

Paredes orientadas a leste e a oeste: uma abordagem crítica em relação ao conforto e à eficiência energética

*East and west oriented walls: a critical approach to comfort
and energy efficiency*

Ariovaldo Denis Granja
Lucila Chebel Labaki

Resumo

O objetivo principal deste artigo é a comparação térmica e energética em regime periódico de duas paredes com orientação leste e oeste com desempenhos idênticos em regime permanente. O fenômeno da inércia térmica foi analisado empregando-se soluções periódicas para a equação de condução de calor proposta por Fourier. Utilizou-se o método da análise harmônica para cálculo dos coeficientes, através de um período de 24 h, para a região de Campinas, SP. Tradicionalmente no Brasil, sistemas de coberturas e paredes têm sido concebidos com base no coeficiente global de transmitância térmica (U). Os valores de U possibilitam apenas a tomada de decisões preliminares sobre a adoção de determinados sistemas de coberturas e paredes, uma vez que eles não retratam o comportamento dinâmico da onda térmica. Os resultados mostram que duas paredes idênticas em regime permanente podem apresentar comportamentos térmico e energético bastante distintos, quando analisadas em condições dinâmicas. Infere-se, portanto, que a seleção de sistemas de paredes, e também de coberturas, deve se basear nos efeitos sobre a capacidade de nivelamento dos picos de carga térmica e sobre a demanda por energia gerada artificialmente para o conforto, guardando relação também com o regime de utilização da edificação em questão.

Palavras-chave: inércia térmica, paredes, temperatura sol-ar, regime periódico.

Abstract

The primary aim of this paper is to compare the thermal and energetic response under periodic conditions of two west-oriented wall systems, which have the same performance when analyzed under steady-state environments. Thermal inertia has been addressed using periodic solutions of the heat conduction equation proposed by Fourier, by means of harmonic analysis, for a period of twenty-four hours, in the region of Campinas - SP. In Brazil, walls and roof systems have traditionally been designed using the steady-state overall heat transfer coefficient (U-value). U-values only allow preliminary design decisions for some wall and roof systems, as they do not encompass the dynamic performance of the thermal wave. The results show that two identical walls under steady-state conditions may have very distinct thermal and energetic performances, when analyzed under dynamic environments. The suggested inferences are that the selection of local walls and roof systems should be based on their ability for peak load leveling and on the consequences for cooling energy demand, and that the use pattern of the building has also to be considered.

Keywords: thermal inertia, walls, sol-air temperature, periodic heat flow

Ariovaldo Denis Granja
Departamento de Arquitetura e
Construção
Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo
Universidade Estadual de Campinas
Caixa Postal 6021
CEP: 13083-970
Campinas, SP- Brasil
Tel: (19) 3788-2082
E-mail: adgranja@fec.unicamp.br

Lucila Chebel Labaki
Departamento de Arquitetura e
Construção
Faculdade de Engenharia Civil,
Arquitetura e Urbanismo
Universidade Estadual de Campinas
E-mail: lucila@fec.unicamp.br

Recebido em 24/05/04
Aceito em 07/11/04

Introdução

O nivelamento dos picos de carga térmica é um importante fator para a concepção de sistemas de coberturas e paredes, uma vez que ele terá influência decisiva no dimensionamento de eventuais sistemas de condicionamento térmico artificial. É possível a visualização do comportamento dinâmico da onda térmica empregando-se sistemas periódicos. Pouca importância se tem dado no Brasil para a concepção de sistemas de coberturas e paredes, que leve em conta a influência destes no desempenho térmico e energético da edificação como um todo. Uma parede concebida erroneamente pode atuar como um painel radiante em horas impróprias, fazendo com que o usuário seja obrigado a recorrer a um sistema artificial de condicionamento térmico, que muitas vezes não resolve o problema. A concepção de paredes e coberturas com base no coeficiente global de transmitância térmica em regime permanente (U) é o mínimo que se espera como parâmetro de tomada de decisões dos projetistas. Porém, análises que considerem a variação periódica dos parâmetros climáticos externos, e a capacidade de armazenamento térmico de coberturas e paredes, fazendo uso desta energia armazenada no momento apropriado, são primordiais para o projetista com consciência energética e ambiental. Neste trabalho investiga-se o comportamento de paredes de comportamento idêntico em regime permanente, orientadas para o nascente e para o poente. Uma das questões práticas abordada é a freqüente sensação de “calor sufocante” em dormitórios voltados para o oeste, em razão do atraso mal dimensionado da onda de calor, fazendo com que o leigo busque a solução na instalação de equipamentos de ventilação e ar-condicionado. A partir destas constatações, verifica-se que há a necessidade do uso de métodos mais sofisticados para a concepção de coberturas e paredes, para a adequação térmica e energética às nossas condições climáticas.

Fundamentos teóricos

Trabalhos recentes vêm investigando a influência da inércia térmica no trópico úmido (PAPST, 1999, PAPST; LAMBERTS, 1999, SZOKOLAY, 2003; DORNELLES; RORIZ, 2003; OGOLI, 2003), recomendando diretrizes para seu uso como estratégia de conforto e de redução de consumo de energia nestas regiões. Adicionalmente, a influência de parâmetros climáticos na caracterização da resposta térmica de edificações foi investigada na cidade de São Paulo por Akutsu, Vittorino e Carballeira (1995).

Bansal, Garg e Kothari (1992), e Deshmukh et al. (1991) investigaram analiticamente a influência da

absortância à radiação solar e da emissividade de superfícies externas de edificações. Estudos adicionais neste tema mostraram que a influência da cor no desempenho térmico e energético está relacionada à massa térmica de cômodos (CHENG; NG; GIVONI, 2003) e também à inércia térmica de fechamentos opacos analisados isoladamente (GRANJA; LABAKI, 2003)¹. Estes trabalhos permitem inferir que o conflito entre a escolha cromática das superfícies externas para fins estéticos, e seus desempenhos em relação à eficiência energética, pode ser racionalmente resolvido se projetistas fizerem uso adequado do fenômeno da inércia térmica na concepção de fechamentos opacos.

O modelo de análise utilizado neste trabalho enfoca o fluxo de calor periódico através de sistemas de paredes homogêneas, fazendo algumas adaptações aos trabalhos clássicos de ALFORD et al. (1939) e MACKEY e WRIGHT (1944). As suposições principais assumidas neste trabalho são as seguintes:

- (a) As paredes possuem altura e comprimento infinitos, porém espessura finita. Desta forma despreza-se os efeitos nas extremidades. Supõe-se o fluxo térmico como sendo unidirecional, suficientemente preciso para fins de engenharia;
- (b) As paredes são constituídas de material homogêneo², e não são considerados os efeitos da umidade, principalmente os de condensação e evaporação, nas superfícies livres da parede. Soluções analíticas para o transporte simultâneo de calor e massa em elementos porosos podem ser encontradas nos trabalhos de Silveira Neto (1985) e Stopp et al. (2003). Simulações considerando o efeito acoplado de calor e massa podem ser conduzidas, entre outros, através dos programas de simulação Moist 2.1 e Umidus 2.0 (MENDES; CELINSKI, 2001);
- (c) Os coeficientes de transferência de calor internos e externos são constantes;
- (d) As variações de temperatura não influem nas propriedades termofísicas dos materiais;
- (e) A análise considera um dia típico de verão claro, e a temperatura interna é mantida constante; e

¹ Ressalta-se que o uso adequado da inércia térmica deve estar relacionado adicionalmente ao padrão de ocupação do cômodo em questão

² O presente artigo foca o efeito da inércia térmica na propagação da onda de calor através de um fechamento convencional e através de seu equivalente leve de concreto em regime permanente. Granja (2002) apresenta exemplos de transferência de calor em regime periódico através de fechamentos opacos porosos e compostos, utilizando simplificações tais como a não consideração dos efeitos da umidade, da resistência de contato entre camadas e dos efeitos nas extremidades dos mesmos.

(f) A absorptância à radiação solar α da superfície externa independe do ângulo de incidência dos raios solares.

A reprodução analítica da temperatura sol-ar (t_{sa}) foi obtida utilizando-se análise harmônica. A t_{sa} , por sua vez, foi o parâmetro de decisão para a determinação do dia típico de verão empregado na análise. Para que a reprodução analítica da t_{sa} fosse possível, foi necessária a seleção de um dia típico claro, utilizando-se como critério de decisão índices de transparência (K_t) superiores a 0,75 (LIU; JORDAN, 1960).

Pode-se afirmar que duas paredes apresentam desempenho térmico idêntico em regime permanente, quando ambas possuem a mesma absorptância à radiação solar α , a mesma relação entre a espessura e a condutividade térmica d/λ (resistência térmica) e quando ambas apresentam a mesma emissividade de radiação de onda longa ε .

As paredes analisadas são confinadas aos planos $0 < x < d$. O plano $x=0$ está exposto à radiação solar e à temperatura ambiente externa. O plano $x=d$ está voltado ao interior do cômodo, onde a temperatura do ar interno t_i é mantida constante.

Em qualquer ponto no interior da parede pode-se estipular:

$$\left(\frac{\lambda}{\rho c}\right)\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right) = \frac{\partial t}{\partial \theta} \quad (1)$$

A solução da Equação 1 obedece as seguintes condições de contorno:

Na superfície externa:

$$q_e = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=0} = h_e (t_{sa} - t_{s,e}) \quad (2)$$

onde,

$$t_{sa} = t_{e,m} + \frac{\alpha I}{h_e} - \frac{\varepsilon \delta r}{h_e} \quad (3)$$

é a temperatura sol-ar.

A temperatura sol-ar pode ser expandida através de séries de Fourier, durante um período de 24 h, assumindo a seguinte forma:

$$t_{sa} = t_{sa,m} + \sum_{n=1}^{\infty} t_{sa,n} \cos(\omega_n \theta - \psi_n) \quad (4)$$

Na superfície interna, tem-se:

$$q_i = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=d} = h_i (t_{s,i} - t_i) \quad (5)$$

Resolvendo-se a Equação 1, submetida às condições de contorno das Equações 2 e 5, chega-se à expressão para a densidade de fluxo de calor para o interior do cômodo, como segue:

$$q_i = U \left[(t_{sa,m} - t_i) + \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n t_{sa,n} \cos(\omega_n \theta - \psi_n - \varphi_n) \right] \quad (6)$$

De maneira análoga, a expressão para a temperatura na superfície interna da parede é dada por:

$$t_{s,i} = t_i + \frac{1}{h_i} \left[U (t_{sa,m} - t_i) + \sum_{n=1}^{\infty} V_n t_{sa,n} \cos(\omega_n \theta - \psi_n - \varphi_n) \right] \quad (7)$$

onde U, o coeficiente global de transmitância térmica, é dado por:

$$U = \left(\frac{1}{h_e} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_i} \right)^{-1} \quad (8)$$

Adicionalmente,

$$V_n = \frac{h_e h_i}{\sigma_n \lambda \sqrt{y_n^2 + Z_n^2}} \quad (9)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\omega_n}{2 \alpha_d}} \quad (10)$$

$$\alpha_d = \frac{\lambda}{\rho c} \quad (11)$$

$$Y_n = \left(\frac{h_e h_i}{2 \sigma_n^2 \lambda^2} + 1 \right) \cos \sigma_n d \operatorname{senh} \sigma_n d + \left(\frac{h_e h_i}{2 \sigma_n^2 \lambda^2} - 1 \right) \operatorname{sen} \sigma_n d \cosh \sigma_n d + \left(\frac{h_e + h_i}{\sigma_n \lambda} \right) \cos \sigma_n d \cosh \sigma_n d \quad (12)$$

$$Z_n = \left(\frac{h_e h_i}{2\sigma_n^2 \lambda^2} + 1 \right) \text{sen } \sigma_n d \cosh \sigma_n d - \left(\frac{h_e h_i}{2\sigma_n^2 \lambda^2} - 1 \right) \cos \sigma_n d \text{senh } \sigma_n d \quad (13)$$

$$+ \left(\frac{h_e + h_i}{\sigma_n \lambda} \right) \text{sen } \sigma_n d \text{senh } \sigma_n d$$

$$\varphi_n = \arctan \left(\frac{Z_n}{Y_n} \right) \quad (14)$$

$$\mu_n = \frac{V_n}{U} \quad (15)$$

Resultados e discussão

Na determinação do dia típico de verão, valores da temperatura do ar ambiente e horas de insolação diárias foram utilizados (Figura 1), compreendendo dados locais no período de 1996 a 2000 (GRANJA, 2002). Os cálculos relativos ao dia típico de verão claro para Campinas/SP (29 de janeiro de 1986) consideraram os seguintes parâmetros: $h_i = 6,3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $h_e = 21,9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, $t_i = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, $\delta r = 0$ (superfícies verticais), $\varepsilon = 0,9$.

As propriedades termofísicas para as duas paredes cinza de comportamento idêntico em regime permanente, com absorvância à radiação solar $\alpha = 0,61$ (CASTRO et al., 2001), são as seguintes (ABNT, 1998):

(a) Fechamento 1: Concreto: $\rho = 2.200 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,75 \text{ W/m K}$, $c = 1,00 \text{ kJ/kg K}$

(b) Parede 2: Concreto com argila expandida: $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,20 \text{ W/m K}$, $c = 1,00 \text{ kJ/kg K}$

Utilizando-se dados horários para a radiação solar incidente em uma superfície vertical oeste, e dados horários da temperatura do ar ambiente no dia típico de verão, expandiu-se a temperatura sol-ar através de séries de Fourier, por um período de 24 h, utilizando-se a Equação 4.

Foram necessários 8 harmônicos para que as curvas das temperaturas sol-ar para cada orientação, obtidas por séries de Fourier, convergissem com as curvas naturais. Para a automatização dos cálculos, expandiu-se a planilha eletrônica Transcalor (GRANJA, 2002) para 8 harmônicos, necessários às superfícies verticais, contra os 2 harmônicos da versão original, que foram suficientes para as simulações em superfícies horizontais naquele trabalho.

A convergência da temperatura sol-ar foi realizada através da equação 4. Em se tratando de superfícies verticais, foi necessária a iteração até o oitavo harmônico para reproduzir através de séries de Fourier a temperatura sol-ar nas orientações leste e oeste (Figuras 2 e 3).

Os parâmetros para a convergência da temperatura sol-ar foram obtido pelo Transcalor através de análise de Fourier, e são dados nas Tabelas 1 (leste) e 2 (oeste).

Para a comparação das duas paredes com desempenhos idênticos em regime permanente, os seguintes parâmetros termofísicos foram adotados (Tabela 3)³:

Os parâmetros prévios permitem calcular a densidade de fluxo de calor (q_i) do ambiente externo para a superfície interna das paredes. A seguir mostra-se a dependência temporal de q_i para as duas paredes consideradas, na orientação leste (Figura 4) e na oeste (Figura 5), utilizando-se a Equação 6.

A densidade de fluxo total em um período de 24 h q_{i24h} pode ser obtida, integrando-se as curvas horárias de q_i para ambas as paredes nas duas orientações diferentes. Como era de se esperar, a energia total em 24 h atravessando ambas as paredes é igual, $q_{i24h} = 680,5 \text{ Wh/m}^2$, tanto na orientação leste como na oeste, já que elas possuem desempenho térmico idêntico em regime permanente.

De maneira análoga apresenta-se a seguir as variações periódicas das temperaturas nas superfícies internas das 2 paredes, contemplando as orientações leste (Figura 6) e oeste (Figura 7).

Os gráficos anteriores permitem sintetizar dados relativos às amplitudes de densidades de fluxo de calor (Δq_i) e de temperaturas nas superfícies internas ($\Delta t_{s,i}$). Estas amplitudes sugerem inferências relacionadas ao comportamento térmico dinâmico durante um período de 24 h para o dia quente de verão analisado. Pela Tabela 4, nota-se que a parede com maior massa (concreto) possui um comportamento térmico mais suave em relação à sua equivalente em regime permanente de menor massa (concreto com argila expandida).

³ A intenção primária do artigo é comparar duas paredes de concreto (convencional e leve) com desempenhos idênticos em regime permanente, ressaltando suas diferenças de comportamento térmico e energético quando analisadas em regime periódico. As considerações relacionadas à disponibilidade comercial da parede composta por concreto com argila expandida (leve) não foram levadas em consideração.

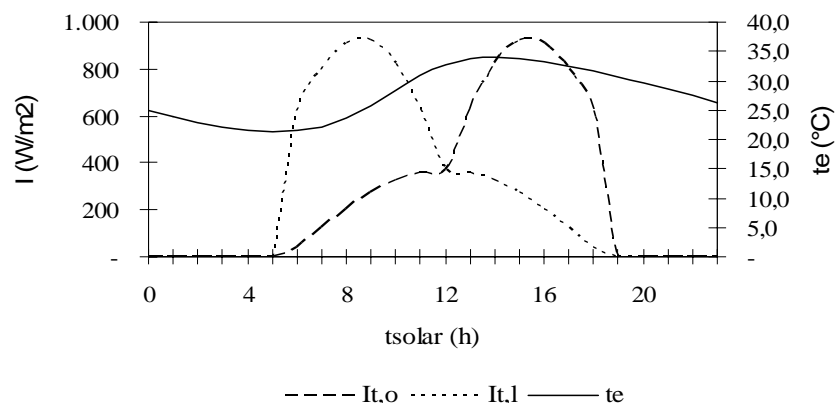


Figura 1 - Temperatura do ar ambiente t_e , intensidade total de radiação solar $I_{t,o}$ sobre uma superfície vertical com orientação oeste, e intensidade total de radiação solar $I_{t,l}$ sobre uma superfície vertical com orientação leste para o dia típico de verão claro (29 de janeiro de 1986), para Campinas, SP ($22^{\circ}54''S$, $47^{\circ}05''W$, altitude de 693m)

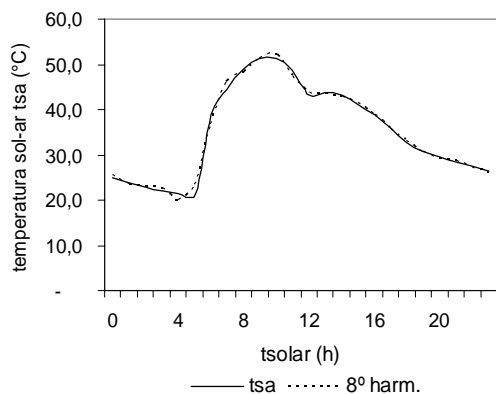


Figura 2 - Convergência da temperatura sol-ar para a parede com orientação leste, para o dia típico de verão de Campinas, SP, absortância à radiação solar $\alpha=0,61$

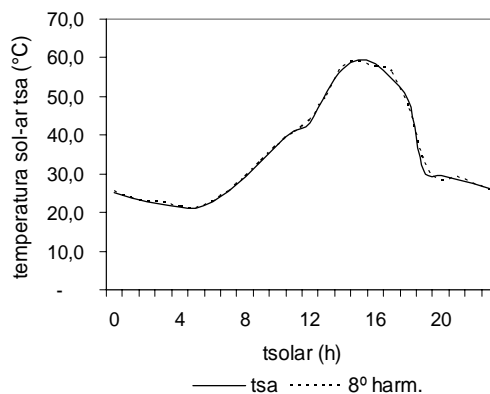


Figura 3: Convergência da temperatura sol-ar para a parede com orientação oeste, para o dia típico de verão de Campinas, SP, absortância à radiação solar $\alpha=0,61$

n	$t_{sa,m}$ (°C)	$t_{sa,n}$ (°C)	ψ_n (rad)
0	35,1	-	-
1	-	12,8	3,0543
2	-	4,8	-1,4312
3	-	3,2	0,0524
4	-	1,3	2,0769
5	-	0,7	2,4435
6	-	1,1	3,8921
7	-	1,0	-0,5760
8	-	0,5	0,8901

Tabela 1 - Análise de Fourier para o dia típico de verão claro de Campinas/SP para paredes com orientação leste, absortância à radiação solar $\alpha=0,61$ (cinza)

n	$t_{sa,m}$ (°C)	$t_{sa,n}$ (°C)	ψ_n (rad)
0	35,1	-	-
1	-	17,0	3,8572
2	-	5,4	1,4486
3	-	3,2	-0,0698
4	-	1,5	4,2586
5	-	0,7	3,8223
6	-	1,0	2,4435
7	-	1,0	0,5934
8	-	0,5	-0,9076

Tabela 2 - Análise de Fourier para o dia típico de verão claro de Campinas/SP para paredes com orientação oeste, absorvância à radiação solar $\alpha=0,61$ (cinza)

	Concreto	Concreto com argila expandida
d (m)	0,200	0,023
d/λ (m ² K/W)	0,115	0,115
U (W/m ² K)	3,130	3,130

Tabela 3 - Parede 1 (em concreto) e parede 2 (em concreto com argila expandida), ambas com desempenhos idênticos em regime permanente

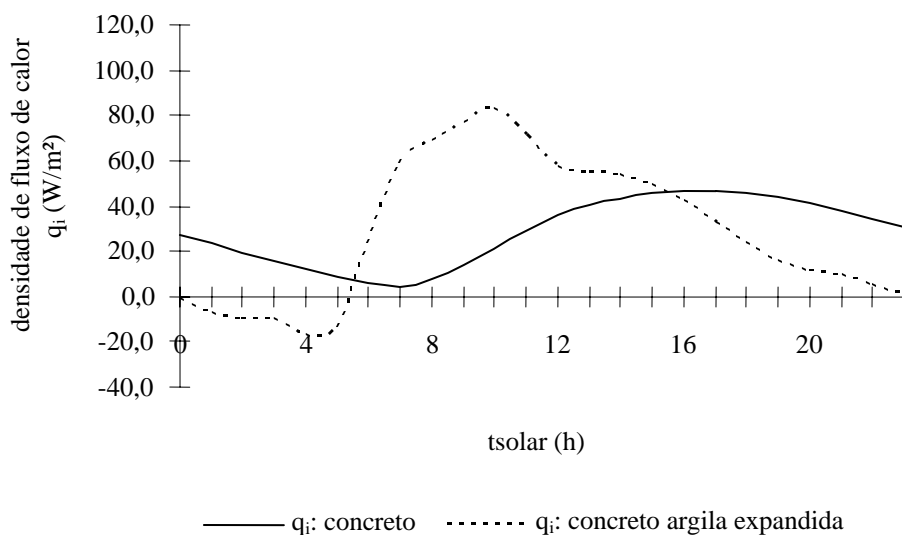


Figura 4 - Densidade de fluxo de calor (q_i) em regime periódico para as duas paredes, orientação leste, para o dia típico de verão

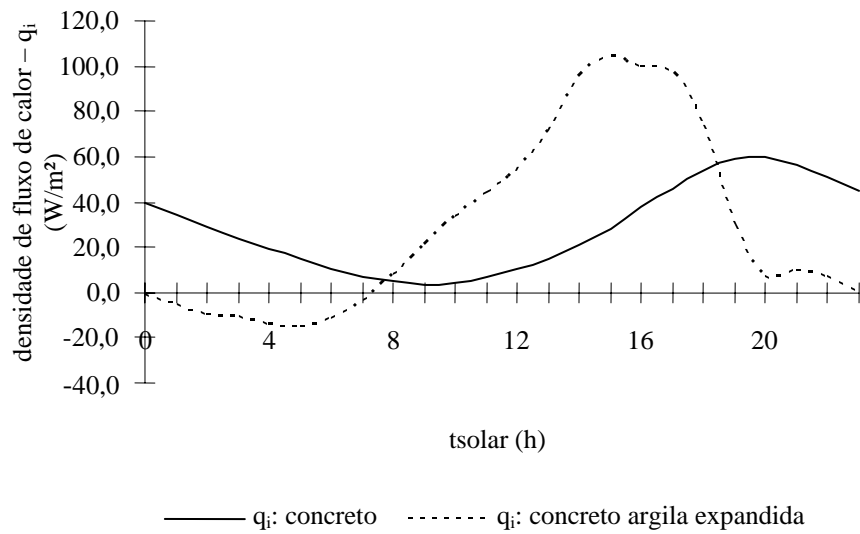


Figura 5 - Densidade de fluxo de calor (q_i) em regime periódico para as duas paredes, orientação oeste, para o dia típico de verão de calor (q_i) em regime periódico para as duas paredes, orientação oeste, para o dia típico de verão

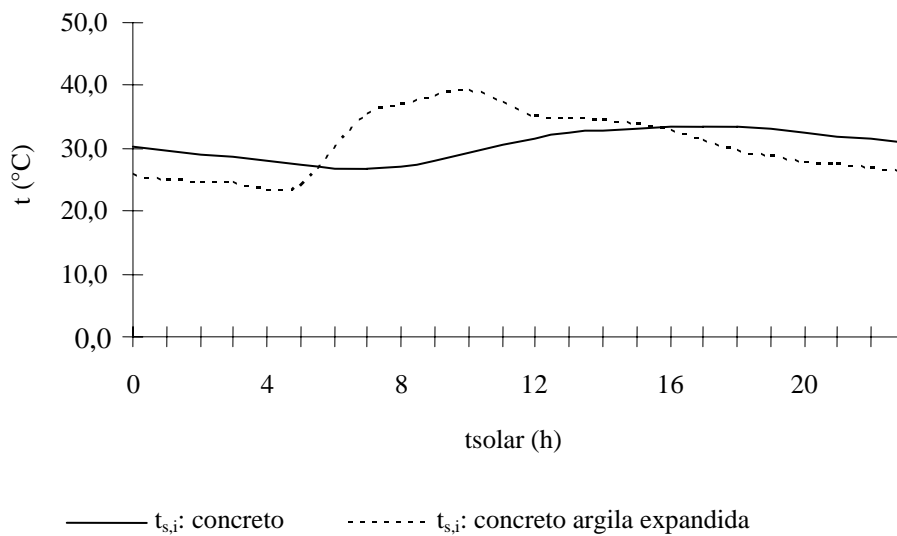


Figura 6 - Temperatura na superfície interna ($t_{s,i}$) em regime periódico para as duas paredes, orientação leste, para o dia típico de verão

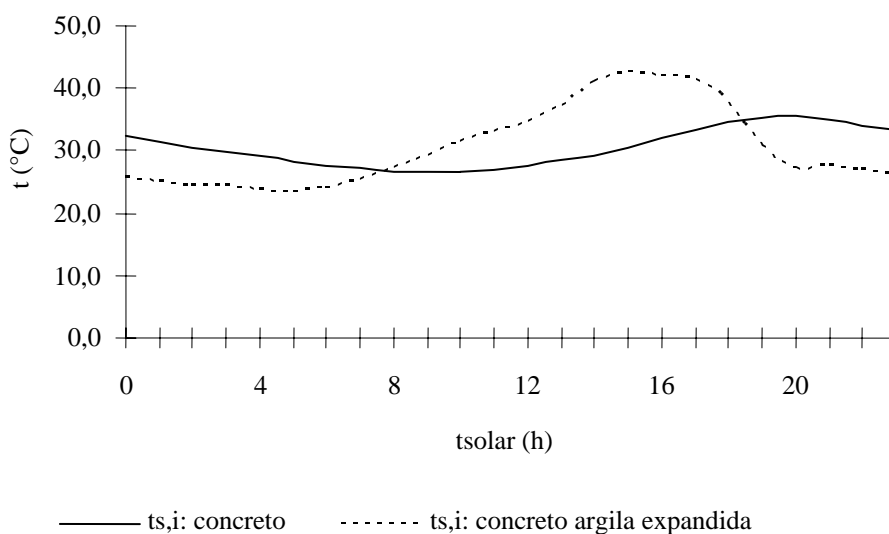


Figura 7 - Temperatura na superfície interna ($t_{s,i}$) em regime periódico para as duas paredes, orientação oeste, para o dia típico de verão

Com relação à adoção de uma ou outra solução para fechamentos externos de edificações, os resultados anteriores permitem obter inferências importantes. Evidentemente, o ganho térmico no período de 24 h obtido pela integração das curvas de densidade de fluxo de calor é idêntico para as duas paredes, independente da orientação, e atingiu um valor de $680,5 \text{ Wh/m}^2$. Adicionalmente, o modelo periódico mostra que fechamentos mais leves tendem a adiantar sensivelmente o pico de carga térmica para dentro do cômodo em relação a fechamentos de massas mais elevadas. Portanto, pode-se inferir que os dois sistemas de paredes analisados conduzem a padrões distintos de comportamento relativos à onda térmica, guardando relação com a massa de cada um. Esta diferenciação de comportamento da onda térmica pode ocasionar reações e graus de desconforto ao usuário em diferentes horas do dia, segundo a adoção de um sistema de parede com maior ou menor massa.

Pode-se inferir adicionalmente que paredes leves orientadas a leste podem ter seus picos de carga térmica logo no início do dia (Figura 4), o que pode acarretar em fator de desconforto, e conseqüentemente de ineficiência energética, em edificações com períodos de ocupação neste período como salas de aula, por exemplo. Por outro lado, edificações com paredes de massa elevada também podem causar desconforto, e determinar consumo desnecessário de energia. É o caso de dormitórios com paredes de orientação oeste. Analisando-se a parede de concreto de massa mais elevada, nota-se pela Figura 5 as quantidades de energia térmica sendo transferidas para dentro do cômodo em horário de notada ocupação de dormitórios. Os exemplos adotados neste trabalho para os sistemas de parede permitem inferir que o uso do atraso térmico da parede de concreto com orientação oeste seria mais recomendável, por exemplo, em salas comerciais que geralmente apresentam pouca ocupação noturna.

Orientação	Parâmetro	Concreto	Concreto com argila expandida
leste	$q_{i\text{máx}}$ (W/m ²)	46,8	82,9
	$q_{i\text{mín}}$ (W/m ²)	4,4	-17,4
	$t_{s,i\text{máx}}$ (°C)	33,4	39,2
	$t_{s,i\text{mín}}$ (°C)	26,7	23,2
	Δq_i (W/m ²)	42,4	100,3
	$\Delta t_{s,i}$ (°C)	6,7	16,0
oeste	$q_{i\text{máx}}$ (W/m ²)	60,1	104,2
	$q_{i\text{mín}}$ (W/m ²)	3,6	-15,4
	$t_{s,i\text{máx}}$ (°C)	35,5	42,5
	$t_{s,i\text{mín}}$ (°C)	26,6	23,6
	Δq_i (W/m ²)	56,5	119,6
	$\Delta t_{s,i}$ (°C)	8,9	18,9

Tabela 4 - Parâmetros de desempenho da parede de maior massa (concreto) e a equivalente em regime permanente de menor massa (concreto com argila expandida), relativos ao dia típico de verão de Campinas, SP, orientações leste e oeste

Conclusões

O fenômeno da inércia térmica merece ser analisado em detalhe no projeto de fechamentos opacos de edificações. A utilização do coeficiente global de transmitância térmica (U) é o mínimo esperado para a concepção de fechamentos opacos externos, porém os resultados deste trabalho mostram as limitações de sua aplicação pura e simples como parâmetro de decisão, uma vez que o comportamento dinâmico da onda térmica não é retratado. Como visto, duas paredes de comportamento idêntico em regime permanente podem ter comportamentos distintos quando analisadas em regime periódico, podendo resultar em desconforto e ineficiência energética dados os padrões diferentes de comportamento da onda térmica. A concepção de sistemas de paredes deve levar em conta também o período de utilização da edificação, permitindo inferir que o adiantamento dos picos da onda térmica, causado por uma parede mais leve em relação a uma de maior massa, pode ser justificável sob o ponto de vista do período de uso do cômodo; o mesmo raciocínio vale para justificar o uso do maior atraso térmico das paredes de maior massa. Estudos adicionais enfocando comparações dos resultados aqui apresentados com programas de simulação disponíveis são recomendados. Além disso, estudos levando em consideração outras tipologias de paredes e de coberturas, são necessários para a obtenção de recomendações mais detalhadas para a concepção destes sistemas em cada condição climática analisada.

Referências bibliográficas

- AKUTSU, M.; VITTORINO, F.;
 CARBALLEIRA, L.F.A. A influência do comportamento climático na resposta térmica de edificações. *In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC)*, 3., 1995, Gramado, RS. **Anais....** Porto Alegre, RS: [S.n.].p. 323-327. CD-ROM.
- ALFORD, J.S.; RYAN, J.E.; URBAN, F.O. Effect of heat storage and variation in outdoor temperature and solar intensity on heat transfer through walls. **American Society of Heating and Ventilating Engineers**, Atlanta, GA, USA, v. 45, p. 369-396, 1939.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Projeto de norma 02: 135.07.002. Desempenho térmico de edificações**. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 1998.
- BANSAL, N.K.; GARG, S.N.; KOTHARI, S. Effect of exterior surface colour on the thermal performance of buildings. **Building and Environment**, Great Britain, v. 27, n. 1, p. 31-37, 1992.
- CASTRO, A.P.A.S.; LABAKI, L.C.; CARAM; R.M.; BASSO, A. Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral. *In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 6., 2001, São Pedro, SP. **Anais....** Campinas, p. 285-286. CD-ROM.

- CHENG, V.; NG, E.; GIVONI, B. Sensivity of envelope colour: effect of thermal mass, windows, and natural ventilation on high rise buildings in hot humid Hong Kong. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA)*, 20., 2003, Santiago, Chile. **Proceedings....** Santiago: [S.n.]. CD-ROM.
- DESHMUKH, M.K.; SODHA, M.S.; SAWHNEY, R.L.; SHARMA, A.K. Effect of solar absorptivity and emissivity of exterior surfaces on the thermal performance of a building. **International Journal of Energy Research**, Indianapolis, USA, v. 15, p. 317-329, 1991.
- DORNELLES, K.A.; RORIZ, M. Inércia térmica, conforto e consumo de energia em edificações na cidade de São Carlos, SP. *In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 7., 2003, Curitiba. **Anais....** Curitiba: [S.n.].p. 369-376. CD-ROM.
- GRANJA, A.D. **Transmissão de calor em regime periódico: efeito da inércia térmica em fechamentos opacos**. Campinas, 2002. 121 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.
- GRANJA, A.D.; LABAKI, L.C. Influence of external surface colour on the periodic heat flow through a flat solid roof with variable thermal resistance. **International Journal of Energy Research**, Indianapolis, USA, v. 27, n. 8, p. 771-779, June 2003.
- LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v. 4, n. 3, p. 1-19, 1960.
- MACKEY, C.O.; WRIGHT, L.T. Periodic heat flow - homogeneous walls or roofs. **American Society of Heating and Ventilating Engineers**, Atlanta, GA, USA, v. 50, p. 293-312, 1944.
- MENDES, N.; CELINSKI, F. Análise comparativa entre programas de previsão de transferência de calor e de umidade. *In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 6., 2001, São Pedro, SP. **Anais...** [S.l.]: [S.n.], 2001. p. 1-8.
- OGOLI, D. M. Predicting indoor temperatures in closed buildings with high thermal mass. **Energy and Buildings**, v. 35, p. 851-862, 2003.
- PAPST, A. L. **Uso da inércia térmica no clima subtropical: estudo de caso em Florianópolis - SC**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- PAPST, A. L.; LAMBERTS, R. Desempenho térmico de 3 edificações residenciais em Florianópolis - SC. *In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 5., 1999, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza, CE, 1999. p. 1-8.
- SILVEIRA NETO, A. **Soluções exatas para o problema de transporte simultâneo de calor e massa em elementos porosos unidimensionais**. 1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1985.
- STOPP, H.; STRANGFELD, P.; MENDES, N. Energy saving and the hygrothermal performance of envelope parts of buildings. *In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO*, 7., 2003, Curitiba, PR. **Anais...** Curitiba: [S.n.], 2003. p. 43-71.
- SZOKOLAY, S.V. The role of thermal mass in warm-humid climate housing. *In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE*, 20., 2003, Santiago, Chile. **Proceedings....** [S.l.]: [S.n.].p. 1-7. CD-ROM

Notação

c : calor específico (kJ/kg K)

d : espessura da parede (m)

h_e : coeficiente de transmissão de calor da superfície externa da parede (W/m² K)

h_i : coeficiente de transmissão de calor da superfície interna da parede (W/m² K)

I : radiação solar total incidente sobre a superfície externa da parede (W/m²)

q_e : densidade de fluxo de calor do ambiente à superfície externa da parede (W/m²)

q_i : densidade de fluxo de calor da superfície interna da parede ao interior da edificação (W/m²)

q_{124h} : densidade de fluxo de calor total em 24 h da superfície interna da parede ao interior da edificação (Wh/m²)

t : temperatura (°C)

t_e : temperatura do ar externo para o dia típico de verão (°C)

$t_{e,m}$: temperatura média do ar externo para o dia típico de verão (°C)

t_i : temperatura do interior da edificação, mantida constante (°C)

$t_{s,e}$: temperatura da superfície externa da parede (°C)

$t_{s,i}$: temperatura da superfície interna da parede (°C)

t_{sa} : temperatura sol-ar (°C)

$t_{sa,m}$: temperatura sol-ar média para um período de 24h (°C)

$t_{sa,n}$: coeficiente harmônico (°C)

U : coeficiente global de transmissão térmica (transmitância térmica) (W/m² K)

Vn : fator dado pela Equação (09) (W/m² K)

Y_n : fator dado pela Equação (12) (adimensional)

Z_n : fator dado pela Equação (13) (adimensional)

α : absorptância à radiação solar (adimensional)

α_d : difusividade térmica (m²/h)

δr : diferença entre a radiação de onda longa incidente na superfície através da abóbada celeste e entorno, e a radiação emitida por um corpo negro submetido à temperatura atmosférica (W/m²)

Δq_i : amplitude de densidade de fluxo de calor (W/m²)

$\Delta t_{s,i}$: amplitude da temperatura na superfície interna (°C)

ε : emissividade de radiação de onda longa (adimensional)

φ_n : ângulo de defasagem ou de atraso - Equação (14) (h)

λ : condutividade térmica (W/m K)

μ_n : fator de amortecimento para a amplitude da onda - Equação (15) (adimensional)

θ : tempo solar (h)

ρ : densidade de massa aparente (kg/m³)

σ_n : fator definido pela Equação (10) (m⁻¹)

$\omega_n = 2\pi/24h$: frequência angular da onda térmica (radianos/h)

ψ_n : ângulo de fase para a temperatura sol-ar (radianos)