

DUAS PAREDES IDÊNTICAS EM REGIME PERMANENTE: COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO EM REGIME PERIÓDICO

Ariovaldo Denis Granja ; Lucila Chebel Labaki

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil
Departamento de Arquitetura e Construção
CP 6021 – CEP 13083 – 970, Campinas/SP
Tel.: +55 19 3788-2384 ; Fax: +55 19 3788-2411
e-mail: denistg@uol.com.br

RESUMO

O objetivo principal desta pesquisa é a comparação térmica e energética em regime periódico de duas paredes com orientação oeste, que apresentam 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. A seleção de sistemas de coberturas e paredes deve se basear em seus efeitos sobre a capacidade de nivelamento dos picos de carga térmica e sobre a demanda por energia gerada artificialmente para o conforto. Conclui-se que duas paredes idênticas em regime permanente podem apresentar comportamentos térmico e energético bastante distintos, quando analisadas em condições dinâmicas.

ABSTRACT

The primary aim of this research is to compare the thermal and energetic response under periodic conditions of two west oriented wall systems, with the same performance when analyzed under steady-state environments. Thermal inertia has been addressed using periodic solutions of the equation of heat conduction proposed by Fourier, by means of harmonic analysis, for a period of twenty-four hours. Traditionally in Brazil, walls and roof systems have been designed using the steady-state overall heat transfer coefficient (U-value). U-values only allow taking preliminary design decisions of these construction systems, as they do not encompass the dynamic performance of the thermal wave. It is shown 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. One may conclude that two identical walls under steady-state conditions may have very distinct thermal and energetic performances, when analyzed under dynamic environments.

1. 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 dinâmico de duas paredes idênticas em regime permanente, orientadas para o poente. É freqüente a 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. Abordou-se esta questão, mostrando-se que há a necessidade do uso de métodos mais sofisticados para a concepção de coberturas e paredes, para que haja adequação térmica e energética às nossas condições climáticas. Este artigo complementa GRANJA e LABAKI, 2002, pois estende a análise às superfícies verticais, que requerem um maior número de harmônicos.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Esta pesquisa enfoca o fluxo de calor periódico através de sistemas de paredes homogêneas, fazendo algumas adaptações aos trabalhos clássicos de ALFORD *et alii*, 1939 e MACKEY e WRIGHT, 1944. As suposições principais assumidas neste trabalho são as seguintes:

- 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.
- As paredes são constituídas de material homogêneo, e não são considerados os efeitos da umidade, principalmente os de condensação e evaporação, nas superfícies livres da parede.
- Os coeficientes de superfície internos e externos são constantes,
- As variações de temperatura não influem nas propriedades termofísicas dos materiais.
- A análise considera um dia típico de verão claro, e a temperatura interna é mantida constante.
- A absorvância à radiação solar α da superfície externa independe do ângulo de incidência dos raios solares.

Pode-se afirmar que duas paredes apresentam desempenho térmico idêntico em regime permanente, quando ambas possuem a mesma absorvância à radiação solar α , a mesma relação entre a espessura e a condutividade térmica d/λ 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:

$$\left(\frac{\lambda}{\rho c}\right)\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right) = \frac{\partial t}{\partial \theta} \quad [\text{Eq. 01}]$$

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

Na superfície externa:

$$q_e = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=0} = h_e (t_{sa} - t_{s,e}) \quad [\text{Eq. 02}]$$

onde,

$$t_{sa} = t_{e,m} + \frac{\alpha I}{h_e} - \frac{\varepsilon \delta r}{h_e} \quad [\text{Eq. 03}]$$

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:

$$t_{sa} = t_{sa,m} + \sum_{n=1}^{\infty} t_{sa,n} \cos(\omega_n \theta - \psi_n) \quad [\text{Eq. 04}]$$

Na superfície interna, tem-se:

$$q_i = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=d} = h_i (t_{s,i} - t_i) \quad [\text{Eq. 05}]$$

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:

$$q_i = U \left[(t_{sa,m} - t_i) + \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n t_{sa,n} \cos(\omega_n \theta - \psi_n - \phi_n) \right] \quad [\text{Eq. 06}]$$

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

$$t_{s,i} = t_i + \frac{1}{h_i} \left[U (t_{sa,m} - t_i) + \sum_{n=1}^{\infty} V_n t_{sa,n} \cos(\omega_n \theta - \psi_n - \phi_n) \right] \quad [\text{Eq. 07}]$$

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

$$U = \left(\frac{1}{h_e} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_i} \right)^{-1} \quad [\text{Eq. 08}]$$

Adicionalmente,

$$V_n = \frac{h_e h_i}{\sigma_n \lambda \sqrt{y_n^2 + Z_n^2}} \quad ([\text{Eq. 09}]$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\omega_n}{2 \alpha_d}} \quad [\text{Eq. 10}]$$

$$\alpha_d = \frac{\lambda}{\rho c} \quad [\text{Eq. 11}]$$

$$Y_n = \left(\frac{h_e h_i}{2 \sigma_n^2 \lambda^2} + 1 \right) \cos \sigma_n d \sinh \sigma_n d + \left(\frac{h_e h_i}{2 \sigma_n^2 \lambda^2} - 1 \right) \sin \sigma_n d \cosh \sigma_n d + \left(\frac{h_e + h_i}{\sigma_n \lambda} \right) \cos \sigma_n d \cosh \sigma_n d \quad [\text{Eq. 12}]$$

$$Z_n = \left(\frac{h_e h_i}{2 \sigma_n^2 \lambda^2} + 1 \right) \sin \sigma_n d \cosh \sigma_n d - \left(\frac{h_e h_i}{2 \sigma_n^2 \lambda^2} - 1 \right) \cos \sigma_n d \sinh \sigma_n d + \left(\frac{h_e + h_i}{\sigma_n \lambda} \right) \sin \sigma_n d \sinh \sigma_n d \quad [\text{Eq. 13}]$$

$$\varphi_n = \arctan \left(\frac{Z_n}{Y_n} \right) \quad [\text{Eq. 14}]$$

$$\mu_n = \frac{V_n}{U} \quad [\text{Eq. 15}]$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na determinação do dia típico de verão, valores da temperatura do ar ambiente e horas de insolação diárias foram utilizadas (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:

$h_i = 6,3 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, $h_e = 21,9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, $t_i = 26 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\delta r = 0$ (superfícies verticais), $\varepsilon = 0,9$.

As propriedades termofísicas para as duas paredes cinza idênticas em regime permanente, com absorvância à radiação solar $\alpha=0,61$ (CASTRO *et alii*, 2001), são as seguintes:

Parede 1: Concreto:

$\rho = 2.200 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 1,74 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, $c = 1,00 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$

Parede 2: Concreto celular

$\rho = 500 \text{ kg/m}^3$, $\lambda = 0,20 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, $c = 1,00 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$

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 a curva da temperatura sol-ar obtida por séries de Fourier convergisse com a curva natural. 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.

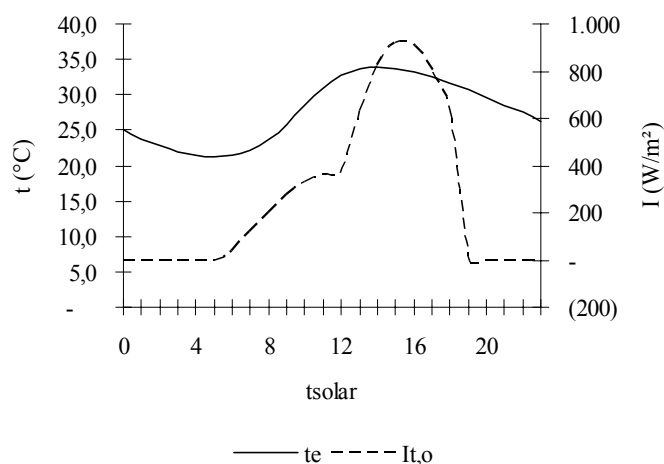


Figura 1: Temperatura do ar ambiente t_e e intensidade total de radiação solar $I_{t,o}$ sobre uma superfície vertical com orientação oeste para o dia típico de verão claro (29 de janeiro de 1986), para Campinas/SP (22°54'S , 47°05'W, altitude de 693m).

A Tabela 1 mostra os parâmetros obtidos para paredes verticais oeste, referentes ao dia típico de verão.

Tabela 1: 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).

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

As propriedades termofísicas das duas paredes idênticas em regime permanente podem ser consultadas na Tabela 2:

Tabela 2: Parede 1 em concreto, e parede 2 em concreto celular, ambas com desempenhos idênticos em regime permanente.

	Concreto	Concreto celular
d (m)	0,200	0,023

d/λ ($\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{W}$)	0,115	0,115
U ($\text{W}/\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$)	3,130	3,130

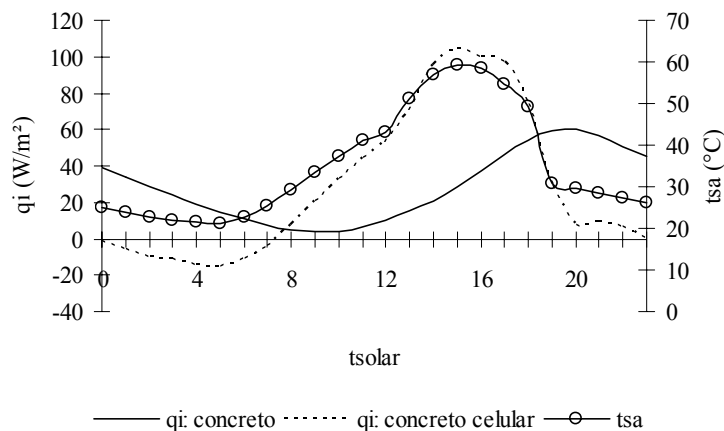


Figura 2: Densidade de fluxo de calor periódico q_i para as duas paredes e temperatura sol-ar t_{sa} para o dia típico de verão.

Os parâmetros prévios permitem calcular a densidade de fluxo de calor do ambiente externo para a superfície interna das paredes. A Figura 2 mostra a dependência temporal de q_i para as duas paredes consideradas, utilizando-se a Equação 6.

A densidade de fluxo total através de um período de 24 h q_{i24h} pode ser obtida, integrando-se as curvas horárias de q_i para ambas as paredes. Como era de se esperar, a energia total em 24 h atravessando ambas as paredes é igual, $q_{i24h}=680,5 \text{ Wh}/\text{m}^2$, já que elas possuem desempenho térmico idêntico em regime permanente. O atraso térmico φ_n em relação à t_{sa} e os coeficientes de amortecimento μ_n em condições periódicas são obtidos através das Equações 14 e 15, respectivamente, e são dados na Tabela 3.

Tabela 3: Atraso térmico φ_n em relação à t_{sa} e coeficiente de amortecimento μ_n para cada parede, no dia típico de verão.

	Concreto	Concreto celular
φ_n (h)	5,7	0,2
μ_n	0,497	0,999

A Tabela 3 mostra que a parede de concreto de espessura 20cm alcança um atraso térmico de 5,7h, enquanto que a de concreto celular com 2,3cm de espessura, e similar quando comparada em regime permanente, atinge 0,2h. Adicionalmente, o amortecimento da onda térmica pelo concreto é de aproximadamente 50%, e para o concreto celular este amortecimento não ocorre, devido à pouca espessura e à baixa massa específica aparente.

De maneira análoga obteve-se a variação temporal da temperatura na superfície interna de ambas as paredes, utilizando-se a Equação 7. Consultando-se a Figura 3, a parede de concreto apresenta um valor máximo de $t_{s,i}$ de 35,5 °C, e mínimo de 26,6 °C. Já para a parede de concreto celular estes valores são 42,5 °C e 23,6 °C, respectivamente. Portanto, a amplitude da $t_{s,i}$ para o concreto atinge 8.9 °C e para o concreto celular 18,9 °C.

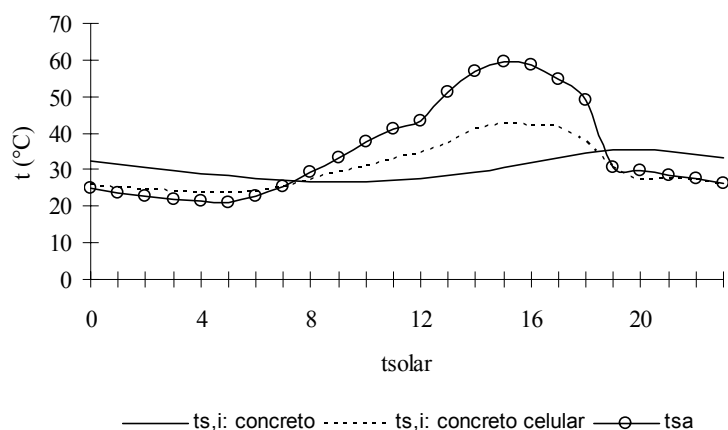


Figura 3: Temperatura na superfície interna $t_{s,i}$ para as duas paredes e temperatura solar t_{sa} para o dia típico de verão.

4. CONCLUSÕES

As duas paredes de concreto e de concreto celular, similares quando analisadas em regime permanente, apresentam comportamentos bastante distintos quando analisadas em regime periódico. Paredes com orientação oeste podem atuar como painéis radiantes em horários inconvenientes ao usuário, fazendo com que o mesmo busque formas de compensar o desconforto térmico na maioria das vezes através de consumo adicional de energia. As curvas temporais de densidade de fluxo de calor, e da temperatura na superfície interna das paredes, permitem que o projetista dimensione o fechamento, para que a energia térmica seja racionalmente aproveitada. Sistemas de paredes e coberturas devem ser selecionados com base em sua capacidade de atenuar os picos de carga térmica, e na demanda de energia para o conforto térmico. Observa-se que a inércia térmica pode ser uma importante estratégia bioclimática para o clima da região, para que sistemas de paredes e coberturas energeticamente eficazes sejam concebidos. A seqüência desta pesquisa deverá analisar outros tipos de sistemas de paredes, e seus respectivos materiais constituintes, considerando-se as demais orientações solares. Trabalhos futuros deverão ampliar o método de cálculo, considerando-se as variações na temperatura interna da edificação.

5. NOTAÇÃO

c calor específico (kJ/kg °C)	$t_{sa,n}$ coeficiente harmônico (°C)
d espessura da parede (m)	U coeficiente global de transmissão térmica (transmitância térmica) (W/m ² °C)
h_e coeficiente de transmissão de calor da superfície externa da parede (W/m ² °C)	V_n fator dado pela equação (09) (W/m ² °C))
h_i coeficiente de transmissão de calor da superfície interna da parede (W/m ² °C)	Y_n fator dado pela equação (12) (adimensional)
I radiação solar total incidente sobre a superfície externa da parede (W/m ²)	Z_n fator dado pela equação (13) (adimensional)
q_e densidade de fluxo de calor do ambiente à superfície externa da parede (W/m ²)	α absorvância à radiação solar (adimensional)

q_i densidade de fluxo de calor da superfície interna da parede ao interior da edificação (W/m^2)	α_d difusividade térmica (m^2/h)
q_{i24h} densidade de fluxo de calor total em 24 h da superfície interna da parede ao interior da edificação (Wh/m^2)	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/m^2)
t temperatura ($^{\circ}C$)	ε emissividade de radiação de onda longa (adimensional)
t_e temperatura do ar externo para o dia típico de verão ($^{\circ}C$)	φ_n ângulo de defasagem ou de atraso - equação (14) (h)
$t_{e,m}$ temperatura média do ar externo para o dia típico de verão ($^{\circ}C$)	λ condutividade térmica ($W/m\ ^{\circ}C$)
t_i temperatura do interior da edificação, mantida constante ($^{\circ}C$)	μ_n fator de amortecimento para a amplitude da onda - equação (15) (adimensional)
$t_{s,e}$ temperatura da superfície externa da parede ($^{\circ}C$)	θ tempo solar (h)
$t_{s,i}$ temperatura da superfície interna da parede ($^{\circ}C$)	ρ massa específica aparente (kg/m^3)
t_{sa} temperatura sol-ar ($^{\circ}C$)	σ_n fator definido pela equação (10) (m^{-1})
$t_{sa,m}$ temperatura sol-ar média para um período de 24h ($^{\circ}C$)	$\omega_n = 2\pi/24h =$ frequência angular da onda térmica (radianos/h)
	ψ_n ângulo de fase para a temperatura sol-ar (radianos)

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFORD, J. S., RYAN, J. E., URBAN, F. O. (1939) Effect of heat storage and variation in outdoor temperature and solar intensity on heat transfer through walls. *American Society of Heating and Ventilating Engineers*, v. 45, p. 369-396, 1939.
- CASTRO, A. P. A. S., LABAKI, L. C., CARAM de ASSIS, R. M., BASSO, A. (2001) Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral. In: VI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, São Pedro. *Anais...* p. 285-286.
- GRANJA, A. D., LABAKI, L. C. (2002) Periodic heat flow: thermal inertia as a bioclimatic strategy for thermal comfort and energy efficiency in buildings of Brazil. In: PLEA 2002: DESIGN WITH THE ENVIRONMENT, Toulouse, France. *Meio digital: CD-ROM*, p. 159-162.
- GRANJA, A. D. (2002) Transmissão de calor em regime periódico: efeito da inércia térmica em fechamentos opacos. Campinas, 121p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.
- MACKEY, C. O., WRIGHT, L.T. (1944) Periodic heat flow – homogeneous walls or roofs. *American Society of Heating and Ventilating Engineers*, v. 50, p. 293-312, 1944.