

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

EIMI VERIDIANE SUZUKI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE AQUECIMENTO/RESFRIAMENTO
DE UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO PASSIVA**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2012

EIMI VERIDIANE SUZUKI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE AQUECIMENTO/RESFRIAMENTO
DE UM SISTEMA DE CLIMATIZAÇÃO PASSIVA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Área de Concentração: Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Adalberto Matoski

Co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger.

CURITIBA
2012

AGRADECIMENTOS

A Deus, o que seria de mim sem a fé que eu tenho nele.

A minha família por todo o incentivo que vocês sempre me deram.

Ao meu professor orientador, Prof. Dr. Adalberto Matoski, por sempre estar lá para me ajudar.

Ao meu professor co-orientador: Prof. Dr. Eduardo Leite Krüger, pela dedicação e por todos os momentos de aprendizado que tornaram possível a conclusão desta monografia.

A professora Márcia Keiko Ono Adriazola, pelo auxílio, e principalmente por todo o carinho.

Aos que me ajudaram na construção dos protótipos e com os equipamentos usados nas medições, em especial ao Paulo Sabino, a Flavia Osaku Minella e ao André Vieira Luccas.

Agradeço aos professores da banca examinadora pela atenção e contribuição dedicadas a este estudo.

A UTFPR e ao PPGEC por esta oportunidade.

Ao SIMEPAR pelos dados fornecidos.

Meus sinceros agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma doaram um pouco de si para que a conclusão deste trabalho se tornasse possível.

RESUMO

O emprego de sistemas passivos de condicionamento de ambientes ao invés de equipamentos de climatização artificial pode ser uma solução bastante conveniente para diminuir o gasto de eletricidade e melhorar o conforto térmico de uma edificação. Uma das técnicas usadas para a melhoria do desempenho térmico de edificações é a utilização de “Paredes Trombe”. Este é um sistema de climatização passiva que utiliza ganhos solares associados à inércia térmica de uma parede para absorver calor no período frio sem bloquear suas perdas do período quente. Esta pesquisa tem como objetivo analisar o potencial de aquecimento/resfriamento de um sistema de climatização passiva baseado na utilização de uma Parede Trombe. Para isso, foram construídos dois protótipos em escala reduzida, sendo um deles com Parede Trombe e o outro em alvenaria de blocos de concreto, sem o sistema passivo. As medições ocorreram em períodos frios (datas) de 2011 e no período de verão de 2012, para configurações distintas da Parede Trombe. Os resultados mostraram que a Parede Trombe teve um resultado positivo tanto para o inverno quanto para o verão.

Palavra-chave: Parede Trombe; Conforto Térmico.

ABSTRACT

The use of passive solar heating for achieving thermal comfort inside a building is a very convenient solution to reduce the cost of electricity. One of the techniques used to improve the thermal performance of buildings is using "Trombe Walls." This is a passive solar heating system that uses solar gains associated with the thermal inertia of a wall to absorb heat during cold periods without blocking their loss in the warm period. This research aims to analyze the potential for heating and cooling of a Trombe Wall. For this, two cells were built on a small scale: passive solar cell and a reference cell. The measurements took place in cold periods (dates), of 2011 and during the summer of 2012, for different configurations of the Trombe Wall. The results showed that the Trombe Wall had a positive result for both winter and summer.

Key words: Trombe Wall; Thermal comfort; Passive solar heating.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO.....	9
FIGURA 2 - BALANÇO ENERGÉTICO PARA O VIDRO POLIDO INCOLOR DE 6MM SOB A INCIDÊNCIA SOLAR.....	17
FIGURA 3 - REDUÇÃO DA PERDA DE CALOR PARA ALGUNS TIPOS DE VIDRO VIDRO DUPLO	18
FIGURA 4 - PÁTIO DA OFICINA CULTURAL OSWALD DE ANDRADE, EM SÃO PAULO – SP, ONDE SÃO UTILIZADAS ABERTURAS ZENITAIS.....	20
FIGURA 5 - PAREDE TROMBE.....	22
FIGURA 6 – CASA TERMICAMENTE OTIMIZADA, PORTO – PORTUGAL, ARQ. SANTIAGO BOISSEL.....	23
FIGURA 7 - CASA SHÄFFER, PORTO SANTO – PORTUGAL, ARQ. GÜNTHER LUDEWIG	23
FIGURA 8– PAREDE ACUMULADORA OU PAREDE TROMBE NÃO VENTILADA ..	24
FIGURA 9- PAREDE TROMBE VENTILADA PARA SITUAÇÃO DE INVERNO.....	25
FIGURA 10- PAREDE TROMBE VENTILADA PARA SITUAÇÃO DE VERÃO.....	26
FIGURA 11- EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DE ESTUFA EM PORTUGAL, (A) MORADIA DO VALE DO ROSAL, ARQ. FAUSTO SIMÕES; (B) MORADIA DA CIDADE DO PORTO, ARQ. FERNANDA SEIXAS	29
FIGURA 12- FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE GANHO ISOLADO PARA (A) NOITE E (B) DIA	29
FIGURA 13 – CARTA BIOCLIMÁTICA DE OLGYAY	32
FIGURA 14 – CARTA BIOCLIMÁTICA PARA O BRASIL COM DELIMITAÇÕES DE ESTRATÉGIAS	33
FIGURA 15 - CARTA BIOCLIMÁTICA PARA O VERÃO EM CURITIBA.....	37
FIGURA 16 - CARTA BIOCLIMÁTICA PARA O INVERNO EM CURITIBA.....	38
FIGURA 17 - MUDANÇA DA CARTA SOLAR DE ACORDO COM A LATITUDE DA TERRA	39
FIGURA 18 - ALTURA SOLAR E AZIMUTE	39
FIGURA 19 - CARTA SOLAR PARA A CIDADE DE CURITIBA, LATITUDE -25,51	40
FIGURA 20 - PLANTA BAIXA DOS PROTÓTIPOS.....	41
FIGURA 21 - CORTE A-A, DO PROTÓTIPO 2 E CORTE B-B, DO PROTÓTIPO 1	42
FIGURA 22- LOCAL ONDE FORAM CONSTRUÍDOS OS PROTÓTIPOS, UTFPR CAMPUS CURITIBA, SEDE ECOVILLE.....	42
FIGURA 23 - PROTÓTIPO CONSTRUÍDO COM BLOCOS DE CONCRETO.	44
FIGURA 24 - CORTE A-A E ELEVAÇÃO FRONTAL DO PROTÓTIPO 2 COM A ESQUADRIA DA PAREDE TROMBE INSTALADA	44
FIGURA 25 - FACE INFERIOR DA ESQUADRIA (A) FECHADA E (B) ABERTA.....	45
FIGURA 26 - FACE SUPERIOR DA ESQUADRIA (A) FECHADA E (B) ABERTA.....	46
FIGURA 27 - PROTÓTIPOS CONSTRUÍDOS.....	46
FIGURA 28 - APARELHO USADO NAS MEDIÇÕES, HOB0®	47
FIGURA 29 - ABERTURAS DA PAREDE TROMBE.....	48
FIGURA 30 - ABRIGO PARA A MEDIÇÃO DA TEMPERATURA EXTERNA	49
FIGURA 31 - ESTAÇÃO METEOROLÓGICA MARCA HOB0® MODELO H21-001	50
FIGURA 32 - SENSORES DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA UTILIZADOS, (A) ANEMÔMETRO, (B) SENSOR DE RADIAÇÃO SOLAR E (C) SENSOR DE TEMPERATURA E UMIDADE DO AR	51

FIGURA 33- HOBO® EMBRULHADO COM PAPEL ALUMÍNIO E SENDO COLOCADO EM UM COPO DE PLÁSTICO, E HOBO® JÁ DENTRO DO COPO DE PLÁSTICO.....	52
FIGURA 34 - HOBO® COLOCADO NA PAREDE NORTE DO PROTÓTIPO 1	52
FIGURA 35 - GRÁFICOS DE RADIAÇÃO SOLAR PARA CADA UM DOS TRÊS DIAS PADRÃO ESCOLHIDOS, PARA O INVERNO	54
FIGURA 36 - GRÁFICO DA CONFIGURAÇÃO 1, PARA O INVERNO, DIA 29 DE MAIO DE 2011	55
FIGURA 37 - CONFIGURAÇÃO 1 PARA O PERÍODO DE INVERNO;.....	56
FIGURA 38 - GRÁFICO DA CONFIGURAÇÃO 2, PARA O INVERNO, DIA 01 DE JUNHO DE 2011.....	56
FIGURA 39 - CONFIGURAÇÃO 2 PARA O PERÍODO DE INVERNO;	57
FIGURA 40- GRÁFICO DA CONFIGURAÇÃO 3, PARA O INVERNO, DIA 19 DE SETEMBRO DE 2011.....	58
FIGURA 41 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS DAS TRÊS CONFIGURAÇÕES, AS TEMPERATURAS EXTERNAS E AS TEMPERATURAS MÉDIAS DO PROTÓTIPO 1 PARA O DIA PADRÃO060	
FIGURA 42 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TRÊS CONFIGURAÇÕES DE INVERNO E O PROTÓTIPO DE REFERÊNCIA	62
FIGURA 43- GRÁFICOS DE RADIAÇÃO SOLAR PARA CADA UM DOS QUATRO DIAS PADRÃO ESCOLHIDOS, PARA O VERÃO	63
FIGURA 44 - GRÁFICO DA CONFIGURAÇÃO 1, PARA O VERÃO, DIA 3 DE JANEIRO DE 2012	64
FIGURA 45 - CONFIGURAÇÃO 1 PARA O PERÍODO DE VERÃO;.....	65
FIGURA 46 - GRÁFICO DA CONFIGURAÇÃO 2, PARA O VERÃO, DIA 8 DE JANEIRO DE 2012	65
FIGURA 47 - CONFIGURAÇÃO 2 PARA O PERÍODO DE VERÃO;.....	66
FIGURA 48 - GRÁFICO DA CONFIGURAÇÃO 3, PARA O VERÃO, DIA 15 DE JANEIRO DE 2012	67
FIGURA 49 - CONFIGURAÇÃO 3 PARA O PERÍODO DE VERÃO;.....	68
FIGURA 50 - GRÁFICO COMPARATIVO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL INCIDENTE EM PLANO HORIZONTAL NOS DIAS 14 E 15 DE JANEIRO DE 2012	68
FIGURA 51 - GRÁFICO DA CONFIGURAÇÃO 4, PARA O VERÃO, DIA 24 DE JANEIRO DE 2012	69
FIGURA 52 - CONFIGURAÇÃO 4 PARA O PERÍODO DE VERÃO;.....	70
FIGURA 53 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS DAS QUATRO CONFIGURAÇÕES, AS TEMPERATURAS EXTERNAS E AS TEMPERATURAS MÉDIAS DO PROTÓTIPO 1 PARA O DIA PADRÃO071	
FIGURA 54 - COMPARAÇÃO ENTRE AS QUATRO CONFIGURAÇÕES DE VERÃO E O PROTÓTIPO DE REFERÊNCIA	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DE MASSA TÉRMICA DE ALGUNS MATERIAIS	21
TABELA 2 - ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS PARA O VERÃO NA CIDADE DE CURITIBA.....	37
TABELA 3 - ESTRATÉGIAS BIOCLIMÁTICAS PARA O INVERNO NA CIDADE DE CURITIBA.....	38
TABELA 4 - CAPACIDADE TÉRMICA E ATRASO TÉRMICO DAS AMOSTRAS TESTADAS	43
TABELA 5 - TABELA RESUMO COM TODOS OS MATERIAIS UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS, A CONDUTIVIDADE TÉRMICA DOS MATERIAIS E A CAPACIDADE TÉRMICA DOS ELEMENTOS.	46
TABELA 6 - RESUMO DOS DADOS DOS TRÊS DIAS PADRÃO DO INVERNO.....	60
TABELA 7 - COMPARAÇÃO ENTRE AS TEMPERATURAS DO PROTÓTIPO 2 COM O PROTÓTIPO DE REFERÊNCIA (PROTÓTIPO 1), PARA O INVERNO	61
TABELA 8 - RESUMO DOS DADOS DOS QUATRO DIAS PADRÃO DO VERÃO.....	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	8
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	8
1.2	OBJETIVOS	9
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1	CONFORTO TÉRMICO.....	10
2.2	TROCAS TÉRMICAS EM EDIFICAÇÕES	11
2.3	GANHOS SOLARES EM EDIFICAÇÕES	16
2.4	SISTEMAS ATIVOS	18
2.5	SISTEMAS PASSIVOS	19
2.5.1	Sistema de aquecimento solar passivo	19
2.5.1.1	Sistema de ganho direto.....	20
2.5.1.2	Sistema de ganho indireto.....	21
2.5.1.3	Sistema de ganho isolado	28
2.5.2	Sistema de resfriamento passivo	29
2.5.2.1	Ventilação Natural	30
2.5.2.2	Resfriamento pelo solo	30
2.5.2.3	Resfriamento evaporativo	31
2.5.2.4	Resfriamento radiativo noturno	31
2.6	FATORES CLIMÁTICOS	32
2.6.1	Carta Bioclimática.....	32
2.6.2	Características do Clima de Curitiba	36
2.7	CARTA SOLAR	38
3	METODOLOGIA	41
3.1	CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS.....	41
3.2	MEDIÇÕES DE INVERNO.....	47
3.2.1	Equipamento utilizado para as medições	47
3.2.2	Medições	48
3.3	MEDIÇÕES DE VERÃO	50
3.3.1	Equipamento utilizado para as medições	50
3.3.2	Medições	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1	MEDIÇÕES DE INVERNO.....	54
4.2	MEDIÇÕES DE VERÃO.....	63
5	CONCLUSÕES	74
	REFERÊNCIAS.....	75
	APÊNDICE A	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O setor residencial é o segundo maior responsável pelo consumo de energia elétrica no Brasil, com tendência crescente: entre os anos de 2002 a 2007, este setor teve um crescimento no consumo de energia elétrica de 25%. O aumento do consumo de energia pode ser sinônimo de cenário econômico favorável e da melhoria da qualidade de vida, mas não é só isso. Esse aumento também tem reflexos negativos, como a possibilidade do esgotamento dos recursos utilizados para a produção de energia, ou o impacto ambiental que esta produção de energia gera. Outro ponto negativo são os altos custos de construção de novas usinas hidrelétricas de energia elétrica (ANEEL, 2008).

Sendo assim, a substituição de aparelhos elétricos de climatização por sistemas solares passivos pode ser uma solução bastante conveniente para diminuir o gasto de eletricidade e melhorar o desempenho térmico de uma edificação (LOURENÇO, 2007)

O conforto térmico proporciona ao homem melhores condições de vida e de saúde, pois em um ambiente termicamente confortável reduzem-se os índices de fadiga e de stress (FROTA e SCHIFFER, 2007). Uma das soluções passivas usadas para a melhoria do desempenho térmico de edificações é a Parede Trombe. Este é um sistema de climatização passiva que utiliza ganhos solares associados à inércia térmica de uma parede para absorver calor no período frio sem bloquear suas perdas do período quente.

Dentro do mapa bioclimático brasileiro (Figura 1), pode-se determinar a Cidade de Curitiba como pertencente à Zona 1. A NBR 15220-3 determina que as estratégias de condicionamento térmico passivo para condições de inverno na Zona Bioclimática 1 são aquecimento solar da edificação e o uso de vedações internas pesadas (inércia térmica).



FIGURA 1 - Zoneamento bioclimático brasileiro

Fonte: ABRAPEX (2012).

1.2 OBJETIVOS

Considerando que para Curitiba as estratégias de condicionamento térmico são o uso de aquecimento solar e vedações internas pesadas, este trabalho tem como objetivo geral analisar o potencial de um sistema de climatização passiva, denominado Parede Trombe, que utiliza aquecimento solar e alta inércia térmica, na otimização do desempenho térmico de protótipos em escala reduzida para Curitiba.

Os objetivos específicos são:

- a) Comparar o desempenho térmico de dois protótipos em escala reduzida em alvenaria de blocos de concreto, sendo um deles com a Parede Trombe e outro sem utilizar este sistema;
- b) Verificar o desempenho do sistema para verão e inverno;
- c) Avaliar o uso de diferentes configurações do sistema para aumentar sua eficiência.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONFORTO TÉRMICO

Sendo a energia solar obtenível de forma gratuita, deve-se tirar o máximo de vantagem desse recurso para o aumento do desempenho térmico de edificações, com o objetivo de evitar o gasto de energia de outras fontes não renováveis.

Segundo Akutsu et al. (2002), nas décadas de 1970 e 1980, na França se tentava diminuir o consumo com o “selo de alta isolamento”, selo criado para incentivar o uso de radiação solar e de fontes internas de calor em edificações. Também se estabeleceram cotas para o gasto de combustíveis fósseis em edificações, compensando-se as perdas de calor a partir de vedações de má qualidade, com o uso conjunto de equipamentos de condicionamento mais eficientes.

Akutsu et al. (2002) afirmam também que, na década de 80, outros países europeus seguiram o exemplo da França com normas para a redução do consumo de energia elétrica. A Grã-Bretanha fixou limites de transmitância térmica para todos os materiais utilizados para vedação e também limitou o consumo de energia elétrica em edificações, com atenção especial para o rendimento de equipamentos de condicionamento de ar.

Historicamente, a evolução do conforto esteve muito relacionada com o desenvolvimento tecnológico. O conforto proporcionado por equipamentos de condicionamento de ar, com o passar do tempo, segundo Rybczynski (1986), não teve um aumento apenas na qualidade com que era oferecido para a população, mas também na quantidade. A partir da década de 20, sobretudo nos Estados Unidos, o conforto tornou-se, devido à industrialização, acessível para grande parte da população.

Conforto térmico, segundo a ASHRAE - *American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, citado por Lamberts et al. (1997, p.41), é uma sensação de bem estar em relação à temperatura ambiente que cerca uma pessoa. Caso o somatório de todas as trocas de calor a que um corpo está submetido seja igual a zero, pode-se dizer que o indivíduo estará em conforto térmico, levando em conta também que a temperatura da pele e o nível de transpiração devem estar dentro de certos limites.

De acordo com Roriz (1987), alguns fatores que influenciam a sensação de conforto térmico são: a temperatura do ar; a temperatura superficial da vedação; a umidade relativa do

ar; a ventilação; a adaptação das pessoas ao clima; o tipo de roupa utilizado por elas; o metabolismo humano; dentre outros. Alguns desses fatores combinados podem trazer uma sensação agradável para o indivíduo, então se diz que ele está em uma “zona de conforto”.

Esse conceito pode ser definido, segundo Olgyay (1998), como um estado em que o corpo mantém o equilíbrio biológico com o menor gasto possível de energia, para que esta seja aproveitada em sua maioria para a produtividade. A edificação pode ser o principal meio de se obter níveis de conforto térmico interno. Deve-se modificá-la para que se adapte às necessidades de conforto dos indivíduos que irão utilizá-la, reduzindo-se ou eliminando-se, quando possível, o uso de equipamentos de condicionamento de ar.

Givoni (1976) afirma que a radiação solar, a radiação emitida pelas superfícies, a temperatura e umidade do ar; os ventos e as precipitações, são os principais fatores do clima que influenciam o conforto humano no projeto de edificações.

2.2 TROCAS TÉRMICAS EM EDIFICAÇÕES

A temperatura é a grandeza física que mede o grau de agitação das partículas de um corpo, quanto mais agitadas estão essas partículas, mais alta é a temperatura. A única situação em que isso não ocorre é durante a mudança de estado físico da matéria, quando a temperatura não se altera, mesmo com mudança do grau de agitação das partículas (SIAS; TEIXEIRA, 2006).

O calor é uma forma de energia em trânsito, ele é transferido, de uma porção da matéria para outra, quando há diferença de temperatura entre elas. Um corpo não tem calor, tem energia interna, portanto, se o corpo ganha calor a sua energia interna aumenta. A condição básica para que haja uma troca de calor é que os corpos estejam em temperaturas diferentes, sendo que o fluxo de calor passa do corpo mais quente para o mais frio (SCHMID, 2005; AXT, 1989).

As trocas de calor são classificadas como trocas térmicas secas e trocas térmicas úmidas. Nas trocas térmicas secas, há mudança de temperatura, enquanto que as trocas térmicas úmidas envolvem mudança de fase. As trocas térmicas secas podem ser efetuadas de três maneiras: condução, convecção e radiação. As trocas térmicas úmidas são feitas por evaporação e condensação (FROTA e SCHIFFER, 2007).

A evaporação é uma troca térmica causada pela mudança da água do estado líquido para o estado gasoso, e a condensação pela mudança do estado gasoso do vapor d'água que existe no ar para o estado líquido. Para ocorrer essas mudanças de estado ocorre uma absorção ou liberação, respectivamente, de energia (FROTA e SCHIFFER, 2007).

Na radiação térmica, a troca de calor se dá por ondas eletromagnéticas entre corpos de temperaturas diferentes e que não estão em contato, sendo que o meio entre eles deve ser transparente ou não absorvente e não ser significativamente aquecido. A transmissão de calor por radiação depende da diferença de temperatura, da capacidade de emissão, e de absorção das superfícies.

Segundo Lamberts et al. (1997, p.184), a convecção é a transferência de calor de uma face de um sólido para um fluido em movimento ou vice-versa. Esta transferência depende de três fatores: área de contato, diferença de temperatura e do coeficiente de troca por convecção.

Frota e Schiffer (2007) afirmam que para haver troca de calor por convecção em superfícies verticais, o ar deve estar em movimento, esta movimentação do ar pode ser natural, por ventos, ou causada para obter uma convecção forçada. Para superfícies horizontais a troca de calor depende do sentido do fluxo de calor, pois quando o fluxo é ascendente ele coincide com o fluxo natural do calor. Quando o fluxo de calor é descendente, a troca por convecção é mais dificultada.

Na condução, o calor passa de um corpo para outro através de contato direto entre dois corpos. O calor se propaga em todos os sentidos e se transmite entre dois corpos em contato e com diferentes temperaturas. Na condução, a condutividade térmica é a principal característica do material na transmissão de calor. Outros fatores que influenciam são: a área transversal e a diferença de temperatura (RIVERO,1985).

A condutividade térmica do material, expressa por "k" ou " λ ", nas trocas por condução, dado em $W/m^{\circ}C$, é um coeficiente de proporcionalidade da equação da transmissão por condução e representa a taxa de agitação atômica através do material no processo de condução de calor. Uma definição mais precisa da condutividade térmica baseia-se na "taxa de fluxo de calor (fluxo de energia por unidade de tempo) através de uma unidade de área e uma unidade de espessura do material, quando há diferença unitária de temperatura entre ambas as faces do material" (KOENIGSBERGER et al., 1980).

Segundo a NBR 15220-1 (2005) o fluxo de calor, expressa por " Φ ", é a quantidade de calor que atravessa uma superfície dividida pelo seu tempo de duração, e é dada em Watt (W, sendo expressa pela fórmula:

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad (1)$$

A resistência térmica (R) é uma propriedade do material, dada em m^2C/W , é determinada pela divisão da espessura pela condutividade térmica do material, e pode ser definida como a habilidade de um material em retardar o fluxo de calor. O inverso da resistência térmica é chamado de transmitância térmica, dado em W/m^2C . A transmitância térmica, U, pode ser definida como a quantidade de calor que atravessa $1m^2$ de um material em um segundo quando a diferença de temperatura entre cada face é de $1^{\circ}C$ (BOOTH; SHAW, 1989). A transmitância térmica é dada pela fórmula:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{\lambda}{e} \quad (2)$$

O calor pode ser se dois tipos: calor latente e calor sensível. O calor latente é aquele envolvido em mudanças de estado físico, é calculado por meio da razão entre a quantidade de calor que a substância deve ganhar ou perder e a massa da mesma. No calor latente, a substância recebe ou cede calor sem que haja uma mudança em sua temperatura (SCHMID, 2005).

O calor sensível é aquele transferido entre duas porções de matéria que possuem temperaturas diferentes, podendo ser transmitido por convecção, condução e radiação. No calor sensível, a quantidade de calor que um corpo ganha ou perde é obtida pela multiplicação de três elementos: a massa do corpo, o seu calor específico, e a variação de temperatura causada pelo ganho ou perda do calor. O conforto de um indivíduo em determinado ambiente é determinado pela relação entre o ambiente, o ser humano e pelo calor sensível e latente (SCHMID, 2005).

O calor específico é a quantidade de calor necessário para elevar 1g de uma substância em $1^{\circ}C$, e é dada em $J/kg^{\circ}C$. O *United States Bureau of Naval Personnel* (1980) afirma que a capacidade térmica equivale ao calor específico multiplicado pela massa do

corpo. A capacidade térmica está relacionada com o corpo, enquanto que o calor específico está relacionado com a substância que o compõe. Dois corpos compostos de massas e de substâncias diferentes podem ter a mesma capacidade térmica. Dois corpos com diferentes massas, mas que sejam constituídos da mesma substância tem capacidades térmicas diferentes, porém possuem o mesmo calor específico. Sendo assim, a capacidade térmica é a quantidade de calor necessária para que um corpo aumente em 1°C a sua temperatura, e é dada em J/K (COSTA, 1974).

O calor específico é expresso por "c", e dado pela fórmula:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta\theta} \quad (3)$$

Sendo :

Q - quantidade de calor (J);

m - massa do corpo (kg);

$\Delta\theta$ - é a variação de temperatura do corpo (°C);

A capacidade térmica (C), é expressa pela fórmula:

$$C = c \cdot m \quad (4) \text{Segundo Magalhães et al. (2012), o}$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c}$$

Sendo:

α - difusão térmica (m²/s);

ρ - densidade (kg/m³). O atraso térmico é dado em horas e corresponde ao “atraso” do calor ao passar por um material: quanto menor for a difusão térmica do material, maior será o atraso térmico (ISOCOR,2010) . A NBR 15220-1 (2005) define atraso térmico como:

“Tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor.”

Um dos fatores que influenciam o atraso térmico é a inércia térmica, seu uso ajuda o atraso e diminui picos de calor. A inércia térmica é definida por Yannas et al. (1995) como a capacidade da edificação de armazenar e dissipar calor, propriedade que está relacionada com a capacidade térmica. Uma edificação com pouca inércia térmica tem uma variação de temperatura igual à variação de temperatura exterior, já se uma edificação tiver inércia térmica infinita sua temperatura interna não variará. A inércia térmica é definida por Braga Filho (2004) como o produto de três elementos: densidade de massa aparente, volume e calor específico à pressão constante.

Enquanto a inércia térmica é a taxa na qual o calor se move através do material, a massa térmica é a capacidade de um material de absorver calor. As principais características que influenciam a massa térmica de um material são (REARDON; MCGEE; MILNE, 2008):

- Densidade: quanto maior a densidade, ou seja, quanto menos vazios no material, maior sua massa térmica;
- Condutividade térmica: o material deve permitir que o calor flua com facilidade através dele para ser considerado um material com alta massa térmica;
- Refletividade: Superfícies escuras, foscas e texturizadas absorvem mais calor;
- Volume: maiores volumes podem armazenar mais calor.

A emissividade é definida como a razão entre a taxa de emissão de radiação de uma superfície real pela taxa de emissão de radiação do corpo negro, por unidade de área, na mesma temperatura. A emissividade possui valores de 0 a 1 (PERIN, 2009). Soisson (1975) afirma que um corpo negro pode ser definido como um irradiador perfeito de energia, e possui emissividade igual a 1.

2.3 GANHOS SOLARES EM EDIFICAÇÕES

Radiação solar é a radiação eletromagnética emitida pelo Sol, ela é formada por ondas de alta frequência, chamadas de ondas curtas. Grande parte dessa radiação solar atravessa a atmosfera terrestre chegando à superfície terrestre onde é absorvida. Parte dessa energia absorvida é "re-irradia", mas como a temperatura da superfície terrestre é inferior que a do Sol, a energia é emitida em ondas de baixa frequência, chamadas de ondas longas (HEWITT, 2008).

O conjunto de todas as formas de radiação solar, radiação de onda curta, é chamado de espectro solar. Ele é dividido em três parcelas: ultravioleta, luz ou espectro visível e infravermelho. A luz ultravioleta tem comprimento de onda menor que 400nm, é invisível e representa 2% da energia solar. A luz ou espectro visível é a que nos permite ver, tendo comprimento de onda de 400nm a 700nm e representa 45% da energia solar. A última parcela é a infravermelha, que representa 53% da energia solar, tem comprimento de onda de 700nm a 3000nm, e, assim como a ultravioleta, é invisível. As três parcelas, quando absorvidas, viram calor, mas apenas a luz é energia luminosa (BAUER, 1994).

Todos os corpos possuem a propriedade de refletir a radiação solar incidente, propriedade esta que é chamada de albedo. Corpos brancos possuem um valor alto de albedo e, como nesse caso a maior parte da energia já foi refletida, a absorção de calor é pequena (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). A partir de sua interação com a luz, os materiais podem ser classificados como materiais opacos, materiais translúcidos e materiais transparentes.

Os materiais opacos são aqueles que absorvem parte da luz incidente e refletem o restante, dependendo de características tais como cor e textura do revestimento externo. As paredes escuras e opacas absorvem mais de 90% da luz, sendo que as claras e brilhantes absorvem cerca de 15% e refletem aproximadamente 85% da luz (HOPKINSON et al., 1975; CASTRO et al., 2003).

Vanderlei e Caram (2007) explicam que um material translúcido é muito semelhante ao material transparente, a diferença é que, quando a luz passa por um material translúcido, muda de direção no interior do material, saindo do outro lado de uma maneira difusa.

Segundo Corato (2001), quando a luz do sol entra em contato com os materiais transparentes (vidro e policarbonatos), pode ser refletida, absorvida e se converter em calor,

sendo também transmitida para o interior. A proporção no qual ocorre a reflexão, absorção e transmissão da luz é dada em função das características do elemento transparente.

Segundo Bauer (1994), a quantidade refletida depende de dois fatores: a refletividade do vidro e o ângulo com que a luz incide no vidro. Outra parte da energia é absorvida pelo vidro e liberada para o interior e o exterior sob forma de calor (radiação de onda longa). A última parte da energia solar (luz visível) atravessa o vidro para o interior da edificação. Para o vidro comum incolor de 6mm, cerca de 78% da energia são transmitidos diretamente para o interior, 7% refletidos e 15% absorvidos pelo vidro. Dos 15% absorvidos, 5% são irradiados para o interior e 10% para o exterior. No total, o vidro comum permite a passagem de 83% da energia solar (Figura 2).

Existem outros tipos de vidros além do vidro comum, chamados especiais, que foram criados para refletir e/ou absorver luz para diminuir sua influência no interior da edificação (LAMBERTS, 2005). Existe também o vidro duplo, que é usado para diminuir as perdas de calor. Ele consiste em dois vidros separados por uma câmara de ar fechada, onde pode ser colocado algum tipo de gás como o argônio, eliminando as trocas térmicas por condução de um vidro ao outro e aproveitando a baixa condutividade térmica do ar ou do gás utilizado para diminuir as trocas por convecção na câmara de ar.

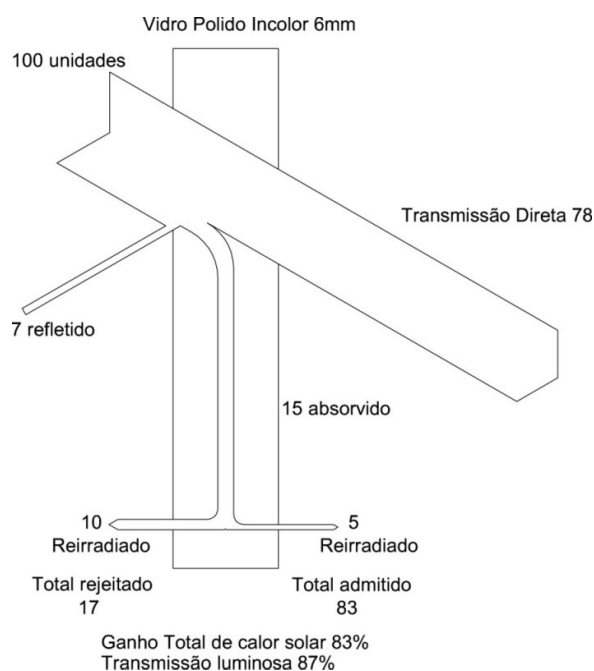


FIGURA 2 - Balanço energético para o vidro polido incolor de 6mm sob a incidência solar

Fonte: Bauer (1994).

No caso de vidros duplos, a lâmina de vidro interna pode ser substituída por um vidro especial, que diminua ainda mais as perdas de calor por condução, mas permitindo a passagem de luz. A redução da perda de calor no vidro duplo pode ser bem significativa, pois enquanto a transmitância térmica do vidro simples comum é de $6,28\text{W/m}^2\text{°C}$, para o vidro duplo padrão esta é de $2,79\text{W/m}^2\text{°C}$, uma diminuição de 55,6% da perda de calor para o meio externo (Figura 3) (THAMES, 2011).

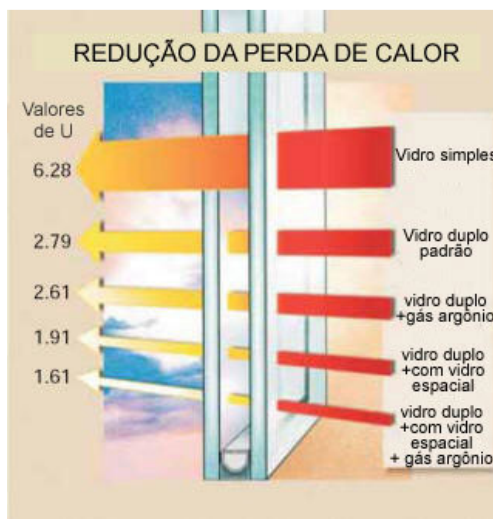


FIGURA 3 - Redução da perda de calor para alguns tipos de vidro vidro duplo

Fonte: Francis Thames (2011).

2.4 SISTEMAS ATIVOS

Algumas edificações utilizam sistemas de climatização artificial para obter conforto térmico, já que muitas vezes o condicionamento natural não é possível ou é insuficiente. Alguns dos equipamentos utilizados para o condicionamento artificial são (LAMBERTS et al., 1997):

- a) Exaustores: geralmente utilizados em ambientes onde há a contaminação do ar, como cozinhas, banheiros e laboratórios, este aparelho suga o ar quente ou impuro, e joga-o para fora do ambiente (auxilia a remoção de calor);
- b) Ventiladores: fazem com que o ar circule no ambiente (promove o aumento da convecção e a renovação do ar interno, com resfriamento do ambiente quando a temperatura externa é inferior à interna);
- c) Ar condicionado: controla mecanicamente a temperatura, a umidade, a pureza e a distribuição do ar em um ambiente.

Para o controle da temperatura, a umidade, a pureza os aparelhos de ar condicionado executam operações chamadas de tratamento de ar, existem seis tipos de tratamento de ar (COSTA, 1974):

1. purificação: elimina partículas sólidas como poeira e fumaça e partículas líquidas como névoa;
2. aquecimento: obtido por meio de resistores elétricos e caloríferos;
3. umidificação: quando água em temperatura superior à temperatura de orvalho do ar é posta em contato com o ar, este se umidifica;
4. refrigeração: obtida colocando-se o ar em contato com uma superfície fria;
5. desumidificação: redução da umidade, uma secagem do ar;
6. mistura: mistura de duas parcelas de ar em condições diferentes.

2.5 SISTEMAS PASSIVOS

Segundo Mendonça (2005), enquanto no sistema ativo são utilizados meios artificiais para a transferência de calor e de massa (convecção forçada do ar), os sistemas passivos são utilizados para aquecer ou resfriar a edificação de uma forma natural.

2.5.1 Sistema de aquecimento solar passivo

No aquecimento passivo, a fonte de calor mais usada é o Sol. São projetadas formas de maximizar o aproveitamento do calor, utilizando-se de vidros, orientação da edificação em relação à trajetória solar e formas de armazenamento do calor para serem liberadas nas horas mais frias do dia. Os sistemas de aquecimento passivo são divididos em (GONÇALVES E GRAÇA, 2004):

- Ganho direto;
- Ganho indireto;
- Ganho isolado.

2.5.1.1 Sistema de ganho direto

Esta é a forma mais simples e mais utilizada de aquecimento solar passivo. Esse sistema consiste de vãos envidraçados orientados na direção correta em relação ao Sol. Para o hemisfério sul, a orientação ideal é o Norte. Qualquer abertura envidraçada de uma edificação é um sistema de ganho direto (MENDONÇA, 2005). De acordo com Gonçalves e Graça (2004) a massa térmica possui grande influência na temperatura interna neste tipo de sistema, pois a combinação de ganho direto com massa térmica para armazenamento da energia coletada internamente garante a redução da amplitude térmica diária do ambiente.

De acordo com Rei (2009), para o sistema de ganho direto, podem ser utilizadas também aberturas zenitais (Figura 4), como clarabóias e lanternins, que segundo Michelena (2011) são aberturas na cobertura de edificações com o objetivo de propiciar ventilação e iluminação naturais dos ambientes.



FIGURA 4 - Pátio da Oficina Cultural Oswald de Andrade, em São Paulo – SP, onde são utilizadas aberturas zenitais

Fonte: Vida maria (2008).

A presença de sombreamentos é fundamental para evitar superaquecimentos e ofuscamentos internos. Podem ser utilizados vidros translúcidos para controlar o ofuscamento e também vidros duplos ou triplos de baixa emissividade, pois estes diminuem a perda de calor para o exterior da edificação (REI, 2009).

Mendonça (2005) apresenta algumas vantagens desse sistema:

- Baixo custo e utilização de materiais facilmente encontrados no mercado;
- Funcionamento simples;
- Flexível e facilmente adaptável aos projetos arquitetônicos.

Mendonça (2005) apresenta também algumas desvantagens desse sistema:

- Pouca privacidade ocasionada por grandes áreas envidraçadas;
- Muita exposição ao sol pode danificar alguns materiais do interior da edificação;
- Desconfortos ocasionados por superaquecimento;
- Deve ser combinado com a massa térmica para ter um melhor desempenho;
- Nem sempre é o suficiente para aumentar a temperatura interna, principalmente no inverno.

2.5.1.2 Sistema de ganho indireto

No sistema de ganho indireto, há uma massa térmica entre a superfície de ganho de calor (superfície translúcida ou transparente) e o espaço a ser aquecido. A massa térmica é aquecida diretamente pelo calor do sol (luz solar visível) e posteriormente libera esse calor acumulado para dentro da edificação. A Tabela 1 - Valores de massa térmica de alguns materiais mostra alguns valores de massa térmica. Alguns sistemas de ganho indireto são: a Parede Trombe, a parede de água e a cobertura de água (MENDONÇA, 2005).

TABELA 1 - Valores de massa térmica de alguns materiais

Fonte: Reardon, Mcgee, Milne (2008).

Material	Massa térmica (KJ /m³K)
Água	4186
Concreto	2060
Arenito	1800
Tijolo	1360
Adobe	1300

2.5.1.2.1 Parede Trombe

O primeiro a apresentar o conceito de Parede Trombe foi o americano Edward S. Morse, que patenteou o invento em 1881 (Morse, 1881) . A idéia foi popularizada e repatenteada, em 1967, pelo francês Félix Trombe e pelo arquiteto Jacques Michel (BINGGELI, 2003).

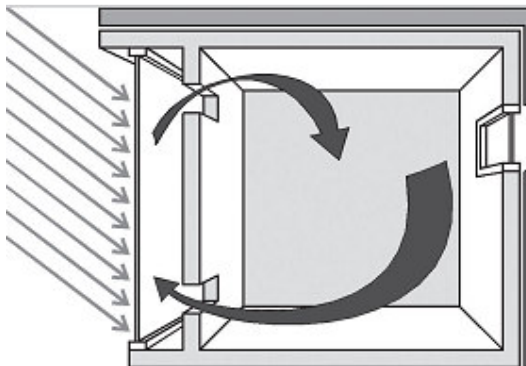


FIGURA 5 - Parede Trombe

Fonte: Gonçalves e Graça (2004).

Gan (1997) afirma que a Parede Trombe é um sistema de climatização passiva constituído de uma superfície exterior de vidro e uma parede interior pintada de preto com boa capacidade de armazenamento térmico e orientada para o Norte (hemisfério sul), esta parede é chamada de parede de armazenamento, e é o elemento que coleta e retém a energia solar. No inverno, essa energia acumulada é usada para aquecer o interior da edificação; no verão, a câmara de ar externa pode ser ventilada naturalmente de forma a amenizar os ganhos de calor. A superfície de vidro deve estar separada da parede de armazenamento por uma distância de 10 a 150cm a fim de evitar os efeitos da condução de calor.

A Figura 6 e a Figura 7 mostram alguns exemplos de construções utilizando Parede Trombe.



FIGURA 6 – Casa Termicamente Otimizada, Porto – Portugal, Arq. Santiago Boissel
 Fonte: Gonçalves e Graça (2004).



FIGURA 7 - Casa Shäffer, Porto Santo – Portugal, Arq. Günther Ludewig
 Fonte: Gonçalves e Graça (2004).

Segundo Mendonça (2005), há dois tipos de Parede Trombe:

- a) Parede acumuladora ou Parede Trombe não ventilada;
- b) Parede Trombe ventilada;

A Parede acumuladora ou Parede Trombe não ventilada segundo Mitjá, citado em Mendonça (2005), não possui aberturas para a circulação de ar, como mostra a Figura 8. A parede acumuladora é menos eficiente que a Parede Trombe ventilada, pois a distribuição da temperatura no interior pode trazer o efeito de estratificação do ar.

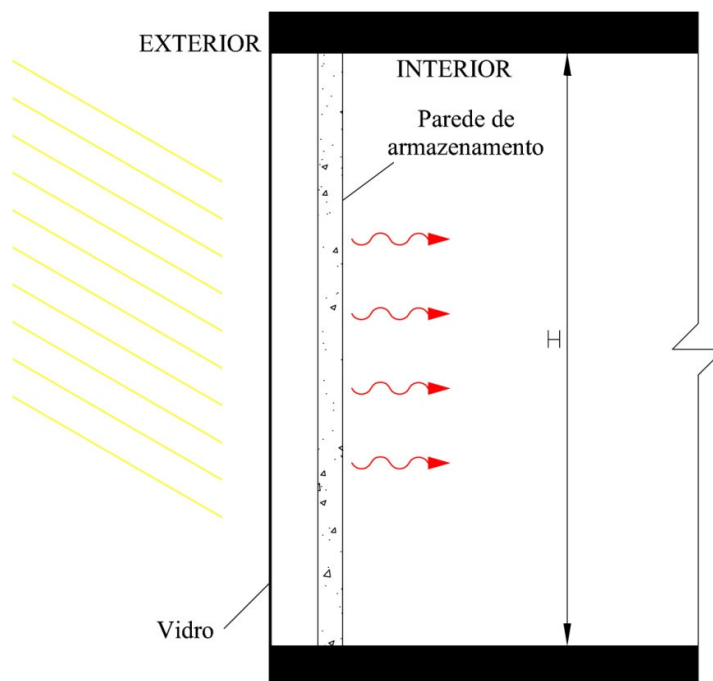


FIGURA 8– Parede acumuladora ou Parede Trombe não ventilada

Neste sistema, o Sol aquece diretamente a parede de armazenamento, após atravessar o vidro, e o calor entra para o interior da edificação somente por condução. A transferência de calor é lenta e geralmente a parede é aquecida durante o dia e dissipa o calor durante a noite. A Parede Trombe não ventilada é indicada para locais frios ou temperados e que possuam uma boa insolação (ROCHETA; FARINHA, 2007).

Já a Parede Trombe ventilada funciona de duas maneiras, a primeira é por meio do aquecimento direto da parede de armazenamento, semelhante à Parede Trombe não ventilada, e a segunda é por meio um conjunto de aberturas inferiores e superiores, tanto na parede de acumulação quanto na área envidraçada, que causam o efeito de termossifão, sendo que este efeito baseia-se no fato que quando um fluido aumenta a sua temperatura há a diminuição da densidade deste. Assim sendo, o ar ao ser aquecido tem a tendência a subir, e no seu lugar ocupará um fluido com uma temperatura inferior (MENDONÇA, 2005).

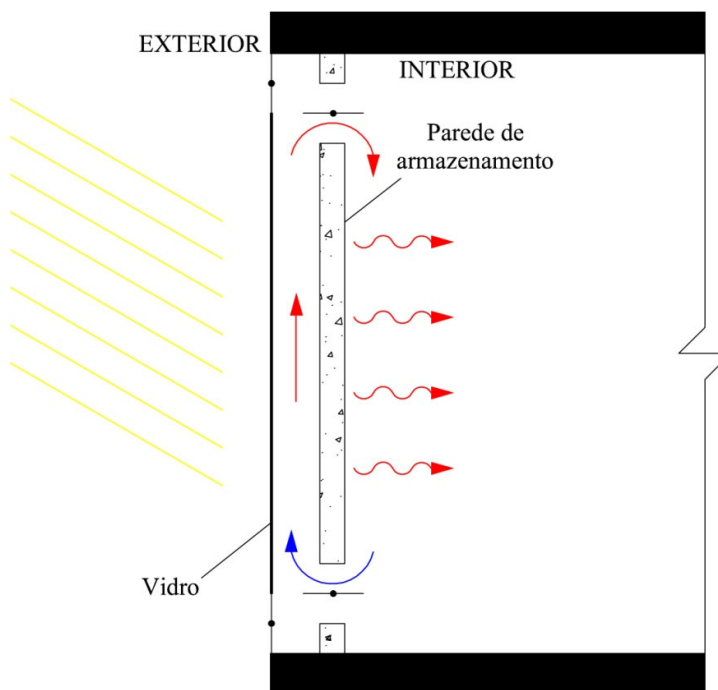


FIGURA 9- Parede Trombe ventilada para situação de inverno

Para aquecer o ambiente interno, Gan (1997) afirma que, durante o dia, as aberturas da parede de armazenamento devem estar abertas e, para evitar perdas, as aberturas da área envidraçada devem estar fechadas. Desta maneira, o ar externo frio entra pela abertura inferior e é aquecido pelo Sol, ascendendo por ser menos denso e retornando para o interior da edificação pela abertura superior, aquecendo o ambiente por convecção (Figura 9). Quando não há mais a incidência de radiação solar, à noite, deve-se fechar as aberturas da parede de armazenamento para minimizar as perdas de calor.

O ambiente também é aquecido por condução. Neste caso, o aquecimento se dá da mesma maneira que na Parede Trombe não ventilada, através do aquecimento direto da parede de armazenamento (ROCHETA; FARINHA, 2007).

De acordo com Gan (1997), para o resfriamento do ambiente, as aberturas devem ser posicionadas de modo que a força de empuxo gerada pelo ar aquecido pelo Sol na chaminé, que é a área entre a parede de armazenamento e o vidro, sugue o ar do ambiente interno pela abertura inferior. O ar quente sobe e sai para o exterior pela abertura superior, como mostra a Figura 10.

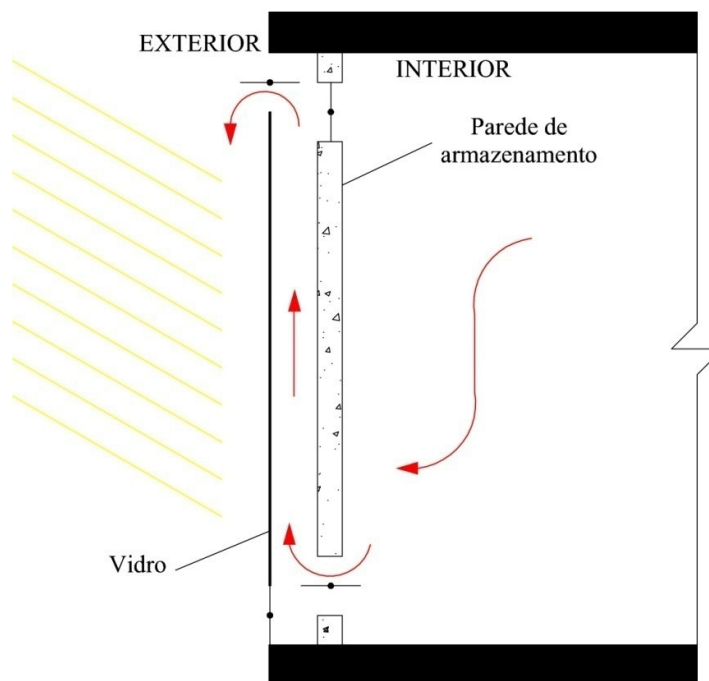


FIGURA 10- Parede Trombe ventilada para situação de verão

Em outro estudo relevante realizado sobre o assunto, Lourenço (2007) comparou matematicamente, através de um exemplo, o consumo de energia elétrica de uma sala comercial que utiliza climatização artificial com a mesma sala utilizando o sistema de climatização passiva Parede Trombe. Foi utilizada uma sala comercial quadrada de 16 m², com 2,80 m de pé-direito, laje de concreto com espessura de 0,2 m, paredes de alvenaria com espessura de 0,15 m, janela voltada para o leste com abertura de 4 m², iluminação de 15 W/m² e habitada por 4 pessoas. A edificação usada na comparação situa-se na cidade de São Paulo.

Lourenço (2007) utilizou para os cálculos a radiação solar do dia 22 de dezembro às 16 horas, esta data foi escolhida por ser o dia crítico e o horário foi selecionado por ser o mais favorável. O estudo concluiu que este sistema pode economizar 462 kWh em energia elétrica por mês.

Chen et al. (2005) estudaram o efeito da Parede Trombe na umidade interna de uma edificação em Dalian, China. A cidade escolhida recebe uma grande quantidade de radiação solar o ano todo, e durante o inverno a temperatura externa média fica entre -4,5 a -6,0°C. Para este estudo foram utilizados dois protótipos, um utilizando a Parede Trombe e o outro para referência, os protótipos tem 2,70 m altura, 3,90 m de largura e 3,90 m de comprimento. A parede de armazenamento da Parede Trombe possui espessura de 0,30 m e o espaço entre a parede de armazenamento e o vidro tem 0,10 m.

Foram medidas a temperatura e a umidade do ar durante os meses de novembro de 2003 a fevereiro de 2004. Foi utilizado um *datalogger* denominado *RHLOG* programado para medir a temperatura e a umidade interna do ar a cada 10 minutos, para a temperatura e umidade externa foi utilizada uma estação meteorológica que gravava os dados a cada 10 minutos. A pesquisa concluiu que a Parede Trombe ajudou a ajustar a umidade no interior do protótipo, melhorando o conforto no interior do protótipo (Chen et al., 2005).

Gan (1998) utilizou um programa denominado CFD (*computational fluid dynamics*) a fim de testar a eficiência da Parede Trombe para a ventilação durante o verão no Reino Unido. Para o estudo foram utilizadas às seguintes dimensões base: parede de armazenamento de concreto com 2,40 m de altura e espessura de 0,30 m, chaminé com 2,00 m de altura e 0,10 m de espessura. Gan concluiu que a utilização de vidro duplo ao invés de vidro simples na Parede Trombe não só reduz a perda de calor no inverno, mas também melhora o resfriamento passivo. Gan também cita que a superfície interior da parede de armazenamento deve ser isolada, evitando o superaquecimento indesejável de ar do ambiente devido à convecção e à transferência de calor por radiação.

Liping e Angui (2006) realizaram um estudo paramétrico para determinar a taxa do fluxo de massa, a temperatura e a velocidade do ar para o sistema de parede Trombe em condições estáveis. Para isso várias alturas, largura de aberturas, entradas de ar e intensidade solar foram simuladas com o CFD software-FLUENT.

A pesquisa de Liping e Angui (2006) concluiu que existe uma relação ideal entre a altura da Parede Trombe e a largura de saída de ar da chaminé para maximizar o fluxo de ar, sendo que essa relação é independente da radiação solar e depende do formato da abertura. Pode-se considerar largura de saída de ar da chaminé ideal de 1/10 da altura da chaminé, na maioria dos casos. O estudo concluiu também que a saída de ar da chaminé ideal para se obter a taxa de ventilação máxima é de cerca de 0,2 m a 0,3 m e a altura da chaminé deve ser maior do que 1 m.

Gomes (2011) utilizou o *software EnergyPlus*, para simular uma célula teste, em duas cidades de Portugal (Lisboa e Guimarães). Primeiramente foi simulado a célula teste com uma Parede Trombe de 8m², a segunda simulação foi com a utilização de parede dupla com envidraçado, e a terceira, e última, foi feita com parede dupla sem caixa de ar. Gomes concluiu que as simulações que utilizaram a Parede Trombe foram as que mais se aproximaram das temperaturas de conforto, para o período de um ano. Concluiu-se também

que a utilização de uma película seletiva na superfície exterior da Parede Trombe otimiza os resultados do sistema.

Chel, Nayak e Kaushik (2008) utilizaram o *software 'TRNSYS building simulation'* para estudar a utilização de Parede Trombe em depósitos de mel, para a cidade de Gwalior, na Índia. Durante o inverno em Gwalior, a temperatura do ar ambiente dos depósitos cai abaixo do intervalo de temperatura requerido para o armazenamento de mel que é entre 18-27°C. O estudo mostrou que a temperatura do ar ambiente pode ser facilmente mantida no intervalo adequado para armazenamento de mel usando uma Parede Trombe ventilada, tendo um potencial de economia de energia de até 3312 kWh/ano.

2.5.1.2.2 Parede de água e Cobertura de água

Mitjá, citado em Mendonça (2005, p.13), alega que neste sistema é a água que coleta e armazena o calor do sol, pois sua capacidade de conter calor é 10 vezes maior que a parede de alvenaria comum. A água deve ser armazenada em recipientes escuros, para absorver a máxima quantidade de radiação solar, que podem ser usados também na cobertura da edificação.

Diferente da Parede Trombe, a água não armazena o calor por muito tempo, ou seja ele é rapidamente transferido para o ambiente. Alguns cuidados devem ser tomados neste sistema, como a colocação de produtos na água para evitar a proliferação de fungos, e o recipiente não deve estar cheio, por causa da dilatação da água.

2.5.1.3 Sistema de ganho isolado

O sistema de ganho isolado, também chamado de sistema de ganho separado, é aquele onde a captação e acumulação de calor não se dão em áreas ocupadas do edifício (GONÇALVES E GRAÇA, 2004). Um exemplo é a estufa (Figura 11), que possui grandes áreas envidraçadas permitindo grandes trocas de calor com o meio externo, o que à noite pode se tornar inconveniente, uma vez que, quando a temperatura externa é mais baixa que internamente, o vidro facilita a perda de calor para o exterior (Figura 12). Esta perda pode ser minimizada utilizando-se de estratégias como o uso de um sistema de isolamento móvel noturno ou o uso de vidro temperado ou duplo (MENDONÇA, 2005).



FIGURA 11- Exemplo de utilização de estufa em Portugal, (a) moradia do Vale do Rosal, Arq. Fausto Simões; (B) moradia da cidade do Porto, Arq. Fernanda Seixas

Fonte: Gonçalves e Graça (2004).

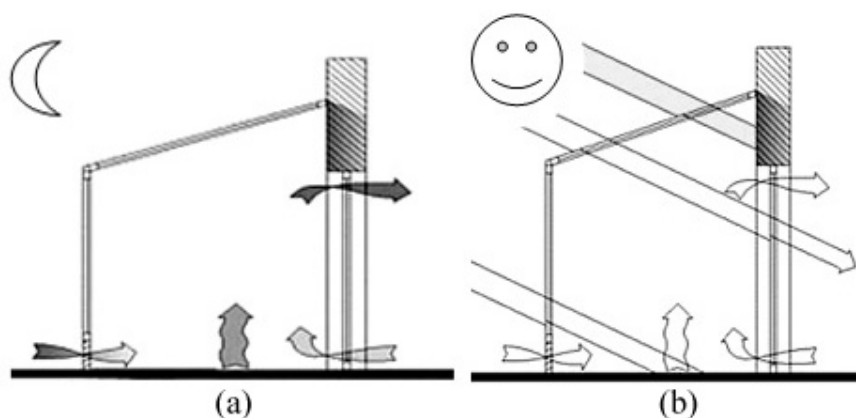


FIGURA 12- Funcionamento do sistema de ganho isolado para (a) noite e (b) dia

Fonte: Mendonça (2005).

2.5.2 Sistema de resfriamento passivo

Para o resfriamento passivo, utilizam-se fontes frias, como por exemplo, o solo, que possui menor flutuação térmica que o ar exterior. Outra maneira de diminuir a temperatura da edificação é utilizando o ar exterior, por meio de convecção natural (seletiva ou não), pois em certas horas do dia, geralmente à noite e pela manhã, a temperatura interna é superior à externa. O sistema de resfriamento passivo pode ser dividido em (GONÇALVES E GRAÇA, 2004):

- Ventilação natural;
- Resfriamento pelo solo;
- Resfriamento evaporativo;
- Resfriamento radiativo noturno.

2.5.2.1 Ventilação Natural

A ventilação natural em uma edificação é causada pela diferença da pressão do ar, entre o interior e o exterior por meio de suas aberturas. Essa passagem de ar depende de vários fatores, entre eles: a forma, localização e orientação da edificação; as características das aberturas, e dos ventos; e a temperatura do ar no interior e no exterior da edificação. Suas principais funções são renovar o ar no interior da habitação, o resfriamento da estrutura e proporcionar conforto térmico (TOLEDO, 2001). Mas, segundo Ruas (2001), nem sempre a ventilação pode proporcionar conforto, pois em algumas situações a perda de calor provocada por ela pode ser indesejável.

Frota e Schiffer (2007) afirmam que a diferença de pressão entre o ar do interior e o ar do exterior da edificação é a principal causa da ventilação natural por ação dos ventos. Além dessa, há a convecção natural por termossifão, denominada ventilação por efeito chaminé.

No caso da ação dos ventos, o vento que se desloca de forma paralela ao solo, quando encontra uma edificação sofre um desvio para poder contornar o obstáculo, criando-se uma pressão positiva na parede a barlavento e uma pressão negativa a sotavento, proporcionando assim a diferença de pressão. Sendo barlavento o lado de onde sopra o vento e sotavento o lado oposto ao lado do qual sopra o vento (FROTA e SCHIFFER, 2007).

A ventilação por efeito chaminé é causada pela diferença de temperatura entre o interior e o exterior do edifício, havendo uma circulação do ar através de aberturas posicionadas a duas alturas, usando-se do efeito termossifão. As duas formas de ventilação podem ocorrer simultaneamente, somando forças ou, em certos casos, uma anulando a outra, havendo uma diminuição da ventilação no ambiente (FROTA e SCHIFFER, 2007).

2.5.2.2 Resfriamento pelo solo

A temperatura do solo sofre pouca variação térmica ao longo do ano, por isso, no verão, a temperatura do solo é inferior a temperatura do ambiente, e pode servir para dissipar o calor da edificação. Existem duas maneiras de resfriamento pelo solo: direto e indireto (GONÇALVES E GRAÇA, 2004).

O resfriamento pelo solo direto também pode ser chamado de construção enterrada, e se caracteriza por ter parte das paredes, ou até da cobertura em contato direto com o solo, o

que faz com que a transferência de calor (do exterior para o interior ou vice-versa) seja amortecida nas trocas por condução através da parede ou cobertura. O processo indireto de resfriamento passivo pelo solo é feito por meio de dutos enterrados e conectados à edificação, sendo tais dutos enterrados a 1-3m de profundidade. O resfriamento, neste caso, vai depender da profundidade e do diâmetro do tubo (GONÇALVES E GRAÇA, 2004).

2.5.2.3 Resfriamento evaporativo

Segundo Mendonça (2005), este processo utiliza a evaporação da água para diminuir a temperatura do ambiente. Para a água evaporar, ela deve absorver energia em forma de calor latente de evaporação, sem aumentar a sua temperatura. Esse processo evita que essa energia em forma de calor aumente a temperatura do ar ambiente e além disso faz com que haja um aumento na umidade do ar. A agitação da fonte de água pode ajudar a evaporação, assim como a incidência de vento também facilita o processo.

O resfriamento evaporativo pode ser feito através da evapotranspiração da vegetação, ou através de piscinas, fontes, lagoas artificiais. Também pode ser através de gotejamento de água, em forma de spray, no exterior do ambiente, diminuindo a temperatura externa e conseqüentemente a interna (GONÇALVES E GRAÇA, 2004). O resfriamento evaporativo pode ser direto ou indireto. Ele é direto quando a vegetação ou a fonte de água esta no ambiente que se deseja resfriar. Quando o ambiente que se deseja resfriar e a fonte de água estão em ambientes separados o processo é chamado de indireto.

2.5.2.4 Resfriamento radiativo noturno

Este sistema aproveita a temperatura mais baixa do ar externo durante a noite, para dissipar o calor da edificação, utilizando geralmente a cobertura da edificação. Durante o dia, a cobertura deve ser isolada no lado externo (telhamento). O calor absorvido internamente (no ático) e acumulado na cobertura, e também o calor gerado no ambiente interno (sob o ático) durante o dia, com a retirada do isolamento térmico entre o ambiente e o ático à noite, é dissipado para o meio externo por irradiação. O resfriamento radiativo noturno só é eficaz se a diferença entre a temperatura durante o dia e a noite for superior a 10°C (MENDONÇA, 2005).

2.6 FATORES CLIMÁTICOS

2.6.1 Carta Bioclimática

Uma maneira de se analisar o clima de determinada região é através da carta bioclimática, criada inicialmente por Olgyay (1963), mostrada na Figura 13. Este diagrama é indicado para regiões úmidas e naturalmente ventiladas durante o dia, com temperaturas internas com variação semelhante à temperatura externa. Ou seja, a carta bioclimática não é indicada para outros tipos de clima, como o quente e seco (GIVONI, 1976).

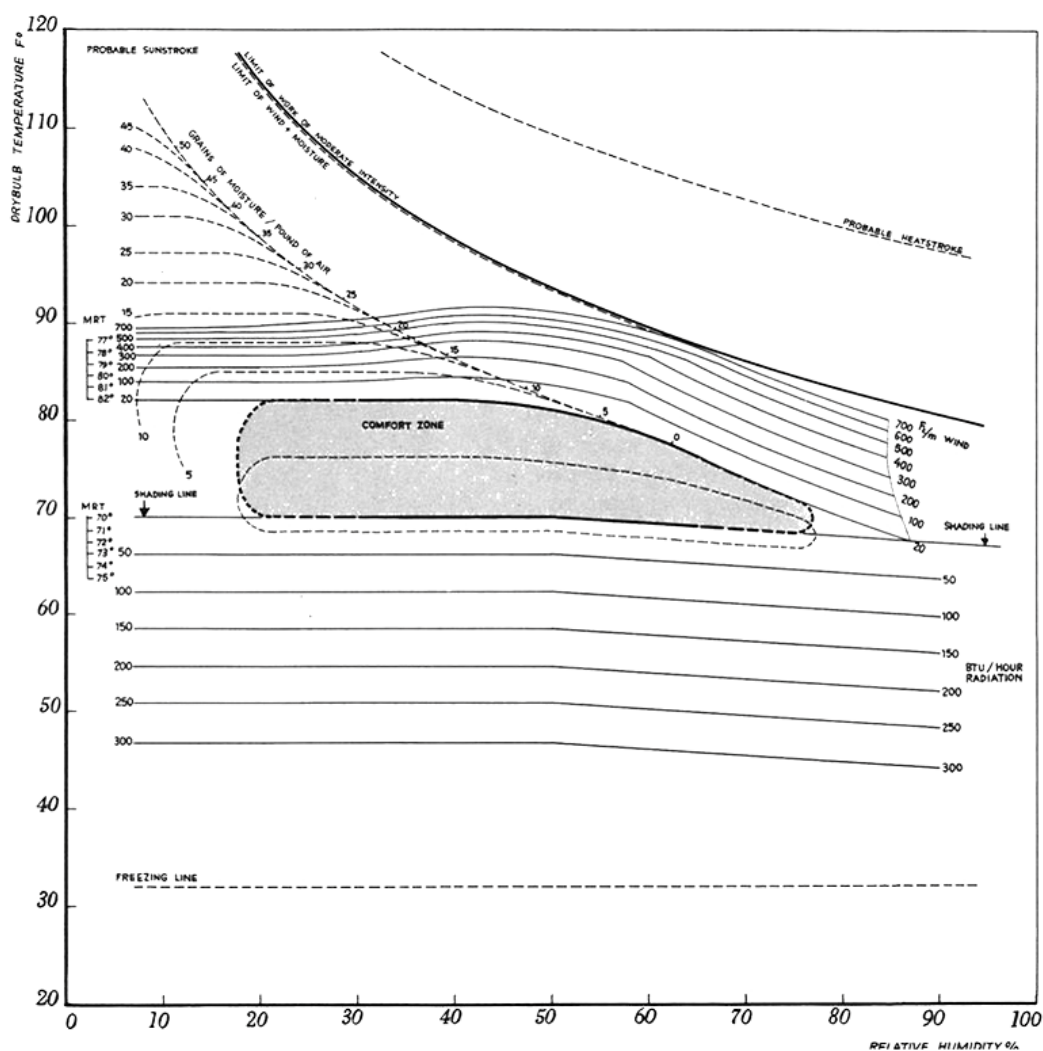


FIGURA 13 – Carta Bioclimática de Olgyay

Fonte: Olgyay (1963).

Em 1969, Givoni (1976) atualizou a carta bioclimática, baseando-se nas temperaturas internas, diferentemente da carta bioclimática de Olgyay, que considerava condições térmicas externas. Em 1979, Milne e Givoni (MILNE e GIVONI, 1979) adicionaram as estratégias bioclimáticas à carta, determinando os limites de eficácia para cada estratégia, a fim de atender às necessidades de conforto para o interior das edificações. As estratégias bioclimáticas podem ser definidas como um conjunto de regras ou medidas destinadas a influenciarem a forma do edifício bem como os seus processos, sistemas e componentes construtivos. As estratégias que devem ser adotadas em um determinado edifício têm como base as características climáticas do local e a função do edifício e o modo com ele é ocupado. As estratégias bioclimáticas têm como objetivo promoverem um bom desempenho em termos de adaptação ao clima (GONÇALVES E GRAÇA, 2004).

No ano de 1992, Givoni atualiza novamente a carta, percebendo que as pessoas que viviam em países subdesenvolvidos, com clima úmido e quente, não se adequavam ao que tinha sido estabelecido. Givoni sugeriu, portanto, a existência de duas cartas bioclimáticas: uma para locais de clima temperado e outra para países de clima quente e úmido, conforme a Figura 14 (MILNE e GIVONI, 1979).

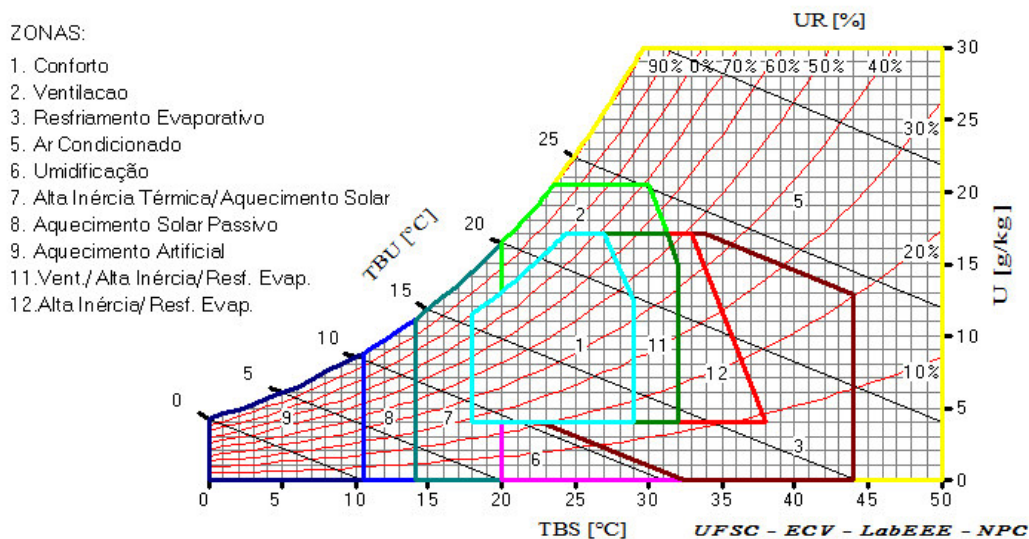


FIGURA 14 – Carta Bioclimática para o Brasil com delimitações de estratégias

Fonte: : Analyses BIO (2010).

A carta bioclimática é construída sobre o diagrama psicrométrico que é demarcado por linhas que representam os seguintes parâmetros:

- Temperatura de bulbo seco (TBS): representada no diagrama psicrométrico pelas linhas verticais, a temperatura é medida por um termômetro de mercúrio (de bulbo seco), sem receber radiação solar direta. A temperatura de bulbo seco também é conhecida como temperatura ambiente (DOSSAT e TORREIRA, 2004).
- Temperatura de bulbo úmido (TBU): representada no diagrama psicrométrico pelas linhas transversais, a temperatura é medida por um termômetro de mercúrio com o bulbo envolto por um pano úmido, imerso em recipiente com água limpa à temperatura ambiente. A velocidade do ar ao redor do pano deve estar entre 18km/h e 37 km/h (DOSSAT e TORREIRA, 2004);
- Umidade relativa (UR): no diagrama psicrométrico, esta é representada por linhas curvas e tem uma variação de 10% entre linhas até atingir 100%. A umidade relativa é a relação entre a quantidade de vapor no ar e o ponto de saturação do mesmo, ou seja, é a taxa de vapor existente no ar em relação à quantidade máxima de vapor que poderia existir no ar sob aquela determinada temperatura. A umidade relativa é inversamente proporcional à temperatura do ar, portanto o aumento desta causa uma diminuição da umidade relativa (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

Como é mostrada na Figura 13, a carta bioclimática é dividida em 9 zonas, e cada uma delas representa uma estratégia bioclimática, conforme segue:

1. Zona de conforto: nesta zona, a probabilidade de que as pessoas estejam em conforto em relação à temperatura é alta. Nesta zona, as temperaturas variam entre 18 °C a 29 °C com a umidade variando entre 20% a 80% (LAMBERTS et al., 1997).
2. Zona de ventilação: Para clima quente e úmido, é indicada a utilização quase que permanentemente da ventilação cruzada para obter o conforto. A ventilação cruzada é quando o ar exterior tem a entrada e a saída por locais diferentes do ambiente, ocasionando assim um trânsito de ventos. Para climas áridos é aconselhável a utilização de ventilação apenas durante a noite. É utilizada esta estratégia para temperaturas superiores às de conforto até os 32 °C ou se a umidade for maior de 80% (LAMBERTS et al., 1997).

3. Zona de resfriamento evaporativo: Esta estratégia utiliza a evaporação da água para diminuir a temperatura e aumentar a umidade do ar. Indicada para climas quentes e secos, com temperaturas de bulbo seco de até 44°C ou de bulbo úmido de até 24°C. A utilização de resfriamento evaporativo é aconselhável quando há ventilação do ambiente, para evitar o acúmulo de vapor d'água no ambiente interno. O resfriamento evaporativo pode ser obtido através da vegetação, fontes de água ou de forma indireta através de tanques de água mantidos a sombra no telhado (LAMBERTS et al., 1997).
4. Zona de massa térmica para resfriamento: Adota-se esta estratégia para diminuir a amplitude térmica de uma edificação. No caso do resfriamento, a massa térmica ajuda a manter as superfícies resfriadas à noite (vantajoso quando se associa à ventilação seletiva noturna) durante o período diurno. Estratégia indicada para locais de grande amplitude térmica diária (LAMBERTS et al., 1997).
5. Zona de ar-condicionado: Para temperaturas de bulbo seco superiores a 44°C, as medidas de climatização passivas não são suficientes, para isso recomenda-se utilizar climatização artificial. Para diminuir o consumo de energia sugere-se aliar o uso do ar-condicionado a algum sistema de climatização passiva (LAMBERTS et al., 1997).
6. Zona de umidificação: Utiliza-se esta estratégia quando a umidade relativa média diária do ar é baixa e a temperatura do ar se encontra entre 20°C a 27°C. A umidificação consiste em manter recipientes com água, ou vegetação dentro da edificação, que não deve ser ventilada para não perder a umidade para o exterior. Esta estratégia pode estar associada ao resfriamento evaporativo (LAMBERTS et al., 1997).
7. Zona de massa térmica com aquecimento solar: Indicada para temperaturas entre 14°C a 20°C, pode ser utilizada de duas maneiras: utilizando a massa térmica para armazenar o calor durante as horas mais quentes do dia, liberando-o para o interior durante as horas mais frias. A segunda maneira é utilizar massa térmica para isolar a edificação e diminuir as perdas de calor (LAMBERTS et al., 1997).

8. Zona de aquecimento solar passivo: Empregada para temperaturas entre 10°C até 14°C, esta estratégia requer um bom isolamento térmico da edificação visando minimizar as perdas de calor para o exterior. Devem ser previstas grandes aberturas envidraçadas voltadas para o Sol, e nas outras orientações as aberturas devem ser mínimas. Esta estratégia exige a utilização de um sistema de aquecimento solar passivo, como, por exemplo, a Parede Trombe.
9. Zona de aquecimento artificial: Indicada para temperaturas abaixo de 10°C, para qualquer umidade, esta estratégia prevê a utilização de aquecimento artificial, pois somente o aquecimento solar passivo não seria suficiente para aquecer o ambiente. Sugere-se a utilização do aquecimento solar passivo juntamente com o aquecimento artificial, para diminuir os gastos energéticos.

2.6.2 Características do Clima de Curitiba

A cidade de Curitiba está localizada no estado do Paraná na latitude 25° 31' Sul e a 910 m acima do nível do mar. Possui o clima subtropical úmido com inverno frio, caracterizado por baixas temperaturas no período de inverno e por ter uma distribuição anual pluviométrica mais regular que os outros climas brasileiros (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2009).

No verão de Curitiba as temperaturas mais elevadas se dão entre os meses de novembro a março com temperatura média de 22,5°C. Pode ser dito que a cidade não possui estação seca e tem precipitações médias anuais de 1600mm (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2009). Utilizando-se o *software* Analysis BIO (2010), obtido através do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foi gerada a carta bioclimática para verão em Curitiba, Figura 15, que mostra as estratégias para se alcançar o conforto térmico para a cidade, no período de verão (de 22/12 a 22/03) (Tabela 2).

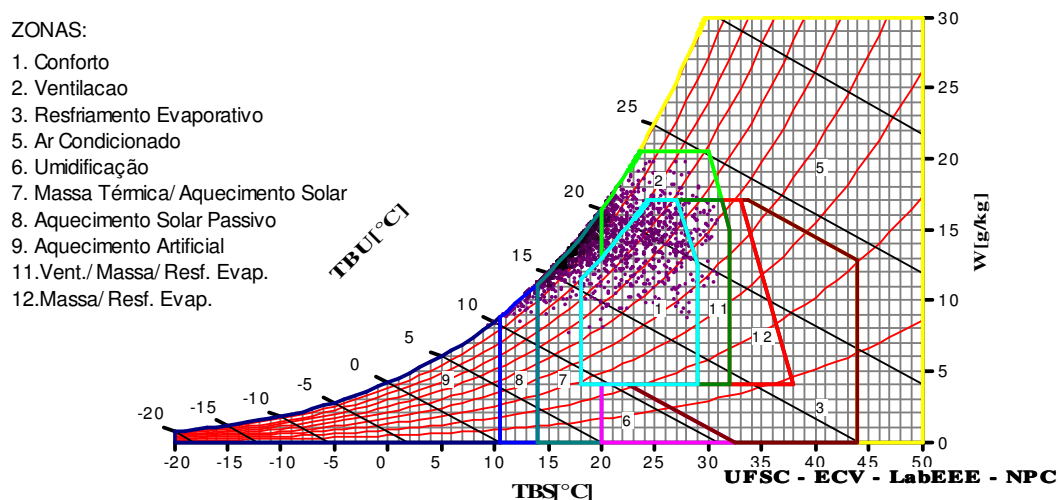


FIGURA 15 - Carta bioclimática para o verão em Curitiba

Fonte: Analysis BIO (2010).

TABELA 2 - Estratégias bioclimáticas para o verão na cidade de Curitiba

Estratégias para o verão	Desconforto por calor (% de horas)
Ventilação	19,9
Massa térmica para resfriamento	2,84
Resfriamento evaporativo	2,84

A Tabela 2 indica que para o verão na cidade de Curitiba a melhor estratégia bioclimática para ser adotada numa edificação é a ventilação, com 19,9%, portanto devem ser instaladas aberturas no ambiente que propiciem a ventilação cruzada. Outras estratégias sugeridas pela carta bioclimática para o período mais quente do ano é a utilização de massa térmica para resfriamento e o resfriamento evaporativo.

A Cidade de Curitiba é considerada a capital brasileira que possui as mais baixas temperaturas do ar, com temperatura média de $16,4^{\circ}\text{C}$, com meses mais frios do ano em junho e julho. Nestes meses, a temperatura média pode chegar a 13°C , sendo que a mínima absoluta atingiu $-5,2^{\circ}\text{C}$ no ano de 1972. Outra característica do inverno curitibano é a ocorrência de geadas rigorosas (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

A carta bioclimática para o inverno em Curitiba pode ser visualizada na Figura 16 (ANALYSIS BIO, 2010) e as estratégias para esta estação são listadas na Tabela 3.

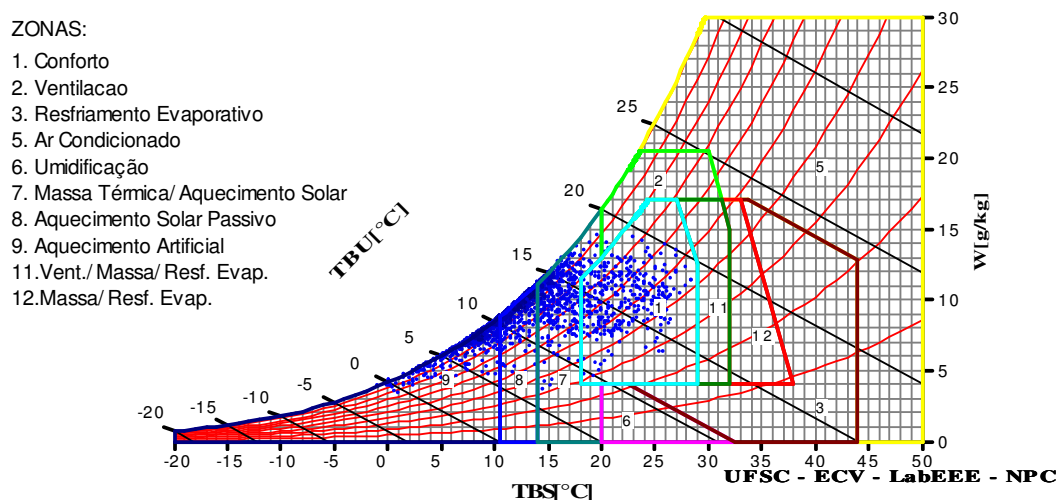


FIGURA 16 - Carta bioclimática para o inverno em Curitiba

Fonte: Analyses BIO (2010).

TABELA 3 - Estratégias bioclimáticas para o inverno na cidade de Curitiba

Estratégia para o inverno	Desconforto por frio (% de horas)
Alta Inércia Térmica/Aquecimento Solar:	25,8
Aquecimento Solar Passivo	28,8
Aquecimento Artificial	27,8

Para o período de inverno na cidade de Curitiba a carta bioclimática (Tabela 3) sugere a utilização de vedações com alta inércia térmica, que devem ser aquecidas pelo Sol, para que o calor seja armazenado pelo material de alta inércia térmica e posteriormente liberado para dentro da edificação. O aquecimento solar passivo também é sugerido pela carta bioclimática, assim sendo devem-se utilizar grandes vão envidraçados na face Norte da edificação. A utilização de aquecimento artificial também pode ser necessária.

2.7 CARTA SOLAR

A carta Solar é uma ferramenta que descreve, em um plano, o movimento aparente do percurso do sol na abobada celeste da Terra, nos diferentes períodos do dia e do ano. Cada

latitude da Terra possui uma carta solar diferente (Figura 17), que varia de acordo com o horário e a época do ano (KREITH; KREIDER, 2011).

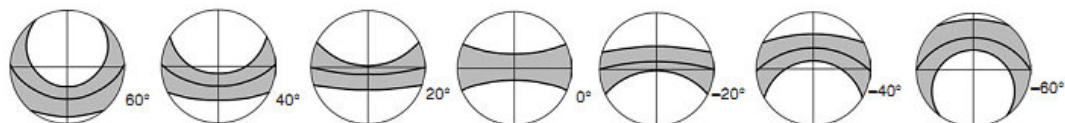


FIGURA 17 - Mudança da carta solar de acordo com a Latitude da Terra

Fonte: Szokolay (2008).

Para uma determinada latitude, pode-se determinar a posição instantânea do Sol achando a intersecção da linha de datas com a linha das horas do dia. A altura solar pode ser lida a partir dos círculos concêntricos do diagrama, sendo que a altura solar é definida como o ângulo composto pelo Sol com o plano horizontal do observador. O azimute, que é o ângulo que indica a direção do raio solar, é dado ao longo do perímetro externo da circunferência do diagrama, como mostram a Figura 18 e a Figura 19 (KREITH; KREIDER, 2011; BITTENCOURT; 1988).

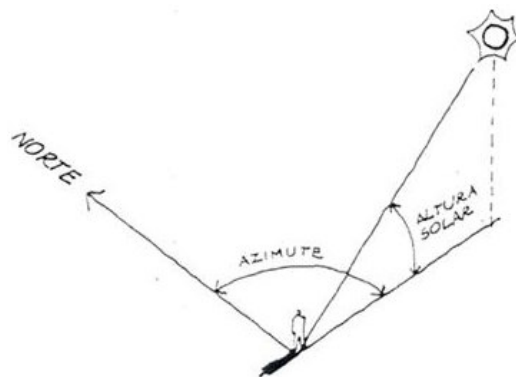


FIGURA 18 - Altura solar e Azimute

Fonte: Bittencourt (1988).

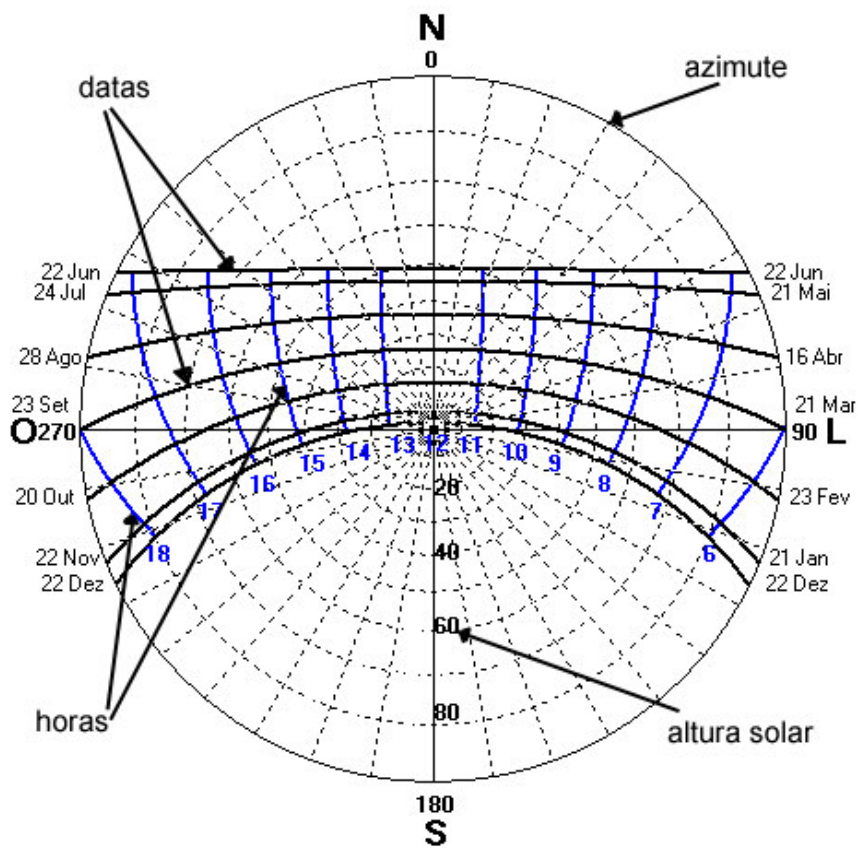


FIGURA 19 - Carta solar para a cidade de Curitiba, latitude -25,51

Fonte: Analysis SOL-AR (2010).

A carta solar apresentada na Figura 19 mostra o traçado das horas (linhas verticais em azul) e dos meses (linhas negritadas no eixo horizontal) a partir do ponto do observador, para a latitude de Curitiba.

A Figura 19 mostra que, para Curitiba, enquanto a incidência de sol no período de inverno apresenta baixo ângulo solar relativamente à linha do horizonte (cerca de 40° , ao meio dia), no verão, a projeção do sol é praticamente zenital para uma fachada norte.

3 METODOLOGIA

Esta parte do trabalho apresenta os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa. As principais etapas realizadas foram:

- Construção dos protótipos;
- Medições de inverno;
- Medições de verão.

3.1 CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS

Para a comparação do desempenho de um sistema construtivo que utilize a Parede Trombe, foram feitas medições das condições térmicas internas em protótipo em escala reduzida, comparativamente a um protótipo de mesmas dimensões sem o sistema passivo, sendo ambos constituídos de blocos de concreto. Foram construídos dois protótipos com medidas de: 2,25m de altura, 1,80m de largura e 1,80m de comprimento, como mostram a Figura 20 e a Figura 21. Em um desses protótipos foi aplicada a Parede Trombe ventilada. Os dois protótipos estão separados um do outro por 1,53m, de forma a minimizar o sombreamento mútuo entre eles. Ambos os protótipos permaneceram vazios, fechados e sem geração de calor no ambiente interno durante o monitoramento.

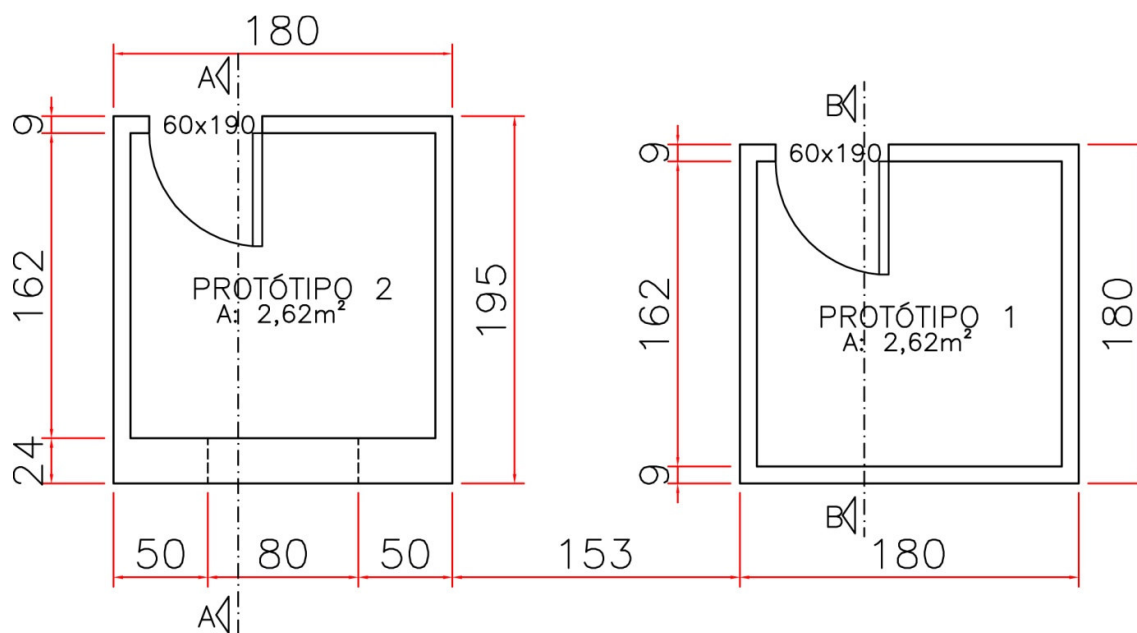


FIGURA 20 - Planta baixa dos protótipos

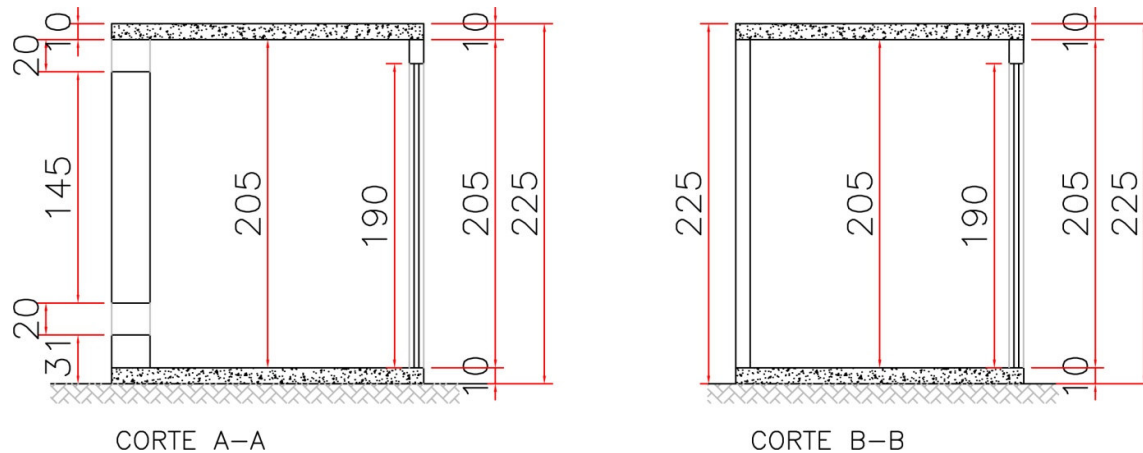


FIGURA 21 - Corte A-A, do protótipo 2 e Corte B-B, do protótipo 1

A localização dos protótipos foi feita no terreno da Universidade Tecnológica Federal do Paraná no campus Curitiba no bairro Campo Comprido, conforme mostrado na Figura 22.



FIGURA 22- Local onde foram construídos os protótipos, UTFPR Campus Curitiba, sede Ecoville
Fonte: Google maps (2009).

O protótipo em que foi instalada a Parede Trombe será denominado "protótipo 2" e o protótipo em que esta não foi aplicada será denominado "protótipo 1".

Os dois protótipos possuem piso de concreto simples com espessura de 10 cm, de modo a minimizar a influência térmica do solo no interior das construções.

Para determinar o material com que seriam realizadas as vedações verticais dos protótipos, foi considerada a capacidade térmica e o atraso térmico de dois tipos de blocos, de materiais altamente usados para esse fim na construção civil no Brasil: concreto e cerâmico. Os cálculos encontram-se no Apêndice A.

TABELA 4 - Capacidade térmica e Atraso térmico das amostras testadas

	Capacidade Térmica (kJ/m ² K)	Atraso Térmico (horas)
Bloco cerâmico (9x14x24cm)	62,3591	1,83
Bloco de concreto (9x19x39cm)	133,8912	2,13

Comparando os valores da Tabela 4, para ambos os materiais com a mesma espessura, verifica-se que os blocos de concreto têm maior capacidade térmica, portanto oferecem potencialmente maior inércia térmica, característica esta que faz com que este material seja mais adequado a regiões de clima temperado e quente seco, ou seja, regiões de grandes amplitudes térmicas. Deste modo, optou-se por utilizar o bloco de concreto, como mostra a Figura 23. Os blocos têm 19cm de altura, 9cm de largura e 39cm de comprimento.

A parede armazenadora (na qual foi colocado o sistema Parede Trombe) foi construída com dupla espessura, ou seja, duas fileiras de blocos de concreto separadas por argamassa comum, de traço 1:2:8. Os furos dos blocos de concreto foram preenchidos com argamassa, eliminando espaços de ar no interior da parede. Essas duas alterações, em relação às outras paredes, foram feitas para aumentar a massa térmica da parede caracterizando assim esta como uma parede de armazenamento.



FIGURA 23 - Protótipo construído com blocos de concreto.

A parede de armazenamento foi feita com duas aberturas, que ligam o interior do protótipo 2 com a chaminé da Parede Trombe. Essas aberturas possuem 91cm de largura e 20cm de altura. A primeira abertura está localizada a 31cm do solo e a segunda a 195cm do solo, ambas estão situadas horizontalmente no centro da parede, conforme mostra a Figura 24. Dois blocos de isopor com as medidas das aberturas da parede de armazenamento foram cortados para fechar essas aberturas quando necessário (ver configurações mais à frente).

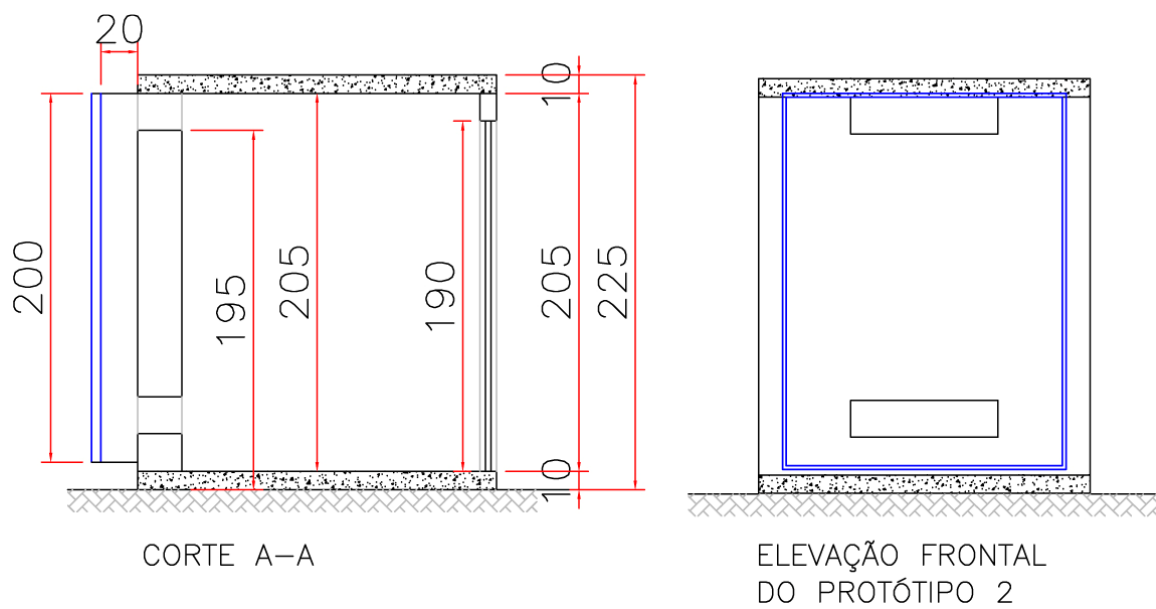


FIGURA 24 - Corte A-A e elevação frontal do protótipo 2 com a esquadria da Parede Trombe instalada

Como a relação ideal entre a altura da Parede Trombe e a largura da saída de ar da chaminé é de 1/10, conforme Liping e Angui (2006), a Parede Trombe tem uma altura de 2,00m e largura da chaminé de 0,20m (Figura 32). O comprimento da esquadria é de 1,5m.

Os dois protótipos foram implantados com orientação para o Norte e possuem laje simples com forro interno de poliestireno de 5cm, para minimizar a influência das trocas de calor pela laje nas medições. Sobre as lajes foi colocado plástico transparente, como camada impermeabilizante, para diminuir a penetração de umidade nos protótipos. Na face sul dos protótipos há uma porta de madeira para o acesso e o interior, idêntica em ambos os protótipos.

A superfície exterior de vidro da Parede Trombe foi fixada por uma esquadria de alumínio pintada de branco. A esquadria teve este material por causa da disponibilidade de mão de obra para a construção da esquadria com todas as especificações necessárias. As faces de superior e inferior da esquadria podem ser abertas ou fechadas conforme a necessidade (conforme configuração), como mostra a Figura 25 e a Figura 26. Esse sistema quando aberto permite a troca de ar entre a chaminé e o exterior, e quando fechado bloqueia essa passagem de ar, tanto na face superior quanto na inferior da esquadria.



FIGURA 25 - Face inferior da esquadria (a) fechada e (b) aberta



FIGURA 26 - Face superior da esquadria (a) fechada e (b) aberta

Para evitar perdas de calor, o vidro utilizado na Parede Trombe foi um vidro duplo com 17mm, sendo o vidro externo um vidro incolor comum de 4mm e o interno um vidro incolor comum de 5mm, a câmara de ar tem 8mm e é preenchida com ar. Foram escolhidas essas dimensões por serem as maiores feitas na região, lembrando que, quanto maior a câmara de ar, melhor é o desempenho do vidro duplo. A parede de armazenamento foi pintada externamente de preto, de forma a absorver a radiação solar visível, sendo esta uma característica da Parede Trombe.

A Figura 27 mostra os dois protótipos depois de prontos.

**FIGURA 27 - Protótipos construídos****TABELA 5 - Tabela resumo com todos os materiais utilizados na construção dos protótipos, a condutividade térmica dos materiais e a capacidade térmica dos elementos.**

	Protótipos				Parede Trombe	
	Piso	Paredes	Laje	Vidro	Parede de Armazenamento	Esquadria
Dimensões, AxLxP (cm)	10x180x180	205x180x9	15x180x180	200x150x1,7	206x180x24	200x150x2
Material	Concreto	Bloco de Concreto	Concreto e isopor	Vidro duplo	Bloco de Concreto + Concreto	Alumínio
Condutividade Térmica (W/mK)	1,75	1,75	Concreto=1,75; isopor=0,04	Vidro=1,0; Ar=0,024	1,75	230
Capacidade Térmica (J/K)	240	133,9	241,8	189	576	0,48

A Tabela 5 mostra um resumo com todos os materiais utilizados na construção dos dois protótipos, assim como algumas propriedades térmicas: a condutividade térmica dos materiais e a capacidade térmica dos elementos. Os cálculos da capacidade térmica estão no Apêndice A.

3.2 MEDIÇÕES DE INVERNO

3.2.1 Equipamento utilizado para as medições

O aparelho usado para a medição de temperatura foi o *datalogger* de temperatura e umidade da HOBO[®], modelo H08-003-02, conforme a Figura 28. Este aparelho mede a temperatura e a umidade relativa do ar e possui memória interna para até 7943 medidas, sendo possível programar intervalo de medição (estes podem ser de 0,5 segundos até 9 horas), data e hora de início de registro dos dados com o *software BoxCar[®] Pro*. A faixa de operação do aparelho é de temperaturas de -20°C até +70°C e umidade relativa de 0 até 95%. Para este estudo foram utilizados intervalos de medição de 5 minutos e 10 minutos.



FIGURA 28 - Aparelho usado nas medições, HOBO[®].

Fonte: VECTUS (2011).

3.2.2 Medições

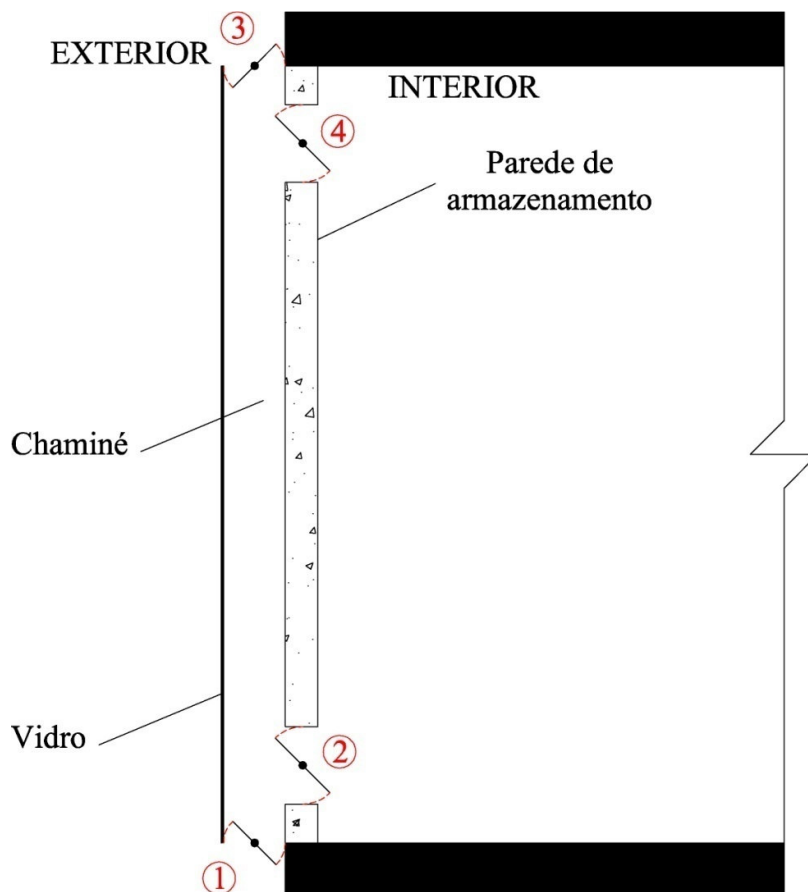


FIGURA 29 - Aberturas da Parede Trombe

Denominou-se a abertura inferior da esquadria da Parede Trombe "abertura 1"; a abertura inferior da parede de armazenamento "abertura 2"; a abertura superior da esquadria da Parede Trombe "abertura 3"; e a abertura superior da parede de armazenamento "abertura 4", como o indicado na Figura 29.

As medições de temperatura interna e externa nos dois protótipos foram realizadas simultaneamente. Para essas medições, utilizou-se o equipamento HOBO[®]. Os dataloggers foram colocados, internamente aos protótipos, no centro de cada um deles, a uma altura de 1,5m e programados com um intervalo de captação de dados de 5 minutos.

Externamente, para as medições de inverno, utilizou-se o equipamento HOBO[®] protegido com alumínio, dentro de um tubo de PVC de 10cm de diâmetro e 50cm de comprimento, conforme a Figura 30. O tubo revestido com papel alumínio serve para proteger o aparelho da chuva e radiação solar direta, minimizando a radiação de onda longa emitida

pelo entorno, ao mesmo tempo que permite que o sensor seja naturalmente ventilado. O HOBO® externo também foi colocado a uma altura de 1,5m do solo e estava localizado no mesmo terreno dos protótipos.



FIGURA 30 - Abrigo para a medição da temperatura externa

As medições de inverno foram realizadas em 3 diferentes configurações:

1. As aberturas 1 e 3 fechadas e as aberturas 2 e 4 abertas. As medições foram feitas durante os dias de 24 a 29 de maio de 2011;
2. A abertura 3 fechada, e as aberturas 1, 2 e 4 abertas. As medições foram feitas durante os dias de 31 de maio de 2011 a 05 de junho de 2011;
3. As aberturas 1 e 3 sempre fechadas e as aberturas 2 e 4 abertas apenas no período entre as 08h00min até as 18h00min. As medições foram feitas durante os dias 19 a 24 de setembro de 2011.

A primeira configuração é sugerida pela literatura para condições de inverno (durante o dia). Para a segunda configuração, a abertura 1 está aberta para que haja a possibilidade da entrada do ar externo junto ao solo, que, durante um dia de céu claro, pode ser mais quente que o ar no interior da edificação. A terceira configuração é sugerida pela literatura para o dia e para a noite. Esta terceira situação necessita de um usuário ativo que mude a configuração das aberturas da parede armazenadora no início da manhã e no final da tarde.

3.3 MEDIÇÕES DE VERÃO

3.3.1 Equipamento utilizado para as medições

Além do equipamento HOBO[®] apresentado no item 3.2.1, para as medições de verão também foi utilizada uma estação meteorológica da marca HOBO, modelo H21-001, para coleta de dados externos referenciais, conforme mostrado na Figura 31.

Esta estação meteorológica pode ser programada para coletar dados em intervalos regulares (de 1 em 1 segundos até de 18 a 18 horas), tem espaço para 10 sensores e possui bateria interna capaz de durar 1 ano (com 10 sensores programados para coletar dados de 10 em 10 segundos). Para este equipamento, também é possível programar a data e a hora do início da gravação dos dados, com o *software HOBOWare[®] Pro*.



FIGURA 31 - Estação meteorológica marca HOBO[®] modelo H21-001

A estação meteorológica estava equipada com 3 sensores: um anemômetro de copo e pá de vento, um sensor de radiação solar (piranômetro de silício) e um sensor de temperatura e umidade do ar, conforme mostrado na Figura 32. O anemômetro fornece a velocidade e a

direção dos ventos. Este sensor capta ventos com velocidade de 0 a 44 m/s, com precisão de 0,5 m/s e resolução de 0,19 m/s e direção de 0 a 360° , com precisão de 3° com resolução de 1,4 graus.

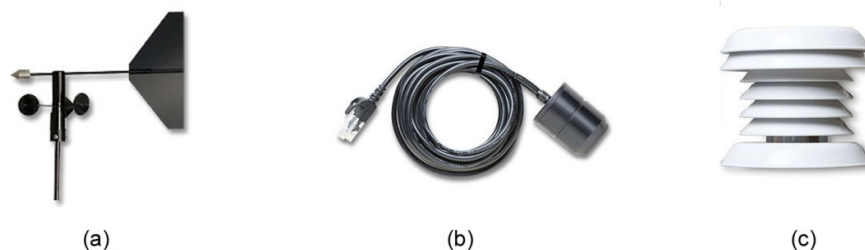


FIGURA 32 - Sensores da estação meteorológica utilizados, (a) anemômetro, (b) sensor de radiação solar e (c) sensor de temperatura e umidade do ar

Fonte: ONSET COMP BRASIL (2012).

O sensor de radiação solar capta valores de 0 a 1280 W/m², com precisão de 10W/m² e resolução de 1,25W/m², para a faixa do espectro solar de 300nm a 1100nm. O sensor de temperatura e umidade do ar capta temperaturas de -40°C a +75°C com precisão 0,2°C e resolução de 0,02°C, este sensor capta de 0% a 100% de umidade do ar, com precisão de 2,5% e resolução de 0,1%.

3.3.2 Medições

Para medir os fatores climáticos externos foi utilizada a estação meteorológica. Este equipamento foi instalado sobre uma laje, a aproximadamente 15m do solo, cerca de 15m do local onde estavam os protótipos. Este local foi escolhido por ficar próximo ao local onde foram construídos os protótipos e por ser uma área externa de acesso restrito.

A estação meteorológica foi programada para captar os dados de velocidade e direção dos ventos, radiação solar, temperatura e umidade do ar a cada minuto.

Dentro do protótipo 1 foram colocados dois equipamentos HOBO[®]. Um deles foi posicionado no centro do protótipo a uma altura de 1,50m do piso, como nas medições de inverno, o HOBO[®] foi embrulhado em papel alumínio e coberto por um copo de plástico, como mostra a Figura 33, sendo que ambas as medidas foram utilizadas para proteger o equipamento (de radiação de onda longa emitida pelas paredes e aberturas e de condensação e umidade). Em todos os casos, o equipamento foi programado com um intervalo de captação de dados de 10 em 10 minutos.



FIGURA 33- HOBO[®] embrulhado com papel alumínio e sendo colocado em um copo de plástico, e HOBO[®] já dentro do copo de plástico

O outro equipamento HOBO[®] colocado no protótipo 1 foi afixado internamente à parede Norte, com o sensor de temperatura do equipamento preso à parede por um pedaço de isopor, como na Figura 34, de forma a registrar a temperatura superficial.



FIGURA 34 - HOBO[®] colocado na parede norte do protótipo 1

Dentro do protótipo 2, foram colocados três equipamentos HOBO[®]. Dois deles foram colocados de maneira semelhante ao protótipo 1: um deles pendurado a 1.5m do piso no

centro do protótipo e o outro fixado à parede norte, com as mesmas características já apresentadas.

O terceiro equipamento HOBO[®] foi instalado na chaminé. Este terceiro medidor de temperatura também foi embrulhado em papel alumínio e colocado dentro de um tubo de PVC, para proteger contra intempéries e evitar a interferência direta da radiação solar no equipamento.

As medições de verão foram realizadas em 4 diferentes configurações:

1. Todas as aberturas fechadas. As medições foram feitas durante os dias de 29 de dezembro de 2011 a 03 de janeiro de 2012;
2. As aberturas 1 e 4 fechadas, e as aberturas 2 e 3 abertas. As medições foram feitas durante os dias 05 a 10 de janeiro de 2012;
3. A abertura 2 fechada e as aberturas 1, 3 e 4 abertas. As medições foram feitas durante os dias 12 a 17 de janeiro de 2012;
4. As aberturas 2 e 4 fechadas, e as aberturas 1 e 3 abertas. As medições foram feitas durante os dias 19 a 30 de janeiro de 2012.

A configuração 1 simula uma Parede Trombe não ventilada, e, como mostra a carta solar para a cidade de Curitiba (Figura 19), durante a maior parte do verão a fachada Norte não sofre a incidência direta dos raios do sol. Desta forma, nesta situação o calor entra no ambiente interno somente por condução. A configuração 2 é a configuração mostrada na literatura para uma situação de verão.

A configuração 3 funciona de duas maneiras: fazendo com que o ar circule entre as aberturas 1 e 3 removendo o excesso de calor da parede de armazenamento e possibilitando que o ar quente, menos denso, saia pela abertura 4, passe pela abertura 3 e vá para o exterior.

A configuração 4 permite que o ar circule entre as aberturas 1 e 3 removendo o excesso de calor da parede de armazenamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MEDIÇÕES DE INVERNO

Nas medições para o período de frio, para cada uma das três configurações testadas, foi escolhido um dia para comparações que tivesse condições de céu claro. Esse dia foi escolhido com base nos dados de radiação solar cedidos pelo Instituto Tecnológico SIMEPAR¹ para os dias medidos. Foram usados dois critérios para a escolha de tais dias: maior valor médio diário de radiação solar e distribuição da radiação solar durante o dia.

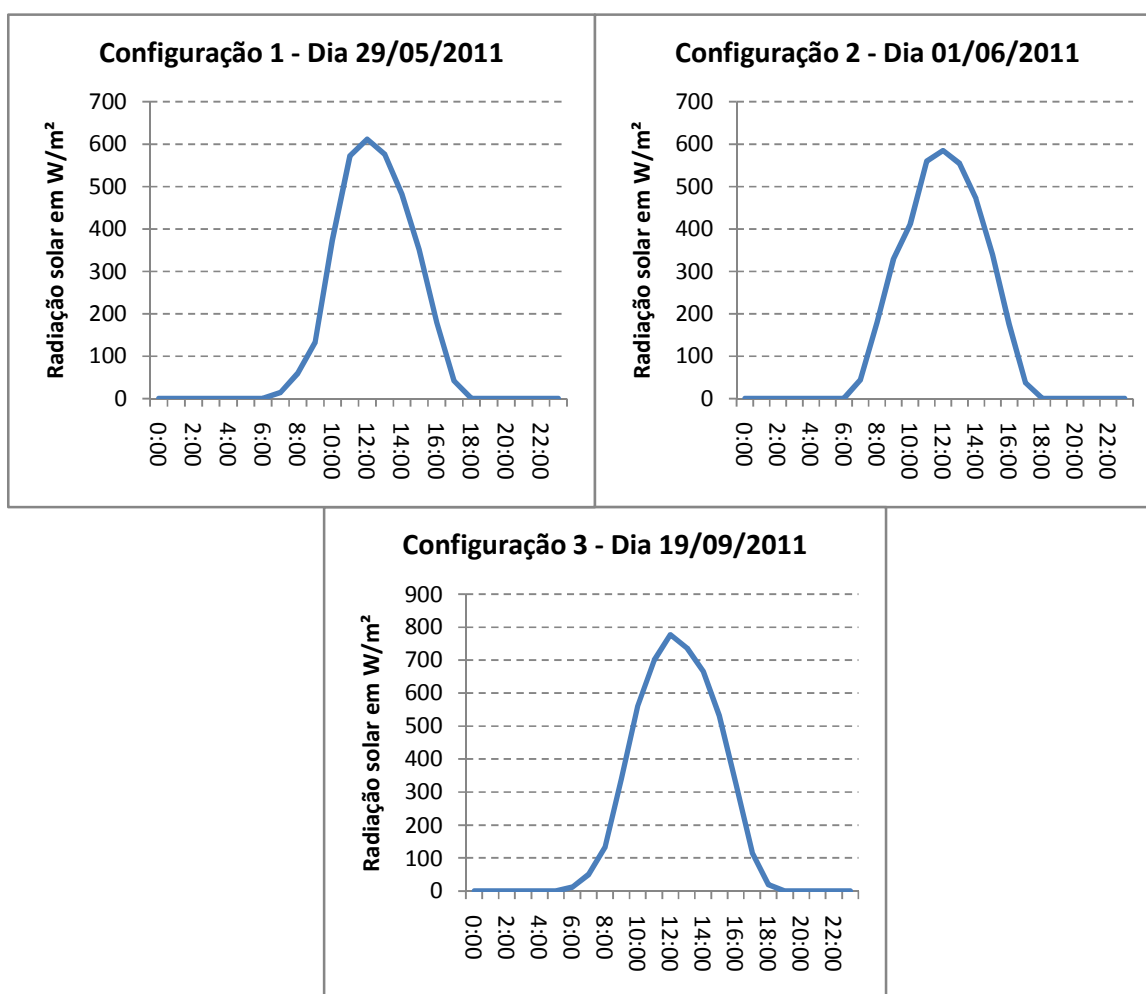


FIGURA 35 - Gráficos de radiação solar para cada um dos três dias padrão escolhidos, para o inverno

¹ Estação medidora localizada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná, UFPR, Curitiba.

Os dias escolhidos foram: para a configuração 1, o dia 29/5/2011; para a configuração 2, o dia 1/6/2011; e para a configuração 3, o dia 19/9/2011. O gráfico com os valores da radiação solar para cada dia pode ser visualizado na Figura 35.

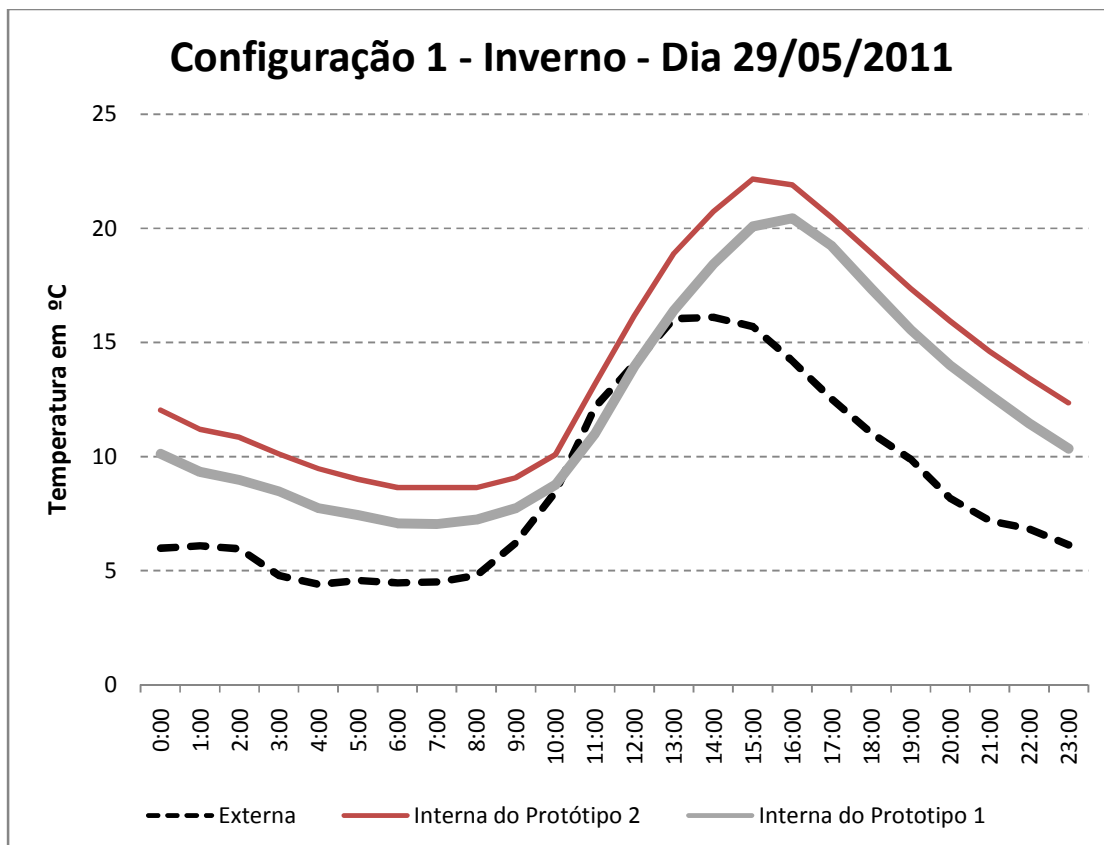


FIGURA 36 - Gráfico da configuração 1, para o inverno, dia 29 de maio de 2011

A Figura 36 mostra que a temperatura interna do protótipo 2 (Parede Trombe) foi sempre superior à temperatura do protótipo 1 (protótipo de blocos de concreto). Isso mostra que a estratégia indicada pela literatura (aberturas 1 e 3 fechadas e aberturas 2 e 4 abertas, conforme Figura 37) para o dia é válida, inclusive para o período noturno. Nota-se o efeito de retenção de calor internamente no protótipo 2 (cerca de 2 graus acima da temperatura observada no protótipo 1), embora o padrão de ambas as curvas de temperaturas internas (protótipo 1 e 2) seja muito semelhante. A circulação natural permanente do ar pelas aberturas da parede de armazenamento aparentemente não acarretou em perdas de calor no período noturno, fator que pode estar associado ao envidraçamento utilizado (vidro duplo). A Figura 37 mostra como ocorreu a entrada de calor no protótipo.

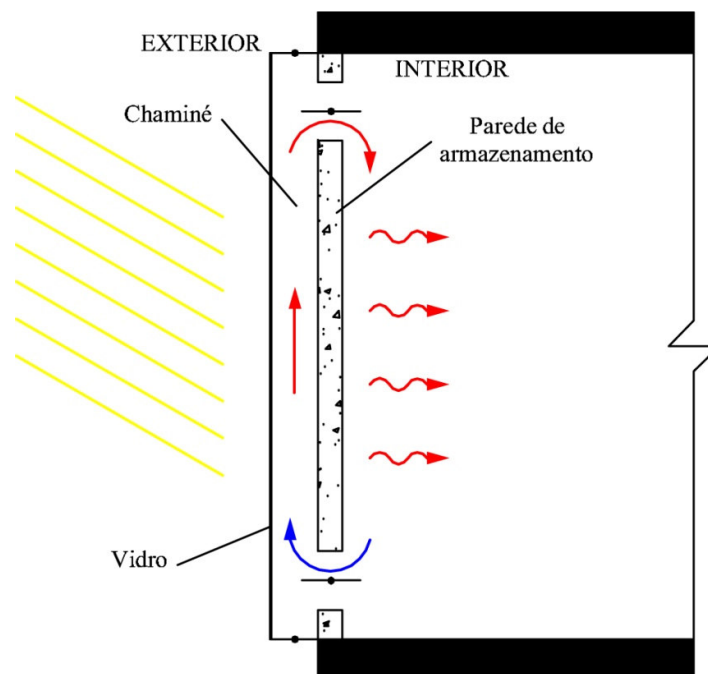


FIGURA 37 – Configuração 1 para o período de inverno;

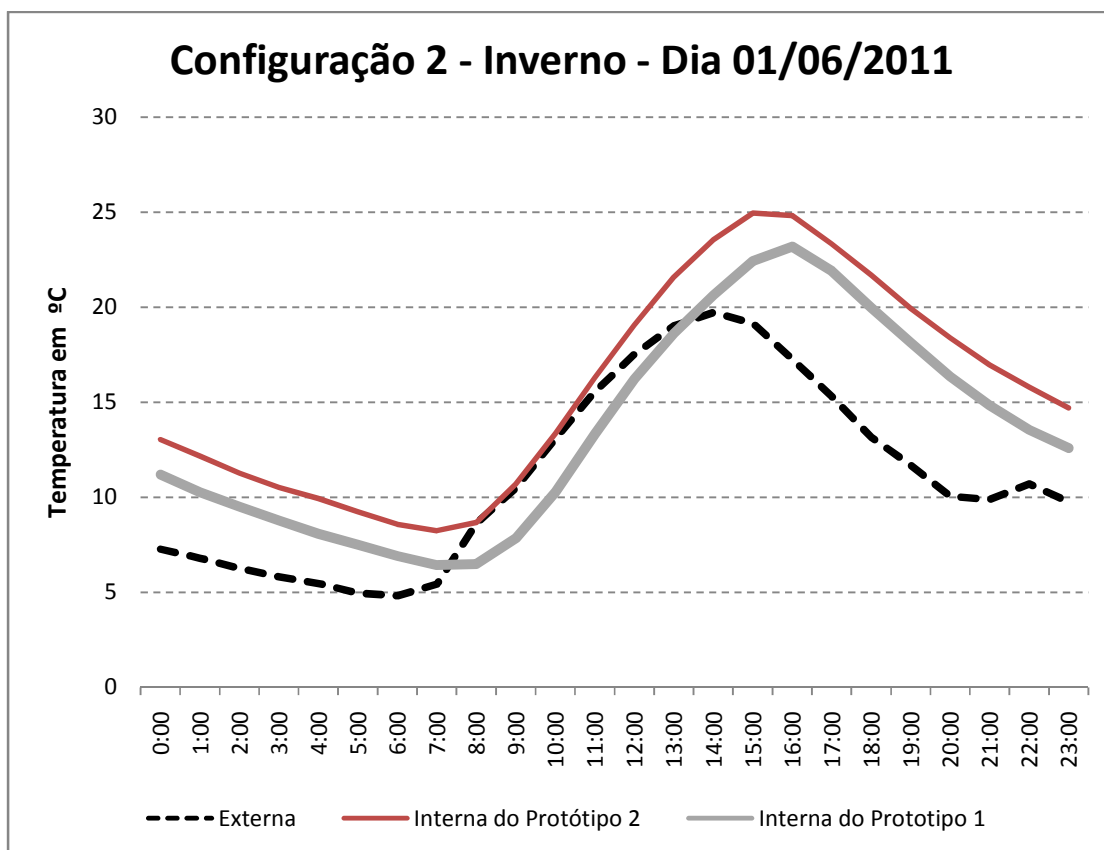


FIGURA 38 - Gráfico da configuração 2, para o inverno, dia 01 de junho de 2011

Para a configuração 2 (abertura 3 fechada e aberturas 1, 2 e 4 abertas, Figura 39) obtiveram-se resultados semelhantes à configuração 1, mas, por permitir a entrada de ar externo na chaminé pela abertura 1, como mostra a Figura 39, houve uma maior perda de calor interno durante a madrugada, fazendo com que pela manhã a temperatura interna do protótipo 2 ficasse muito próxima à da externa. Durante o restante do dia a temperatura do protótipo 2 foi superior à temperatura externa e, em todo o tempo esteve superior à do protótipo 1 (Figura 38).

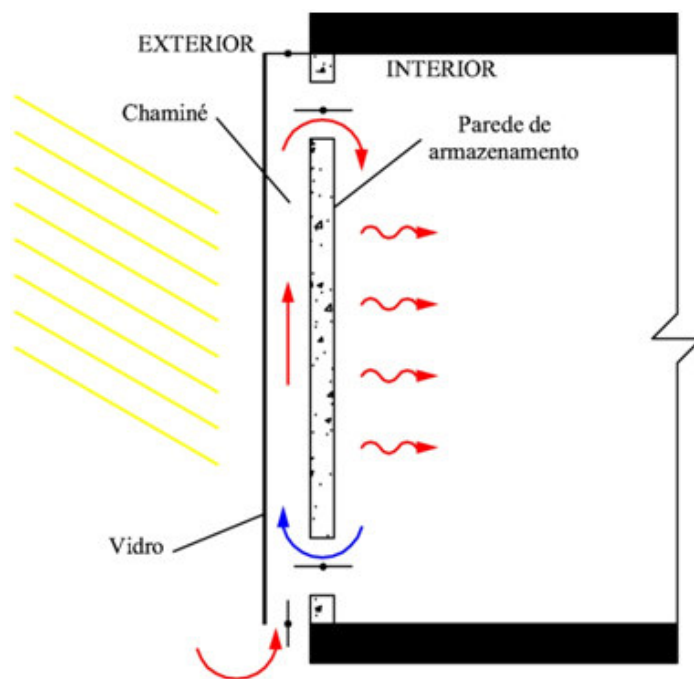


FIGURA 39 - Configuração 2 para o período de inverno;

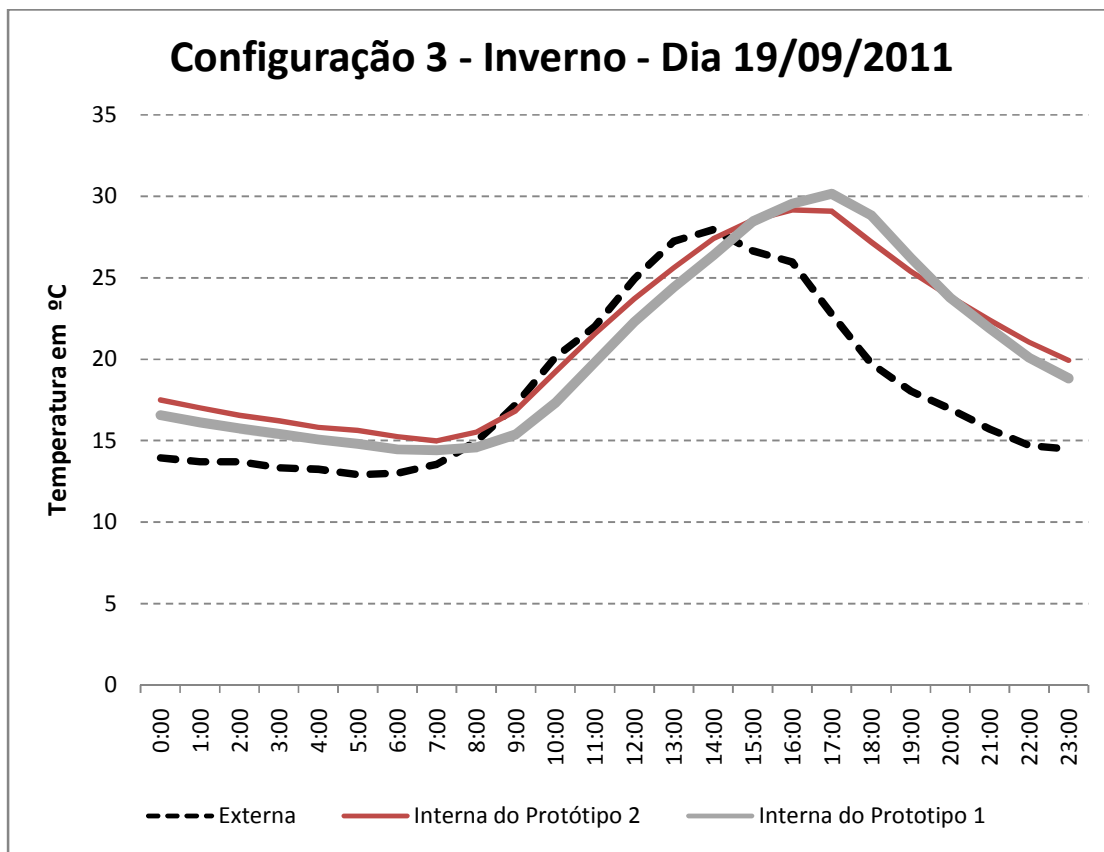


FIGURA 40- Gráfico da configuração 3, para o inverno, dia 19 de setembro de 2011

A Figura 40 mostra que a configuração 3 (aberturas 1 e 3 sempre fechadas e aberturas 2 e 4 abertas apenas no período diurno) não se mostrou tão eficiente quanto as duas configurações anteriores. A temperatura máxima do protótipo 2 não foi superior à do protótipo 1, embora a temperatura interna nos dois protótipos tenha permanecido muito próxima. Durante a manhã, a temperatura externa foi superior à interna em ambos os protótipos. Aparentemente, o fato de não haver ventilação permanente para o interior do protótipo 2 (aberturas da parede de armazenamento abertas apenas durante o dia) anulou em grande parte o funcionamento da Parede Trombe, que é baseado no efeito estufa associado à circulação de ar. Em parte também, a operação de fechamento manual das aberturas (com a abertura, mesmo que por pouco tempo, da porta dos fundos) em um protótipo de pequenas dimensões pode ter influenciado sobremaneira na perda de calor.

Outra explicação para o fato desta configuração ter mostrado um comportamento diferente das outras duas, é que as duas primeiras configurações foram medidas próximas ao início do inverno, e esta última próxima ao fim. Esse fato faz com que a incidência da radiação solar seja diferente. Analisando a carta solar da cidade de Curitiba (Figura 19), pode-

se notar que nesta última medição a altura solar é próxima de 60° do plano do horizonte (na carta, cerca de 30° graus do zênite, contra cerca de 40° do plano do horizonte nas configurações 1 e 2), ou seja, a incidência de radiação solar no vidro é menor, apesar do valor da radiação ser maior, como o mostrado na Figura 35.

TABELA 6 - Resumo dos dados dos três dias padrão do inverno

	Configuração 1			Configuração 2			Configuração 3		
	Externa	Interna do protótipo 2	Interna do protótipo 1	Externa	Interna do protótipo 2	Interna do protótipo 1	Externa	Interna do protótipo 2	Interna do protótipo 1
Temperatura mínima	4,2	8,6	7,0	4,6	8,2	6,2	12,6	14,9	14,1
Temperatura máxima	16,8	22,5	20,6	20,2	25,6	23,2	28,3	29,5	30,3
Diferença entre a temperatura mínima interna e a mínima externa	-	4,4	2,8	-	3,6	1,6	-	2,3	1,5
Fator Decremental (μ)	-	1,10	1,08	-	1,12	1,09	-	0,93	1,03
Média das temperaturas	8,8	13,9	12,1	11,2	15,7	13,5	18,2	21,1	20,4
Diferença entre temperatura média interna e média externa	-	5,2	3,4	-	4,5	2,4	-	2,9	2,2

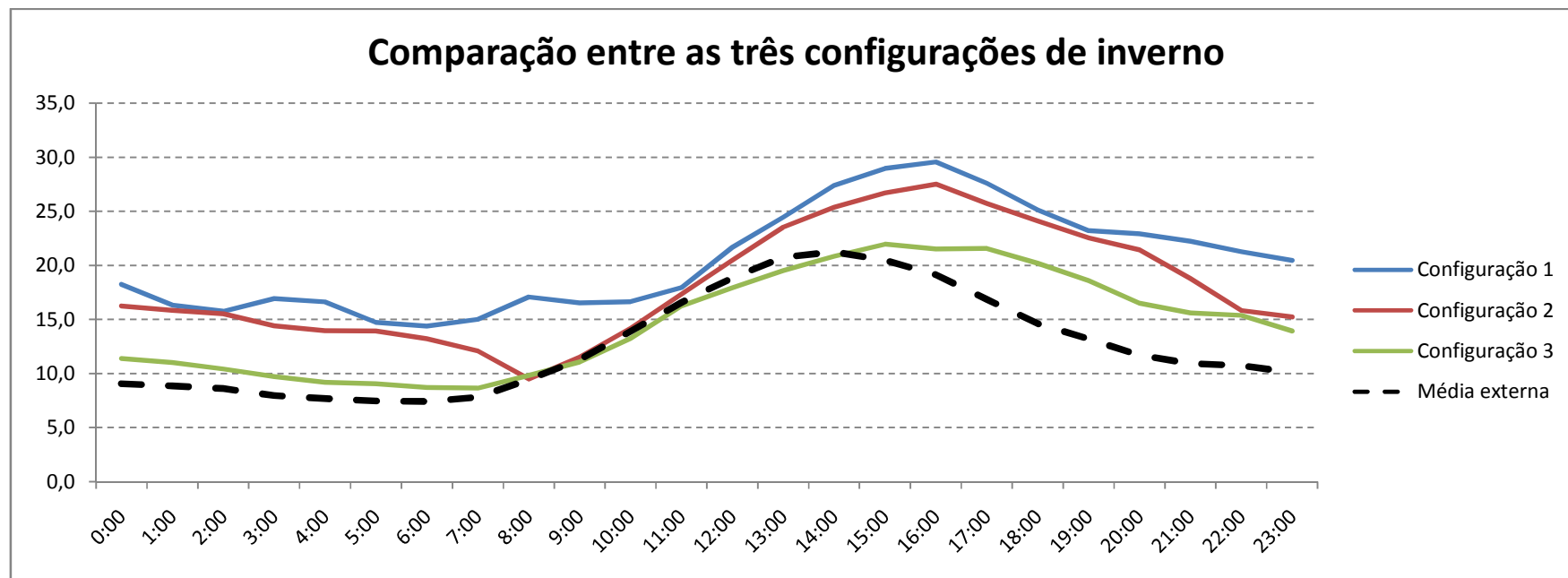
**FIGURA 41 - Comparação entre as temperaturas das três configurações, as temperaturas externas e as temperaturas médias do protótipo 1 para o dia padrão**

TABELA 7 - Comparação entre as temperaturas do protótipo 2 com o protótipo de referência (protótipo 1), para o inverno

	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3
Diferença entre as temperaturas mínimas	1,6	2,0	0,8
Diferença entre as temperaturas máximas	1,9	2,4	-0,8
Diferença entre as temperaturas médias	1,8	2,2	0,7

Uma das maneiras de se fazer comparações entre temperaturas é através do Fator Decremental (μ) (CRUZ et al., 2007), importante parâmetro para análise do desempenho térmico do ambiente interno, representado por um coeficiente de variação da amplitude interna relativamente à amplitude externa. Esse coeficiente é, assim, o quociente entre ambas as amplitudes. Portanto se a amplitude térmica interna for menor que a externa, o fator decremental deverá ser baixo. Como mostrado na Tabela 6, o menor valor do fator decremental foi para a configuração 3 ($\mu = 0,9$).

Pode-se usar o fator decremental também para comparar as amplitudes do protótipo 2 com as do protótipo 1. Nas duas primeiras configurações o fator decremental teve praticamente os mesmos valores para o protótipo 2 e o protótipo 1. Isso significa que ambos os protótipos tiveram amplitudes térmicas semelhantes. Para a configuração 3 houve uma pequena diferença entre o fator decremental dos protótipos (0,1).

Outra forma de comparação é verificar as diferenças entre as temperaturas médias internas e externas (Tabela 6 e Tabela 7). A configuração 1 é a que mais se destaca nesta comparação, pois tem o maior valor dentre as do protótipo 2 (5,2°C).

Sendo as temperaturas mais críticas para o inverno as mínimas, percebe-se que a configuração 1 destaca-se neste ponto também, pois entre as três configurações é a que tem a maior diferença entre a temperatura mínima interna e a externa (4,4°C).

A Figura 41 mostra um gráfico de comparação entre as temperaturas nas três configurações, a temperatura externa para os dias padrão. Para se obter esse gráfico, foi adotado o seguinte procedimento de normalização de dados: foi extraída a média horária das temperaturas externas para os três dias de medição, multiplicou-se a média horária externa pela temperatura interna em cada configuração, relativa à mesma hora da média externa. O produto obtido foi dividido pela temperatura externa, relativa ao dia e horário de cada configuração. Esse procedimento foi feito para o dia padrão das três configurações.

Na Figura 41, a configuração 1 se destaca por apresentar as maiores temperaturas durante todo o dia, superando a temperatura externa e a temperatura das outras duas configurações. A configuração 2 também obteve um bom resultado, mas demonstra uma grande queda de temperatura pela manhã. Observando o gráfico nota-se que a parte crítica do dia é durante a manhã, quando todas as temperaturas internas ficam muito próximas à externa, chegando a ser inferiores à esta, o que é o caso da configuração 3.

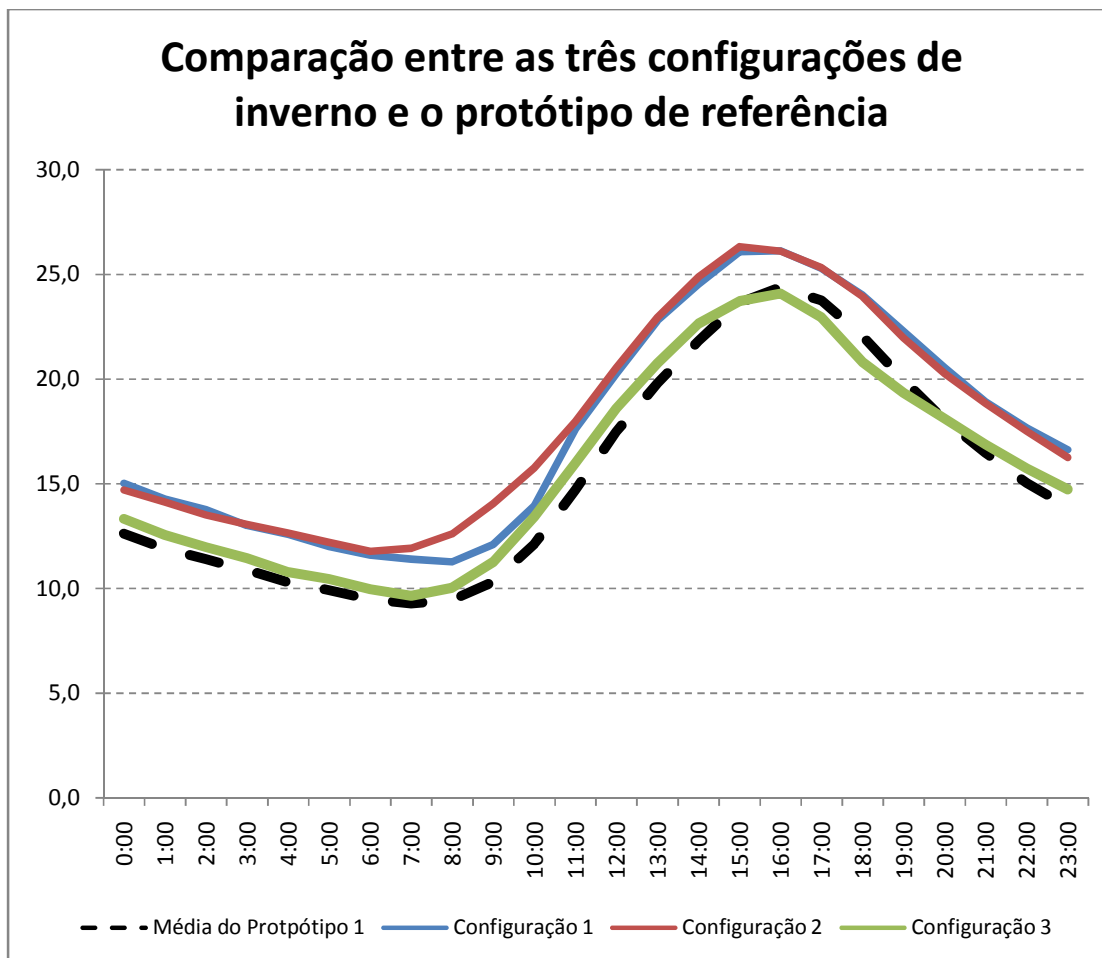


FIGURA 42 - Comparação entre as três configurações de inverno e o protótipo de referência

Deve-se notar, entretanto, que nas Figura 36, 38 e 40, o protótipo 1 (referência) apresenta comportamento térmico diferenciado para cada dia, ora a temperatura interna está próxima da externa no período da manhã (Figura 38), ora está se distanciando daquela, com algum atraso térmico. Isso ocorre em razão das condições atmosféricas do(s) dia(s) anterior(es) ao dia escolhido para a comparação. Sendo assim, foi feita uma normalização dos dados tomando-se como referência o protótipo 1 (Figura 42).

A comparação das três configurações com o protótipo de referência (Figura 42) mostra também que as configurações 1 e 2 tiveram comportamento térmico muito semelhante, com exceção do período da manhã, quando a configuração 2 obteve um melhor resultado. Isto se deve ao fato de haver circulação de ar entre o exterior e a chaminé, pois o Sol aquece mais rapidamente o ar do exterior do que o protótipo.

4.2 MEDIÇÕES DE VERÃO

Para as quatro configurações nas quais foram realizadas as medições, foi escolhido novamente um dia padrão em condições de céu claro, selecionado com base nos dados de radiação solar medidos com a estação meteorológica localizada próxima ao experimento.

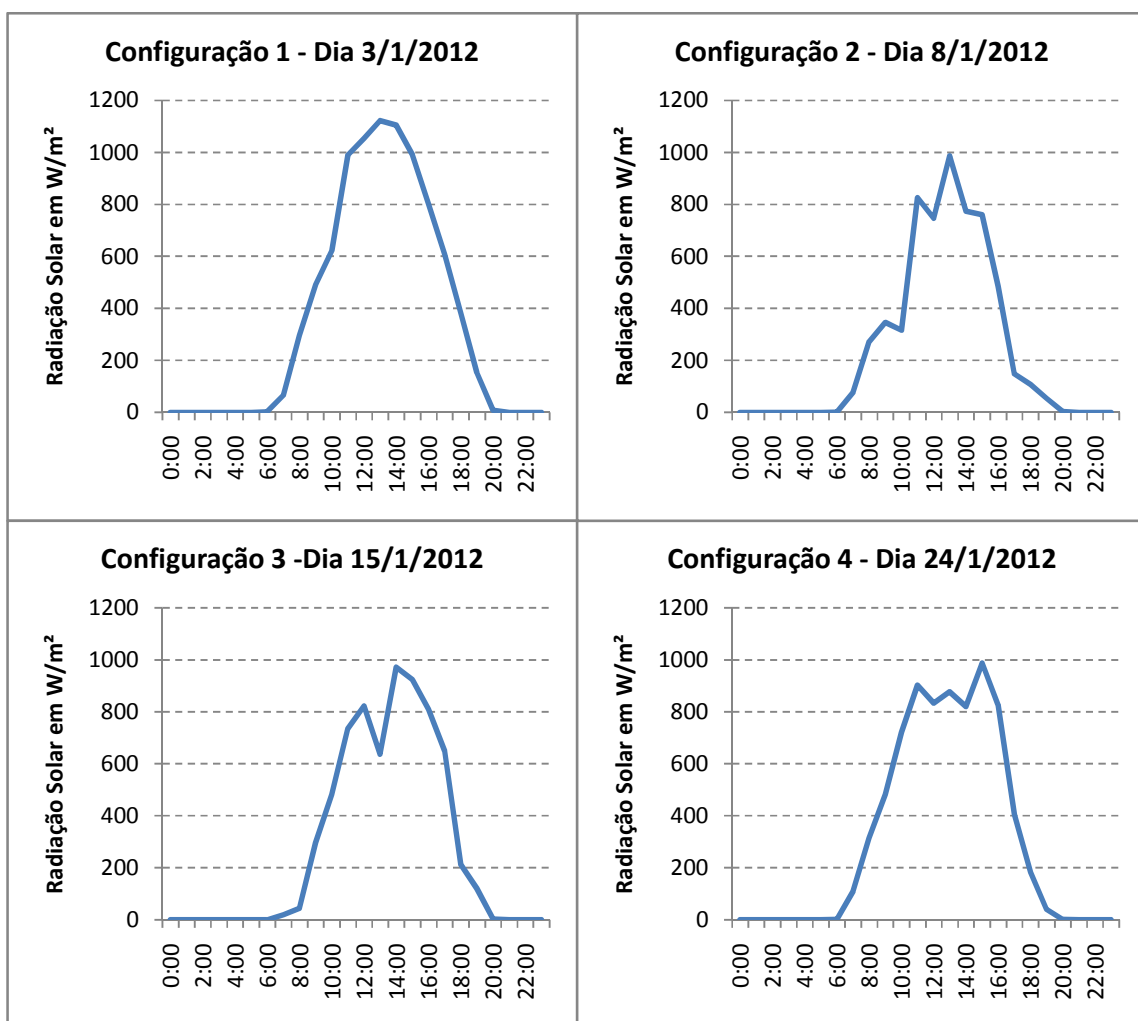


FIGURA 43- Gráficos de radiação solar para cada um dos quatro dias padrão escolhidos, para o verão

Os dias escolhidos foram: para a configuração 1, o dia 3/1/2012, para a configuração

2, o dia 8/1/2012, para a configuração 3, o dia 15/1/2012 e para a configuração 4, o dia 24/1/2012. O gráfico com os valores da radiação solar para cada dia pode ser visto na Figura 43.

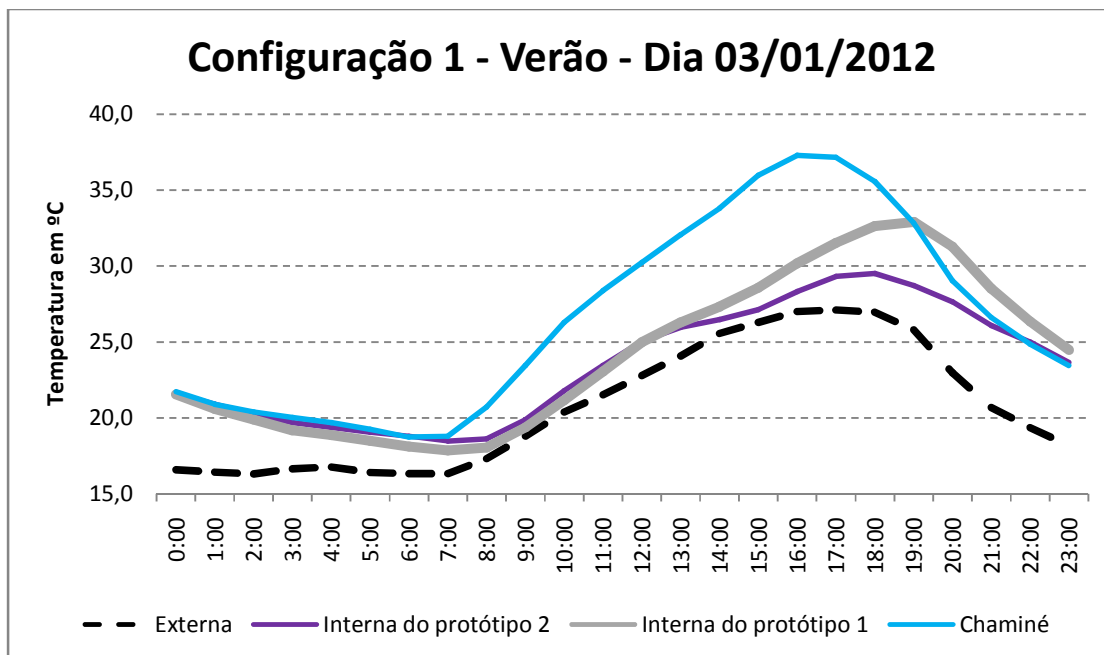


FIGURA 44 - Gráfico da configuração 1, para o verão, dia 3 de janeiro de 2012

A Figura 44 mostra o gráfico do dia padrão da configuração 1 (todas as aberturas fechadas, Figura 45). A temperatura externa permaneceu sempre abaixo das outras três temperaturas medidas (nos dois protótipos e na chaminé do protótipo 2). Mostra-se também que a temperatura interna do protótipo 2 é inferior à temperatura interna do protótipo 1 na parte da tarde, sendo as temperaturas internas nos dois protótipos muito semelhantes durante a manhã e à noite. Esse comportamento mostra que, durante o período mais quente do dia, o protótipo 2 tem um comportamento mais adequado às condições de verão na comparação com o protótipo padrão, indicando que o sistema de climatização passiva teve um resultado positivo para esta configuração.

A temperatura da chaminé foi mais elevada que as outras três na maior parte do dia, uma vez que a chaminé estava fechada, não trocava ar nem com o interior do protótipo nem com o meio externo, formando uma estufa. O calor entra através do vidro por condução e por radiação direta do sol. No fim da tarde parte desse calor é perdida, por condução, para o exterior pelo vidro e esquadria e para o interior, pela parede de armazenamento.

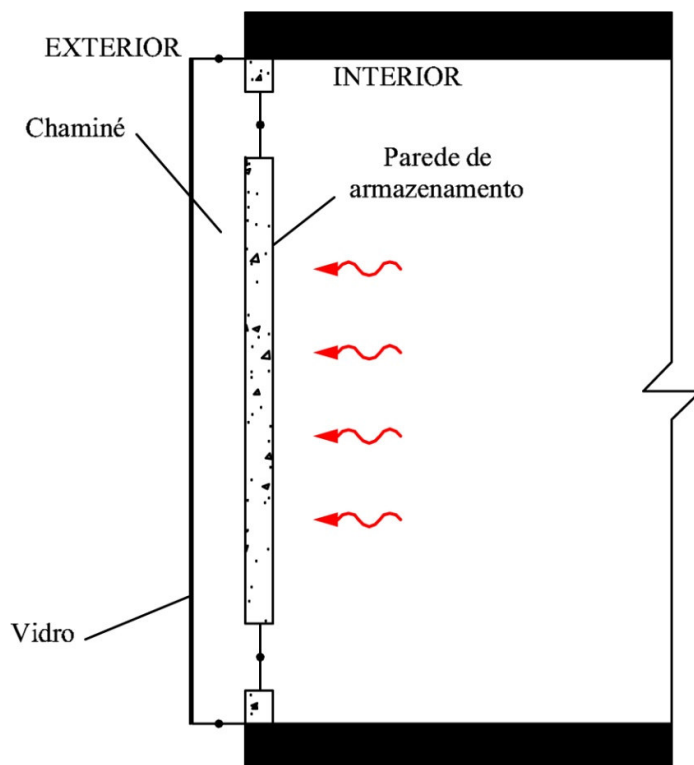


FIGURA 45 - Configuração 1 para o período de verão;

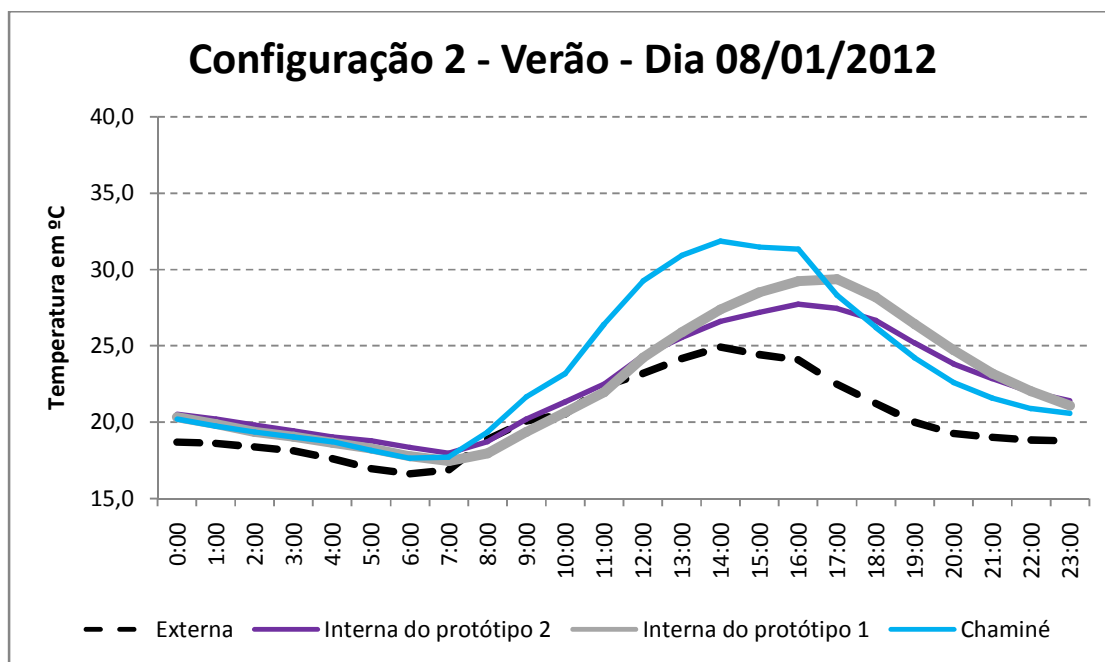


FIGURA 46 - Gráfico da configuração 2, para o verão, dia 8 de janeiro de 2012

A Figura 46 mostra que, para a configuração 2 (aberturas 1 e 4 fechadas e 2 e 3 abertas, Figura 47), o desempenho do protótipo 2 foi mais semelhante ao do protótipo 1. Apesar de esta ser a configuração aconselhada pela literatura para o verão, nota-se que, neste caso, a diferença entre o protótipo 2 e o 1 foi menor que na configuração 1, principalmente no período da tarde. Isso se deve ao seguinte fato: como a parte envidraçada da Parede Trombe não recebe radiação direta do sol (conforme a carta solar para Curitiba, Figura 18), a sucção gerada pelo ar quente, mais leve, na chaminé não é o suficiente para extrair o ar quente do interior do protótipo (Figura 47).

A temperatura da chaminé não esteve tão alta como na configuração 1, pois como a abertura 3 estava aberta, o ar da chaminé foi em parte (apenas pela abertura superior da chaminé) removido durante o período de insolação.

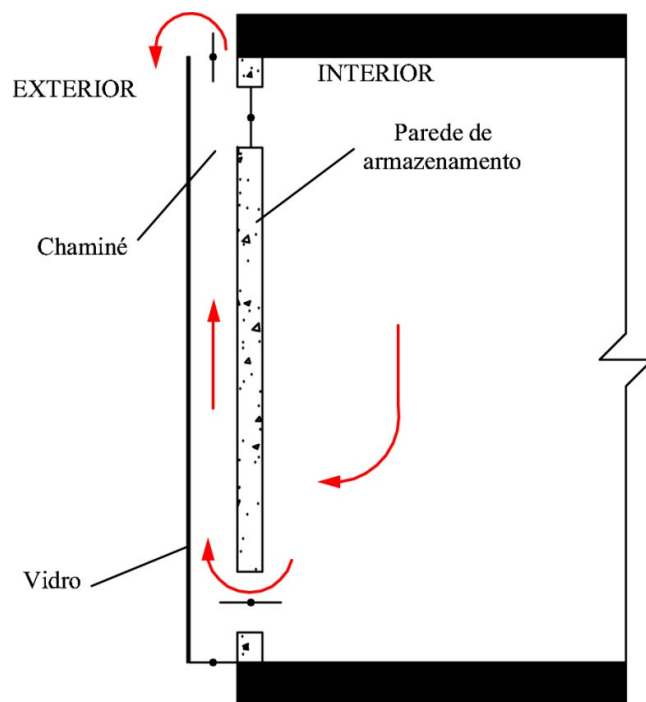


FIGURA 47 - Configuração 2 para o período de verão;

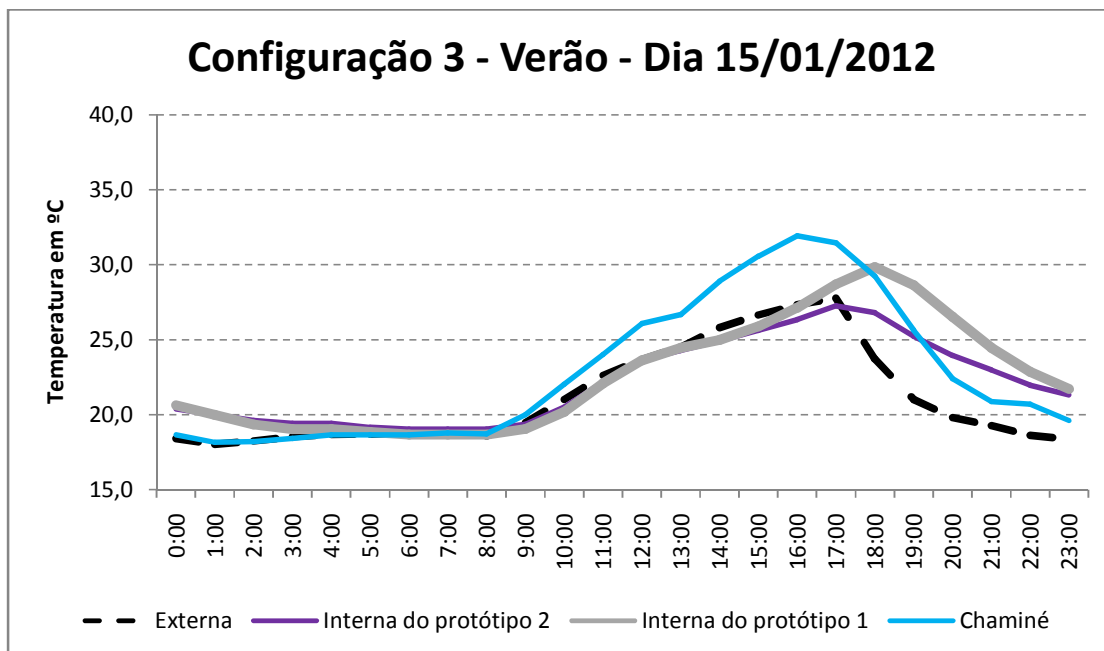


FIGURA 48 - Gráfico da configuração 3, para o verão, dia 15 de janeiro de 2012

O gráfico do dia padrão da configuração 3 (abertura 2 fechada e aberturas 1, 3 e 4 abertas, Figura 49), Figura 48, mostra que até as 16:00 horas as temperaturas externa e dos protótipos 1 e 2 foram muito semelhantes. Na Figura 43, nota-se uma diminuição brusca da radiação solar às 18:00, de forma semelhante há a diminuição brusca da temperatura externa neste horário.

Esta configuração é a que tem um menor número das aberturas fechadas, portanto a semelhança entre a temperatura externa e a do protótipos 2 se deve ao fato que houve uma grande circulação de ar de dentro do protótipo para o exterior, como mostra a Figura 49. O que justifica também a temperatura da chaminé ser mais próxima à externa, principalmente no período da madrugada quando não há incidência de radiação solar.

A temperatura do protótipo 1 se mantém próxima à externa até as 16:00. O que, em comparação às duas configurações anteriores, são temperaturas baixas. Isso se deve ao fato do dia anterior ao dia escolhido para comparações, 14/01/2012, ter sido um dia com pouca incidência de radiação solar (Figura 50), por este motivo o protótipo 1 não conseguiu acumular calor internamente para a madrugada do dia 15/01/2012.

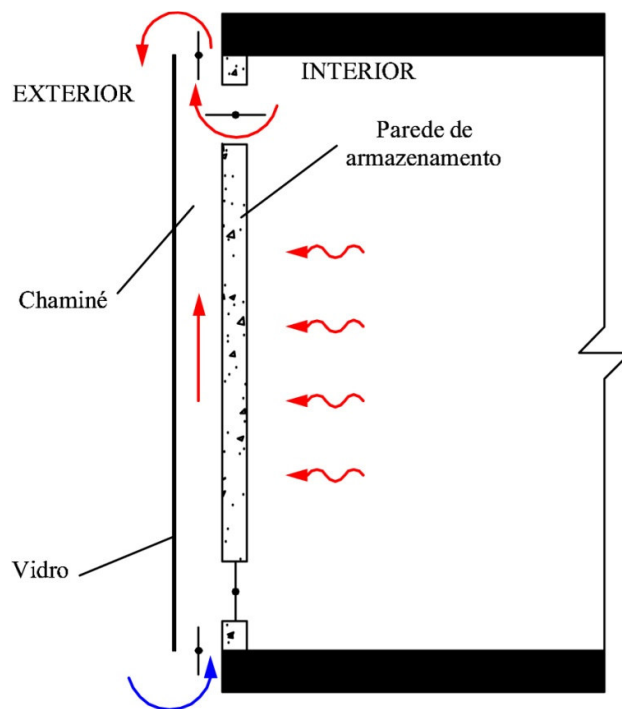


FIGURA 49 - Configuração 3 para o período de verão;

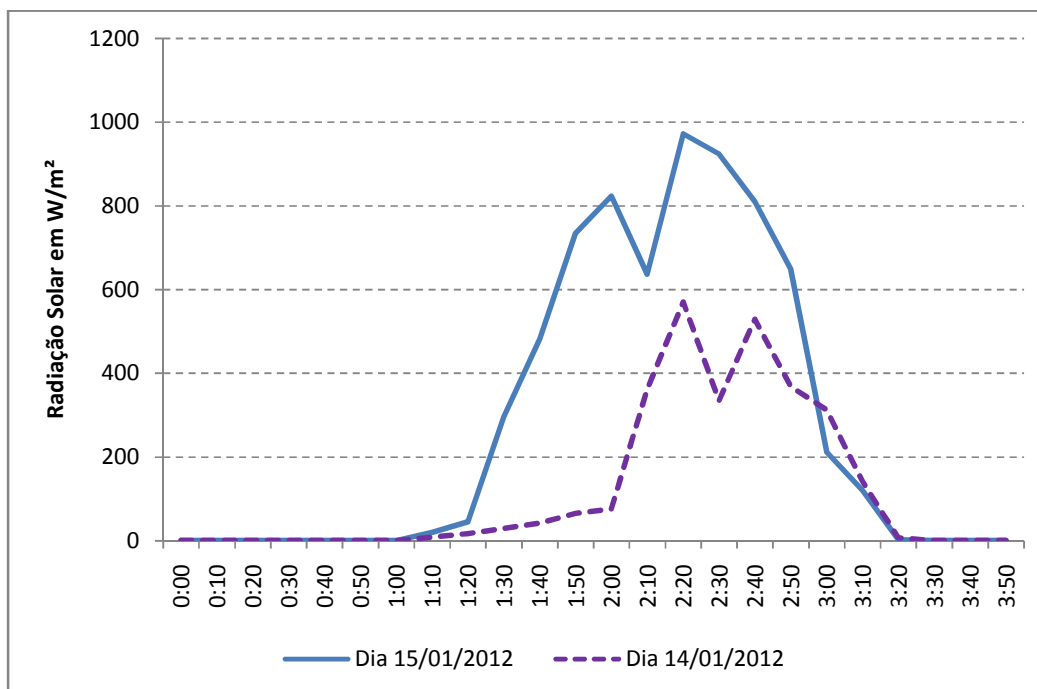


FIGURA 50 - Gráfico comparativo da radiação solar global incidente em plano horizontal nos dias 14 e 15 de janeiro de 2012

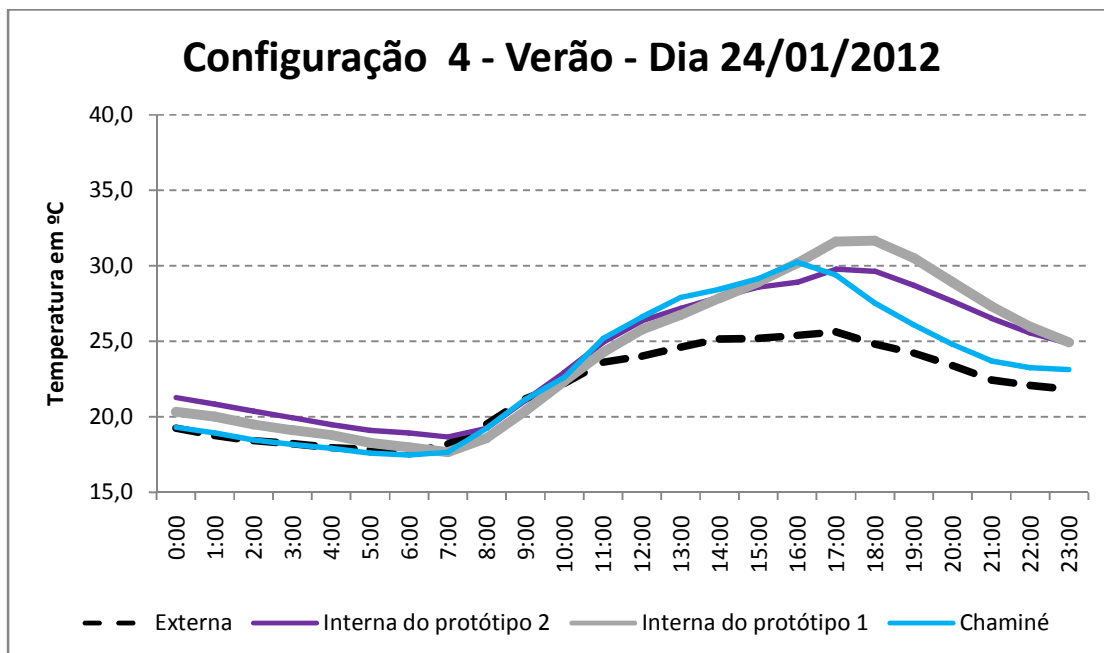


FIGURA 51 - Gráfico da configuração 4, para o verão, dia 24 de janeiro de 2012

A comparação entre as temperaturas internas no protótipo 1 e no protótipo 2, na configuração 4 (aberturas 2 e 4 fechadas, e aberturas 1 e 3 abertas, Figura 52), apresentada na Figura 51, mostra pouca diferença entre as duas. O único período em que a temperatura do protótipo com a Parede Trombe é inferior à do outro protótipo ocorre ao final da tarde. A parede de armazenamento, neste caso, funcionou como massa térmica para resfriamento, ou seja, acumulou o calor da parte mais quente do dia e foi liberando aos poucos durante a noite e madrugada, como mostra a Figura 52, o que fez com que a temperatura durante a madrugada dentro do protótipo 2 fosse ligeiramente superior à do protótipo 1, e fez também com que durante o fim da tarde o protótipo 2 ficasse com uma temperatura inferior à do protótipo 1. Já que as aberturas da parede de armazenamento estavam fechadas, não havia circulação de ar para dentro do protótipo e as trocas de calor ocorriam por condução.

Com as aberturas 1 e 3 abertas, houve grande circulação de ar pela chaminé, fazendo com que as temperaturas neste espaço ficassem próximas às externas, quando havia pouca ou nenhuma radiação solar. Nos horários de insolação, a temperatura se distanciou da temperatura externa.

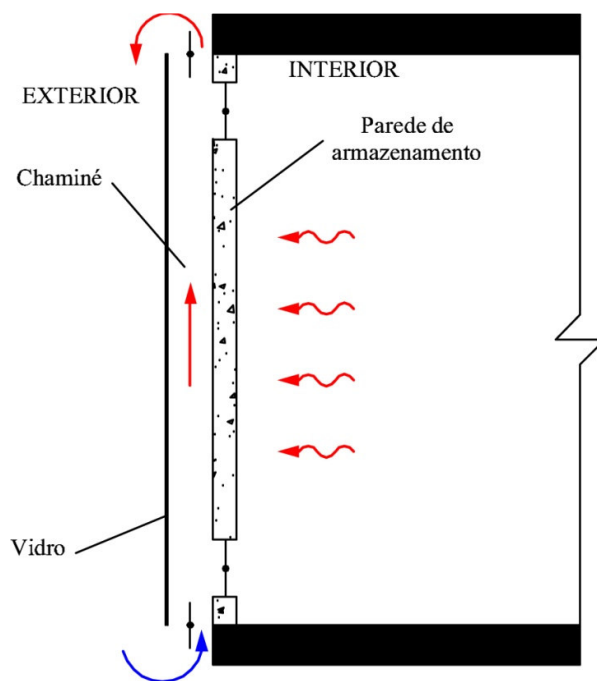


FIGURA 52 – Configuração 4 para o período de verão;

Observando a Tabela 8 nota-se que o menor valor do fator decremental foi para a configuração 3 ($\mu = 0,82$), seguida pela configuração 1 ($\mu = 1,00$). Quando adotado o fator decremental como critério de comparação das amplitudes térmicas dos protótipos, percebe-se que nas quatro configurações o fator decremental do protótipo 2 foi inferior ao do protótipo 1. A configuração 1 é a que possui a maior diferença entre fator decremental do protótipo com o 2 (0,40). Isso significa que a Parede Trombe fez com que a amplitude interna fosse inferior à do protótipo 1, ou seja, com melhor desempenho segundo esse critério.

Comparando as diferenças entre as temperaturas médias internas e externas (Tabela 8), a configuração 1 é a que mais se destaca, pois apresenta o maior valor dentre as do protótipo 2, como também a maior diferença de temperatura média entre os protótipos.

TABELA 8 - Resumo dos dados dos quatro dias padrão do verão

	Configuração 1			Configuração 2			Configuração 3			Configuração 4		
	Externa	Interna do protótipo 2	Interna do protótipo 1	Externa	Interna do protótipo 2	Interna do protótipo 1	Externa	Interna do protótipo 2	Interna do protótipo 1	Externa	Interna do protótipo 2	Interna do protótipo 1
Temperatura mínima	16,2	18,3	17,5	16,5	17,9	17,1	18,0	19,0	18,7	17,5	18,7	17,5
Temperatura máxima	27,4	29,5	33,2	25,8	27,9	29,5	28,4	27,5	29,9	26,4	29,9	31,9
Diferença entre a temperatura máxima interna e a máxima externa		2,1	5,8		2,1	3,7		-0,9	1,5		3,5	5,5
Fator Decremental	-	1,00	1,40	-	1,08	1,33	-	0,82	1,08	-	1,26	1,62
Média das temperaturas	20,7	23,5	24,2	20,2	22,4	22,5	21,1	22,1	22,6	21,7	24,1	24,1
Diferença entre temperatura interna e externa	-	2,8	3,5	-	2,2	2,4	-	1,0	1,5	-	2,4	2,3

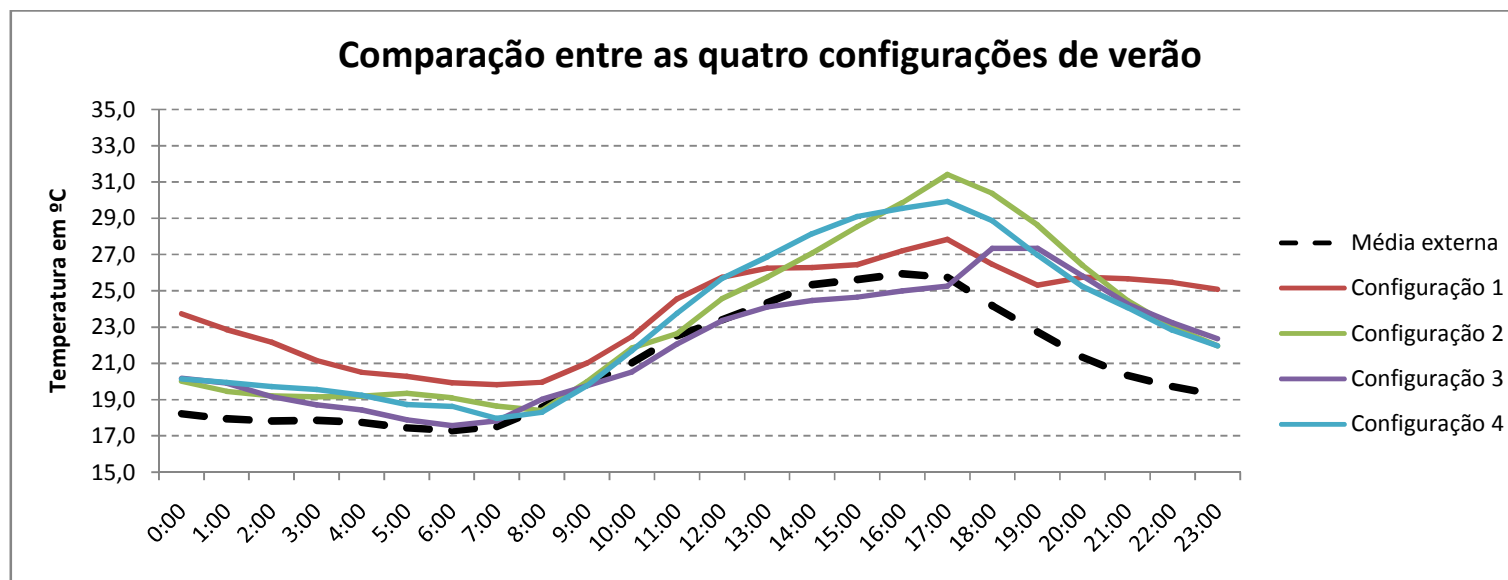
**FIGURA 53 - Comparação entre as temperaturas das quatro configurações, as temperaturas externas e as temperaturas médias do protótipo 1 para o dia padrão**

TABELA 9 - Comparação entre as temperaturas do protótipo 2 com o protótipo de referência (protótipo 1), para o verão

	Configuração 1	Configuração 2	Configuração 3	Configuração 4
Diferença entre as temperaturas mínimas	0,8	0,8	0,3	1,2
Diferença entre as temperaturas máximas	-3,7	-1,6	-2,4	-2,0
Diferença entre as temperaturas médias	-0,7	-0,1	-0,5	0,0

Para o verão, analisa-se a temperatura máxima (Tabela 8), verificando-se que a configuração 3 foi a única que apresentou uma temperatura máxima interna no protótipo 2 inferior à temperatura máxima externa (0,9°C). Destaca-se também a configuração 4, pois foi a que teve a maior diferença positiva (mostrando retenção de calor internamente) entre a temperatura máxima no protótipo 2 com relação ao exterior (3,5°C). Na Tabela 9 destaca-se a configuração 1 pois é na que possui a maior diferença entre as temperaturas máximas internas do protótipo 2 para o protótipo 1 (3,7°C), esta configuração também apresenta a maior diferença entre as temperaturas médias internas do protótipo 2 para o protótipo 1 (0,7°C).

Na Figura 53 pode-se perceber que a configuração 3 se destaca por permanecer abaixo da média externa das 10:00 até as 18:00, com maior benefício térmico durante o período do dia e, dentre as demais opções, as mais baixas temperaturas internas durante o dia.

Para as medições de verão também foi feito uma normal tomando-se como referência o protótipo 1 (Figura 54). Nesta comparação nota-se que todas as configurações possuem um comportamento semelhante durante a primeira metade do dia. Durante o restante do dia destaca-se a configuração 1 por possuir as menores temperaturas. Após as 13 horas todas as configurações tiveram uma temperatura inferior ao protótipo de referência, principalmente nos horários que a temperatura interna dos protótipos estava mais quente.

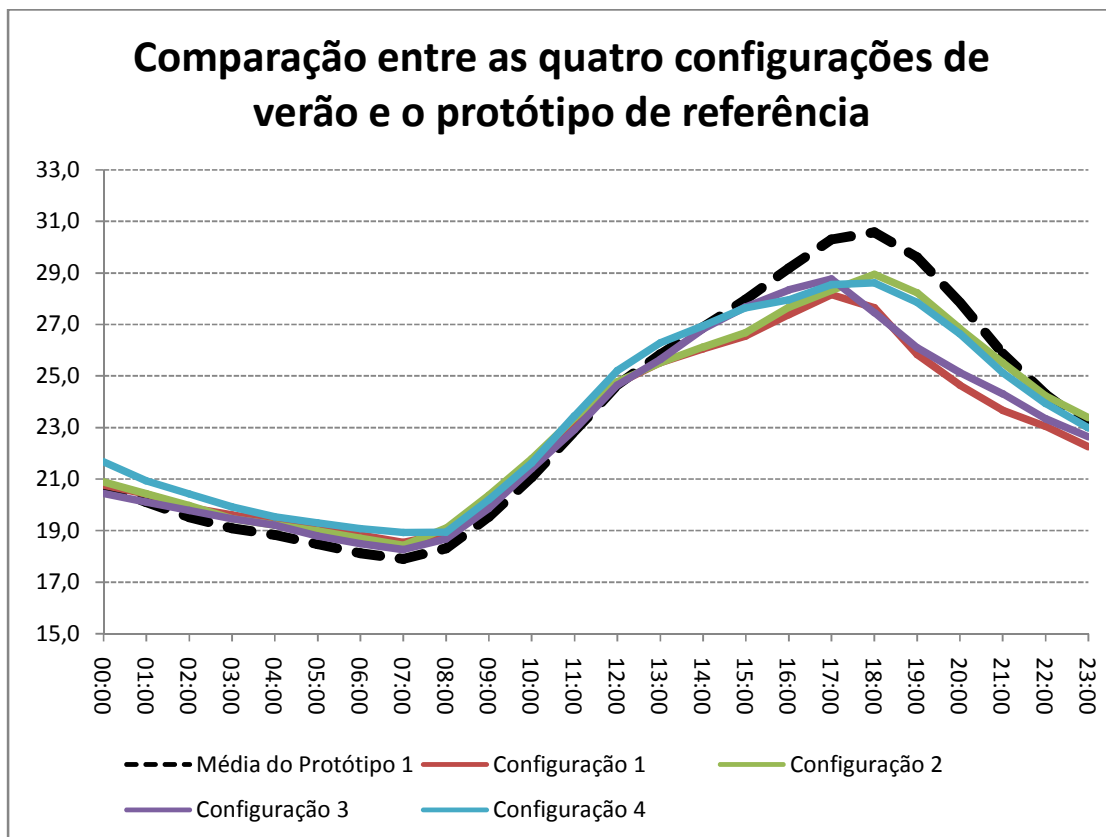


FIGURA 54 - Comparação entre as quatro configurações de verão e o protótipo de referência

5 CONCLUSÕES

O estudo mostrou que a utilização da Parede Trombe pode ser uma alternativa viável para Curitiba a fim de melhorar o desempenho térmico de uma edificação. Quando comparado com o protótipo sem Parede Trombe, o protótipo com este sistema apresentou bons resultados na maioria dos casos.

Para o inverno a temperatura mínima chegou a ficar 4,4°C acima da temperatura externa. Durante a madrugada, que é o período mais frio do dia, a Parede Trombe mostrou comparativamente melhor desempenho, mostrando que a parede de armazenamento acumulou calor durante o dia e o liberou para o interior durante a madrugada.

As medições de inverno mostraram que a configuração que obteve um melhor resultado é aquela em que a abertura 3 está fechada, e as aberturas 1, 2 e 4 abertas. Esta configuração faz com que o sol aqueça o ar dentro da chaminé. Havendo o aquecimento da coluna de ar, por sua densidade ser reduzida, há um efeito de termossifão. Nesta configuração, há também a entrada de ar pela abertura inferior da Parede Trombe, o que facilita a entrada de ar externo, aquecido pela superfície do terreno, sem que haja perdas significativas por esta abertura durante a noite. A configuração das aberturas da Parede Trombe mostrada na literatura para o período do dia (aberturas 1 e 3 fechadas e aberturas 2 e 4 abertas) obteve também um bom resultado, com uma diferença de desempenho principalmente no período da manhã onde aquela se destaca por aquecer o mais rapidamente o interior do protótipo.

Para o verão de Curitiba, o sistema também mostrou bom resultado, apesar do sistema ser aconselhado para condições de frio. Na comparação com o protótipo sem o sistema, o protótipo com a Parede Trombe, quando operado de forma adequada, pode neutralizar o efeito observado no inverno, com desempenho superior ao do protótipo padrão de concreto.

A configuração das aberturas da Parede Trombe sugerida pela literatura para o verão não foi a que obteve os melhores resultados para essa estação. A configuração que obteve melhores resultados foi a configuração 1, que simula uma Parede Trombe não ventilada (todas as aberturas fechadas). Nesta configuração, a parede de acumulação absorve calor do interior e da chaminé durante o dia, funcionando como massa térmica de resfriamento.

REFERÊNCIAS

ABIKO, Alex K. **Tecnologias apropriadas em construção civil**. Disponível em: <<http://alexabiko.pcc.usp.br/artigos/TecnologiasApropriadas.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2009.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220 – 1: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220 – 2: 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**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15220 – 3: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.

ABRAPEX, Associação Brasileira do Poliestireno Expandido. **Isolamento Térmico: Zoneamento Bioclimático Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.abrapex.com.br/11Conserv-Pg3.htm>>. Acesso em: 13 maio 2012. ANALYSIS BIO. Florianópolis: , Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, UFSC: 2010.

ANALYSIS SOL-AR. Florianópolis: , Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, UFSC: 2010.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**: 3. ed. Brasília, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689>. Acesso em: 12 fev. 2012.

AKUTSU, Maria.;VITTORINO, Fúlvio. **A tendência atual dos métodos de avaliação do desempenho térmico e energético de edificações** . Disponível em <<http://www.infohab.org.br> > Acesso em: 24 fev. 2002.

AXT, Rolando; BRÜCKMANN, Magale E. **O conceito de calor nos livros de ciências**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Florianópolis – SC, v. 6, n. 2, p.128-142, ago. 1989.

BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de Construção**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 2 v.

BINGGELI, Corky. **Building systems for interior designers**. Canadá: John Wiley And Sons, 2003.

BITTENCOURT, Leonardo. **Uso Das Cartas Solares: Diretrizes Para Arquitetos**. Maceió: Universidade Federal de Alagoas, 1988.

BOOTH, Robert H.; SHAW, Roy L. **Principios De Almacenamiento De Papa**. Lima: Centro Internacional de la Papa, 1989.

BRAGA FILHO, Washington. **Transmissão de calor**. São Paulo: Pioneira, 2004. 614 p.

CASTRO, Adriana P. de A. S.; LABAKI, Lucila C.; CARAM, Rosana M.; BASSO, Admir; FERNANDES, Mauro R. **Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 3, n. 2, p.69-76, mai/jun. 2003.

CHEL, Arvind; NAYAK, J.K.; KAUSHIK, Geetanjali; **Energy conservation in honey storage building using Trombe wall**. Energy and Buildings, 2008.

CHEN Bin; CHEN, Huijuan; MENG, Shirong; CHEN Xin.; SUN, Peng, DING Yinghui; **The effect of Trombe wall on indoor humid climate in Dalian, China**. Science Direct, 2005.

CORATO, Lucas L.; NAKANISHI, Tatiana M.; CARAM, Rosana. M. **Inovações tecnológicas em fachadas transparentes a partir da década de 70**. In: ENCAC, VI., 2001, São Pedro, SP.

CRUZ, Eduardo G.; KOVACH, Axa V. R.; MORALES, Gaudy C. B.; GALLARDO, Magalis; GÓMEZ, Rosalinda G.; LAURENS, Lesvia P.; BOHORQUEZ, Elisabeth T.; FLACÓN, Rafael. **Desempeño térmico de la VBP-1: temperaturas características, factor decremental y retraso térmico**. Maracaibo - Venezuela: Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño (IFAD), Univerdidad del Zulia, Núcleo Técnico de LUZ., 2008.

COSTA, Ennio C. da. **Física aplicada à construção: conforto térmico**. 3. ed. rev. e ampl. São Paulo: E. Blücher; c1974. 260 p.

DOSSAT, Roy J.; TORREIRA. Raul P.; **Princípios De Refrigeração: Teoria, Prática, Exemplos, Problemas, Soluções**. São Paulo: Hemus, 2004.

FROTA, Anésia. B.; SCHIFFER, Sueli. T. R. **Manual de conforto térmico: Arquitetura, Urbanismo**. 8. ed. São Paulo: Nobel, 2007. 243 p.

GAN, Guohui; **A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings**. Energy and Buildings, 1998.

GIVONI, Baruch. **Man, Climate and Architecture**. 2ª edição. Applied Science Publishers Ltd.,1976, London.

GIVONI, Baruch. **Confort, climate analysis and building design guidelines**. Energy and

Building, 3 ed. Princeton, University Press, 1992.

GOMES, Miguel A. G., **Construção Sustentável Contributo da Utilização da Parede Trombe**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011

GONÇALVES, Helder; GRAÇA, João M.; **Conceitos bioclimáticos para os edifícios em Portugal**. Lisboa, Nov. 2004.

HEWITT, Paul G.; RICCI, Trieste F.; GRAVINA, Maria H.; CAVALCANTI, Cláudio J. H. **Física Conceitual**. Porto Alegre: 2008.

HOPKINSON, Ralph G.; PETHERBRIDGE, Peter; LONGMORE, James. **Iluminação Natural**. 1975 Calouste Gulbenkian, Lisboa, 776p.

INSTITUTO JATOBÁS (Pardinho – Sp). **Centro de Cultura Max Feffer**. Disponível em: <<http://www.centrodeculturamaxfeffer.org.br/>>. Acesso em: 21 nov. 2010.

ISOCOR AGLOMERADOS DE CORTIÇA A.C.E., **A importância do atraso térmico na transmissão de calor**. Disponível em: <<http://www.projectista.pt/empresa/isocor/>> Acesso em: 05 dez. 2010.

KOENIGSBERGER, Otto H.; INGERSOLL, T.G.; MAYHEW, A.; SZOKOLAY, S.V. **Manual of tropical housing and building**. London, Longman, 1980.

KREITH, Frank; KREIDER, Jan F. **Principles of Sustainable Energy**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2011.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 1997.

LAMBERTS, Roberto; GHISI, Eneid; ABREU, Ana L. P. de; CARLO, Joyce C. **Desempenho térmico de edificações**. Universidade Federal De Santa Catarina: Laboratório De Eficiência Energética Em Edificações, 2005.

LIPING, Wang; ANGUI, Li; **A numerical Study of Trombe Wall for Enhancing Stack Ventilation in Buildings**. Geneve: The 23^o Conference on Passive and Low Energy Architecture, 2006.

LOURENÇO, Sérgio R.; **Energia Solar na climatização passiva do ambiente construído** Exacta, São Paulo - SP, v. 5, n. 2, p.253-258, jul./dez. 2007.

MAGALHÃES, Manoelita; FERREIRA, Ricardo; GROSSI, Pablo; ANDRADE, Roberto. **Medição da difusividade térmica da dentina humana utilizando o método do flash de laser.** Disponível em <http://biblioteca.cdtm.br/cdtm/arpel/adobe/Conference_Pablo_AGrossi.pdf> Acesso em: 11 fev. 2012.

MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil.** São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007.

MENDONÇA, Paulo J. F. A. U.; **Habitar sob uma segunda pele: Estratégias para a Redução do Impacto Ambiental de Construções Solares Passivas em Climas Temperados.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, 2005.

MICHELENA, Luiz F.; **Lanternins.** Disponível em: <<http://www.construcaoecia.com.br/conteudo.asp?ed=61&cont=677>>. Acesso em: 5 maio 2011.

MILNE, Murray; GIVONI, Baruch. **Energy Conservation Through Building Design, Architectural Design Based on Climate,** in D. Watson (ed.), McGraw-Hill, Inc. New York, NY: 1979.

MORSE, Edward L.; **Warming and Ventilating Apartments by Sun's Rays,** U. S. Patent 246,626. 1881

OLGYAY, Victor. **Design with Climate.** New Jersey: Princeton University Press, 1963.

ONSET COMP BRASIL. **Estação Meteorológica Básica.** Disponível em: <<http://www.onsetcompbrasil.com.br/>>. Acesso em: 12 fev. 2012.

_____. **Design With Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism.** Princeton University Press, Princeton, 1963.

PERIN, Aryston L., **Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade.** 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

REI, João M. da S. **A arquitetura solar passiva: O Sol e a Terra em ação de afluência.** 175 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade da Beira Interior, Covilha: Portugal, 2009.

RIVERO, Roberto. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural.** 2º ed. rev. e ampliada. Porto Alegre: D.C. Luzzatto Editores, 1986.

ROCHETA, Vera; FARINHA, Fátima. **Práticas de Projecto e Construtivas para a Construção Sustentável**. Congresso de Construção 2007, Coimbra - Portugal, 17 a 19 dez. 2007.

RORIZ, Maurício. **Zona de conforto térmico** – Um estudo comparativo de diferentes abordagens. São Carlos, 1987. 133 f. Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação do Departamento de Arquitetura e Planejamento) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, USP.

RUAS, Álvaro C.; LABAKI, Lucila C. **Ventilação do ambiente e o conforto térmico**. In: ENCAC, VI., 2001, São Pedro, SP.

RYBCZYNSKI, Witold. **Casa: pequena história de uma idéia**. Rio de Janeiro: Record, c1986.

SCHMID, Aloísio L. **A idéia do conforto: reflexões sobre o ambiente construído**. Curitiba: Pacto Ambiental, 2005. 339 p.

SCHUMACHER, Ernest F. **Small is beautiful**. Reino Unido: Vintage, 1973.

SIAS, Denise B.; TEIXEIRA, Rejane M. R. **Energia interna, calor, temperatura...** Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas – CEFET-RS . Disponível em: <<http://www2.pelotas.ifsul.edu.br/denise/caloretemperatura/index.html>>. Acesso em: 08 nov. 2009.

SOISSON, Harold E.; **Instrumentation in Industry**. New York: Wiley, 1975.

THAMES, Francis. **DIY Double Glazing**. Disponível em: <http://auctionbank.blogspot.com/2011/04/diy-double-glazing.html?utm_source=feedburner&utm_medium=feed&utm_campaign=Feed%3A+blogspot%2FJJKlh+%28Rumah+Lelong%29&utm_content=Google+International>. Acesso em: 05 jun. 2011.

TOLEDO, Alexandre. **Critérios para o dimensionamento de aberturas de ventilação natural dos edifícios**. In: ENCAC, VI., 2001, São Pedro, SP.

VANDERLEI, Paula S. S.; CARAM, Rosana M.; **Vidros translúcidos utilizados nas fachadas das edificações e sua preocupação com o conforto ambiental**. Revista Tecnológica, 2007.

VECTUS. **Registrador HOBO - Série H08 - H08-003-02**. Disponível em: <<http://vectus.com.br/registrador/registrador-temperatura-umidade-relativa/registrador-hobo-serieh08-h0800302.html>>. Acesso em: 05 jun. 2011.

Vida maria. **Adaptação da clarabóia da Oficina Cultural Oswald de Andrade.** Disponível em: <<http://www.vidamaria.com.br/?p=273>>. Acesso em: 20 nov. 2010.

YANNAS, Simos; MALDONADO, Eduardo; ADNOT, Jerome; KRAINER, Aleš. **Designing for Summer Comfort : Heat Gain Control and Passive Cooling ff Buildings : A European Handbook from the EU Pascool Project.** Architectural Association Graduate School, Londres, 1995.

SZOKOLAY, Steven V. **Introduction to Architectural Science: The Basis of Sustainable Design.** Amsterdam: Elsevier Architectural Press, 2008.

APÊNDICE A

Para calcular a capacidade térmica e o atraso térmico dos materiais foram feitos os cálculos conforme a NBR 15220-2(2005). A capacidade térmica de cada componente é calculada pela expressão:

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i \quad (1)$$

Onde:

e_i é a espessura da camada i ;

c_i é o calor específico do material da camada i ;

ρ_i é a densidade de massa aparente do material da camada i .

Para elementos que possuem mais de um material, são chamados de não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, cada componente deve ter sua capacidade térmica calculada separadamente pela expressão (1), e a capacidade térmica total do elemento pela expressão:

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{T_a}} + \frac{A_b}{C_{T_b}} + \dots + \frac{A_n}{C_{T_n}}} \quad (2)$$

Onde:

A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção;

$C_{T_a}, C_{T_b}, \dots, C_{T_n}$ são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela expressão (1).

O atraso térmico, quando o elemento tiver apenas um material, é calculado pela expressão (3) ou pela (4). Quando possuem "n" materiais no sentido perpendicular ao fluxo de calor é dado pela expressão (5).

$$\varphi = 1,382. e \sqrt{\frac{\rho c}{36\lambda}} \quad (3)$$

$$\varphi = 0,7284 \sqrt{R_T C_T} \quad (4)$$

$$\varphi = 1,382. R_T \sqrt{B_1 + B_2} \quad (5)$$

Quando o valor de B_2 for negativo ele será descartado, sendo:

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_T} \quad (6)$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \rho c)_{ext}}{R_T} \right) \cdot \left(R_{ext} - \frac{R_T - R_{ext}}{10} \right) \quad (7)$$

$$B_0 = C_T - C_{T_{ext}} \quad (8)$$

Onde:

R_T é resistência térmica de superfície a superfície do componente;

C_T é a capacidade térmica total do componente;

$C_{T_{ext}}$ é a capacidade térmica da camada externa do componente.

Para o calculo do atraso térmico é necessário o cálculo da resistividade térmica total de um componente, que é dado pelas expressões (9) e (10), quando há apenas um material, ou seja , uma camada homogênea.

$$R_T = R_{T_1} + R_{T_2} + \dots + R_{T_n} + R_{ar1} + R_{ar2} + \dots + R_{arn} \quad (9)$$

$$R_t = R_{se} + R_T + R_{si} \quad (10)$$

Sendo:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (11)$$

Onde:

$R_{T_1}, R_{T_2}, \dots, R_{T_n}$ são as resistência térmica das n camadas homogêneas;

$R_{ar1}, R_{ar2}, \dots, R_{arn}$ são as resistência térmica das n camadas de ar obtidas pela Tabela xx;

R_{se} é a resistência térmica da superfície externa, obtida pela Tabela xx;

R_{si} é a resistência térmica da superfície interna, obtida pela Tabela xx;

λ é a condutividade térmica do material.

TABELA A1 - Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura.

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura "e" da câmara de ar (cm)	Resistência térmica R_{ar} (m ² .K/W)		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
		→	↑	↓
Superfície de alta emissividade $\varepsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\varepsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

Notas:

1. ε é emissividade hemisférica total.
2. Os valores para câmaras de ar com uma superfície refletora só podem ser usados se a emissividade da superfície for controlada e previsto que a superfície continue limpa, sem pó, gordura ou água de condensação.
3. Para coberturas, recomenda-se a colocação da superfície refletora paralelamente ao plano das telhas; desta forma, garante-se que pelo menos uma das superfícies- a inferior- continuará limpa, sem poeira.
4. Caso, no processo de cálculo, existam câmaras de ar com espessura inferior a 1,0cm, pode-se utilizar o valor mínimo fornecido pela tabela.

Fonte: NBR 15220 (2005).

TABELA A2 - Resistência térmica superficial interna e externa

R_{se} (m ² .K/W)			R_{se} (m ² .K/W)		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
→	— ↑	↓ —	→	— ↑	↓ —
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: NBR 15220 (2005).

A resistência térmica para camadas não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é dada pela expressão (12).

$$R_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (12)$$

Onde:

A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção;

R_a, R_b, \dots, R_n são as resistências térmicas de superfície para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela expressão (9).

O primeiro tipo de vedação vertical testado é o bloco cerâmico, ele possui 9cm de largura, 14cm de altura e 24cm de comprimento, é um bloco de 6 furos e cada furo tem 3cm x 3cm. Não há reboco interno nem reboco externo e as juntas entre os tijolos têm 1cm (Figura A1). Para fins de cálculo divide-se o bloco em 3 seções, A, B e C como mostra a Figura A2.

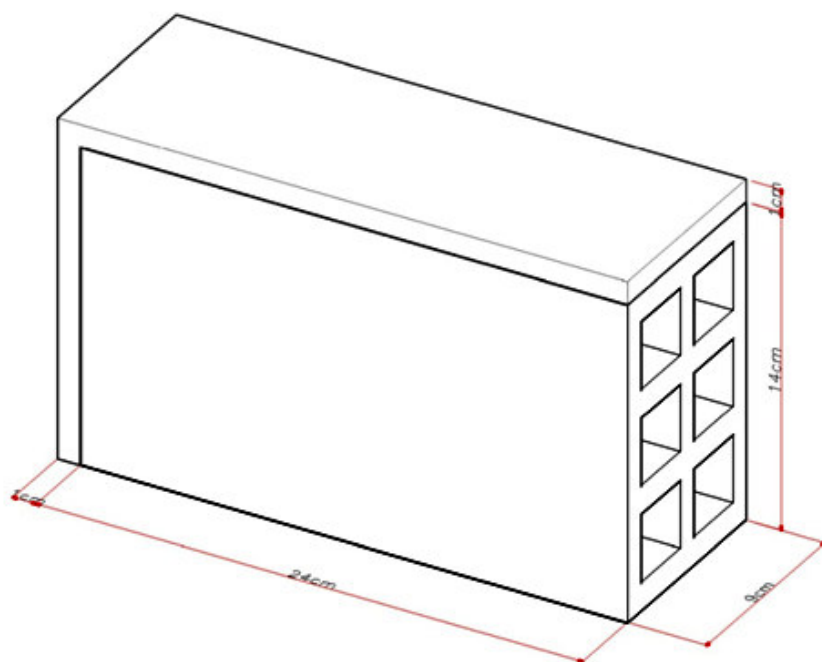


FIGURA A1 - Bloco cerâmico testado

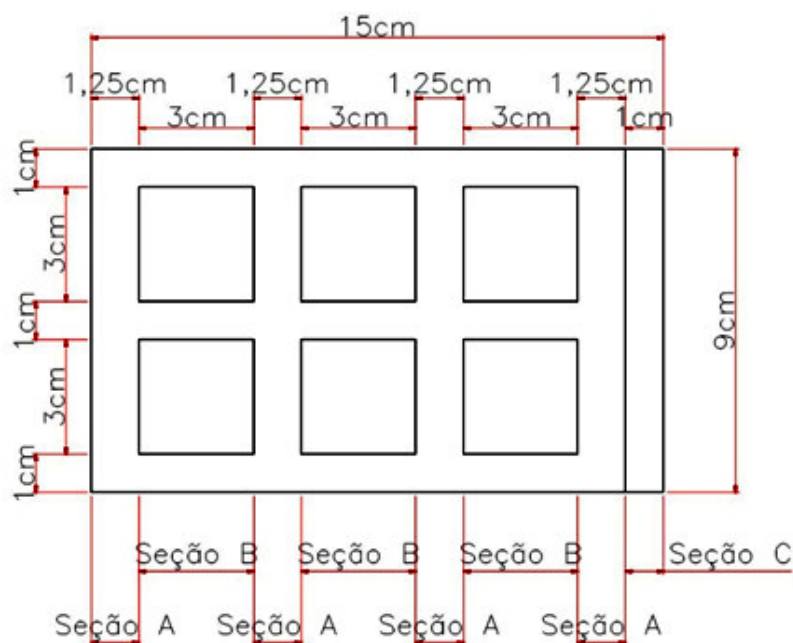


FIGURA A2 - Dimensões e divisão das seções do bloco cerâmico testado

Para o cálculo da capacidade térmica será utilizado as expressões (1) e (2), segundo a NBR 15220-2 a densidade de massa aparente do bloco cerâmico é 1600kg/m^3 , a densidade de massa aparente da argamassa usada nas juntas é 2000kg/m^3 , o calor específico do bloco cerâmico é $0,92\text{kJ}/(\text{kg.K})$ e o calor específico da argamassa usada nas juntas é $1,00\text{kJ}/(\text{kg.K})$.

Seção A (bloco cerâmico):

$$C_{T_a} = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i = 0,09 * 0,92 * 1600 = 132,48\text{kJ}/(\text{m}^2.K)$$

$$A_a = 0,0125 * 0,24 = 0,0030\text{m}^2$$

Seção B (bloco cerâmico+câmara de ar não ventilada+ bloco cerâmico+ câmara de ar não ventilada + bloco cerâmico):

$$C_{T_b} = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i = 0,01 * 0,92 * 1600 + 0 + 0,01 * 0,92 * 1600 + 0 + 0,01 * 0,92 * 1600$$

$$C_{T_b} = 44,16\text{kJ}/(\text{m}^2.K)$$

$$A_b = 0,03 * 0,24 = 0,0072\text{m}^2$$

Seção C (argamassa):

$$C_{T_c} = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i = 0,09.1.2000 = 180,00\text{kJ}/(\text{m}^2.K)$$

$$A_c = 0,01 * 0,24 + 0,01 * 0,15 = 0,0039\text{m}^2$$

Portanto a capacidade térmica da parede será:

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{T_a}} + \frac{A_b}{C_{T_b}} + \dots + \frac{A_n}{C_{T_n}}} = \frac{(4 * 0,003) + (3 * 0,0072) + (1 * 0,0039)}{\frac{(4 * 0,003)}{132,48} + \frac{(3 * 0,0072)}{44,16} + \frac{(1 * 0,0039)}{180}}$$

$$C_T = 62,3569\text{kJ}/(\text{m}^2.K)$$

O cálculo da resistência térmica será feita usando as expressões (9) e (11), segundo a NBR 15220-2 a condutividade térmica do bloco cerâmico é $0,90\text{W}/\text{m.K}$ e a condutividade térmica da argamassa usada nas juntas é $1,15\text{W}/\text{m.K}$. Segundo a Tabela A1, para esta situação o R_{ar} é igual a $0,16 (\text{m}^2.K)/\text{W}$.

Seção A (bloco cerâmico):

$$R_a = \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} = \frac{0,09}{0,9} = 0,1(m^2 \cdot K)/W$$

$$A_a = 0,0125 * 0,24 = 0,0030m^2$$

Seção B (bloco cerâmico+câmara de ar não ventilada+ bloco cerâmico+ câmara de ar não ventilada + bloco cerâmico):

$$R_b = \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}}$$

$$R_b = \frac{0,01}{0,9} + 0,16 + \frac{0,01}{0,9} + 0,16 + \frac{0,01}{0,9} = 0,3533(m^2 \cdot K)/W$$

$$A_b = 0,03 * 0,24 = 0,0072m^2$$

Seção C (argamassa):

$$R_c = \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} = \frac{0,09}{1,15} = 0,0783(m^2 \cdot K)/W$$

$$A_c = 0,01 * 0,24 + 0,01 * 0,15 = 0,0039m^2$$

Portanto a resistência térmica da parede será:

$$R_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} = \frac{(4 * 0,003) + (3 * 0,0072) + (1 * 0,0039)}{\frac{(4 * 0,003)}{0,1} + \frac{(3 * 0,0072)}{0,3533} + \frac{(1 * 0,0039)}{0,0783}}$$

$$R_T = 0,1624(m^2 \cdot K)/W$$

A resistência total é calculada utilizando os dados da Tabela A2 e a expressão (10):

$$R_t = R_{se} + R_T + R_{si} = 0,13 + 0,1624 + 0,04 = 0,3324(m^2 \cdot K)/W$$

Com resistência térmica de superfície a superfície, pode-se calcular o atraso térmico com as expressões (5), (6), (7) e (8).

$$B_0 = C_T - C_{T_{ext}} = C_T - (e_{T_{ext}} c_{T_{ext}} \rho_{T_{ext}}) = 62,3569 - (0,01 * 1600 * 0,92) = 47,6369$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_T} = 0,226 \cdot \frac{47,6369}{0,1624} = 66,3083$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \rho c)_{ext}}{R_T} \right) \cdot \left(R_{ext} - \frac{R_T - R_{ext}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(0,9 \cdot 1600 \cdot 0,92)}{0,1624} \right) \cdot \left(\frac{0,01}{0,9} - \frac{0,1624 - \left(\frac{0,01}{0,9} \right)}{10} \right) = -6,7142$$

Como B_2 é negativo ele será descartado.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_T \cdot \sqrt{B_1 + B_2} = 1,382 \cdot 0,1624 \cdot \sqrt{66,3083}$$

$$\varphi = 1,8276 \text{ horas}$$

O segundo tipo de vedação vertical testado é o bloco de concreto, ele possui 9cm de largura, 19cm de altura e 39cm de comprimento, é um bloco com 2 furos e cada furo tem 4cm x 15,75cm. Nas paredes não há reboco interno nem reboco externo e as juntas entre os tijolos têm 1cm (Figura A3). Para fins de cálculo divide-se o bloco em 3 seções, A, B e C como mostra a Figura A4.

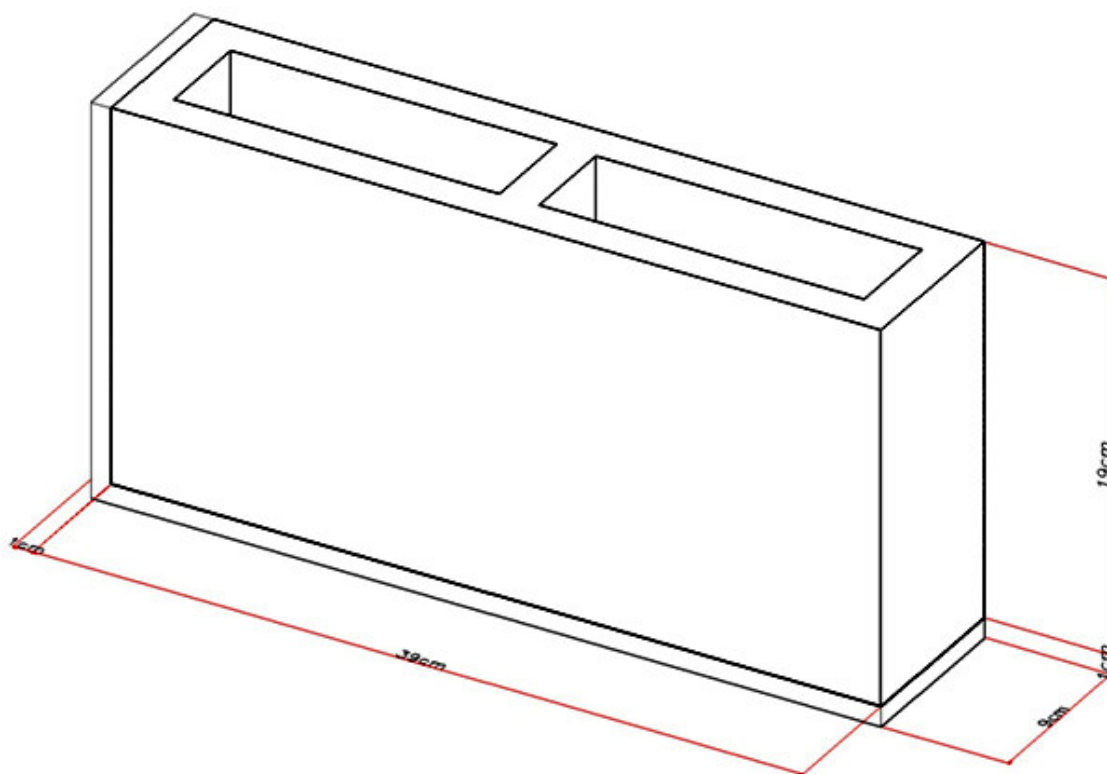


FIGURA A3 - Bloco de concreto testado

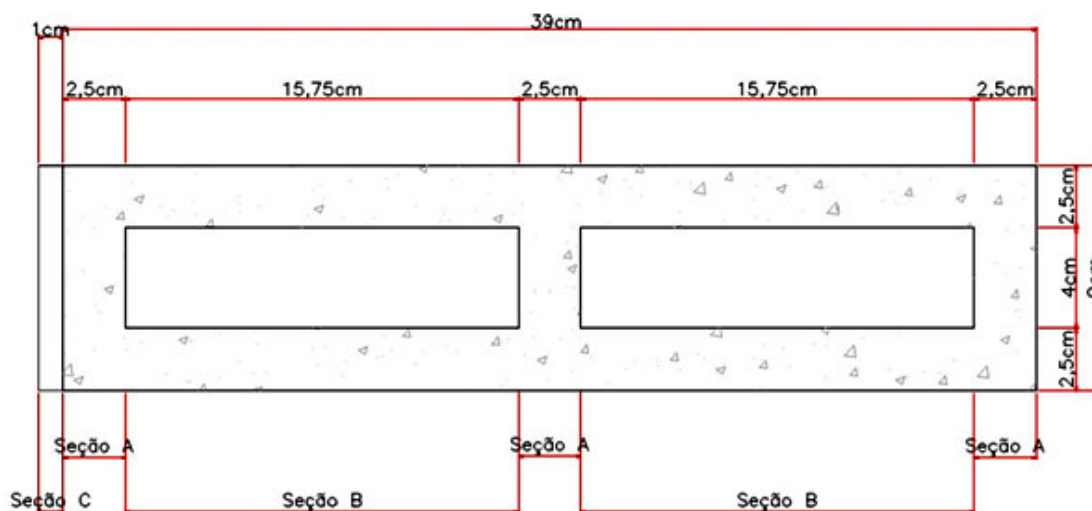


FIGURA A4 - Dimensões e divisão das seções do bloco de concreto testado

Para calcular a capacidade térmica serão usadas as expressões (1) e (2), segundo a NBR 15220-2 a densidade de massa aparente do bloco de concreto é 2400kg/m^3 , a densidade de massa aparente da argamassa usada nas juntas é 2000kg/m^3 , o calor específico do bloco de concreto é $1,00\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ e o calor específico da argamassa usada nas juntas é $1,00\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.

Seção A (bloco de concreto):

$$C_{T_a} = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i = 0,09 * 1,00 * 2300 = 216\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$A_a = 0,025 * 0,19 = 0,00475\text{m}^2$$

Seção B (bloco de concreto + câmara de ar não ventilada bloco de concreto):

$$C_{T_b} = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i = 0,025 * 1,00 * 2300 + 0 + 0,025 * 1,00 * 2300 = 120\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$A_b = 0,1575 * 0,24 = 0,02993\text{m}^2$$

Seção C (argamassa):

$$C_{T_c} = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i = 0,09 \cdot 1 \cdot 2000 = 180,00\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$A_c = 0,01 * 0,39 + 0,01 * 0,20 = 0,0059\text{m}^2$$

Portanto a capacidade térmica da parede será:

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{T_a}} + \frac{A_b}{C_{T_b}} + \dots + \frac{A_n}{C_{T_n}}} = \frac{(3 * 0,00475) + (2 * 0,02993) + (1 * 0,0059)}{\frac{(3 * 0,00475)}{216} + \frac{(2 * 0,02993)}{120} + \frac{(1 * 0,0059)}{180}}$$

$$C_T = 133,8912 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

O cálculo da resistência térmica será feita usando as expressões (9) e (11), segundo a NBR 15220-2 a condutividade térmica bloco de concreto é 0,90W/m.K e a condutividade térmica da argamassa usada nas juntas é 1,15W/m.K. Segundo a Tabela A1, para esta situação o R_{ar} é igual a 0,16(m².K)/W.

Seção A (bloco de concreto):

$$R_a = \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} = \frac{0,09}{1,75} = 0,514(\text{m}^2 \cdot \text{K})/W$$

$$A_a = 0,025 * 0,19 = 0,00475 \text{ m}^2$$

Seção B (bloco de concreto +câmara de ar não ventilada+ bloco de concreto + câmara de ar não ventilada + bloco de concreto):

$$R_b = \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}} + R_{ar} + \frac{e_{concreto}}{\lambda_{concreto}}$$

$$R_b = \frac{0,025}{1,75} + 0,16 + \frac{0,025}{1,75} = 0,1886(\text{m}^2 \cdot \text{K})/W$$

$$A_b = 0,1575 * 0,24 = 0,02993 \text{ m}^2$$

Seção C (argamassa):

$$R_c = \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} = \frac{0,09}{1,15} = 0,0783(\text{m}^2 \cdot \text{K})/W$$

$$A_c = 0,01 * 0,39 + 0,01 * 0,20 = 0,0059 \text{ m}^2$$

Portanto a resistência térmica da parede será:

$$R_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} = \frac{(3 * 0,00475) + (2 * 0,02993) + (1 * 0,0059)}{\frac{(3 * 0,00475)}{0,514} + \frac{(2 * 0,02993)}{0,1886} + \frac{(1 * 0,0059)}{0,0783}}$$

$$R_T = 0,1194(\text{m}^2 \cdot \text{K})/W$$

A resistência total é calculada utilizando os dados da Tabela A2 e a expressão (10):

$$R_t = R_{se} + R_T + R_{si} = 0,13 + 0,1194 + 0,04 = 0,2824(m^2 \cdot K)/W$$

Com resistência térmica de superfície a superfície, podemos calcular o atraso térmico com as expressões (5), (6), (7) e (8).

$$B_0 = C_T - C_{T_{ext}} = C_T - (e_{T_{ext}} c_{T_{ext}} \rho_{T_{ext}}) = 133,8912 - (0,025 * 2400 * 1,00) = 73,8912$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_T} = 0,226 \cdot \frac{73,8912}{0,1194} = 139,8281$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \rho c)_{ext}}{R_T} \right) \cdot \left(R_{ext} - \frac{R_T - R_{ext}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(1,75 * 2400 * 1,00)}{0,1194} \right) \cdot \left(\frac{0,025}{1,75} - \frac{0,1194 - \left(\frac{0,025}{1,75} \right)}{10} \right) = 27,1898$$

Como B_2 é positivo ele não será descartado.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_T \sqrt{B_1 + B_2} = 1,382 * 0,1194 * \sqrt{139,8281 + 27,1898}$$

$$\varphi = 2,133 \text{ horas}$$

Outros materiais foram usados nesta pesquisa e aqui serão calculados a capacidade térmica de cada componente dos protótipos:

O piso de ambos os protótipos tem dimensões de 10cm de altura, 180cm de largura e 180cm de profundidade. Para este cálculo será usada a expressão (1). Segundo a NBR 15220-2 a densidade de massa aparente do concreto é 2400kg/m³ e o calor específico do concreto é 1,00kJ/(kg.K).

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i = 0,1 * 1,00 * 2400 = 240kJ/(m^2 \cdot K)$$

A laje possui dois materiais concreto com 10cm de altura e isopor com 5cm de altura, a largura da laje é de 180cm e a profundidade 180cm. Para este cálculo de capacidade térmica será usada a fórmula (1). Os valores de densidade de massa aparente e calor específico do concreto serão usados os mesmos dos usados no cálculo da laje. A densidade de massa aparente do isopor é 25kg/m³ e o calor específico do isopor é 1,42kJ/(kg.K) (NBR 15220-2, 2005).

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i = (0,1 * 1,00 * 2400) + (0,05 * 1,42 * 25) = 241,775 kJ/(m^2 \cdot K)$$

O vidro duplo é constituído de vidro com 4cm de espessura, uma câmara de ar não ventilada de 8cm de espessura e vidro com espessura de 5cm. para este cálculo de capacidade térmica será usada a fórmula (1). Sendo a densidade de massa aparente do vidro igual a 2500kg/m³ e o calor específico do vidro igual a 0,84kJ/(kg.K) (NBR 15220-2 , 2005).

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i = (0,04 * 0,84 * 2500) + 0 + (0,05 * 0,84 * 2500) = 189 kJ/(m^2 \cdot K)$$

A parede de armazenamento vai ser calculada com os mesmos dados do bloco de concreto, utilizando a fórmula (1) e espessura de 24cm.

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i = 0,24 * 1,00 * 2400 = 576 kJ/(m^2 \cdot K)$$

O alumínio tem espessura de 2mm, e o cálculo de capacidade térmica será usada a fórmula (1). Sendo a densidade de massa aparente do alumínio igual a 2700kg/m³ e o calor específico do alumínio igual a 0,88kJ/(kg.K) (NBR 15220-2 , 2005).

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i c_i \rho_i = 0,002 * 0,88 * 2700 = 0,04752 kJ/(m^2 \cdot K)$$