

ELABORAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO SIMPLIFICADO PARA ESTIMAR A TEMPERATURA INTERNA EM AMBIENTES DOTADOS DE PAREDES TROMBE

Fernando Sá Cavalcanti (1); Rosana Maria Caram (2)

(1) Arquiteto, Professor da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas – UFAL. fernandoantonio@ctec.ufal.br.

(2) Física, Docente do Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo do Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo – USP. rcaram@sc.usp.br

RESUMO

Este trabalho apresenta uma série de modelos matemáticos simplificados de modo a permitir que profissionais de projeto definam o desempenho térmico de edificações dotadas de paredes trombe para o caso de localizadas no Brasil, pois ainda há poucos estudos sobre o tema quando se refere a esta localidade. A parede trombe consiste em uma “estufa” entre uma parede de alta inércia térmica com aberturas inferiores e superiores e uma superfície envidraçada por onde o ambiente mantém contato com o exterior. Este dispositivo é capaz de absorver energia proveniente da radiação solar aquecendo o ar nesta estufa e este ar aquecido pode ser direcionado para o interior ou exterior da edificação a depender da finalidade. Este ar pode ser usado para aquecer o ambiente ou resfriá-lo por meio da ventilação natural. A metodologia para esta pesquisa se deu a partir da análise comparativa de uma série de simulações utilizando o software energyplus, versão 7.0 e em seguida tratamento estatístico para determinar a correlação entre as variáveis obtidas e consequentemente definir os modelos matemáticos. Os resultados apresentaram equações que permitem que o usuário estime a temperatura interna em ambientes que possuam paredes trombe em sua composição projetual sem que haja necessidade de simulações computacionais, o que demandaria profissionais qualificados e maiores custos no processo de projeto, além do prazo para modelagem do projeto em ambiente virtual de simulação.

Palavras-chave: Paredes trombe, Modelo Simplificado, Energyplus.

ABSTRACT

This paper presents a series of simplified mathematical models to allow design professionals define the thermal performance of buildings equipped with trombe walls in case located in Brazil, because there are few studies on the subject when referring to this location. The trombe wall consists of a "greenhouse" between a high thermal inertia wall with upper and lower openings and a glazed area where the environment is in contact with the outside. This device is capable of absorbing energy from solar radiation heating the air in this greenhouse and the heated air can be directed to the interior or exterior of the building depending on the purpose. This air can be used to heat or cool the environment it through natural ventilation. The methodology for this research was made from a comparative analysis of a series of simulations using EnergyPlus software, version 7.0, and then statistical processing to determine the correlation between values obtained and thus define the mathematical models. The results presented equations that allow the user to estimate the internal temperature in environments that have trombe walls in your projetual composition without the need of computer simulations, which would require skilled and higher costs in the design process, after the deadline for project modeling simulation virtual environment

Keywords: Trombe Walls, Statistic Models, Energyplus.

1. INTRODUÇÃO

As paredes trombe evoluíram de uma parede grossa com vidro na frente, em que a maior parte do calor era perdido e não chegava ao interior do edifício, para a versão moderna que possui ventilações no topo e na base da caixa de ar, que permitem o arrefecimento rápido do coletor e maximiza os ganhos obtidos. Segundo Balcomb (1998), o desempenho de uma parede trombe pode cair cerca de 40% caso ela não esteja aberta para o ambiente interno e a parede trombe deve estar livre de elementos como armários, dry-wall ou elementos que possam impedir a transferência de calor por radiação da parede para a zona interna.

A Figura 1 ilustra a composição deste sistema construtivo de modo a facilitar o entendimento de suas partes e seu processo de funcionamento. Neste esquema é possível observar a superfície envidraçada (a), com espessura geralmente entre 02 e 06 milímetros, que será responsável em promover o efeito estufa na câmara de ar (b) entre o vidro e a parede interna com alta massa térmica (c). Esta parede apresenta-se usualmente com alta absorvência térmica, de modo a otimizar o acúmulo de calor na câmara de ar e conseqüentemente o aquecimento do ar nesta região do componente analisado.

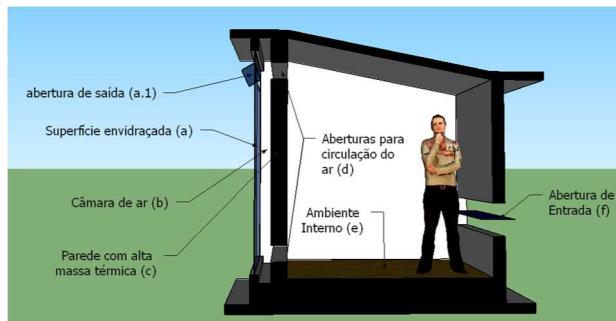


Figura 1 - Corte esquemático de uma Parede Trombe

Esta parede apresenta duas aberturas para circulação do ar (d), sendo uma inferior para entrada do ar frio que vai ser aquecido na câmara de ar devido ao efeito estufa e outra superior para passagem do ar aquecido para o ambiente interno (e) que será ocupado pelos usuários e se tornará objeto de estudo deste trabalho no que tange o desempenho térmico de edificações. O ambiente interno apresenta uma abertura para entrada do ar (f) na face oposta à face onde localiza-se a parede trombe, permitindo a renovação de ar neste espaço e remoção do ar aquecido nos momentos em que este procedimento se faz necessário. A superfície envidraçada também pode apresentar uma abertura em sua região superior (a.1) para exaustão do ar aquecido, possibilitando tomar partido da ventilação natural nos meses mais quentes do ano.

O funcionamento de uma parede trombe é essencialmente simples: A radiação solar é absorvida pelo vidro que compõe a face exterior da parede, este material permite que a radiação de onda curta o atravesse e aqueça a face externa da parede com alta inércia térmica que apresenta alta absorvência.

Ao aquecer, a parede com alta inércia térmica reemite calor para a câmara de ar existente neste sistema, produzindo-se o chamado "efeito estufa". Este efeito estufa é maximizado em decorrência da alta absorvência e alta emissividade que a parede com alta massa térmica apresenta, pois a radiação de onda longa emitida pela parede (na forma de calor) não pode voltar a atravessar o vidro.

A parede com alta inércia térmica num sistema trombe, em geral, apresenta espessura entre os 200mm e os 400mm. Esta espessura é definida de modo a que o calor não chegue ao espaço interior por condução durante as horas de Sol, mas permita que tal aconteça a partir do momento em que o Sol se põe. Para uma parede com alta inércia térmica que apresente espessura de 200mm, o calor só chega por condução ao paramento interior passadas 8 a 10 horas após o início do armazenamento de calor (TORCELLINI e PLESS, 2004).

Segundo Nick Backer, (apud TIRONE, 2007) a transferência de calor através de uma parede de Trombe demora cerca de 18min por cada 10mm de espessura, ou seja, numa parede de 200mm de betão, a parede retarda em 6 horas a irradiação do calor armazenado. Com o início da absorção da radiação solar no Inverno por volta das 12horas (11h solares), a parede começará a irradiar calor para o espaço interior por volta das 18 horas (fim da tarde, início da noite), quando é mais necessário.

O efeito estufa fará com que este sistema construtivo acumule calor que, sem alternativa, é liberado para o interior da habitação, quando utilizado para aquecimento ou para o ambiente externo, por meio do efeito chaminé proporcionando ventilação no ambiente interno por convecção, através de aberturas no topo e base da parede com alta massa térmica que potencializam a termocirculação.

À medida que recebe radiação solar, a parede com alta massa térmica vai acumulando energia que, ao fim de algum tempo, acaba por atravessá-la e aflorar no interior do edifício, aquecendo o ambiente interno por convecção e radiação, além de em decorrência da alta inércia térmica, promove um retardo na transmissão e uma amortização na oscilação das temperaturas (ADAMS et al, 2010).

A configuração das aberturas irá definir a finalidade da utilização de uma parede trombe, se para aquecimento ou refrigeração. Esta variação da configuração pode ocorrer por meio da interferência do usuário que definirá as suas necessidades de conforto ou por meios automatizados, potencializando seu uso nos momentos em que há maior necessidade.

Para tomar partido do aquecimento passivo por meio da parede trombe, a abertura da superfície envidraçada não deverá permitir a passagem do ar aquecido, que por sua vez deverá ser liberado para o espaço interno pela abertura superior da parede com alta inércia térmica, aquecendo-o e retornando à câmara de ar pela abertura inferior, reiniciando o ciclo (GAN, 1998).

Para promover ventilação, a parede com alta massa térmica deve ter apenas a abertura inferior permitindo a circulação do ar e a abertura de saída localizada na superfície envidraçada deve também possibilitar a passagem do ar. O ar exterior entra por outra abertura em uma parede diferente e o ar interior, mais quente, sai pela Parede Trombe (SHEN et al., 2007).

Para entender melhor o funcionamento de uma parede trombe, é possível fazer uma analogia com sistemas elétricos indicando os ganhos e as perdas de calor durante este processo (Figura 2).

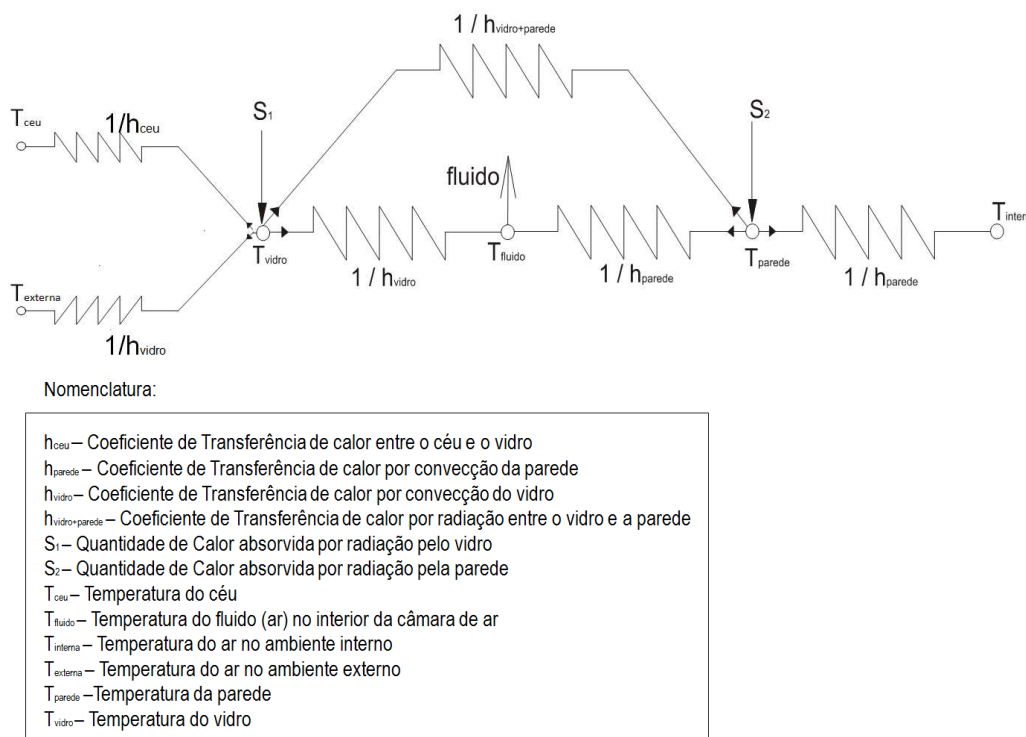


Figura 2 - Esquema do funcionamento de uma parede trombe.

Fonte: CAVALCANTI, 2013

2. OBJETIVO

Diante do apresentado acima, este artigo tem como objetivo elaborar uma série de modelos matemáticos simplificados que possibilitem a previsão das temperaturas internas e desempenho térmico durante o dia em edificações dotadas de paredes trombe, a fim de auxiliar na identificação de possíveis situações de desconforto de forma simplificada e com menor tempo que uma simulação e modelagem computacional.

3. MÉTODO

Nesta seção são apresentadas as etapas do processo de modelagem objetivando atingir o modelo na forma final, aprovado em todas as etapas estatísticas necessárias para a elaboração de um modelo fidedigno e representativo nos seus resultados. Aplicou-se para as etapas de execução dos modelos o processo de regressão linear simples e múltipla.

A metodologia proposta buscou uma alternativa de geração de modelos matemáticos através de uma forma clássica, largamente utilizada em pesquisas de previsão de dados. Esta metodologia consiste em encontrar a equação de uma função (linear ou não linear) que permita descrever e compreender a relação entre duas ou mais variáveis e projetar ou estimar uma das variáveis em função da outra. A regressão atua de forma a

estabelecer que a soma dos quadrados dos desvios seja um valor mínimo.

Esta metodologia foi baseada em estudos paramétricos obtidos a partir de simulações computacionais, utilizando o software EnergyPlus, aplicado a oito cidades brasileiras, uma em cada zona bioclimática estabelecida na NBR15220 (ABNT,2005) de modo a obter a melhor configuração de uma parede trombe para cada caso, tornando possível a utilização deste dispositivo arquitetônico em edificações construídas no Brasil.

A seleção das variáveis consiste no cruzamento dos resultados de 3888 simulações no software Energyplus versão 7.0 de um ambiente padrão dotado de parede trombe em diversas configurações para as condições de inverno (quando se há necessidade de aquecimento) e verão (priorizando a ventilação natural) para as oito zonas bioclimáticas brasileiras conforme a NBR-15220 (ABNT, 2005), desconsiderando os valores para os horários em que a radiação solar incidente no plano horizontal é nula (período da noite) pois neste período a parede trombe perde sua eficiência já que o ar no interior do canal não é aquecido, minimizando o seu movimento no interior do sistema trombe.

Sabe-se então que para executar as simulações computacionais no software EnergyPlus (E+) uma das etapas essenciais é a inserção dos dados climáticos do sítio onde a edificação será implantada, Roriz elaborou arquivos climáticos para 411 cidades brasileiras (RORIZ, 2012). Por serem considerados dados mais precisos, pois foram obtidos a partir de coletas em estações meteorológicas, optou-se neste trabalho por utilizar esta base de dados de modo a considerar oito climas brasileiros, um para cada zona bioclimática estabelecida pela NBR-15220/3. As cidades que foram simuladas neste trabalho estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação das cidades utilizadas para simulações.

Cidades Simuladas	Estado	Zona Bioclimática	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Curitiba	PR	1	-25.52	-49.18	934
Santa Maria	RS	2	-29.70	-53.70	151
Florianópolis	SC	3	-27.67	-48.55	9
São Carlos	SP	4	-22.02	-47.89	854
Garanhuns	PE	5	-8.89	-36.49	823
Campo Grande	MS	6	-20.47	-54.67	532
Cuiabá	MT	7	-15.65	-56.10	176
Belém	PA	8	-1.38	-48.48	10

Após realizar simulações durante um ano climático, e de posse dos resultados indicados em °C.h de desconforto por calor e frio, a partir de dados horários durante um ano climático. Estes dados climáticos principalmente a zona bioclimática e latitude foram os principais definidores para estabelecimento das bases projetuais aqui propostas. As configurações do sistema trombe adotadas para propor as recomendações deste trabalho encontram-se descritas a seguir:

O ambiente simulado tem dimensões de 4,00 x 4,00m com pé direito de 3,00m e possui uma parede trombe na fachada sem sombreamento, orientada para o norte, sul ou oeste (conforme descrito posteriormente) com todas as paredes pintadas de branco (absortância $\alpha=0,27$), com excessão da parede com alta inércia térmica que apresenta sua superfície externa (superfície voltada para o interior do canal de ar da parede trombe) pintada de preto (absortância $\alpha=0,97$). Os materiais construtivos adotados para as simulações deste trabalho estão descritos na Tabela 2, onde é possível observar as propriedades termofísicas dos materiais utilizados como dados de entrada para o software EnergyPlus.

Tabela 2 - Relação dos componentes e suas propriedades

Paredes				Piso				Laje			
Parede de tijolo com revestimento em argamassa (espessura variável)				Piso em concreto (10,0 cm) com revestimento cerâmico				Laje em concreto armado (15,0 cm) com mais 5,0cm de isolamento			
Componente	λ (W/m °C)	ρ (Kg/m³)	c (J/Kg °C)	Componente	λ (W/m °C)	ρ (Kg/m³)	c (J/Kg °C)	Componente	λ (W/m °C)	ρ (Kg/m³)	c (J/Kg °C)
Tijolo cerâmico 08 furos 19x19x09cm	0,40	1200	960	Concreto armado	1,75	2400	1005	Concreto armado	1,75	2400	1005
Argamassa de revestimento	0,85	2000	1005	Piso cerâmico	1,10	2000	1005	Isolante térmico	0,04	18	1675

Onde:

λ – Condutividade Térmica; / ρ – Massa específica (densidade); / c – Calor específico.

As simulações neste trabalho foram realizadas a partir do modelo de edifício padrão apresentado anteriormente e das variações paramétricas para as quais se deseja investigar a influência no desempenho térmico. Os parâmetros variados neste trabalho estão apresentados na Tabela 3, cujo impacto de cada variável será analisado em conjunto com os demais que também influenciam seu desempenho térmico.

Tabela 3 - Resumo das variáveis adotadas para as simulações.

Variáveis				
Área das aberturas	Espessura da parede com alta inércia	Tipo de fechamento da superfície envidraçada	Área da Superfície envidraçada	Distância: Parede - Vidro
(%)	(m)	(-)	(%)	(m)
3	0.15	Vidro simples 3 mm	50	0.05
6	0.30	Vidro duplo	75	0.10
	0.45	Tijolo de vidro	100	0.15

Foi feito o cruzamento entre todas as possibilidades, resultando em 162 casos para simulação. Foram consideradas três situações básicas para as simulações neste trabalho. A primeira situação pretende proporcionar aquecimento nos períodos frios, quando as duas aberturas (superior e inferior) permitem a circulação do ar que está aquecido neste dispositivo para o ambiente padrão, porém, sem renovação do ar interno por meio de ventilação natural (considerado nas simulações como modelo - FECH). A segunda situação promove a ventilação natural, quando a face de vidro da parede trombe possui uma abertura para saída do ar, além de considerar nesta situação a abertura inferior da parede trombe e a abertura de entrada do ambiente permitindo a passagem do ar (Chamado neste trabalho de modelo - VENT). Já na terceira situação, todas as aberturas do ambiente permitirão a circulação do ar, promovendo aquecimento (neste caso, chamou-se de modelo - AQEC), conforme se pode observar na figura 3.

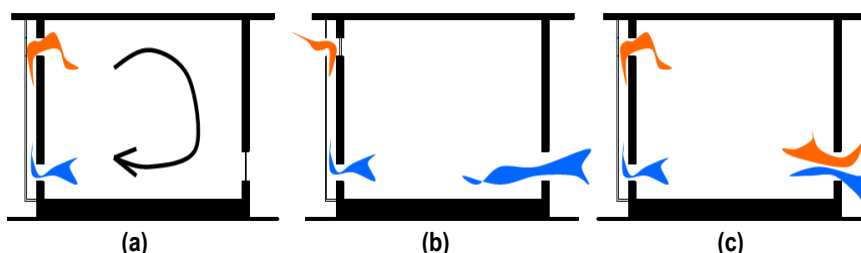


Figura 3 - Esquema das situações consideradas (a) situação 1 (FECH) (b) situação 2 (VENT) e (c) situação 3 (AQEC)

Confirmou-se a partir das simulações que a temperatura interna de ambientes dotados de paredes trombe depende de variáveis como a temperatura externa ao ambiente, radiação incidente na superfície coletora e no plano horizontal que por sua vez também influenciam na temperatura superficial da face envidraçada e na temperatura no interior da câmara de ar entre o vidro e a parede com alta inércia térmica.

A transferência de calor por radiação é um processo em que a energia calorífica é transferida entre corpos com diferentes temperaturas, sem que ocorra o contato entre os mesmos, sendo este fenômeno a principal forma de transmissão de calor entre o Sol e a Terra. Todo corpo aquecido emite ondas eletromagnéticas, que viajam através do vácuo. A energia radiante que provém do sol é denominada de radiação solar e é a principal fonte de aquecimento dos edifícios.

Em geral, os materiais opacos absorvem uma fração da radiação solar incidente e refletem o restante. Nos vidros e em alguns materiais transparentes, o comportamento térmico específico é analisado pela transparência seletiva à radiação, pois além de absorver e refletir esta radiação, também a transmitem para o interior dos ambientes.

Para determinar a quantidade de radiação que incide em uma superfície não horizontal, como é o caso de uma parede trombe, quando não é possível encontrar este dado juntamente com dados climáticos são necessárias algumas definições:

Fator geométrico (R_b) é a razão entre a radiação solar direta sobre uma superfície inclinada e a radiação solar direta sobre um plano horizontal. De acordo com o método desenvolvido por Liu e Jordan (1963) e citado por Duffie & Beckman (1980), para o hemisfério sul, deve ser aplicada a seguinte equação:

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi/180) \omega'_s \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180) \omega_s \sin \phi \sin \delta}$$

Equação 01

Onde:

β – Ângulo de Inclinação da Superfície em relação à horizontal ($0^\circ < \beta < 180^\circ$, para ângulos acima de 90° significa que a face está voltada para baixo);

Φ – Latitude do local;

δ – Declinação;

ω_s - Ângulo horário do pôr-do-sol para a superfície horizontal;

ω'_s - Ângulo horário do pôr-do-sol para a superfície inclinada.

A declinação pode ser encontrada a partir da equação de Cooper:

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen} \left[\left(\frac{360 \cdot (NDA + 284)}{365} \right) \right]$$

Equação 02

Onde:

δ - Ângulo de declinação ($-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$);

NDA - Número do dia no Ano (NDA=1 em 1/Jan e NDA=365 em 31/Dez).

O ângulo horário do pôr-do-sol ajustado para a superfície inclinada, segundo Duffie & Beckman (1980), para o hemisfério sul pode ser calculado por:

$$\omega'_s = \min \left[\begin{array}{l} \text{arc cos}(-\text{tg } \phi \text{ tg } \delta) \\ \text{arc cos}(-\text{tg } (\phi + \beta) \text{ tg } \delta) \end{array} \right]$$

Equação 03

Há uma variabilidade diária e média mensal da radiação solar global incidente sobre um plano inclinado, com ou sem desvio azimutal durante o ano. Dados locais de radiação solar quando gerados em estações de medição são normalmente medidos sobre um plano horizontal exigindo uma série de cálculos trigonométricos (conforme apresentados neste trabalho) para concluir a quantidade global específica sobre um plano inclinado, além da consideração dos modelos de distribuição temporal e espacial da radiação solar em função da isotropia ou anisotropia da abóbada celeste (céu) com efeito numérico diferenciado na componente difusa e analogamente na global que é a soma das componentes direta, difusa e albedo.

Atualmente, para determinar a radiação solar global incidente em um plano inclinado qualquer, parte-se do princípio que esta é composta por três componentes: radiação direta, radiação difusa e a contribuição do albedo. Este procedimento foi desenvolvido por Liu e Jordan (1963) (apud DUFFIE & BECKMAN, 1980) a fim de encontrar curvas para estimar a radiação solar em qualquer latitude e qualquer ângulo de inclinação de coletores solares voltados para o norte. A base de seu trabalho foram os dados coletados em 80 localidades dos Estados Unidos e do Canadá.

De acordo com o método desenvolvido por Liu e Jordan (1963) e aperfeiçoado por Klein (1977), o cálculo da radiação solar global em um plano inclinado (H_β), apresentado em Duffie & Beckman (1980), para o hemisfério sul é resultante da equação:

$$H_\beta = H \left(1 - \frac{H_d}{H} \right) R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right)$$

Equação 04

Onde:

β – Ângulo de Inclinação da Superfície em relação à horizontal;

H - radiação solar global em uma superfície horizontal (W/m^2);

H_d - radiação solar difusa em uma superfície horizontal (W/m^2);

R_b – Fator Geométrico;

ρ - albedo.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir dos valores obtidos por simulação e tendo posse dos melhores modelos para cada cidade analisada, foram elaborados modelos simplificados para cada situação de modo a tornar possível a previsão deste

componente em diversas localidades por profissionais que venham a propor a utilização de paredes trombe em seus projetos a partir de dados climáticos medidos com maior facilidade pelos instrumentos disponíveis no mercado ou mesmo pela base de dados climática disponíveis nos Institutos de Monitoramento Meteorológico.

As equações apresentadas a seguir foram obtidas por meio de regressões estatísticas, tornando possível estimar a temperatura do ar no interior dos ambientes dotados de paredes trombe para as oito cidades analisadas neste trabalho. Encontraram-se então modelos capazes de estimar estas variáveis em função da temperatura do ar externo e da radiação solar incidente nas superfícies horizontais e de fachada coletora.

Entende-se por modelo estatístico a representação de processos físicos, econômicos, biológicos através de um formalismo matemático que permite que se façam previsões ou interpretações em relação ao universo que se pretende modelares. Existem diferentes caminhos nos quais esses modelos podem ser usados e desenvolvidos. Seus objetivos primordiais são descrever, explicar ou prever um fenômeno. São exemplos de sua aplicação: previsão meteorológica, estudos financeiros, detecção de fraude. Os modelos estatísticos podem ser aplicados a quase todas as situações em que são requeridos raciocínios formais para sua resolução.

Estas equações obtidas por meio de regressão encontram-se acompanhadas de seus respectivos coeficientes de determinação (R²), que corresponde ao quadrado do coeficiente de correlação (R). Assim a partir do valor do coeficiente de determinação foi possível obter o valor do coeficiente de correlação. Para este caso em que as grandezas analisadas são diretamente proporcionais, o coeficiente de correlação será sempre positivo.

Para estas regressões, foram separadas duas condições:

A primeira refere-se aos valores do desempenho térmico para o inverno de modo a proporcionar o mínimo de desconforto por frio e a segunda deve ser utilizada para o verão, no modelo que prioriza a ventilação natural. Para obter-se a radiação solar incidente no fechamento envidraçado deve-se fazer uso dos modelos apresentados anteriormente nas equações 01 a 04. A partir daí, pode-se então estimar inicialmente a temperatura superficial na face coletora por meio das equações 05 e 06. A equação para estimar a temperatura superficial da face envidraçada no período de inverno, de modo a promover o aquecimento dos ambientes, pode ser definida por:

$$T_{sup} = 5,76088 + 0,04122 (H_b) + 0,8814 (T_e) \quad \text{Equação 05}$$

Onde: T_{sup} = Temperatura superficial da face envidraçada (°C);
 T_e = Temperatura Externa (°C);
 H_b = Radiação incidente na superfície coletora (W/m²).

Esta equação apresentou um coeficiente de correlação (R) de 0,943197, que se refere a uma correlação muito forte, aproximando os valores calculados por meio deste modelo simplificado dos valores obtidos por simulação, conforme apresentado na figura 4.

Para determinar a Temperatura superficial na face coletora da parede trombe que promove ventilação natural no verão pode-se utilizar a equação 06. Esta equação apresentou um coeficiente de correlação de 0,968643 que confere uma correlação altíssima, conforme pode-se observar na figura 5, que apresenta um comparativo entre os valores obtidos por meio da regressão e os valores obtidos por simulação, apresentando valores similares, já que os pontos distribuem-se ao longo da reta correspondente ao erro igual a zero, indicando que os valores para temperatura superficial calculados tendem a estar sempre próximos aos simulados e que, portanto o modelo simplificado corresponde ao comportamento encontrado por meio de simulação.

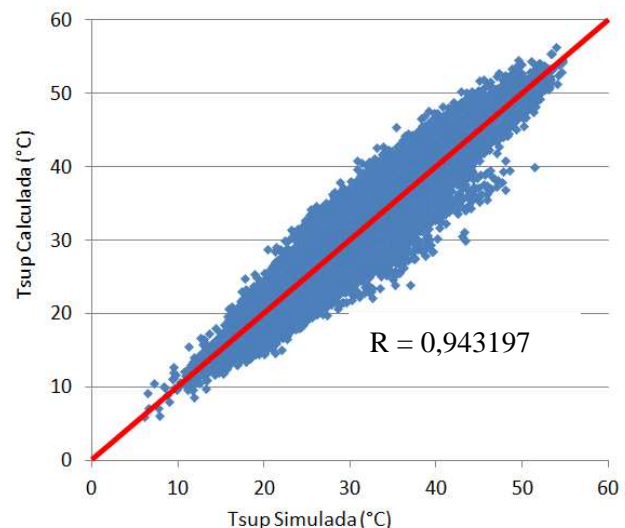


Figura 4 - Relação entre os valores da Temperatura superficial na face envidraçada obtidos por simulação (x) e calculados por meio do modelo simplificado (y) para as oito cidades analisadas no inverno.

— Linha do erro zero

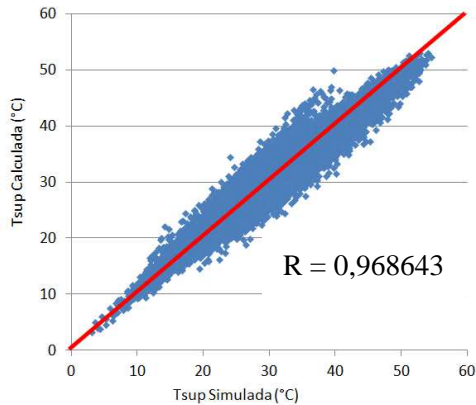
$$T_{sup} = 3,67176 + 0,03977 (H_b) + 0,91491 (T_e)$$

Equação 06

Onde: T_{sup} = Temperatura superficial da face envidraçada (°C);

T_e = Temperatura Externa (°C);

H_b = Radiação incidente na superfície coletora (W/m²).



Observa-se então que é possível determinar a temperatura superficial no coletor da parede trombe apenas com dados medidos em estações climáticas, de modo a obter valores confiáveis, com alta correlação (valores para "R" acima de 0,94 nos dois casos), o que garante uma correlação significativa entre as variáveis (Figura 5). Outra variável importante para a determinação da temperatura no interior dos ambientes onde serão inseridos estes dispositivos é a temperatura no interior do vão da parede trombe, que depende diretamente das temperaturas superficiais (calculadas anteriormente) e da temperatura do ar no exterior dos ambientes. As equações obtidas para esta variável estão apresentadas abaixo, com seus respectivos coeficientes de determinação (R²) e correlação (R).

Figura 5 - Relação entre os valores da Temperatura superficial na face envidraçada obtidos por simulação (x) e calculados por meio do modelo simplificado (y) para as oito cidades analisadas no verão.

— Linha do erro zero

$$T_{i2} = 4,25968 + 0,91678 (T_{sup}) - 0,09231 (T_e) - 0,01357 (T_{sup}-T_e)^2$$

Equação 07

$$T_{i2} = 2,01076 + 0,35837 (T_{sup}) + 0,56661(T_e)$$

Equação 08

Onde: T_{i2} = Temperatura no interior da parede trombe (°C);

T_{sup} = Temperatura superficial da face envidraçada (°C);

T_e = Temperatura Externa (°C),

A equação 07 representa os valores obtidos para promover aquecimento no inverno com coeficientes de determinação de 0,8792 e correlação de 0,93766, e a equação 08 que apresenta seus coeficientes de determinação igual a 0,97447 e correlação de 0,98715 deve ser utilizada quando se deseja ventilação natural, no verão. Observa-se que para todos os casos, na estimativa da temperatura no interior da parede trombe, obteve-se uma altíssima correlação (acima de 0,9) principalmente no modelo que promove a ventilação natural no verão (Figura 6), tornando possível calcular esta variável com maior confiabilidade adequando-se aos modelos simulados computacionalmente.

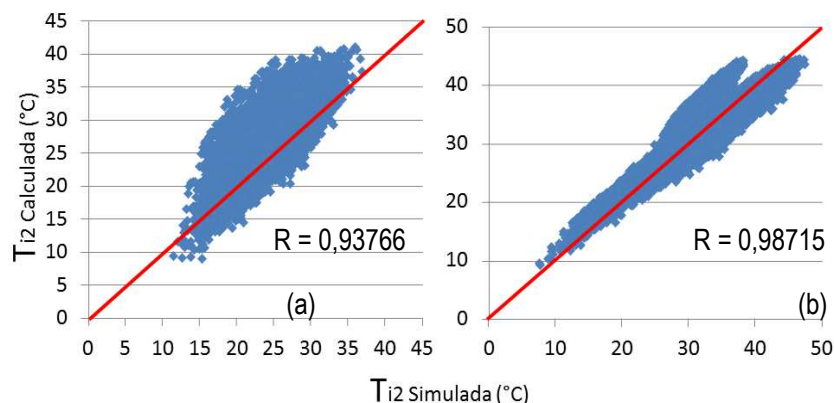


Figura 6 - Relação entre os valores da Temperatura no interior do canal da parede trombe obtidos por simulação (x) e calculados por meio do modelo simplificado (y) para as oito cidades analisadas no inverno (a) e no verão (b).

— Linha do erro zero

A partir destas equações é possível determinar a temperatura interna dos ambientes dotados de paredes trombe e quantificar em seguida a previsão do desconforto térmico dos usuários que venham a ocupar estes espaços caso se deseje esta análise horária.

As equações obtidas por regressão para a temperatura interna dos ambientes dotados de paredes trombe dependem diretamente das duas variáveis calculadas acima, de modo que ao aplicá-las seja possível estimar o desempenho térmico e possíveis potencialidades de desconforto térmico ao longo do ano por meio das análises necessárias por qualquer metodologia já conhecida para definição das zonas de conforto.

Estas equações apresentadas para a Temperatura no interior dos ambientes em alguns casos chegou a apresentar um coeficiente de correlação em torno de 0,88, o que embora represente uma forte correlação, fica abaixo dos valores obtidos para outras equações obtidas neste trabalho.

$$T_i = 4,229195 + 0,26926 (T_{sup}) - 0,01879(H_b) + 0,05918 (T_e) + 0,49783 (T_{i2}) - 0,01357 (T_{sup}-T_e)^2 \quad \text{Equação 09}$$

$$T_i = 4,86515 + 0,26409 (T_{sup}) - 0,01796(H_b) + 0,25295 (T_e) + 0,28464 (T_{i2}) - 0,00116 (H_d) \quad \text{Equação 10}$$

Sendo: T_i = Temperatura no interior dos espaços dotados de paredes trombe (°C);

T_e = Temperatura Externa (°C);

H_d = Radiação direta Incidente no Plano Horizontal (W/m²);

H_b = Radiação Incidente no Plano Inclinado (W/m²);

T_{sup} = Temperatura superficial da face envidraçada (°C);

T_{i2} = Temperatura no interior da parede trombe (°C).

Enquanto a equação 09 apresentou coeficiente de determinação igual a 0,77923 e coeficiente de correlação 0,88274, os mesmos coeficientes obtidos para a equação 10 foram 0,82325 e 0,907331 respectivamente e observa-se na figura 7 que estes valores quando inseridos em um gráfico de dispersão (x,y) apresentam boa correlação entre os valores obtidos por simulação e calculado com o auxílio das equações obtidas neste trabalho.

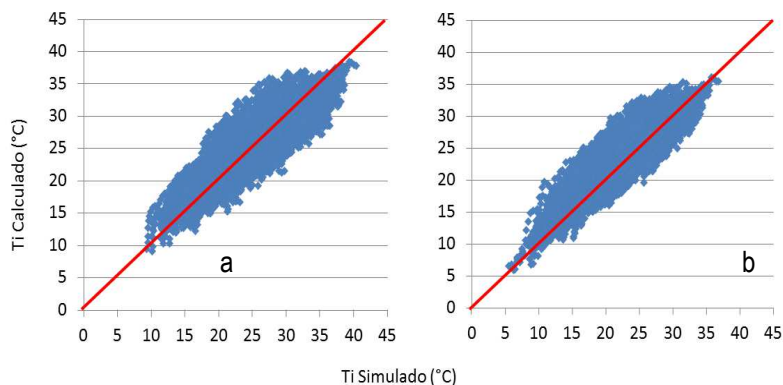


Figura 7 - Relação entre os valores da Temperatura no interior do canal da parede trombe obtidos por simulação (x) e calculados por meio do modelo simplificado (y) para as oito cidades analisadas no verão (a) e no inverno (b).

— Linha do erro zero

De posse destas equações, é possível estimar a temperatura interna para o verão por meio da equação 09 e para o inverno por meio da equação 10, nos espaços que venham a possuir uma parede trombe a partir de medições ou estimativas de temperatura e radiação solar em edificações construídas no Brasil.

Diante disto, pode-se confirmar a eficiência do modelo aqui proposto que permitirá aos profissionais de projeto encontrar o desempenho deste componente quando inserido em edificações localizadas em climas brasileiros sem que haja a necessidade de futuras simulações, processo que requer alto custo e maiores prazos para elaboração de projeto arquitetônico, além de uma mão de obra especializada e escassa no mercado brasileiro.

5. CONCLUSÕES

A utilização de simulações computacionais tem se mostrado uma ferramenta satisfatória na análise do desempenho térmico de edificações, por possibilitar a realização das avaliações desejadas em tempo reduzido e com confiabilidade similar aos modelos experimentais. O software utilizado, além de fornecer dados confiáveis, é capaz de simular a edificação analisada em cada caso adotado neste trabalho para um ano típico de referência em aproximadamente 6 segundos.

Para permitir uma avaliação prévia do desempenho deste componente arquitetônico aqui estudado, foram elaborados alguns modelos simplificados para que escritórios de arquitetura e profissionais de projeto em geral,

ao tomarem partido desta estratégia de projeto, possam estimar seu comportamento por meio de cálculos, sem a necessidade direta de realização de novas simulações, o que demandaria profissionais qualificados e especialistas, além de um maior tempo na elaboração dos modelos computacionais.

É importante salientar que os modelos elaborados neste trabalho foram validados para as configurações de paredes trombe estudadas e descritas neste documento, não sendo válidos para modelos com tipologias e sistemas construtivos diferentes dos mencionados anteriormente.

A partir destas observações, pretende-se aprimorar a consciência de que a arquitetura local e a produção de edificações devem ser conduzidas de maneira que os profissionais incorporem uma linguagem adequada e de características próprias, criando uma tipologia regional, dando uma identidade à arquitetura que vem sendo importada ou mal copiada e que perde de vista o mais importante: o conforto dos usuários. Frente à crise energética, necessita-se projetar bem para reduzir o consumo de energia e levar em conta as condições climáticas do meio, aplicando-se as técnicas bioclimáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- ADAMS, Serina, BECKER, Marc. KRAUSS, Drew. GILMAN Caitlin M. **Not A Dry Subject: Optimizing Water Trombe Walls**. in the SOLAR 2010 Conference Proceedings, American Solar Energy Society, 2010.
- BALCOMB, J.D., BARKER, G., HANCOCK, C.E. **An Exemplary Building Case Study of the Grand Canyon South Rim Residence**. NREL/TP-550-24767, Golden, CO: National Renewable Energy Laborator. 1998.
- CAVALCANTI, Fernando A de M Sá. **Paredes Trombe no Brasil: Análise do Potencial de utilização para aquecimento e refrigeração**. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Instituto de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. 2013.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- GAN, Guohui. **A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings**. Energy and buildings Vol 27, 1998.
- RORIZ, Maurício. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. Texto para o Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações, São Carlos, 2012. disponível em: http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Sobre_os_arquivos_EPW.pdf. Acesso em Junho de 2012.
- SHEN, Jibao, LASSUE Stéphane, ZALEWSKI Laurent and HUANG Dezhong. **Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls**, In: Energy and Buildings, vol 39 issue 8, Science Direct, 2007.
- TIRONE, L; **CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL – Soluções Eficientes Hoje, a nossa Riqueza de Amanhã**, 2007.
- TORCELLINI, P and PLESS, S. Trombe Walls in Low-Energy Buildings: Pratical Experiences, In: **World Renewable Energy Congress VIII and Expo**, Denver, 2004.