do componente.

3.12.1 Caso de elemento homogéneo

Em uma placa homogénea (constituída por um único material), com espessura “e” e submetida a um regime térmico variável e senoidal com períodos de 24 horas, o atraso térmico pode ser estimado pela expressão (2) [33].

$$\varphi = 0.7284 * \sqrt{R_t * C_t} \quad (2)$$

Em que:

φ - Atraso térmico;

R_t - Resistência térmica de superfície a superfície do componente;

C_t - Capacidade térmica do componente respectivamente.

Para os valores da resistência térmica R_t , os valores obtidos através de medições em ensaios normalizados, devem ser usados sempre que possível. Na ausência de valores medidos, recomenda-se que a resistência térmica seja calculada pela expressão (3) [33].

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (3)$$

Em que:

R - Resistência térmica;

e - Espessura;

λ - Condutividade térmica do material.

A capacidade térmica (expressão (4)) é a grandeza física que determina a relação do produto entre a espessura, calor específico e densidade do material [33].

$$C_t = e * c * \rho \quad (4)$$

Em que:

C_t - Capacidade térmica;

e - Espessura;

ρ - Densidade de massa aparente do material;

c - Calor específico do material.

3.12.2 Caso de elemento heterogéneo

No caso de um elemento formado por diferentes materiais compostos em “n” camadas paralelas às faces (perpendiculares ao fluxo de calor), o atraso térmico varia conforme a ordem das camadas. O cálculo da resistência e da capacidade térmica é igual ao do caso de elemento homogéneo, variando só o número de camadas a somar [33].

3.13 Calor específico

A transferência de calor de um corpo para outro ocorre mediante a diferença de temperatura entre eles. Assim, o calor flui do corpo de maior temperatura para o corpo de menor temperatura [34].

Calor específico (c) consiste na quantidade de calor que é necessário fornecer à unidade de massa de uma substância para elevar a sua temperatura de um grau, ou seja, é uma grandeza física que define a variação térmica de determinada substância ao receber determinada quantidade de calor. A unidade no SI é J/ (kg.K) [34]. Este parâmetro pode ser definido pelo quociente entre a capacidade térmica de um corpo pela massa do mesmo.

Matematicamente,

$$c = \frac{C}{m} \quad (5)$$

Em que:

c Calor específico do material;

C Capacidade térmica do material;

m Massa do material.

4 CONTRIBUIÇÃO PAREDE DE TROMBE – CASOS DE ESTUDO

Neste capítulo é analisado o desempenho de uma parede de Trombe em pedra inserida na fachada sul de uma fracção com cerca de 100 m^2 situado em Portugal, cidade de Coimbra.

De forma a obter a informação presente na análise deste capítulo, recorreu-se ao programa *DesignBuilder* para fazer simulações de diversas situações. O espaço a ser alvo de estudo será analisado com duas configurações extremas. A primeira possui dimensões de $10 \times 10 \text{ m}$, ao passo que a segunda disposição terá $3 \times 30 \text{ m}$. Estas configurações foram definidas de modo a obter uma área de parede de Trombe de 30 m^2 e 9 m^2 respectivamente. A área das paredes envolventes para o primeiro caso terão 30 m^2 . No segundo caso haverá duas paredes com 90 m^2 (este e oeste) e outra com 9 m^2 (norte). Pretende-se ver o ganho de temperatura que uma variação de área de parede de Trombe pode trazer ao espaço. As duas configurações encontram-se na Figura 4.1 e Figura 4.2.

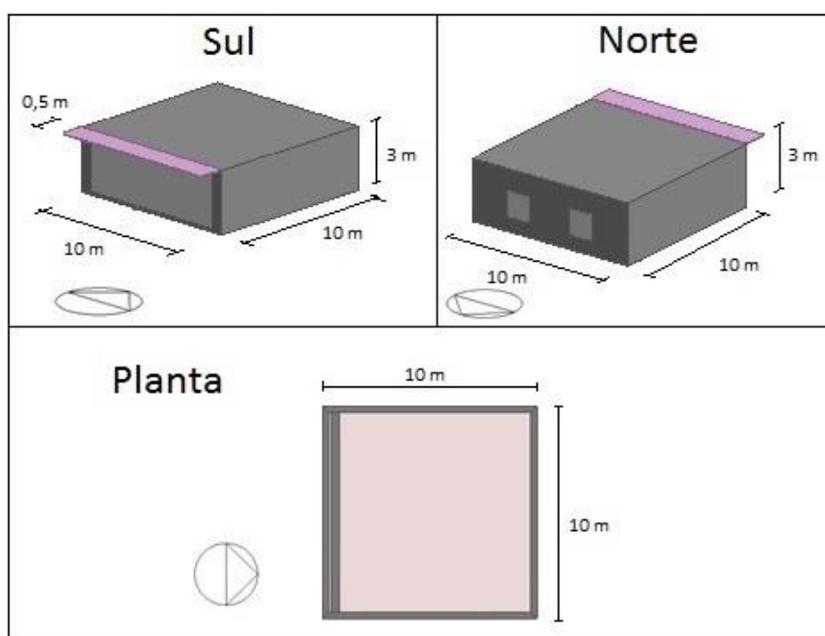


Figura 4.1 – Geometria do compartimento $10 \times 10 \text{ m}$.

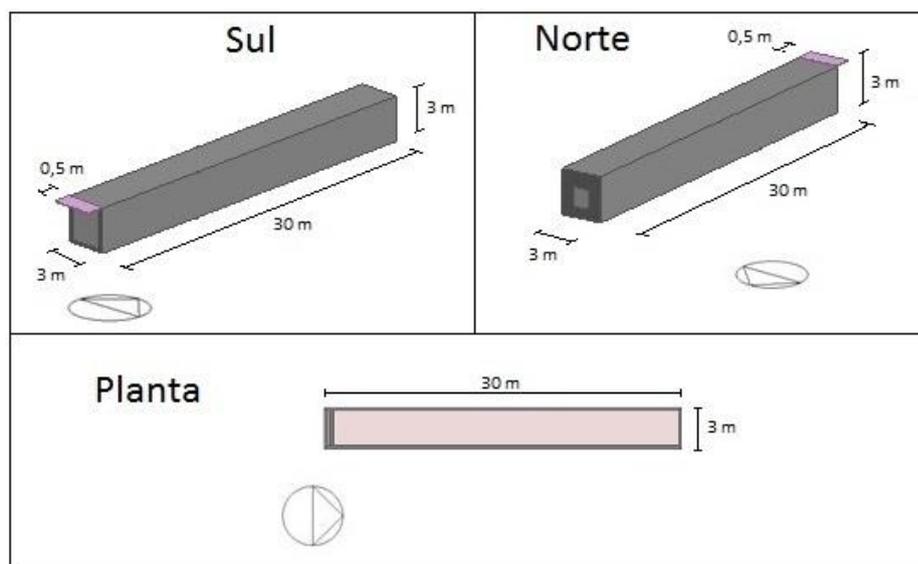


Figura 4.2 – Geometria do compartimento 3 × 30 m.

Além de duas configurações distintas, serão também analisados diferentes modos de concepção das paredes da envolvente exterior. Uma das soluções consiste em utilizar a solução construtiva do tipo ETICS, visto ser uma solução de elevado desempenho térmico. Este sistema corrige as pontes térmicas reduzindo o problema das condensações no interior, melhora o desempenho térmico de Verão, já que permite que toda a espessura da parede contribua para a inércia térmica, e protege a estrutura e a alvenaria dos choques térmicos, contribuindo assim para o aumento da durabilidade desses elementos. A solução tipo ETICS é constituída por uma camada de 20 cm de betão e 4 cm de isolamento térmico (EPS). A segunda solução consiste em trocar a posição do isolamento térmico, introduzindo-o pelo interior, o que permite um aumento de inércia térmica.

Os pisos foram modelados assumindo condições de fronteira adiabática, isto é, considera-se que não haverá trocas de calor. Estes elementos são constituídos por uma camada de betão com 20 cm de espessura, e por uma camada de isolante térmico com 5 cm de espessura.

A fachada que vai conter a parede de Trombe é a fachada localizada a sul, visto ser nesta orientação que é possível captar a maior intensidade da radiação solar no período de inverno (período entre o final da manhã e o início da tarde). Esta parede é inicialmente composta por uma parede de pedra, caixa-de-ar com 11 cm e vidro simples.

Depois de estabelecida toda a geometria e envolvente do apartamento, faz-se posteriormente uma análise paramétrica em que se varia o material construtivo da parede acumuladora, a espessura da caixa-de-ar e o tipo de vidro. Além destas variações, serão também introduzidos sistemas de sombreamento.

Os materiais a serem utilizados para a constituição da parede de Trombe são pedra calcária, betão, tijolo maciço e tijolo furado.

As propriedades dos materiais utilizados encontram-se no Quadro 4.1.

Quadro 4.1 – Propriedades dos materiais utilizados

Material	Espessura (m)	U (W/m ² .°C)	λ (W/m °C)	c (kJ/kg.°C)	ρ (kg/m ³)	ϵ	α solar
Pedra	0,20	3,89	2,3	1,0	2600	0,9	0,6
	0,30	3,33	2,3	1,0	2600	0,9	0,6
	0,40	2,91	2,3	1,0	2600	0,9	0,6
Pedra preta	0,20	3,89	2,3	1,0	2600	0,9	0,9
Betão armado	0,20	4,00	2,5	1,0	2400	0,9	0,6
Tijolo maciço	0,20	2,64	0,96	0,84	2000	0,9	0,6
Tijolo furado	0,20	1,10	0,27	0,84	850	0,9	0,6

Os valores referentes às propriedades dos materiais expressos no Quadro 4.1 foram retirados da base de dados do programa *DesignBuilder*.

No Quadro 4.2 encontram-se calculados alguns parâmetros térmicos obtidos através das propriedades dos materiais utilizados. Estes valores foram calculados com base nas expressões que se encontram descritas no capítulo três deste documento.

Quadro 4.2 – Parâmetros térmicos dos materiais utilizados

Material	Espessura (m)	Coefficiente transmissão térmica [W/m ² .°C]	Massa térmica [kJ/m ² .°C]	Atraso térmico [h]
Pedra	0,2	3,89	520	04:54:00
	0,3	3,33	780	07:18:00
	0,4	2,91	1040	09:48:00
Pedra preta	0,2	3,89	520	04:54:00
Betão armado	0,2	4,00	480	04:30:00
Tijolo maciço	0,2	2,64	336	06:06:00
Tijolo furado	0,2	1,10	142,8	07:30:00

Da análise do Quadro 4.2 é possível perceber que a espessura tem uma relação direta com o atraso térmico no elemento pedra. Comparando todos os elementos com igual espessura, repara-se que o betão armado apresenta um valor próximo do da pedra. De todos os materiais simulados, o que apresenta maior valor de atraso térmico é o tijolo furado, tendo um valor superior quando comparado com o tijolo maciço.

As simulações serão realizadas para os meses de dezembro (inverno), onde se esperam dias com radiação solar significativa, e para junho (verão), onde os valores de radiação solar são superiores. Para a simulação de inverno, os resultados analisados serão referentes aos últimos onze dias do mês, pois é onde se observa maior radiação solar.

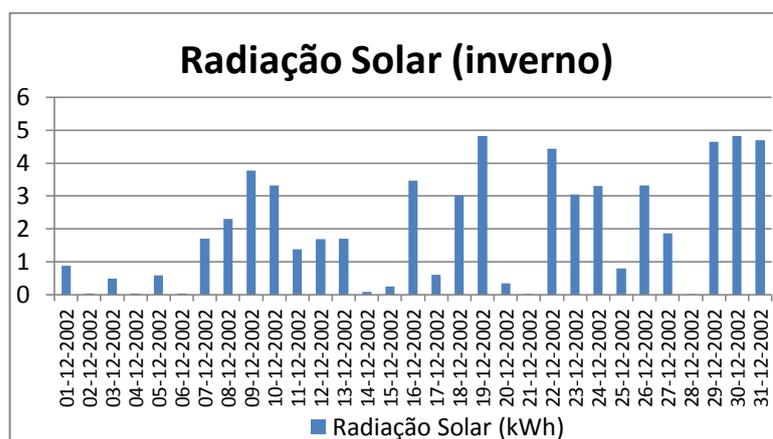


Figura 4.3 – Valores da radiação solar no mês de dezembro.

Foi adoptado o mesmo procedimento para a verificação da radiação no verão. Para as simulações que terão lugar no mês de junho, escolheu-se o dia 3 de junho, como sendo o dia com maior radiação solar. As análises de resultados serão efectuadas a partir do dia 26 de maio até ao dia 8 de junho.

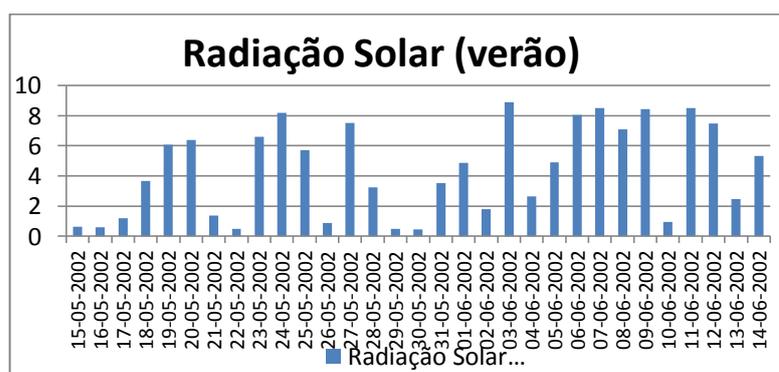


Figura 4.4 – Valores da radiação no mês de junho.

Nas próximas secções deste capítulo apresenta-se uma análise paramétrica com diferentes soluções construtivas para a parede de Trombe.

Os parâmetros analisados são os seguintes:

- Caso 1 – Comparação entre uma parede de Trombe com soluções de referência (parede de pedra e ETICS);
- Caso 2 – Parede de Trombe em pedra com variação de espessura (20, 30 e 40 cm);
- Caso 3 – Variação da espessura da caixa-de-ar (7, 11 e 22 cm);
- Caso 4 – Variação do vidro (vidro simples e vidro duplo);
- Caso 5 – Parede de Trombe em pedra com variação de cor (cor clara e cor escura);
- Caso 6 – Parede de Trombe com variação de material (pedra, betão, tijolo maciço, tijolo furado);
- Caso 7 – Edifício com pala de protecção solar e estores.

Todos os casos vão ser estudados com ganhos internos de 12 W/m^2 , excepto o caso 4.1 que será alvo de uma comparação entre ganhos de 6 W/m^2 e de 12 W/m^2 . Estes ganhos dizem respeito ao calor gerado por todo o conteúdo do espaço que produza calor, como por exemplo, a iluminação.

4.1 Comparação entre parede de Trombe com soluções de referência

No primeiro caso faz-se uma comparação entre uma parede de Trombe em pedra, uma parede simples de pedra e uma parede com ETICS. As paredes indicadas possuem 20 cm de espessura, e apenas a parede de Trombe contém caixa-de-ar e envidraçado exterior. Como foi referido anteriormente, apenas neste caso serão comparadas as variações de temperatura interior para ganhos internos de 12 W/m^2 (Figura 4.5 e Figura 4.6) e 6 W/m^2 (Figura 4.7 e Figura 4.8).

As figuras seguintes mostram a variação da temperatura interior ao longo do período de estudo das três paredes referidas, para um ganho interno de 12 W/m^2 .

Ao analisar-se a Figura 4.5, nota-se que a parede de Trombe se destaca das outras paredes com temperaturas interiores mais elevadas, qualquer que seja a posição do isolamento térmico da envolvente exterior. Fazendo uma comparação entre as outras paredes, na Figura 4.5 a) os valores das temperaturas são aproximados, ao passo que na Figura 4.5 b) a parede com ETICS aparenta ter melhor desempenho térmico. Observa-se que a envolvente com o isolamento pelo exterior apresenta menores amplitudes térmicas, resultando em uma maior estabilização da temperatura interior.

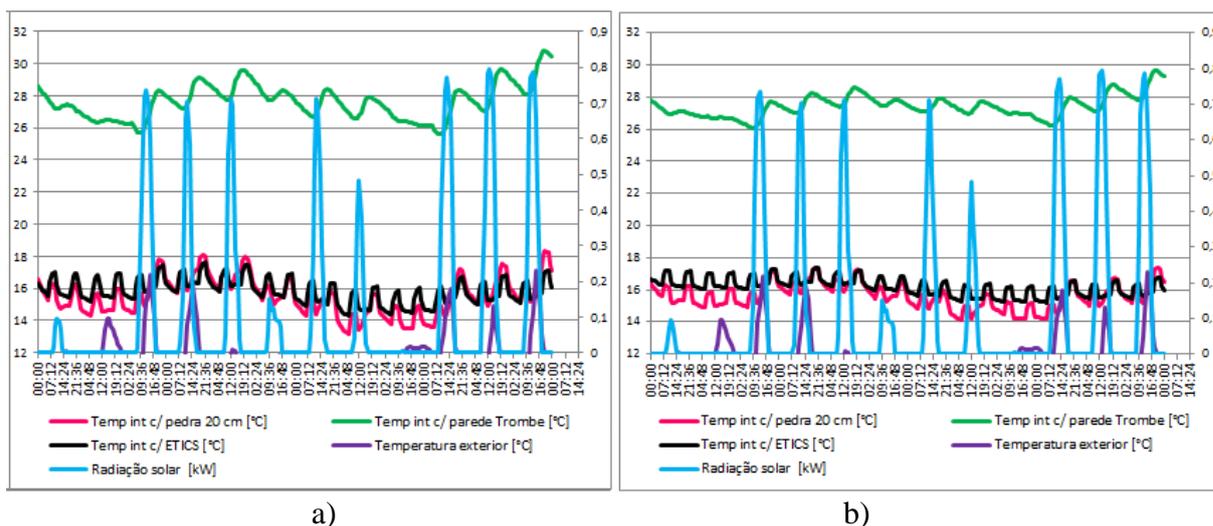


Figura 4.5 – Distribuição da temperatura interior com e sem parede de Trombe para a geometria 10×10 m com ganho interno de 12 W/m^2 , considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

Em relação ao caso em que o espaço tem 3×30 m (Figura 4.6), as principais diferenças em relação ao caso da Figura 4.5 são as temperaturas atingidas pela parede de Trombe, resultado esperado visto serem duas situações extremas. No que diz respeito às amplitudes térmicas, com o isolamento pelo interior, o valor máximo da amplitude térmica diária é de $1,2 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto que no caso em que o isolamento está pelo exterior, esta toma valores perto dos $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$, resultado representativo de maior estabilidade da temperatura.

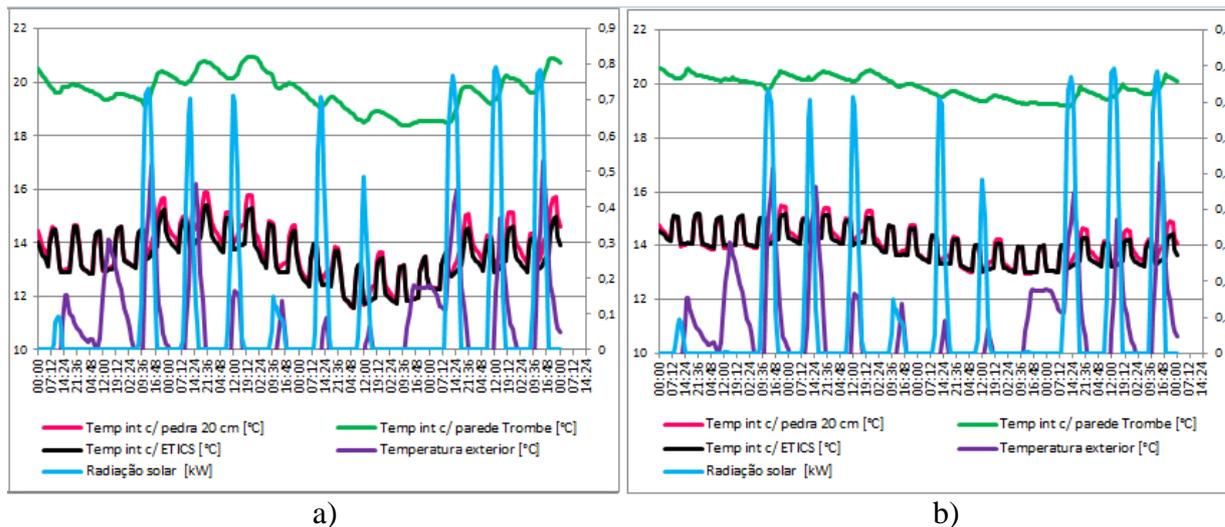


Figura 4.6 – Distribuição das temperaturas interiores com e sem parede de Trombe para a geometria 3×30 m com ganho interno de 12 W/m^2 , considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

A Figura 4.7 e a Figura 4.8 mostram as temperaturas interiores para ganhos internos de 6 W/m^2 .

No caso da Figura 4.7 a), a diferença principal que se observa com um ganho de 6 W/m^2 são as temperaturas alcançadas pela parede de pedra, em que nos dias de maior radiação atinge temperaturas superiores em relação à parede com ETICS, gerando amplitudes térmicas maiores, situação que não acontece com ganhos de 12 W/m^2 . Este resultado é também observado com o isolamento pelo exterior. Em relação à parede de Trombe, a única diferença são os valores obtidos da temperatura, que neste caso são mais baixos em cerca de $3^{\circ}/4^{\circ} \text{C}$. Os valores das amplitudes térmicas diárias não sofrem grandes alterações com a alteração de valores de ganhos internos.

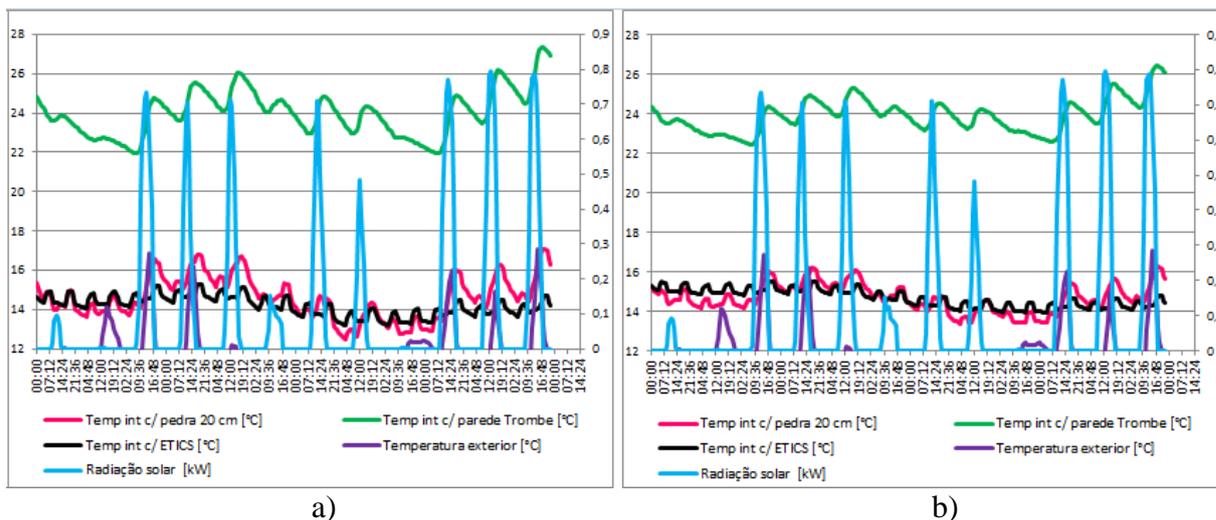


Figura 4.7 – Distribuição das temperaturas interiores com e sem parede de Trombe para a geometria 10 × 10 m com ganho interno de 6 W/m², considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

Em relação à Figura 4.8, não se observam grandes diferenças no comportamento da temperatura. Os valores da temperatura vão ser mais baixos, qualquer que seja a parede, resultado compreensível visto que há menos calor gerado no interior. Neste caso, e como acontece no caso da Figura 4.7, nos dias de maior radiação, a parede com 20 cm de pedra tem temperaturas superiores em relação à parede com ETICS.

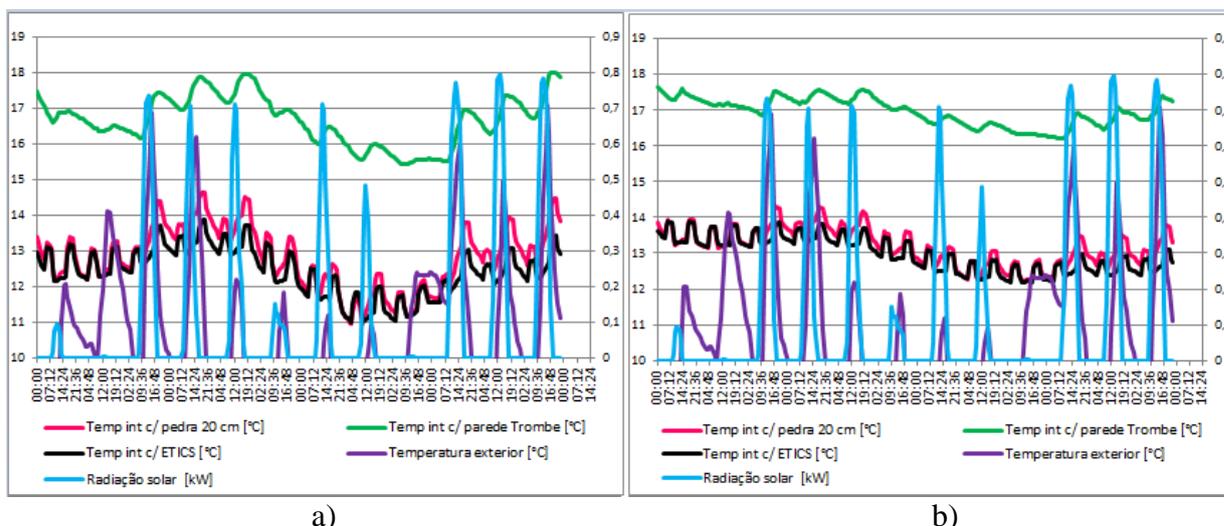


Figura 4.8 – Distribuição das temperaturas interiores com e sem parede de Trombe para a geometria 3 × 30 m com ganho interno de 6 W/m², considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

4.2 Variação de espessura da parede acumuladora

Na segunda simulação faz-se variar a espessura da parede de Trombe em pedra orientada a sul. As espessuras vão tomar valores de 20, 30 e 40 cm.

Nas figuras seguintes, a parede com 20 cm apresenta melhor desempenho térmico, pois o caminho a percorrer pelo calor é menor. Na Figura 4.9 observa-se que a temperatura máxima no interior é atingida pela parede com 20 cm com valor de 30,9 °C. As diferenças de temperatura das paredes de 30 e 40 cm em relação à parede de 20 cm são de 0,7 °C e 1,3 °C respectivamente.

O valor das amplitudes térmicas no interior do espaço diminui com o aumento da espessura da parede. Assim, a amplitude térmica diária máxima da parede de 20 cm é de 2,8 °C, 1,7 °C para a parede de 30 cm e de 1 °C para a parede de 40 cm. Quando o isolamento da envolvente está na parte exterior das paredes (Figura 4.9 b)), o comportamento da temperatura (aumento e diminuição) é parecido ao da Figura 4.9 a), diferenciando apenas nos valores alcançados, sendo essa diferença aproximadamente de 1 °C. Observa-se também que neste caso as amplitudes térmicas diárias são menores.

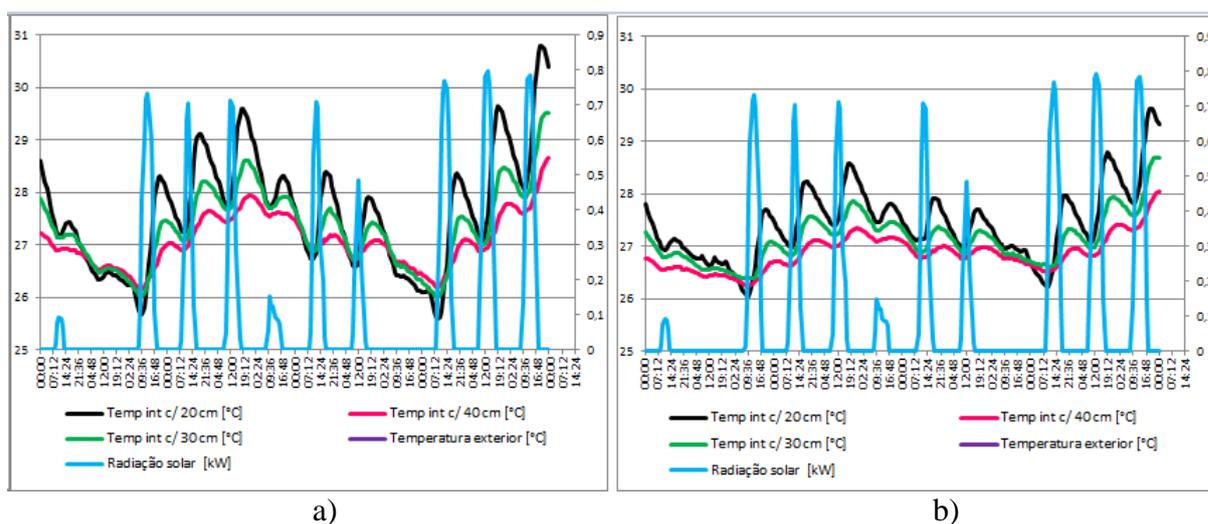


Figura 4.9 – Distribuição da temperatura interior fazendo variar a espessura da parede acumuladora com geometria 10 × 10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

Quando se troca as dimensões do apartamento, existe uma diferença abismal nos valores alcançados pelas temperaturas interiores. Enquanto que no caso da Figura 4.9 a), a temperatura máxima é de 30,9 °C e a média de 28 °C, na Figura 4.10 a) a temperatura máxima é de 21 °C e a média é de 19,5 °C. Esta diferença justifica-se pelo facto da parede de

Trombe neste segundo caso representar cerca de um terço da área do primeiro caso. Quando não existe radiação solar, a parede de 40 cm permite obter valores de temperatura interior mais elevadas em algumas horas do dia.

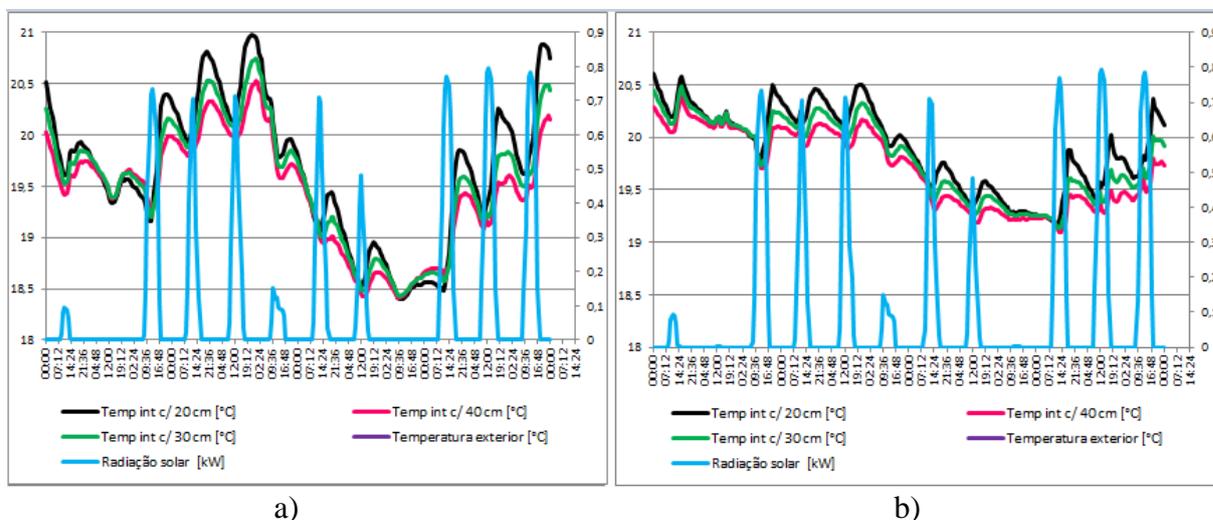


Figura 4.10 – Distribuição da temperatura interior fazendo variar a espessura da parede acumuladora com geometria 3×30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

4.3 Variação de espessura da caixa-de-ar

No terceiro caso vai estudar-se qual a variação de temperatura interior quando se altera a espessura da caixa-de-ar da parede de Trombe em pedra com 20 cm. A espessura vai variar para valores de 7, 11 e 22 cm.

Pela análise dos gráficos da Figura 4.11, repara-se que não há diferença nos valores obtidos entre a caixa-de-ar de 7 e 11 cm, resultado aceitável visto a diferença de espessuras ser muito pequena. Comparando esses valores com os da caixa-de-ar de 22 cm, observa-se que nos dias de maior radiação as temperaturas são superiores quando se utiliza caixa-de-ar de 11 cm, sendo o valor máximo obtido de cerca de 31 °C. Em relação às temperaturas mínimas, estas tendem a ser um pouco mais baixas com caixa-de-ar de 11 cm, provocando assim maiores amplitudes térmicas diárias. Nos dias de menor radiação, a caixa-de-ar com 22 cm torna-se mais vantajosa, pois as temperaturas interiores mínimas são mais elevadas.

No gráfico da Figura 4.11 b), o comportamento da temperatura vai ser parecido ao da Figura 4.11 a), variando apenas nos valores e amplitudes térmicas obtidos. Qualquer que seja a espessura da caixa-de-ar e a posição do isolamento térmico, a diferença de valores entre as

caixas-de-ar não ultrapassa os 0,5 °C. Nas amplitudes térmicas, estas são mais baixas quando o isolamento se encontra na parte exterior da envolvente, tornando a temperatura interior mais estável.

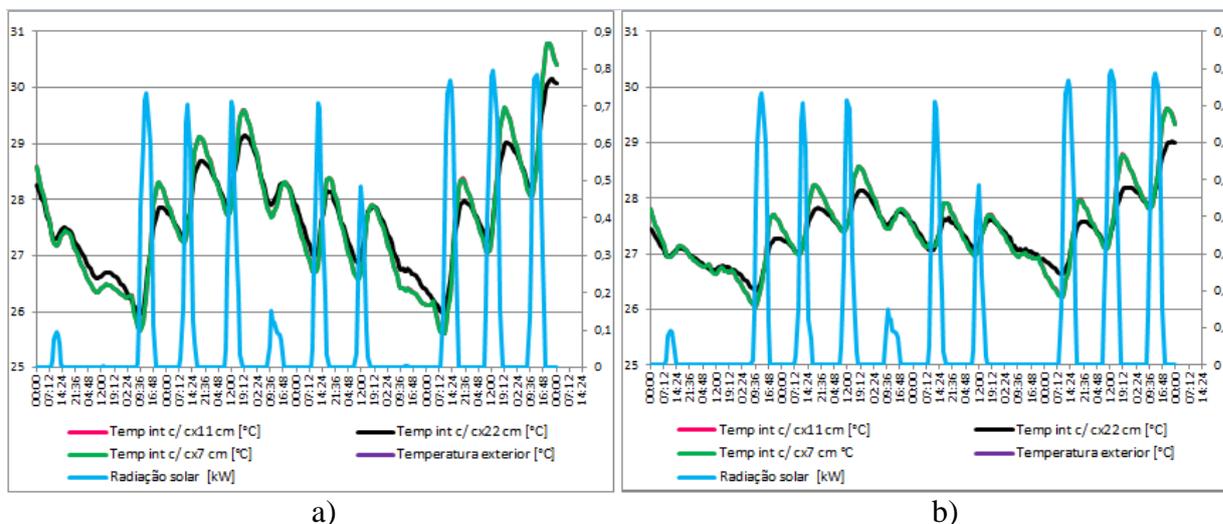


Figura 4.11 – Distribuição da temperatura interior com variação de espessura da caixa-de-ar com geometria 10 × 10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

No caso do compartimento com 3 × 30 m (Figura 4.12), qualquer que seja a posição do isolamento térmico, os valores da temperatura interior alcançados pela caixa-de-ar de 11 cm são sempre mais elevados que os valores da caixa-de-ar de 22 cm, fazendo neste caso, com que os valores das amplitudes térmicas sejam parecidos, pois a diferença de temperaturas é constante.

Comparando dimensões de compartimento, no caso em que temos 10 × 10 m, são obtidos valores de temperatura interior muito superiores (cerca de 9/10 °C) aos que são conseguidos no caso 3 × 30 m, resultado aceitável devido à discrepância de valores do espaço em estudo.

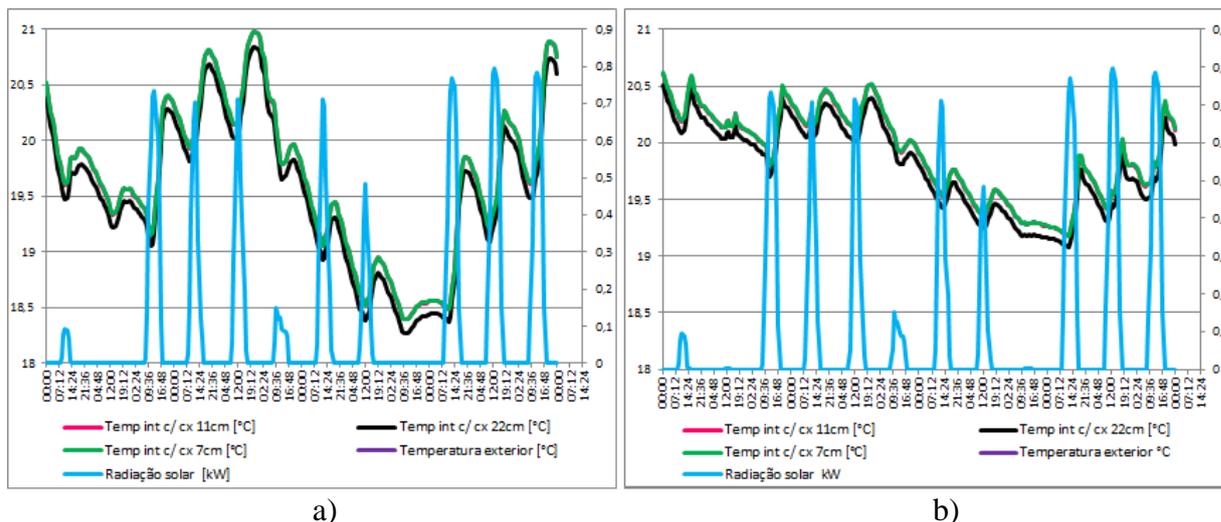


Figura 4.12 – Distribuição da temperatura interior com variação de espessura da caixa-de-ar com geometria 3×30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

4.4 Variação do tipo de vidro

Variação do tipo de vidro é outra das alterações que se pode fazer nos elementos constituintes de uma parede de Trombe. Neste caso faz-se uma modificação no envidraçado da parede de Trombe com 20 cm e caixa-de-ar de 11 cm. Vai comparar-se a utilização de vidro simples constituído por um único pano com 6 mm de espessura, com um envidraçado composto por vidro duplo com um pano interior de 4 mm, caixa-de-ar de 12 mm e um pano exterior com 6 mm. Os vidros utilizados são vidros simples com um factor solar de 0,85. Os coeficientes de transmissão térmica são de $3,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para vidro simples e $2,7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para vidro duplo.

Analisando a Figura 4.13, observa-se que com a utilização de vidro duplo obtêm-se temperaturas interiores mais elevadas, o que é compreensível visto que um vidro duplo tem melhor desempenho térmico que um vidro simples, como foi referenciado no capítulo três deste documento.

Com o isolamento pelo interior (Figura 4.13 a)) consegue-se um ganho de 1°C em relação ao isolamento pelo exterior, sendo nessa posição (exterior) que se obtém maior diferença de temperatura entre envidraçados.

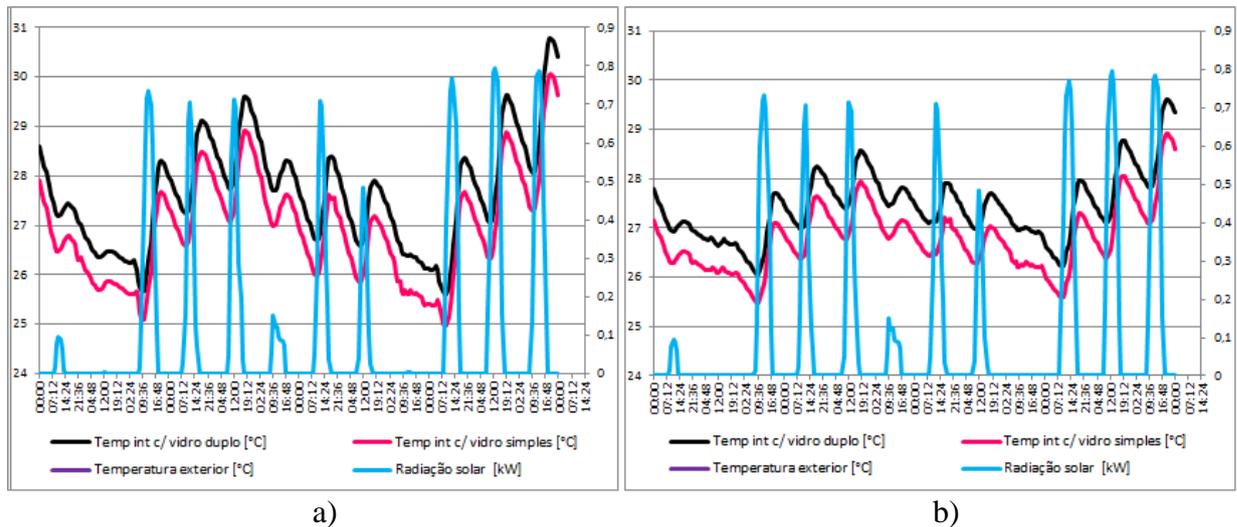


Figura 4.13 – Distribuição da temperatura interior com vidro simples e vidro duplo com geometria 10×10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

Em relação à Figura 4.14, pode-se observar o mesmo comportamento da temperatura da Figura 4.13 a), alterando apenas os valores de temperatura conseguidos, sendo que no compartimento 10×10 m a temperatura máxima atingida é de 31°C num dos dias mais quentes, ao passo que nesse mesmo dia para o compartimento 3×30 m apenas são alcançados 21°C , ou seja, uma diferença de 10°C . Mudando a posição do isolamento térmico das paredes envolventes (Figura 4.13 b) e Figura 4.14 b)), a diferença de temperaturas obtidas para esse mesmo dia ronda os $9,3^{\circ}\text{C}$. Nesta simulação é bem evidente a diferença de amplitudes térmicas com a posição do isolamento térmico.

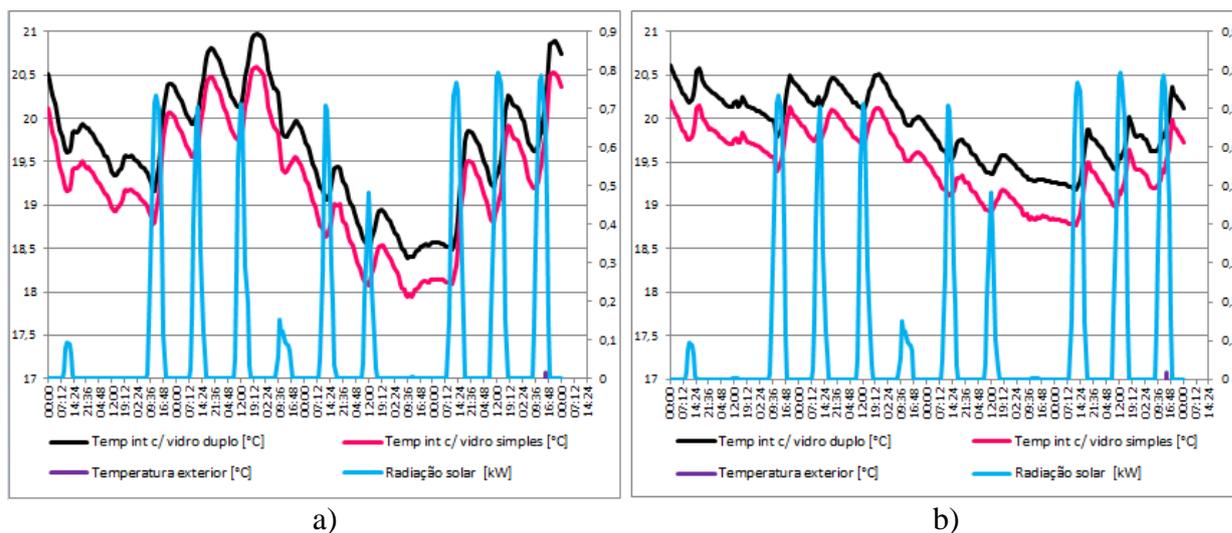


Figura 4.14 – Distribuição da temperatura interior com vidro simples e vidro duplo com geometria 3×30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

4.5 Variação da cor

Uma outra modificação que se pode introduzir numa parede de Trombe com 20 cm de espessura, caixa-de-ar de 11 cm e vidro duplo para ver o comportamento da temperatura interior é a mudança de cor na parede acumuladora. Para isso analisaram-se dois tipos de cor. Inicialmente com a parede acumuladora pintada com cor clara, trocando depois para uma cor escura. Os resultados destas simulações encontram-se presentes nas figuras seguintes.

Antes de se fazer qualquer avaliação individual de resultados, é de se esperar que as temperaturas com a parede pintada com cor escura sejam mais elevadas, pois a cor escura tem um elevado poder de absorção face a uma cor clara.

Começando pela análise do compartimento com 10×10 m (Figura 4.15), observa-se que a mudança da cor traz um acréscimo na temperatura interior de 2°C no dia mais quente, sendo o valor máximo de $33,2^\circ\text{C}$. A diferença de temperaturas entre pedra clara e pedra escura varia entre $0,5^\circ\text{C}$ e 2°C .

Como se vem observando em todos os casos analisados, quando o isolamento das restantes paredes está pelo exterior, os valores das amplitudes térmicas são mais baixos, conseguindo-se assim uma temperatura interior mais estável. Resultado também obtido na Figura 4.15 b).

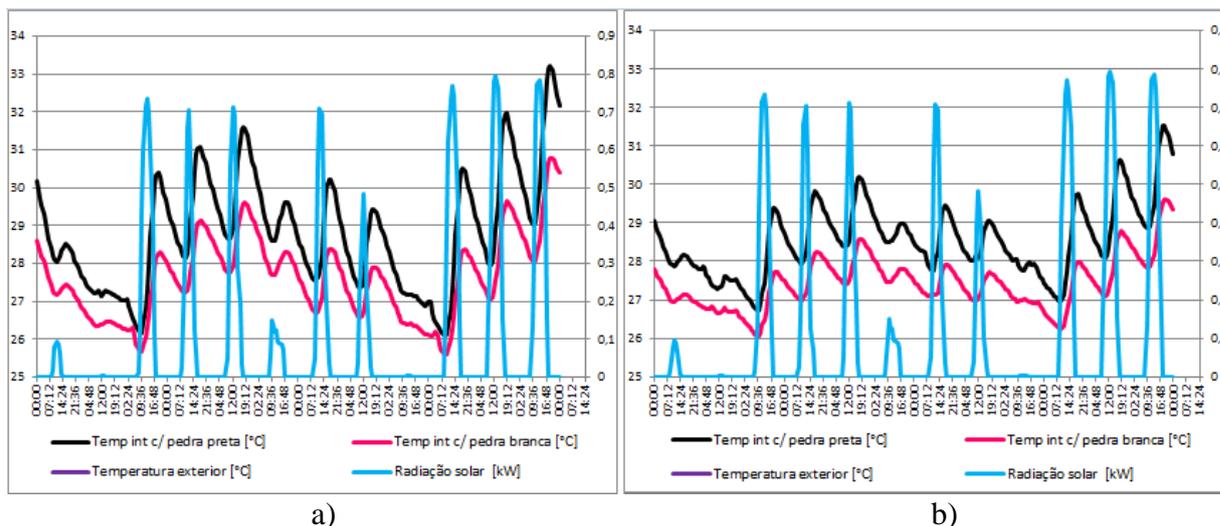


Figura 4.15 – Distribuição da temperatura interior com pedra branca e pedra preta com geometria 10×10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

No compartimento com 3×30 m verifica-se uma diferença pouco significativa entre a utilização de pedra clara e pedra escura. É compreensível que se obtenham temperaturas superiores com a parede escura, mas esse ganho exprime-se em apenas $0,5$ °C tanto para o caso da Figura 4.16 a) como para o caso da Figura 4.16 b). Visto que as diferenças não são assim tão significativas, isso traduz-se nos valores das amplitudes térmicas, tomando valores parecidos. Devido à configuração do espaço, nos casos da Figura 4.15 são conseguidas temperaturas mais elevadas em relação aos casos da Figura 4.16, qualquer que seja a posição do isolamento térmico na envolvente.

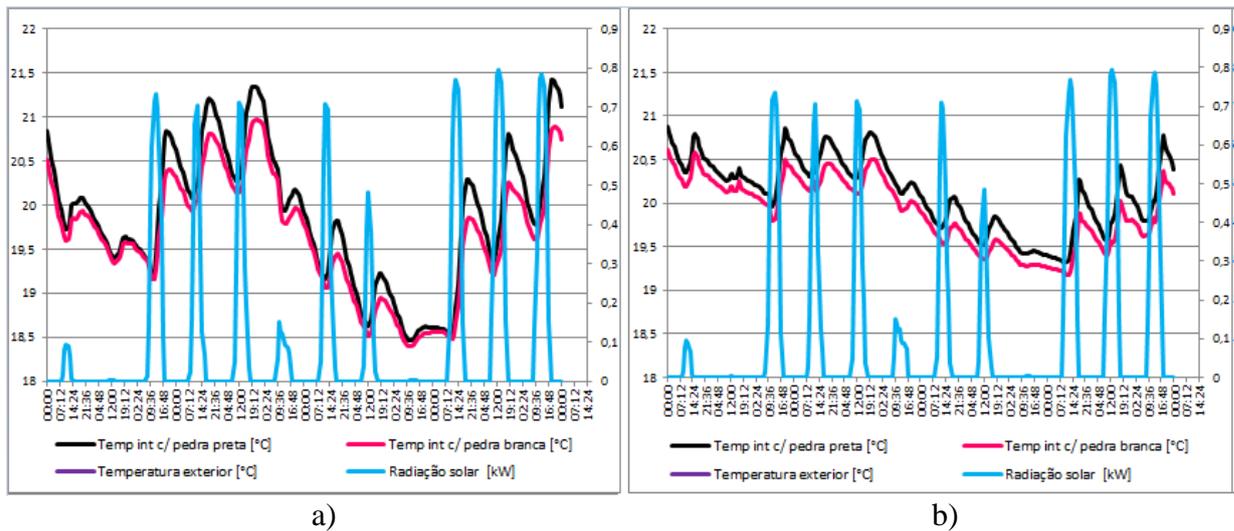


Figura 4.16 – Distribuição da temperatura interior com pedra branca e pedra preta com geometria 3×30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

4.6 Variação do material construtivo

No sexto caso altera-se o material construtivo da parede acumuladora. Além da pedra, vai estudar-se a contribuição do betão, tijolo maciço e tijolo furado. A espessura da parede é de 20 cm para qualquer material, com caixa-de-ar de 11 cm e vidro duplo.

Através da Figura 4.17, observa-se que a pedra tem um comportamento térmico parecido ao do betão. Comparando os valores obtidos pelo betão e pelo tijolo maciço, a diferença de temperaturas ronda os $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, nos dias de maior radiação solar. O tijolo furado como se nota, é a pior escolha para elemento construtivo de uma parede de Trombe, pois a diferença na temperatura interior para os outros três elementos é de $1,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Nos dias de menor radiação, as temperaturas interiores conseguem ser mais elevadas quando o isolamento se encontra pelo exterior, qualquer que seja o material escolhido, traduzindo-se em amplitudes térmicas mais baixas.

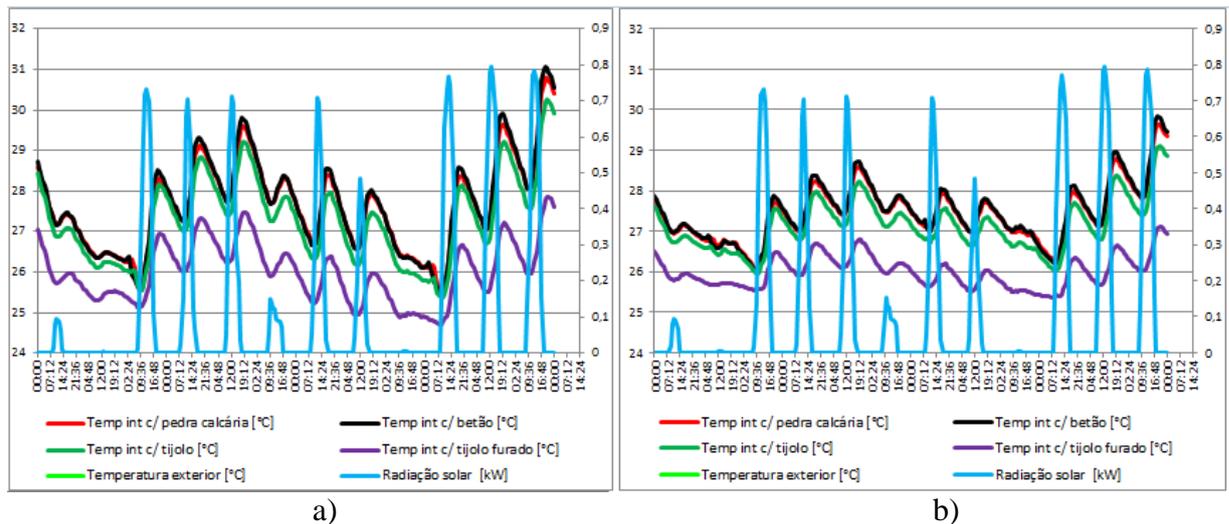


Figura 4.17 – Distribuição da temperatura interior com variação de material com geometria 10 × 10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

No caso da Figura 4.18, independentemente da volumetria do espaço, a ordem dos materiais não se altera, sendo o betão e a pedra muito idênticos, seguidos pelo tijolo maciço e pelo tijolo furado, ou seja, do material mais denso para o menos denso. Como acontece no caso da Figura 4.17 b), no caso da Figura 4.18 b) as temperaturas mínimas são mais elevadas, levando a valores de amplitudes térmicas baixas, e com isso a uma estabilização da temperatura interior.

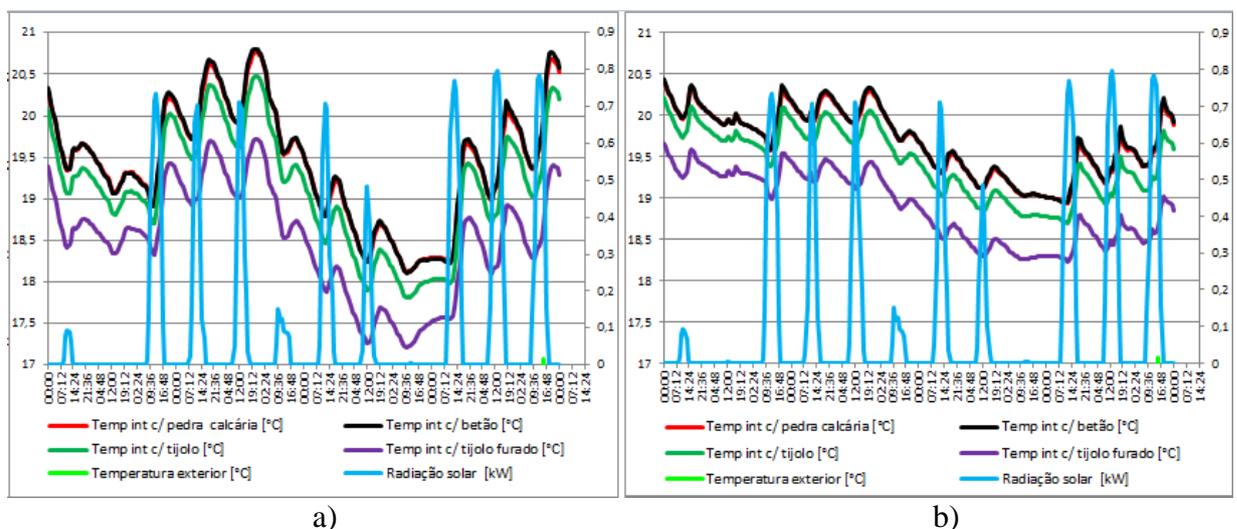


Figura 4.18 – Distribuição da temperatura interior com variação de material com geometria 3 × 30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

Para se ver o efeito do atraso térmico, parâmetro estudado no ponto 3.12 e calculado no Quadro 4.2 deste trabalho, a Figura 4.19 mostra uma ampliação da Figura 4.17 a) e Figura 4.18 a) para o primeiro pico de temperatura máxima, para se observar o efeito desse parâmetro. O atraso térmico define-se como o tempo decorrido entre uma variação térmica em um meio e a sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor. Na Figura 4.19 observa-se que o betão tem menor valor de atraso térmico, pois o pico de temperatura máxima acontece mais cedo que o pico dos outros materiais.

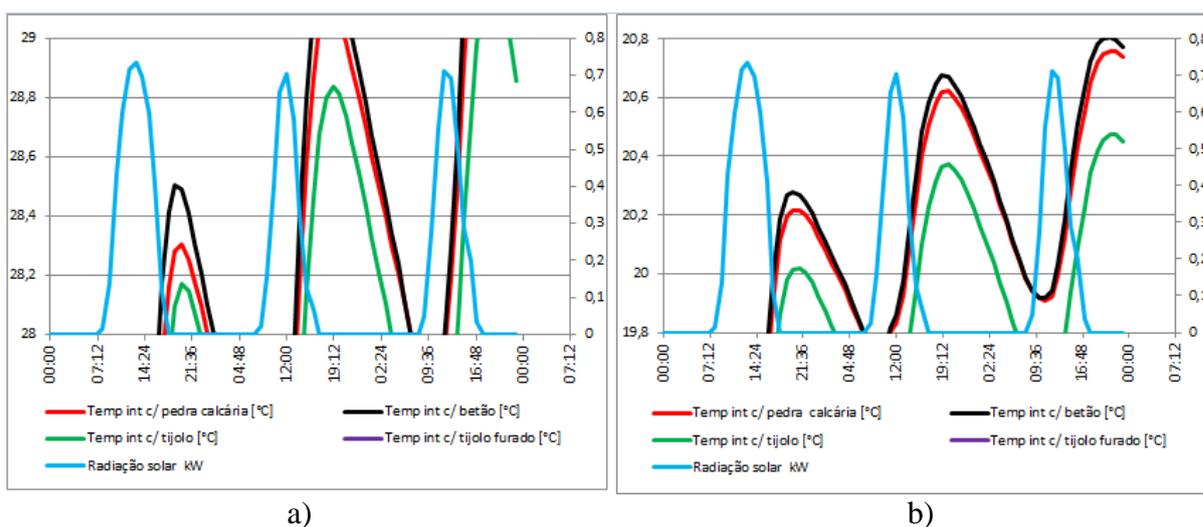


Figura 4.19 – Efeito do atraso térmico com isolamento pelo interior no compartimento: a) 10 × 10 m, b) 3 × 30 m.

4.7 Introdução de dispositivos de sombreamento

Os dispositivos de sombreamento servem para evitar o sobreaquecimento do espaço, situação mais propícia no verão. As simulações seguintes foram realizadas no verão para se ver a eficiência deste tipo de sistemas. Com a introdução de palas exteriores com 0,5 m e 1,5 m, as figuras seguintes mostram as variações de temperatura dentro do apartamento. É de se esperar que a pala com 1,5 m tenha melhor desempenho que a pala com 0,5 m devido ao seu comprimento, pois evita uma maior incidência da radiação solar no envidraçado

Com a introdução de palas exteriores, é notória a diminuição das temperaturas interiores. Para o caso a) da Figura 4.22, não há diferenças nas temperaturas máximas alcançadas visto que os valores são parecidos. Onde se nota a diferença é nos valores das temperaturas mínimas, onde estes são mais baixos quando se tem uma pala maior. Já no caso b), a pala com 1,5 m demonstra maior eficiência, pois as temperaturas máximas vão ser mais baixas em relação às

temperaturas atingidas pela pala com 0,5 m. Como na Figura 4.22 b) não há tanta variação de temperatura, as amplitudes térmicas vão ser mais baixas.

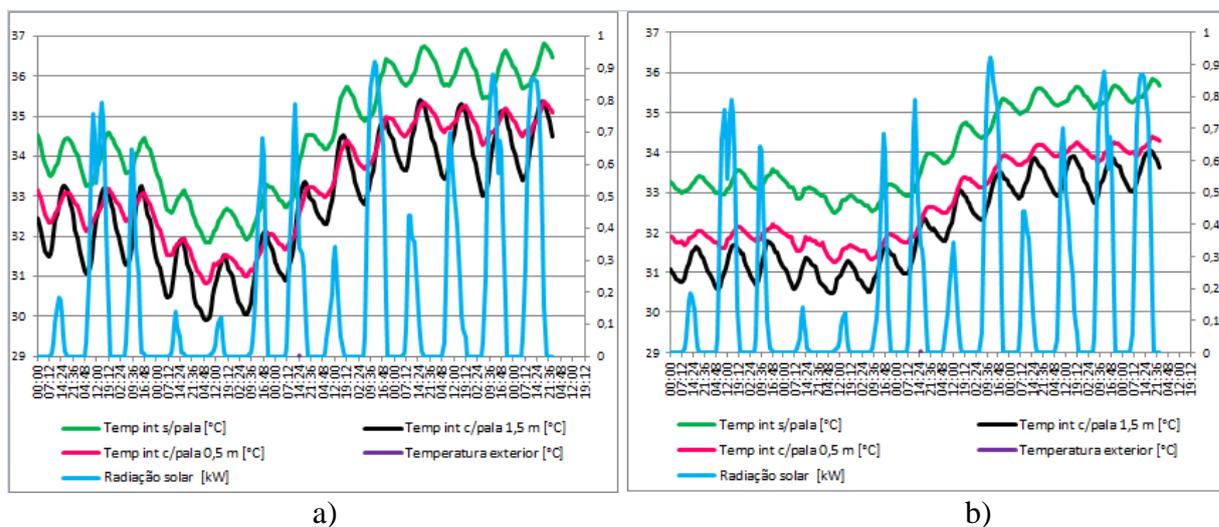


Figura 4.20 – Distribuição das temperaturas interiores com introdução de palas com geometria 10×10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

Ao passo que no compartimento 10×10 m, a redução da temperatura é bem evidente, no caso do compartimento 3×30 m a introdução da pala não traz grandes benefícios às temperaturas alcançadas no interior do apartamento. Como se foi evidenciando ao logo deste estudo, as amplitudes térmicas são mais baixas quando o isolamento térmico está pelo exterior, e com isso uma maior estabilização da temperatura. Resultado também verificado para a Figura 4.23.

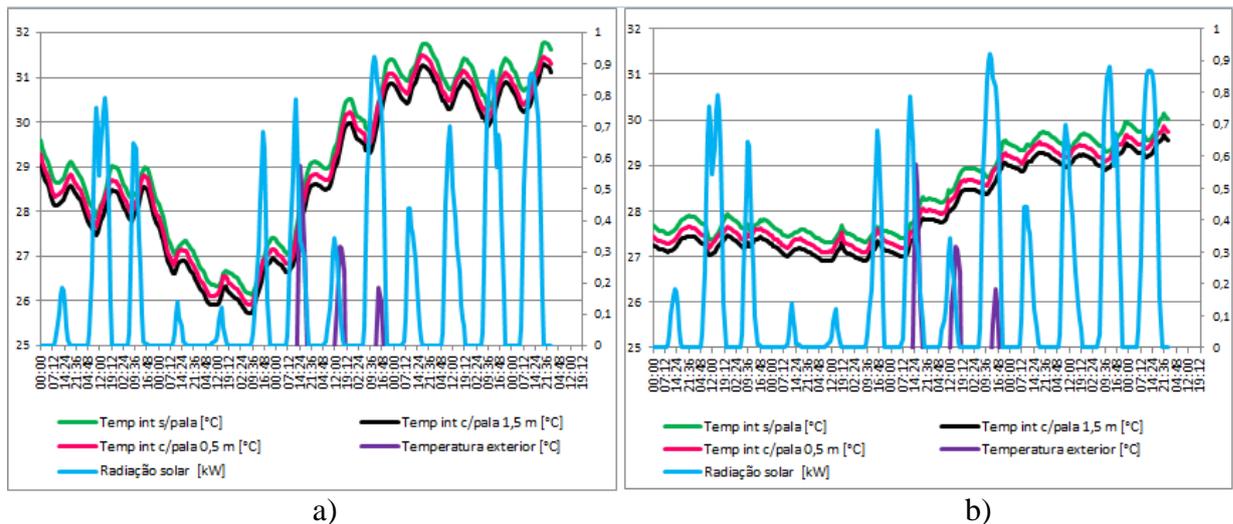


Figura 4.21 – Distribuição das temperaturas interiores com introdução de palas com geometria 3×30 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

Além da colocação de palas exteriores, existem outras soluções para o sombreamento do espaço. A colocação de estores pode ser uma solução igualmente eficaz para evitar o sobreaquecimento. As figuras seguintes mostram as simulações efectuadas com introdução de estores, um instalado no interior da caixa-de-ar e outro no exterior do apartamento junto ao envidraçado. Os estores escolhidos são compostos por ripas com grande refletividade e estão inseridos na base de dados do programa.

Começando pela análise da Figura 4.24, há claramente uma diminuição de temperatura interior com a introdução de um estore, resultado esse esperado. Com o estore a temperatura baixa em média 2 a 3 °C, tanto para o isolamento pelo interior como pelo exterior. De referir que a posição do estore é importante, visto que é no exterior que é mais eficiente, pois “trava” a entrada de calor na caixa-de-ar, impedindo esta de aquecer e de o transferir para o interior do compartimento. Se o estore estiver na parte interior da caixa-de-ar, esta acumula a energia proveniente da radiação solar e o estore perde todo o seu efeito. A ideia descrita anteriormente é traduzida pelos gráficos da Figura 4.24. A posição do estore pelo exterior reduz a temperatura interior em cerca de 1 °C em relação ao estore no interior da caixa-de-ar.

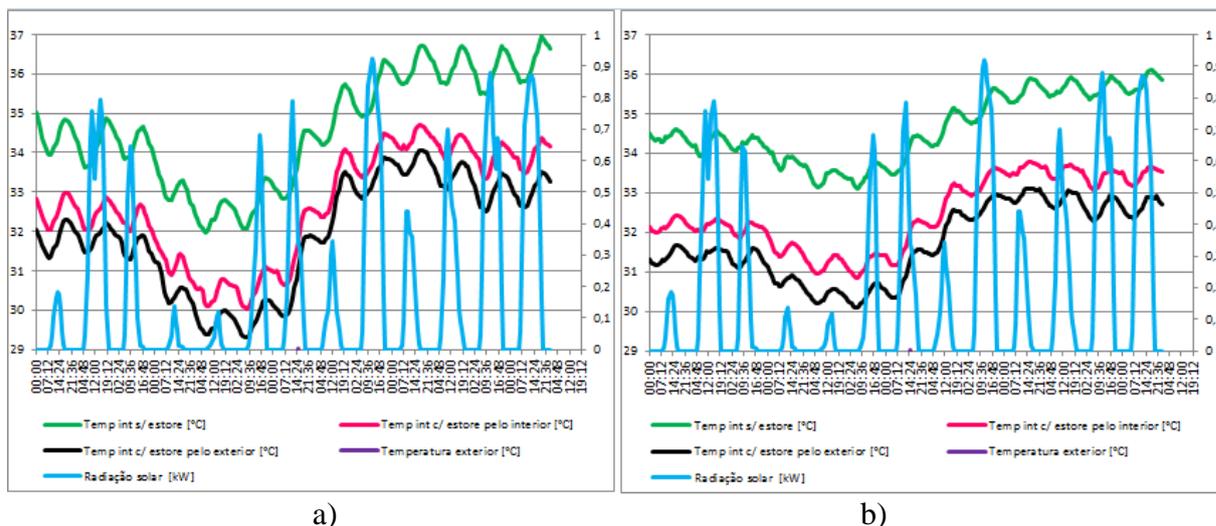


Figura 4.22 – Distribuição das temperaturas interiores com introdução de estore pelo interior e exterior com geometria 10×10 m, considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

No compartimento 3×30 m, como acontece com a introdução de uma pala, as diferenças de temperatura interior não são assim tão evidentes com a introdução de estores. A diferença entre a utilização de estore pelo exterior e a não utilização de estore é de 1°C (Figura 4.25 a)). Em relação há introdução de estore no interior, a diferença é menor, andando na casa dos $0,5^\circ\text{C}$. No caso em que o isolamento se encontra pelo exterior (Figura 4.25 b)), as diferenças de temperatura dentro do espaço aquecido encontram-se entre os $0,6$ e 1°C , sendo novamente atingidas temperaturas mais baixas quando o estore está pelo exterior.

No que diz respeito às amplitudes térmicas, tanto na Figura 4.22 como na Figura 4.23, como os valores das temperaturas interiores são mais estáveis, isso proporciona amplitudes térmicas mais baixas.

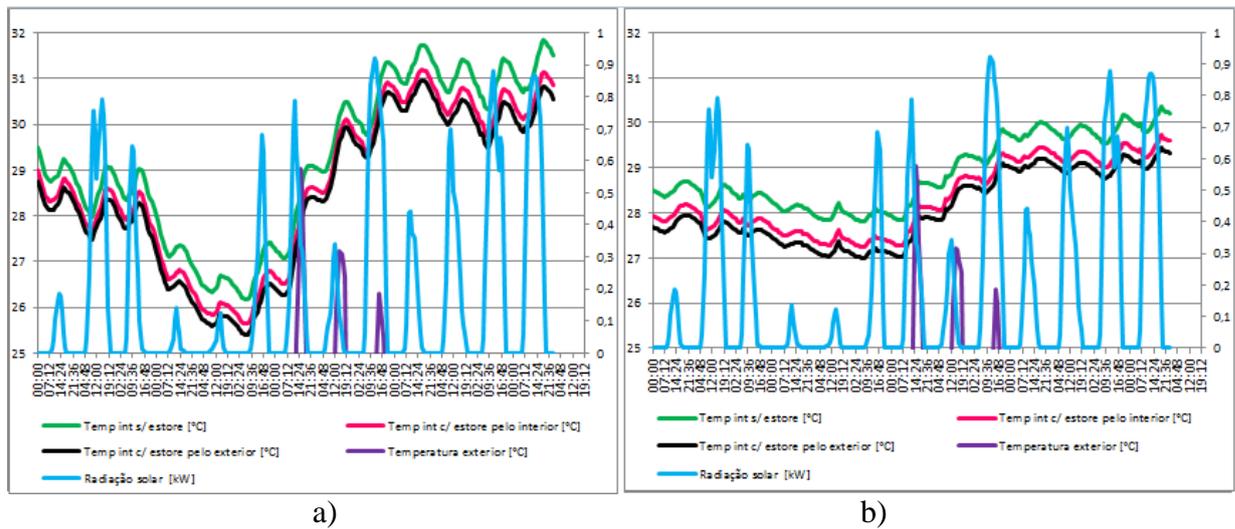


Figura 4.23 – Distribuição das temperaturas interiores com introdução de estore pelo interior e exterior com geometria 3×30 m considerando a envolvente vertical com: a) isolamento pelo interior, b) isolamento pelo exterior.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O recurso aos sistemas solares passivos ainda não constitui uma prática corrente, dando-se preferência aos sistemas de ganho direto. Um dos sistemas solares passivos alvo de estudo neste trabalho designa-se por parede de Trombe. A fraca utilização desta solução no sector da construção deve-se ao facto de os intervenientes desconhecerem o seu desempenho térmico e as suas características construtivas, mas também de não haver incentivo prático, uma vez que é difícil o seu enquadramento no cálculo regulamentar em vigor.

Com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento de estudos desta solução, neste trabalho foram simuladas algumas alterações nos constituintes da parede de Trombe de modo a otimizar o seu desempenho térmico.

No que diz respeito ao trabalho realizado, através dos gráficos elaborados a partir dos dados obtidos do programa *DesignBuilder*, comprovou-se que a implementação de uma parede de Trombe contribui para o aquecimento de um espaço interior.

Foram simulados dois casos extremos em termos de geometria do espaço. O primeiro possui dimensões 10×10 m ao passo que o outro tem 3×30 m, bem mais representativo do normal. As paredes envolventes também sofreram algumas alterações, nomeadamente na localização do isolamento térmico, pois trazia mais estabilidade à temperatura interior quando este se encontrava pelo exterior.

Fazendo um resumo dos casos simulados, na primeira simulação observou-se que com a introdução de uma parede de Trombe, são conseguidas temperaturas interiores mais elevadas em relação a uma parede simples de pedra e a uma parede com ETICS.

Depois de se perceber a vantagem da introdução de uma parede de Trombe para o aumento das temperaturas interiores, nos restantes casos foram feitas alterações de modo a tornar o seu desempenho ainda mais eficiente. Na segunda simulação alterou-se a espessura da parede acumuladora e verificou-se que com uma parede menos espessa, eram atingidas temperaturas interiores mais elevadas. De seguida, escolhendo a espessura mais favorável para a parede acumuladora, simulou-se a variação de espessura da caixa-de-ar, e observou-se que a caixa-de-ar com menor espessura proporcionava temperaturas mais altas. Depois de se escolher a

espessura da parede acumuladora e da caixa-de-ar mais vantajosas, comparou-se a utilização de vidro simples e vidro duplo, e devido ao seu melhor desempenho térmico, com vidro duplo conseguiram-se temperaturas mais elevadas.

A mudança de cor na parede acumuladora foi a alteração escolhida para a quinta simulação. Devido ao seu poder de absorção, com a utilização de uma cor escura são atingidas temperaturas interiores mais elevadas. Na sexta simulação foram trocados os materiais de construção da parede acumuladora. Os valores mais elevados de temperatura obtidos vão ao encontro da densidade e do atraso térmico dos materiais utilizados, pois quanto mais denso for o material, maior temperatura consegue fornecer ao espaço interior e quanto menor for o seu valor de atraso térmico, mais cedo se obtém a temperatura pretendida.

Por fim, na sétima e última simulação, o objetivo do estudo não era o aquecimento interior mas sim arranjar soluções para evitar o seu sobreaquecimento. Com a introdução de uma pala exterior e estores, conseguiu-se uma redução das temperaturas interiores. Nos estores, estes são mais eficientes quando se encontram na parte exterior do apartamento junto ao envidraçado, enquanto que no caso da pala, quanto maior for o seu comprimento, maior será a sua eficiência.

Através dos resultados obtidos é possível perceber que através da inclusão de uma parede de Trombe num compartimento, é possível fazer um aproveitamento da radiação proveniente do sol e com isso aumentar a eficiência energética do edifício. Considera-se que o trabalho apresentado constitui um contributo válido no que respeita ao desempenho térmico da parede de Trombe.

Para possíveis trabalhos futuros, surge a hipótese de se fazerem simulações/estudos em apartamentos com dimensões mais realistas das que foram simuladas nesta dissertação, para se perceber o desempenho térmico de uma parede de Trombe numa situação corrente, e caso os resultados sejam satisfatórios, tentar impulsionar a sua utilização na construção corrente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EDP@. <http://www.edp.pt/>. Energia de Portugal (página internet oficial). Acedida a 5 de Novembro de 2013;
- [2] DGEG@ (2007). <http://www.dgeg.pt/>. Direcção Geral de Energia e Geologia (página internet oficial), Paris. Acedida a 12 de Julho de 2014;
- [3] Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação). In Jornal Oficial da União Europeia, Nº L153, 16 de Junho de 2010, pp. 13-35;
- [4] http://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/AE_active_solar_energy_system.html#;
- [5] Gonçalves, H., Graça, J.M., “Conceitos Bioclimáticos para os Edifícios em Portugal”, Direcção Geral de Geologia e Energia, 2004;
- [6] Moita, F. Energia Solar Passiva 1; Direcção-Geral de Energia, Imprensa Nacional Casa da Moeda, 1985;
- [7] Oliveira, A., “Avaliação da Qualidade Térmica de Edifícios”, Tese de Mestrado em Construção de Edifícios, Universidade do Porto, 2007;
- [8] Mazria, E., The Passive Solar Energy Book. 1979;
- [9] CAD@. <http://planetacad.com/>. Companhia de Arquitectura e Design (página internet oficial). Acedida em 5 de Novembro de 2013;
- [10] AdEPorto@. www.adeporto.eu/. Agência de Energia do Porto (página internet oficial). Acedida em 5 de Novembro de 2013;
- [11] Sá, A. Parede de Trombe: Análise Experimental e Simulação de Desempenho Térmico; Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, 2011;

[12] <http://theredstool.blogspot.pt/2011/02/trombe-wall.html>;

[13] http://www.powerhousetv.com/wcm/groups/wcm_internet/@int/@powerhousetv/documents/digitalmedia/mdaw/mdi3/~edisp/027450.jpg;

[14] <http://pt.wikinoticia.com/estilo%20de%20vida/67-moda/57896-trombe-wall>;

[15] Mendonça, P.; 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, 2005;

[16] Torcellini, P.; Pless, S.; Trombe Walls in Low-Energy Buildings: Practical Experiences; Conference Paper NREL, Julho de 2004;

[17] Holcimfoundation. www.holcimfoundation.org. (página internet oficial). Energy efficient university building, Lawrence, KS, USA. Acedida em 6 de Novembro de 2013;

[18] Diogo. A. Sistemas Envidraçados com e sem Protecção Solar; Tese de Mestrado em Arquitectura, Instituto Superior Técnico, 2012;

[19] Sirgado, J., Análise do impacto dos vão envidraçados no desempenho térmico dos edifícios. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2010;

[20] http://proto-maolive.blogspot.pt/2009_09_01_archive.html;

[21] <http://atelieraugusta.blogspot.pt/2010/07/dica-de-decoracao-estores.html>;

[22] <http://www.decoraambientes.com/search?updated-max=2013-04-21T20:24:00-07:00&max-results=32&reverse-paginate=true>;

[23] Gomes. M. Construção Sustentável – Contributo da Utilização da Parede Trombe. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, 2011;

[24] Shen, J.; Lassue, S.; Zalewski, L.; Huang, D.; Numerical study on the thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls; Energy and Buildings 39 (2007) 962-974;

[25] Martins, A. Contribuição da parede de Trombe na redução dos consumos energéticos dos edifícios; Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Trás-os-Montes, 2010;

[26] INETI, Edifício SOLAR XXI – Um edifício energeticamente eficiente em Portugal, Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I.P. Departamento de Energias Renováveis;

[27] Nunes, L. Eficiência Energética de Edifícios: Contributo dos PCMs e Parede Trombe; Universidade de Aveiro, 2011;

[28] Kara, Y.; Çirakman, A.; Arslantürk, C. Solar Energy Storage in Buildings Structure for Solar Space Heating; International Conference and Exhibition on Green Energy & Sustainability for Arid Regions & Mediterranean Countries, Jordan, Novembro, 10-12 2009;

[29] Domínguez, M.; García, C.; Arias, J.; Los materiales de cambio de fase (PCM) en la construcción; Departamento de Engenharia do Instituto do Frío, CSIC, Espanha;

[30] Fang, X; Li, Y. Numerical Simulation and Sensitivity Analysis of Lattice Passive Solar Heating Walls; Solar Energy Vol. 69, No 1, pp. 55-66, 2000;

[31] Simões, N. Exemplo de Aplicação do RCCTE (DL n.º 80/2006) – Edifício Multifamiliar, ITeCons, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 2007;

[32]<http://arquitectura0emisiones.blogspot.pt/2011/04/forum-homini-hotel-el-uso-de-inercia.html>;

[33] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Projeto 02:135.07-001/2, Set 2003, Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações;

[34] Sistema Internacional de Unidades. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Minas Gerais.

[35] Neves, P. Aplicação de paredes de Trombe em habitações já existentes, Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Julho de 2012.

[36] Norma ISO 13790:2007 (E) – Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling.

[37] DesignBuilder 2.1, User's Manual, October 2009