

UTILIZAÇÃO DE PAREDES TROMBE EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS NA CIDADE DE OURO PRETO - MG

**Adriano Pinto Gomes (1); Henor Artur de Souza (2);
Gisele Cristina Antunes Martins (3); Denisson Volponi Spilari (4)**

(1) Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, agomes_arq@yahoo.com.br

(2) Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, henor@em.ufop.br

(3) Graduanda em Engenharia Civil, gisa.martins@gmail.com

(4) Graduando em Engenharia Civil, denisson_ufop@hotmail.com

Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil -
Área de Construção Metálica, Ouro Preto, MG, CEP. 35400-000.

RESUMO

Um desempenho térmico adequado de uma edificação depende da adequação do seu sistema de fechamento externo e interno, de um sistema eficiente de ventilação natural, além de um projeto arquitetônico que aproveite de forma eficiente as condições climáticas locais. As paredes Trombe constituem um sistema indireto de ganho solar e podem ser utilizadas como uma estratégia eficiente no condicionamento de ambientes sujeitos a grandes amplitudes térmicas. Neste trabalho, avalia-se o potencial de utilização de paredes Trombe em edificações residenciais, considerando o clima de inverno da cidade de Ouro Preto – MG. A avaliação do desempenho térmico é feita via simulação numérica utilizando o programa *EnergyPlus*. São consideradas quatro configurações de fechamentos e sistemas de ventilação natural diferentes. Propõem-se paredes Trombe constituídas por tijolo cerâmico maciço e placa cimentícia. Os resultados obtidos mostram que o sistema de fechamento proposto, para o período de inverno de Ouro Preto, foi capaz de minimizar a oscilação da temperatura interna do ambiente, reduzindo o consumo de energia necessário para o aquecimento.

Palavras-chave: paredes Trombe, ventilação natural, desempenho térmico, simulação numérica.

ABSTRACT

A suitable thermal performance of a building depends on the adequacy of its internal and external closure system, an efficient natural ventilation system, and an architectural project which uses efficiently the local weather conditions. The Trombe walls are an indirect solar gain system that can be used as an effective strategy when conditioning places exposed to large temperature ranges. In this paper the Trombe wall potential is evaluated for residential buildings, considering the winter climate in the city of Ouro Preto - MG. The thermal performance evaluation is established by numerical simulation using *EnergyPlus* software. Four different settings of closure and natural ventilation system are considered. Trombe walls made by solid ceramic brick and cement plate are proposed. The obtained results prove that the closure system proposed for winter days in Ouro Preto, was able to minimize the local internal temperature oscillation reducing the energy consumption required for heating.

Keywords: Trombe wall, natural ventilation, thermal performance, numerical simulation.

1. INTRODUÇÃO

A inércia térmica está relacionada à capacidade de uma edificação armazenar e liberar calor. O uso da inércia térmica diminui a oscilação e os picos de temperatura durante o dia, contribuindo no atraso da condução de calor através do sistema de fechamento. Uma edificação com baixa inércia térmica fica muito sensível à variação da temperatura do ar externo, e com uma inércia elevada, a temperatura interna estaria sujeita a uma influência muito pequena das condições climáticas externas (PAPST, 1999).

A razão entre a energia absorvida e a energia armazenada nos fechamentos da edificação depende da capacidade térmica dos materiais utilizados. Os parâmetros mais relevantes relacionados à inércia térmica são: atraso térmico e capacidade de amortecimento.

Segundo Rivero (1986), o retardo ou atraso térmico (ϕ) é o tempo que a propagação de calor através do fechamento leva para manifestar-se na superfície oposta do mesmo. O atraso térmico depende dos parâmetros que intervêm no processo de transmissão de calor por condução em regime transitório: a condutividade térmica (λ), o calor específico (c), a densidade absoluta (d), e a espessura do fechamento (e). O atraso térmico depende também da ordem em que as camadas estejam dispostas (NBR 15220:2005).

A capacidade de amortecimento é a propriedade do fechamento de diminuir a amplitude das variações térmicas. O coeficiente de amortecimento (μ) é definido como a relação entre a amplitude da temperatura superficial interna de um fechamento (T_s) e a amplitude da temperatura do ambiente externo (T_e). Quanto menor for o valor deste coeficiente, maior será a capacidade de amortecimento do fechamento (RIVERO, 1986).

$$\mu = \frac{T_s}{T_e}$$

Equação 1

Uma das aplicações dos conceitos da inércia térmica se dá nas paredes Trombe. As paredes Trombe constituem um sistema indireto de ganho solar, ou seja, elas não possibilitam a incidência da luz solar no ambiente a ser aquecido. Esse sistema, popularizado na década de 60, se constitui por uma massa de acumulação térmica entre o espaço a ser aquecido e os panos de vidro. A radiação solar atravessa o pano de vidro e aquece a parede de acúmulo térmico, que por sua vez aquece o ambiente interno. Esteticamente, vista pelo exterior a parede Trombe se assemelha a uma janela e, pelo interior, assemelha-se a um fechamento comum (Figura 1).

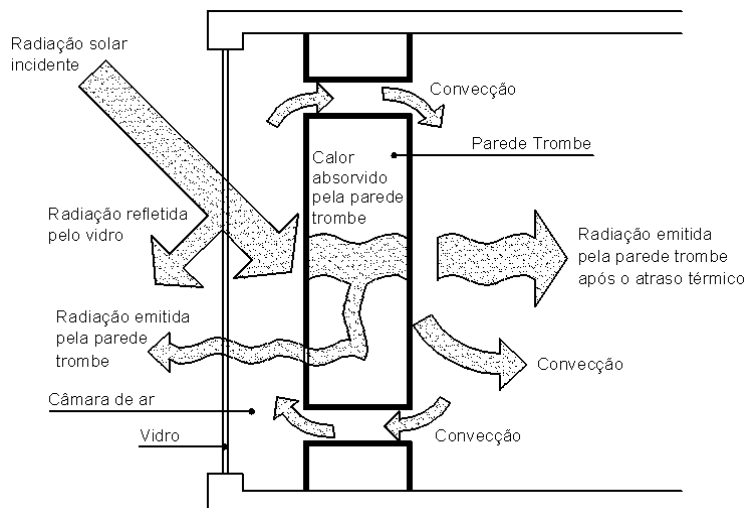


Figura 1 – Esquema de uma parede Trombe e as interações térmicas existentes.

As paredes de acumulação em alvenaria maciça (*Trombe wall*) são as mais comuns, retardando por várias horas a transmissão do calor do lado que recebe a radiação solar direta para o lado interior. O calor acumulado durante o dia é transmitido ao ambiente interno somente à noite. Essas paredes podem ser utilizadas como paredes estruturais e, devido à sua massa, podem constituir boas barreiras acústicas (BROWN, 2004).

As paredes Trombe podem ser ventiladas e não-ventiladas. Nas paredes Trombe podem ser previstos respiradouros altos e baixos para criar um circuito completo de convecção entre o recinto e a câmara de ar da

parede, maximizando os ganhos de calor.

Nos climas tropicais, as paredes Trombe devem ser protegidas por placas horizontais devidamente dimensionadas para impedir os ganhos de calor no período de verão. No verão, como a luz solar incide em um ângulo muito pequeno em relação à superfície do fechamento envidraçado, a maior parte da radiação é refletida. No inverno, com a baixa altitude solar, a parede Trombe recebe mais radiação solar direta, produzindo uma grande captação de energia.

No caso do clima da região de Ouro Preto / MG, que para o período de inverno tem amplitudes térmicas muito elevadas, em torno de 20 °C, as paredes Trombe podem proporcionar uma redução no efeito da oscilação da temperatura por meio do uso da inércia térmica dos fechamentos, contribuindo para melhores condições de conforto interno.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar o potencial da utilização de paredes Trombe em edificações residenciais, considerando o clima da cidade de Ouro Preto / MG, por meio de simulação numérica do desempenho térmico via o programa *EnergyPlus*.

3. METODOLOGIA

A análise é realizada por meio da avaliação do desempenho térmico de um modelo, realizando um estudo comparativo das temperaturas internas do ambiente, considerando a resposta global da edificação e verificando o cumprimento das exigências de conforto térmico de seus usuários.

Utiliza-se o programa de simulação numérica *EnergyPlus* (versão: 2.2.0) para a determinação do comportamento térmico do modelo, observando-se as etapas relevantes no processo de avaliação do desempenho térmico de uma edificação que englobam principalmente a caracterização da edificação, caracterização e configuração do sistema de fechamento vertical, horizontal e cobertura, caracterização do perfil de ocupação, a caracterização das condições típicas de exposição ao clima, e também a caracterização das exigências humanas de conforto térmico (GOMES; SOUZA, 2007).

3.1. Caracterização do modelo

O objeto de estudo desse trabalho é uma habitação térrea unifamiliar, representada por uma célula teste, constituída por uma única zona de pé-direito de 3 m, com área total de 54 m² (Figura 2). A parede Trombe está voltada para o norte, sem dispositivo de proteção solar, uma vez que está se considerando somente o período de inverno.

Sabe-se que os fechamentos internos e o mobiliário também influenciam na inércia térmica global da edificação, ou seja, a capacidade térmica de todos os corpos internos devem ser considerados. As paredes internas também podem amortecer as variações da temperatura exterior. Mas como se trata de um estudo comparativo, esses elementos não foram considerados.

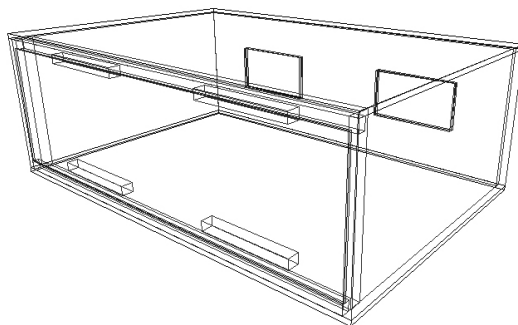


Figura 2 – Perspectiva do modelo simulado.

3.2. Caracterização dos fechamentos

Os fechamentos simulados foram definidos de acordo com seu atraso térmico. Independente dos materiais, os fechamentos foram compostos de forma a obter um atraso térmico de $\phi = 6,6$ h para a parede Trombe e $\phi = 3,8$ h para os outros fechamentos verticais. O cálculo do atraso térmico foi realizado segundo a norma brasileira NBR 15220:2005. Para componentes formados por diferentes camadas paralelas perpendiculares ao fluxo de calor, o atraso térmico é determinado pela expressão:

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2}$$

Equação 2

onde R_t é a resistência térmica de superfície a superfície do componente [$m^2.K/W$]; B_1 é dado pela equação (3) e B_2 é dado pela equação (4)

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_t}$$

Equação 3

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

Equação 4

onde B_0 é dado pela equação (5), λ é a condutividade térmica do material [$W/(m.K)$], ρ é a densidade de massa aparente do material (kg/m^3) e c é o calor específico do material [$kJ/(m^2.K)$]. Se $B_2 < 0$ então usar $B_2 = 0$.

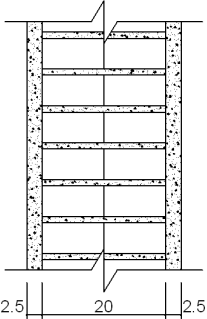
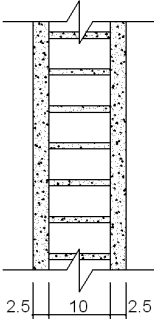
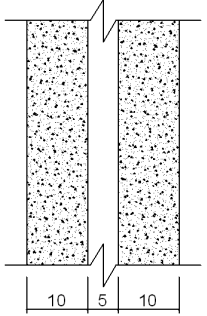
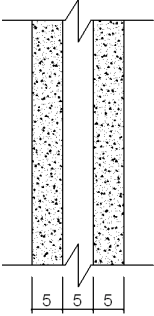
$$B_0 = C_T - C_{Text}$$

Equação 5

onde C_T é a capacidade térmica total do componente [$kJ/(m^2.K)$] e C_{Text} é a capacidade térmica da camada externa do componente [$kJ/(m^2.K)$].

As propriedades termofísicas dos materiais de composição dos fechamentos foram obtidas na norma NBR 15220: 2005. Na Tabela 1 apresentam-se as composições dos fechamentos. Para todos os casos simulados foram considerados laje (sem cobertura) e piso em concreto.

Tabela 1 – Composições dos fechamentos

	Parede Trombe	Fechamentos verticais
	Parede dupla de tijolos maciços, assentados na menor dimensão	Parede de tijolos maciços, assentados na menor dimensão
Atraso térmico $\varphi = 6,6 h$		Atraso térmico $\varphi = 3,8 h$
		
	Parede dupla de concreto com câmara de ar	Parede dupla de placas cimentíceas com câmara de ar
Atraso térmico $\varphi = 6,6 h$		Atraso térmico $\varphi = 3,8 h$
		

A parede Trombe possui alguns detalhes que são essenciais a um bom desempenho térmico. A câmara de ar deve ser bem isolada nos lados para evitar perdas de calor, principalmente pelo piso. As aberturas devem ser devidamente dimensionadas para maximizar a convecção natural. Neste trabalho, as aberturas correspondem a 3% da área de parede de acumulação (Figura 3).

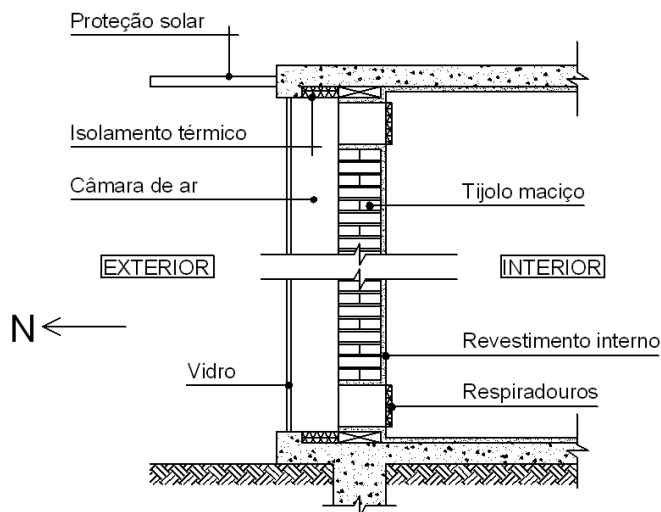


Figura 3 – Detalhes da parede Trombe.

3.3. Caracterização dos casos e rotinas

Não foram consideradas fontes internas de calor. As rotinas de ocupação incluíram o horário das aberturas das janelas da zona térmica e dos respiradouros da parede Trombe. Os casos estudados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Casos simulados

Casos	Descrição	Esquema	Materiais Construtivos	
			Trombe	Fechamentos verticais
Referência	Modelo em sistema construtivo tradicional.		—	Argamassa Tijolo maciço Argamassa
1	Parede Trombe sem respiradouros.		Vidro Câmara de ar Tijolo maciço	Argamassa Tijolo maciço Argamassa
2	Parede Trombe com respiradouros. Caso 2a: resp. abertos entre 8:00h e 18:00h, Caso 2b: resp. abertos entre 18:00h e 8:00h.		Vidro Câmara de ar Tijolos maciços	Argamassa Tijolo maciço Argamassa
3	Parede Trombe com respiradouros abertos entre 18:00h e 8:00h.		Vidro Câmara de ar Placas Cimentíceas	Placa Cimentícea Câmara de ar Placa Cimentícea
4	Parede Trombe com respiradouros e ventilação noturna (entre 18:00h e 8:00h).		Vidro Câmara de ar Placas Cimentíceas	Placa Cimentícea Câmara de ar Placa Cimentícea

3.4. Caracterização das condições climáticas e condições de conforto

Para a simulação numérica, foram considerados dados climáticos da cidade de Ouro Preto. Os dados foram obtidos por meio de medições *in loco*, ao longo dos meses de junho a agosto de 2006, capturados de meia em meia hora. Para a análise dos resultados, foi gerado um dia representante de inverno de 2006. O dia representante foi obtido por meio de uma análise estatística de uma seqüência de três dias consecutivos do mês de julho, que resultaram em uma mesma amplitude térmica.

Em Ouro Preto a temperatura de bulbo seco do dia representante de inverno oscila entre 11,5°C e 31,5°C, com amplitude de 20 °C, e a umidade relativa oscila entre 28,8% e 78,2%. Observado-se as curvas mostradas na Figura 4, fica evidente a necessidade de uma intervenção arquitetônica que minimize as amplitudes dos dados climáticos, aproximando as curvas dos limites de conforto.

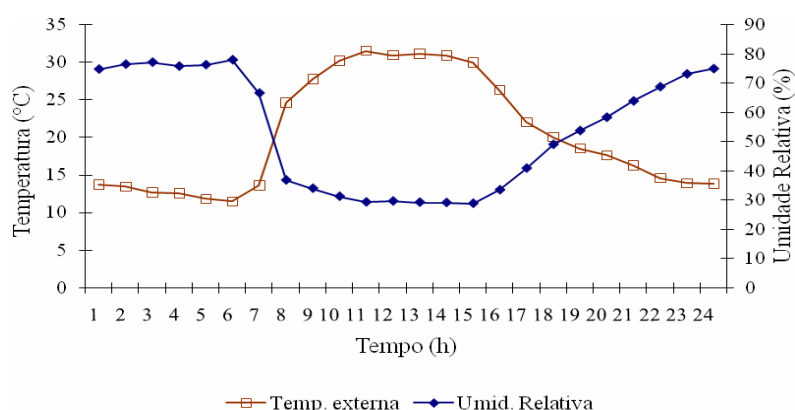


Figura 4 – Evolução temporal da temperatura de bulbo seco e umidade relativa do dia simulado.

As exigências humanas de conforto térmico são caracterizadas por valores, ou intervalos de valores inter-relacionados da temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e temperatura radiante média do ambiente. Neste trabalho, para caracterizar as exigências humanas de conforto térmico, estabeleceu-se somente o intervalo de temperaturas internas compreendidas entre 19°C e 28°C (ASHRAE 55: 2004; ISO 7730: 2006).

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

No processo de simulação numérica via *EnergyPlus*, utilizou-se o modo *AirflowNetwork*, que simula o fluxo de ar entre as zonas térmicas e o exterior, através de frestas e janelas, devido à ventilação forçada ou natural (LBNL, 2006). Neste modelo são consideradas várias condições que influenciam o fluxo de ar, como forma do edifício, parâmetros climáticos, caracterização da abertura das portas e janelas e infiltração através das frestas, nas aberturas (janelas e portas) e nas interfaces dos fechamentos com o sistema estrutural.

Na Figura 5, apresenta-se a comparação dos resultados obtidos para os casos de referência, parede Trombe sem e com respiradouros (Tabela2), considerando ventilação diurna e noturna.

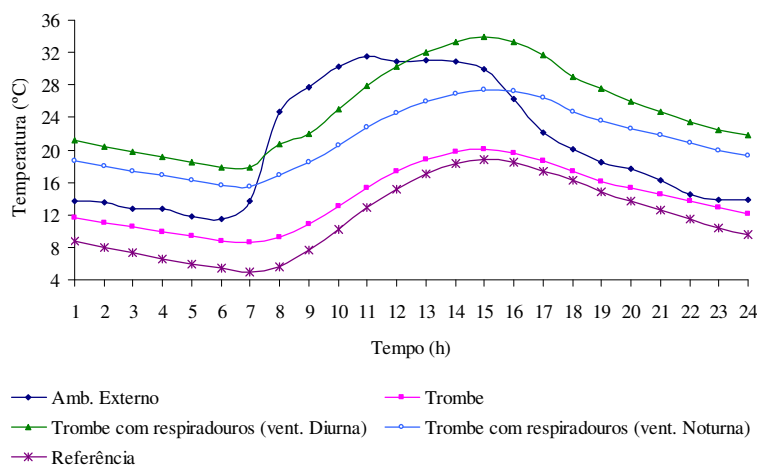


Figura 5 – Evolução temporal da temperatura dos casos de referência, 1, 2a e 2b.

Observa-se pelas curvas da evolução temporal da temperatura interna, mostradas na Figura 5, que o sistema com paredes Trombe eleva a temperatura interna em relação ao caso de referência. Observa-se que quando o sistema Trombe possui respiradouros, seu desempenho térmico melhora para o período de inverno, elevando a temperatura interna. A abertura diurna dos respiradouros, em função da intensa convecção de calor através da câmara de ar, devido a insolação durante o dia, promove uma elevação no perfil de temperatura interna a limites desconfortáveis, principalmente nos períodos de temperatura externa mais elevada. Considerando que a abertura dos respiradouros seja feita no período noturno, a influência da convecção através da câmara de ar, proporciona temperaturas mais próximas da faixa de conforto ao longo do dia.

Na Figura 6, apresenta-se a comparação dos resultados obtidos para os casos com utilização de parede Trombe com respiradouros no período de 18:00h às 08:00h; considerando a parede de acumulação em tijolo cerâmico e placa cimentícia (Casos 2 e 3).

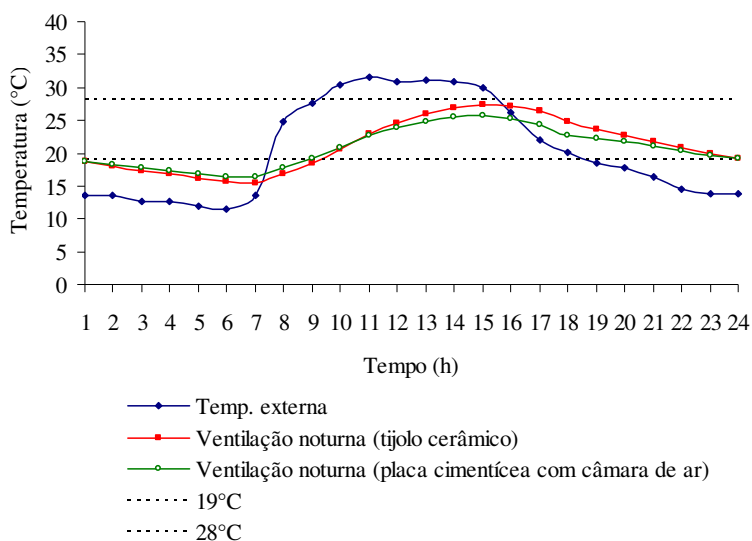


Figura 6 – Evolução temporal da temperatura considerando diferentes composições de fechamento vertical.

A eficiência térmica da parede Trombe pode ser obtida por meio de fechamentos convencionais em tijolo cerâmico maciço ou por meio de fechamentos industrializados como placas cimentícias. O fechamento em placas cimentícias, por possuir câmara interna de ar em todos os fechamentos verticais (Tabela 1), possui um isolamento térmico maior, proporcionando uma menor oscilação na temperatura interna. A redução na câmara de ar do fechamento em placa cimentícia, promoveria a aproximação com o caso de tijolo cerâmico. Observa-se também, que para ambos os tipos de materiais constituintes da parede Trombe, conseguem-se temperaturas internas na faixa de conforto, sugerido pela norma ASHRAE 55: 2004, ao longo de quase todo período.

Na Figura 7, apresentam-se as temperaturas superficiais da parede Trombe em placas cimentícias.

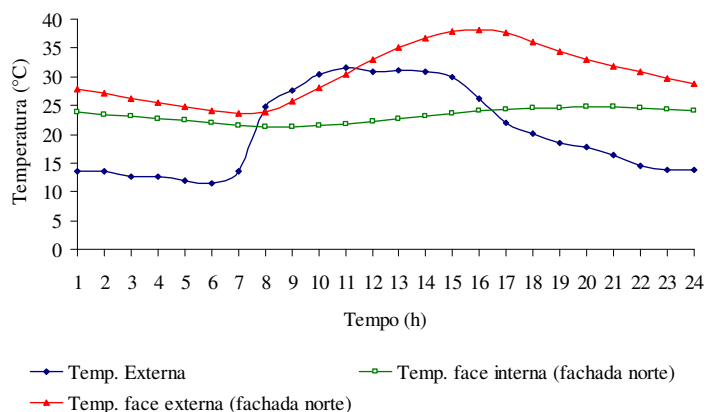


Figura 7 – Evolução temporal das temperaturas superficiais da parede Trombe.

No período de 08:00h às 15:00h, a temperatura superficial externa da parede Trombe desloca a temperatura superficial máxima para o período noturno, que possui temperaturas externas mais baixas.

Segundo Izard e Guyot (1980), a utilização das paredes de acumulação podem gerar desconforto térmico pelo superaquecimento dos ambientes. Aberturas para ventilação nos fechamentos próximos a parede Trombe poderiam controlar a temperatura interna dos ambientes aumentando as trocas de calor entre o interior e exterior da edificação. Na Figura 8, apresentam-se as temperaturas internas obtidas pela abertura de janelas no período noturno (Caso 4).

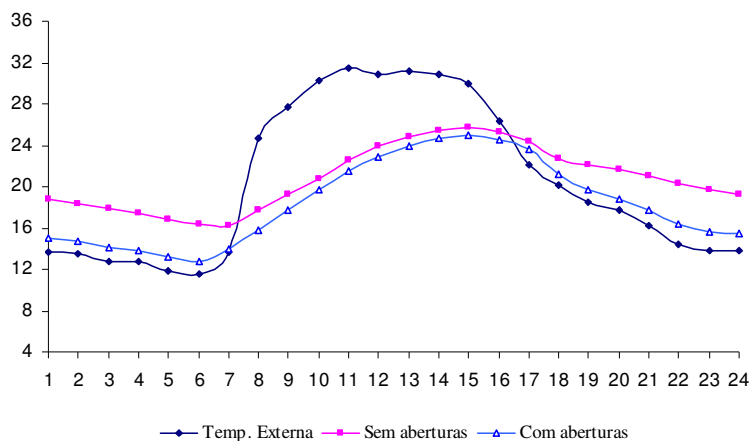


Figura 8 – Evolução temporal das temperaturas obtidas com aberturas para ventilação da zona térmica.

Na Figura 9, apresenta-se o somatório de graus-hora necessários para o aquecimento do ambiente, considerando parede Trombe com placa cimentícia e respiradouros abertos no período noturno.

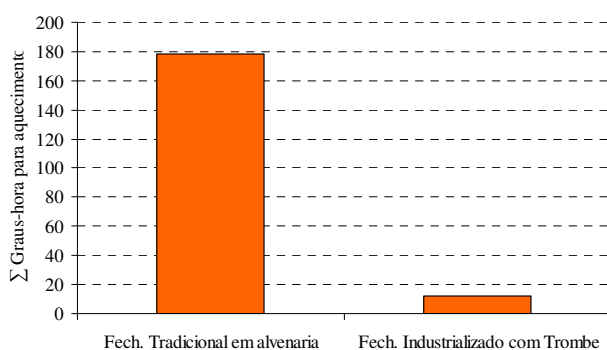


Figura 9 – Graus-hora necessários para o aquecimento.

Observa-se pelos resultados mostrados que a utilização do fechamento com parede Trombe reduz consideravelmente o número de graus-hora necessários para o aquecimento do ambiente em torno de 93 %.

5. CONCLUSÕES

O uso da inércia térmica é indispensável para controlar as temperaturas máximas e mínimas no período de inverno. Deve-se prever no estudo da composição dos fechamentos a capacidade de amortecimentos dos elementos constituintes.

A parede Trombe se constitui numa estratégia de eficiência energética de edificações que deve ser considerada desde o projeto, para evitar problemas de superaquecimento dos ambientes. Este sistema passivo pode contribuir consideravelmente na diminuição dos gastos energéticos com aquecimento, mesmo no inverno de um clima tropical como o da cidade de Ouro Preto - MG.

6. REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERING. **Thermal environmental conditions for human occupancy**. ANSI/ASHRAE 55:2004. Atlanta, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações** (2005) – 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.

BROWN, G. Z. **Sol, vento e luz: estratégias para o projeto de arquitetura**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

GOMES, A. P.; SOUZA, H. A. Simulação numérica do desempenho térmico de edificações em *Light Steel Framing*. In: IX Encontro Nacional e V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 9, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto, 2007, p. 798-806.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria** - ISO 7730:2006. Germany, 2006.

IZARD, J.; GUYOT, A. **Arquitetura Bioclimática**. Barcelona: Gustavo Gili, 1980.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY (2006). **EnergyPlus Input Output Reference: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output**. April 20.

PAPST, Ana Lígia. **Uso de Inércia térmica no clima subtropical. Estudo de caso em Florianópolis – SC**. Florianópolis, 1999. 165 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

RIVERO, Roberto. **Arquitetura e Clima: condicionamento térmico natural**. 2ª edição. Porto Alegre: D.C. Luzzatto Editores, 1986.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio da FAPEMIG e da Fundação Gorceix a este trabalho.