

## DETERMINAÇÃO DOS VALORES DO COEFICIENTE DE TROCA SUPERFICIAL EXTERNO ( $h_e$ ) E INTERNO ( $h_i$ ) DE MATERIAIS TRANSPARENTES

**Santos, Joaquim(1), Sichieri, Eduvaldo(2), Caram, Rosana(2), Labaki, Lucila(3)**

(1) Universidade Federal de Santa Maria / Doutorado USP – São Carlos, SP

(2) Universidade de São Paulo – São Carlos / Departamento de Arquitetura e Urbanismo  
Av. Trabalhador São-carlense 400, São Carlos – SP  
CEP 13566-590 Brasil -Tel.: +55 XX 16 2739315

E-mail: [joapizzu@sc.usp.br](mailto:joapizzu@sc.usp.br) / [sichieri@sc.usp.br](mailto:sichieri@sc.usp.br) / [rcaram@sc.usp.br](mailto:rcaram@sc.usp.br)

(3) Departamento de Engenharia Civil / UNICAMP

C. P. 6021, Campinas, SP -Tel.: +55 XX 19 37882384 E-mail: [lucila@fec.unicamp.br](mailto:lucila@fec.unicamp.br)

### RESUMO

Os Coeficientes de Trocas Superficiais de Calor Externo ( $h_e$ ) e Interno ( $h_i$ ) possuem uma grande importância no cálculo do Fator  $U$  e do Fator de Ganho Solar ( $FGS$ ) de vedações transparentes. Dessa maneira, a determinação correta desses dois coeficientes para os diversos tipos de vidros, policarbonatos e acrílicos é o objetivo central desse trabalho. No cálculo do coeficiente de troca por convecção ( $h_c$ ) foi adotado o modelo DOE-E *Convection Model*, o qual considera a rugosidade superficial dos materiais, a velocidade do vento e as diferenças de temperatura entre o material e o meio ambiente. Foram calculados os valores de  $h_e$  e  $h_i$  para superfícies verticais e horizontais, com velocidades do vento entre 0 e 3 m/s, considerando uma diferença de temperatura média de 15°C entre as temperaturas dos ambientes e do material. Os resultados obtidos foram comparados aos existentes na literatura apontando diferenças que demonstram a grande importância da consideração da rugosidade superficial dos materiais, da velocidade do vento e da emissividade na adoção dos valores de  $h_e$  e  $h_i$ .

### ABSTRACT

The External ( $h_e$ ) and Internal ( $h_i$ ) Surface Heat Transfer Coefficients are important to calculation of the U-factor and Solar Heat Gain Factor (SGF) of transparent materials. Thus, the main objective of this work is a correct determination of both coefficients for the several types of glasses, polycarbonates and acrylic. In the calculation of the convection surface heat transfer coefficient ( $h_c$ ) the model DOE-E Convection Model was adopted, which considers the surface roughness of the materials, the wind speed and the temperature differences between the material and the environment. The  $h_e$  and  $h_i$  values were calculated for vertical and horizontal surfaces, with wind speeds between 0 and 3 m/s, considering an average temperature difference of 15°C between the environment and the material. The results obtained were compared to the existent ones in the literature. The observed differences in the values of  $h_e$  and  $h_i$  denote the great importance of the consideration of the materials superficial roughness, wind speed and emissivity.

### 1. INTRODUÇÃO

No conjunto das vedações externas de um edifício, as transparentes são as que maiores cuidados exigem em sua especificação, por satisfazerem variadas exigências humanas, que envolvem principalmente a necessidade de comunicação com o mundo exterior, a iluminação natural, o aquecimento no período frio, a renovação do ar para respiração e a melhoria da aparência externa e interna dos edifícios.

Devido a esse fato a fabricação dos materiais transparentes para utilização em esquadrias externas experimentou, nas últimas décadas, uma grande evolução tecnológica, decorrente da preocupação mundial crescente com a redução do consumo de energia, e das novas exigências do mercado consumidor, relacionadas ao seu uso cada dia mais diversificado.

Esse fato aumentou significativamente a quantidade de alternativas de escolha disponíveis e a responsabilidade do profissional encarregado desse item do projeto, sendo necessárias informações precisas sobre as propriedades reais do material transparente a ser utilizado.

As principais propriedades das vedações transparentes, com relação ao conforto térmico e visual, são o Coeficiente Global de Transferência de Calor (Fator  $U$ ), o Fator de Ganho Solar ( $FGS$ ) e a Transmitância da Luz Visível ( $T_v$ ).

O fator  $U$  engloba as trocas térmicas envolvidas no conjunto das diversas camadas constituintes do elemento de vedação e ainda as trocas por radiação e convecção nas duas faces do mesmo, sendo o inverso da Resistência Térmica Total ( $R$ ) e dado por:

$$R = \frac{1}{U} = \frac{1}{h_e} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{1}{h_i}$$

Observa-se que a parcela  $e_1/\lambda_1$  possui muito pouca importância, devido principalmente às pequenas espessuras utilizadas dos materiais transparentes, dessa maneira os valores de  $h_e$  e  $h_i$  são determinantes no cálculo do fator  $U$ .

Já o  $FGS$  é dado pela soma da parcela de energia que entra por transparência com a parcela da energia absorvida que é reirradiada para o interior, sendo a determinação precisa dos valores dos coeficientes de trocas superficiais de calor externo ( $h_e$ ) e interno ( $h_i$ ) essenciais no cálculo correto do destino dessa segunda parcela, pois é basicamente desses dois valores e das diferenças de temperatura que depende com que presteza as trocas externas e internas do calor absorvido têm possibilidade de ocorrer.

Na literatura os valores empregados para a análise do comportamento térmico dos materiais transparentes são os mesmos dos materiais opacos, variando de acordo com a Tabela 01.

**Tabela 01 – Valores de  $h_e$  e  $h_i$  para superfícies verticais conforme literatura**

Fonte	$h_e$ (W/m <sup>2</sup> .K)	$h_i$ (W/m <sup>2</sup> .K)	Observação
ASHRAE, 1993 e 1997	29	8,3	Velocidade do Vento $V_o = 6,67$ m/s
JOHNSON, 1991	Reino Unido	16,7	Adota $\varepsilon = 0,84$ sempre
	EUA	Inverno = 34 Verão = 22,7	
LAMBERTS et. al, 1997	25	7,7	Esses valores são adotados para qualquer tipo de superfície vertical.
FROTA & SCHIFFER, 1995	20	8	
COSTA, 1982	20	7	Não possuem maiores detalhes a respeito de diferenças de $t_e$ e $t_i$ , emissividade das superfícies e velocidade do vento.
Projeto de Norma – ABNT, 1998	25	7,7	

No entanto no cálculo e adoção desses valores não são levados em consideração fatores importantes de diferenciação entre os vários tipos de materiais, os quais são de grande importância na definição dos valores de  $h_e$  e  $h_i$ , principalmente a rugosidade e a emissividade da superfície dos mesmos. Já os fatores climáticos, como a velocidade do vento e as temperaturas do local, são nesses casos pré-estabelecidos, sem critérios mais específicos para determinado local ou época do ano, carecendo de maior precisão também nesse sentido.

## 2. CÁLCULO DE "he" e "hi" PARA OS MATERIAIS TRANSPARENTES

Na obtenção dos valores de  $h_e$  e  $h_i$  temos que levar em consideração que ambos são compostos da soma de duas parcelas, os coeficientes de transmissão de calor por convecção ( $h_c$ ) e por radiação ( $h_r$ ), logo  $h_e$  ou  $h_i = h_c + h_r$ , sendo básico a sua decomposição nessas duas parcelas para uma melhor avaliação de sua origem, para um cálculo mais apurado de seu valor final e para ter-se uma melhor visão de alterações nesse valor devido às possíveis variações dos fatores adotados.

### 2.1 Cálculo do Coeficiente de Transmissão por Convecção "hc"

Os métodos disponíveis para o cálculo do coeficiente de transmissão por convecção são muito variados, segundo McCLELLAN & PEDERSON, 1997, como TARP Detalhado, BLAST Detalhado, MOWitt e DOE, levando em consideração a velocidade e a direção do vento, a rugosidade do material, as diferenças de temperatura, as dimensões da superfície, além de inúmeras constantes retiradas de estudos realizados pelos autores. No entanto, nessa mesma bibliografia, os autores concluem que a utilização dos diferentes métodos resulta valores muito próximos.

Nesse trabalho optamos pela utilização do modelo DOE-2 *Convection Model*, por fazer uma diferenciação entre os vidros e outros materiais construtivos em termos de rugosidade da superfície\* e por sua facilidade de emprego.

Por esse método temos, para o coeficiente de transmissão por convecção ( $h_c$ ):

$$h_c(\text{vidros}) = h_n^2 + (a \cdot V_o^b)^2 \quad a \text{ e } b - \text{valores da Tabela 02}$$

$V_o$  - velocidade do vento (m/s)

Para fluxo ascendente:

$$h_n = 9,482 \cdot \left( \frac{T_s - T_a}{7,238 - \cos \beta} \right)$$

$T_s$  - temperatura superficial externa ou interna do material (K)  
 $T_a$  - temperatura de bulbo seco do ambiente externo ou interno (K)  
 $\beta$  - inclinação da superfície em relação à horizontal

Para fluxo descendente:

$$h_n = 1,810 \cdot \left( \frac{T_s - T_a}{1,382 + \cos \beta} \right)$$

**Tabela 02 - Valores dos coeficientes a e b**

Direção do Vento	a	b
Sotavento	2,38	0,89
Barlavento	2,86	0,617
Valor médio adotado	2,62	0,753

Fonte: McCLELLAN & PEDERSEN, 1997, p.p.473.

\* As películas de controle solar, os policarbonatos e acrílico citados nesse trabalho foram considerados com a mesma rugosidade superficial dos vidros

No caso de superfícies verticais ( $\beta = 90^\circ$ ) as duas fórmulas anteriores igualam-se em valor. A Tabela 03 apresenta, para esse caso, a variação de  $h_c$  em função de  $(T_s - T_a)$  e também de diferentes velocidades do vento.

**Tabela 03 – Valores de  $h_n^2$  e  $h_c$  para superfícies verticais com  $(T_s - T_a)$  e velocidades do vento ( $V_o$ ) variáveis**

$T_s - T_a$ (K)	$V_o = 0 \text{ m/s} \quad V_o = 0,5 \text{ m/s} \quad V_o = 1 \text{ m/s} \quad V_o = 1,5 \text{ m/s} \quad V_o = 2 \text{ m/s} \quad V_o = 2,5 \text{ m/s} \quad V_o = 3 \text{ m/s}$														
	$h_n^2$	$h_c$	$h_{c_m}$ (médio)	$h_c$	$h_{c_m}$	$h_c$	$h_{c_m}$	$h_c$	$h_{c_m}$	$h_c$	$h_{c_m}$	$h_c$	$h_{c_m}$	$h_c$	$h_{c_m}$
5	5,02	2,24		2,73		3,45		4,20		4,95		5,68		6,40	
10	7,97	2,82		3,22		3,85		4,54		5,24		5,94		6,62	
15	10,44	3,23	3,1	3,59	3,5	4,16	4,1	4,80	4,8	5,47	5,4	6,14	6,10	6,81	6,8
20	12,64	3,55		3,88		4,42		5,03		5,67		6,32		6,97	
25	14,67	3,83		4,13		4,64		5,23		5,85		6,48		7,11	

Observa-se, nessa tabela, uma pequena variação do valor de  $h_c$  em função do valor da parcela  $(T_s - T_a)$ , que é o dado mais variável ao longo do dia e de mais difícil obtenção, sendo possível a utilização de um valor médio de  $h_c$ , nesse caso, sem incorrer em um erro considerável.

Os valores obtidos nessa tabela para  $V_o = 0 \text{ m/s}$  corresponde ao ambiente interno, considerado sem movimento de ar.

A velocidade do vento, no entanto, acarreta variações acentuadas no valor de  $h_c$ , para a face externa, sendo importante sua diferenciação para diferentes locais de projeto. O limite na tabela apresentada de  $3 \text{ m/s}$  para o valor de  $V_o$  é devido à observação dos dados climáticos brasileiros, conforme GOULART et al., 1997, que para os dias típicos de verão e inverno as velocidades do vento médias não apresentam valores superiores a esse.

A Tabela 04 apresenta os valores de  $h_c$  para superfícies horizontais, utilizando o valor médio de  $(T_s - T_a)$  igual a  $15^\circ \text{ C}$ , com o mesmo intervalo de variação da velocidade do vento e para fluxo ascendente e descendente.

Para superfícies horizontais, teríamos, no cálculo de  $h_c$ , a velocidade do vento de acordo com a velocidade média mensal do local adotado, sendo o fluxo ascendente. Para o interior é adotado  $V_o = 0 \text{ m/s}$  e o fluxo descendente ou  $h_c = 1,90$ .

**Tabela 04 – Valores de  $h_n^2$  e  $h_c$  para superfícies horizontais com  $(T_s - T_a) = 15^\circ \text{ C}$  e velocidade do vento variável**

$T_s - T_a$ (K)	Fluxo	$h_n^2$	$V_o = 0 \text{ (m/s)} \quad V_o = 0,5 \quad V_o = 1 \quad V_o = 1,5 \quad V_o = 2 \quad V_o = 2,5 \quad V_o = 3$						
			$h_c$	$h_c$	$h_c$	$h_c$	$h_c$	$h_c$	$h_c$
15	Ascendente	14,05	3,80	4,10	4,60	5,20	5,80	6,40	7,10
	Descendente	3,51	1,90	2,40	3,20	4,00	4,80	5,60	6,30

## 2.2 Cálculo do Coeficiente de Transmissão por Radiação

Para o cálculo do coeficiente de transmissão por radiação ( $h_r$ ), temos segundo ÖZISIK, 1990, que:

$$h_r = \varepsilon \cdot \mathbf{B} \cdot (T_a^2 + T_s^2)(T_a + T_s)$$

$\varepsilon$  – emissividade da superfície do material

$\mathbf{B}$  – constante de Stéfan-Boltmann =  $5,67 \cdot 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

Para a maioria dos nossos climas temos, geralmente,  $T_s > T_a$  e  $(T_s - T_a) \ll T_s$ . Nesse caso, ÖZISIK, 1990, cita que a fórmula anterior pode ser linearizada para:

$$h_r = 4 \cdot \varepsilon \cdot \mathbf{B} \cdot T_s^3$$

Com a utilização dessa fórmula, para uma variação de  $T_s$  entre 293 e 323 K (20 e 50° C), caso mais comum em nosso clima, para o vidro comum com  $\varepsilon = 0,84$ , temos  $h_r$  variando entre 4,8 e 6,4 W/m<sup>2</sup>K, com um valor médio de 5,6 W/m<sup>2</sup>K.

Esse valor médio de  $h_r$  foi utilizado nesse trabalho, tanto para exteriores como interiores, resultando para outros materiais transparentes com emissividade  $\varepsilon_m$ :

$$h_r = 5,6 \cdot \varepsilon_m / 0,84$$

A Tabela 05 apresenta uma relação de valores de  $\varepsilon_m$  para os diversos tipos de materiais transparentes, com o valor de  $h_r$  resultante.

**Tabela 05 – Valores de  $\varepsilon$  e  $h_r$  para os diversos materiais transparentes**

Material	$\varepsilon$	$h_r$	Fonte
Vidro <i>float</i> incolor ou colorido sem tratamento superficial	0,84	5,60	JOHNSON, 1991, p. 28
Camada refletiva pirolítica por deposição química a vapor	0,18	1,20	JOHNSON, 1991, p.59 PINATTI, 1999, p. 47 ASHRAE, 1997, p.29-6
Camada refletiva a vácuo	0,15	1,00	JOHNSON, 1991, p. 59
Películas de poliéster refletiva	0,24	1,60	JOHNSON, 1991, p. 57
Policarbonatos e acrílicos	0,90	6,00	ASHRAE, 1997, p. 29-27

Para a maioria dos climas brasileiros os valores encontrados de  $h_r$  podem ser adotados tanto para condições de verão como inverno, sem erro significativo, embora para o inverno se obtenha um valor um pouco menor se for necessário maior detalhamento no cálculo.

## 2.3 Valores Calculados de $h_e$ e $h_i$ para os materiais transparentes

Com a utilização dos valores de  $h_c$  e  $h_r$  obtidos, temos então o valor de  $h_e$  e  $h_i$  da Tabela 06, para superfícies horizontais e verticais, os quais podem ser empregados no cálculo de  $U$  e da parcela absorvida que é reirradiada para o interior.

**Tabela 06 – Valores de  $h_e$  e  $h_i$  dos materiais transparentes para diferentes velocidades do vento ( $V_o$ )**

Material Transparente	$h_r$		Superfície	$h_i$ $V_o=0$	$h_e$ em função de $V_o$ (m/s) e $h_c$ médio						
	Int.	Ext.			0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Vidros <i>float</i> sem tratamento superficial	5,6	5,6	Vertical	8,7	8,7	9,1	9,7	10,4	11,0	11,7	12,4
			Horizontal	7,5	9,4	9,7	10,2	10,8	11,4	12,0	12,7
Camada refletiva pirolítica interna	1,2	5,6	Vertical	4,3	8,7	9,1	9,7	10,4	11,0	11,7	12,4
			Horizontal	6,1	9,4	9,7	10,2	10,8	11,4	12,0	12,7
Camada refletiva a vácuo interna	1,0	5,6	Vertical	4,1	8,7	9,1	9,7	10,4	11,0	11,7	12,4
			Horizontal	2,9	9,4	9,7	10,2	10,8	11,4	12,0	12,7
Películas refletivas	1,6	5,6	Vertical	4,7	8,7	9,1	9,7	10,4	11,0	11,7	12,4
			Horizontal	3,5	9,4	9,7	10,2	10,8	11,4	12,0	12,7
Policarbonatos e acrílico	6,0	6,0	Vertical	9,1	9,1	9,5	10,1	10,8	11,4	12,1	12,8
			Horizontal	7,9	9,8	10,1	10,6	11,4	11,8	12,4	13,1

### 3. CÁLCULO DE "he" e "hi" PARA MATERIAIS COM DIFERENTES RUGOSIDADES

Para termos uma noção de diferenciação entre os valores de  $h_e$  e  $h_i$  dos vidros e outros materiais transparentes e de materiais com superfície de rugosidades diferentes, fazemos a seguir o cálculo desses valores para alguns materiais construtivos mais comuns.

O método de cálculo utilizado nesse trabalho estabelece que para superfícies com rugosidades superficiais diferentes do vidro o cálculo de  $h_c$  é adotado como:

$$h_c = h_n + Rf \cdot (h_{c_{\text{vidro}}} - h_n)$$

$Rf$  é o multiplicador de rugosidade superficial, dado pela Tabela 07.

**Tabela 07 – Multiplicador de Rugosidade Superficial ( $Rf$ )**

Índice de rugosidade	$Rf$	Material
1	2,17	Revestimento de argamassa
2	1,67	Tijolos
3	1,52	Concreto
4	1,13	Madeira lisa
5	1,11	Gesso alisado
6	1,00	Vidro

Fonte: McCLELLAN & PEDERSEN, 1997, p.p.472.

Teríamos então, para um valor médio de  $(T_s - T_a) = 15^\circ\text{C}$  e uma velocidade do vento de 0 m/s, 3m/s e 6,67m/s, os valores da Tabela 08. A adoção do valor de  $V_o = 6,67$  m/s é citado pela ASHRAE, 1997, no cálculo desse coeficiente para o inverno nos EUA.

Foi empregado o valor de  $\varepsilon = 0,84$  para a emissividade dos materiais construtivos mais comuns, que constam dessa tabela.

**Tabela 08 – Valores de  $h_e$  para outros materiais com rugosidades diferentes do vidro**

Material	$h_n$	$h_r$ ( $\varepsilon = 0,84$ )	$h_c$			$h_i$		$h_e$
			$V_o = 0$ (m/s)	$V_o = 3$	$V_o = 6,67$	$V_o = 0$	$V_o = 3$	$V_o = 6,67$
Revestimento argamassa	3,23	5,6	3,2	11,0	21,0	8,8	16,6	26,6
Tijolos	3,23	5,6	3,2	9,2	16,9	8,8	14,8	22,5
Concreto	3,23	5,6	3,2	8,7	15,6	8,8	14,3	21,2
Madeira	3,23	5,6	3,2	7,3	12,5	8,8	12,9	18,0
Gesso alisado	3,23	5,6	3,2	7,2	12,3	8,8	12,8	17,9
Vidro comum	3,23	5,6	3,2	6,8	11,4	8,8	12,4	17,0

#### 4. CONCLUSÕES

O valor de  $h_i$  para os vidros sem tratamento superficial interno está aproximadamente de acordo com a bibliografia citada anteriormente, devido principalmente ao fato de nesse caso o ar ser considerado sem movimento e a rugosidade superficial não ter influência, resultando o mesmo valor para os diversos tipos de materiais.

Os valores obtidos para  $h_e$  evidenciam uma grande diferença com os valores atualmente utilizados, variando principalmente com a velocidade do vento, o que identifica a importância da consideração da rugosidade superficial dos materiais. Portanto, na adoção do valor de  $h_e$  para cálculos futuros a velocidade do vento média do local em estudo deve sempre que possível ser levada em consideração, pois possui uma influência significativa nesse valor e na parcela de calor absorvida que vai para o interior do edifício.

Comparando-se com os dados da tabela 08, observa-se que os valores empregados pelos diversos autores para  $h_e$ , conforme Tabela 01, estão relacionados a materiais com rugosidade superior ao vidro, valores de velocidade do vento bastante elevados e grandes diferenças entre temperaturas externas e internas, o que não está adequado às condições climáticas brasileiras.

A existência de tratamentos superficiais com emissividade ( $\varepsilon$ ) diferente do vidro comum deve ser considerada na adoção do valor do coeficiente de troca superficial de calor, pois esse fato acarreta alteração no valor do coeficiente de troca por radiação ( $h_r$ ).

#### 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE (1993). *Fundamentals Handbook*. EUA, 1993. Cap. 27: Fenestration.
02. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE (1997). *Fundamentals Handbook*. EUA, 1997. Cap. 29: Fenestration.

03. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1998). Comitê Brasileiro de Construção Civil. *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*. Projeto de Norma Técnica 02: 135.C. 1998.
04. COSTA, Ê. C. (1982). *Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural*. São Paulo, Edgard Blücher, 1982.
05. FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. (1995). *Manual de Conforto Térmico*. São Paulo, Studio Nobel, 1995.
06. GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. (1997). Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras. Florianópolis, Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1997.
07. JOHNSON, T. E. (1991). *Low-E Glazing Design Guide*. Stoneham, Butterworth Architecture, 1991.
08. LAMBERTS, R.; DUTRA, L. PEREIRA, F. O. R. (1997). *Eficiência Energética na Arquitetura*. São Paulo, PW Editores, 1997.
09. McCLELLAN, T. M.; PEDERSON, C. O. (1997). Investigation of Outside Heat Balance Models for Use in a Heat Balance Cooling Load Calculation Procedure. *ASHRAE Transactions: symposia*. V.103, part 2, 1997.
10. ÖZISIK, M. N. (1990) *Transferência de Calor. Um Texto Básico*. Trad. Luiz de Oliveira. Rio de Janeiro, Editora Guanabara. Koogan S. A., 1990.
11. PINATTI, A. A. (1999) *Indicações sobre a Utilização de Vidros Eletrocromicos com Filme de NB<sub>2</sub>O<sub>5</sub> como Proteção Solar de Edifícios*. São Carlos, 1999. 88p. Dissertação (Mestrado) – Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo.