

ANÁLISE DA METODOLOGIA UTILIZADA NO CÁLCULO DAS RESISTÊNCIAS TÉRMICAS SUPERFICIAIS SUGERIDAS PELA NBR 15220:2005 UTILIZANDO DADOS AMBIENTAIS TÍPICOS DO BRASIL

MARTINS, Monalisa Coelho 1^a

^a (UFPR – Curitiba – Paraná – Brasil), monalisa.cmartins@gmail.com.

Resumo.

O aprimoramento do desempenho térmico de edificações pode contribuir para o uso eficiente da energia e conservação do meio ambiente. Um dos parâmetros utilizados no cálculo do desempenho térmico é a resistência térmica superficial, cujo cálculo envolve diversos fatores, principalmente ambientais. Para determinar essa grandeza existem diversas equações na literatura, porém os resultados são divergentes, visto que, estudos indicam que é possível obter diferenças entre 20% e 40% no cálculo da demanda de energia. Na “NBR 15220 - *Desempenho térmico de edificações*” são sugeridos valores médios de resistência térmica superficial, interna e externa, que são utilizados em todo o país, independente das características ambientais da cada região. O objetivo do presente trabalho é comparar as diferentes equações para cálculo dos coeficientes de troca de calor por convecção e, assim, calcular a produção de calor no inverno e no verão. Foi utilizado como exemplo um edifício de múltiplos andares sem refrigeração mecânica. Foi verificada uma superestimação dos coeficientes de troca de calor por convecção que levou a uma diferença de produção de calor de 258% no verão e de 34% no inverno. Esses resultados indicam que a NBR 15220 está mais adequada para as regiões com temperaturas baixas, visto que a diferença é maior quando aplicado em regiões com temperaturas mais elevadas.

Palavras chave: Coeficiente de filme de convecção. Resistência térmica superficial. Desempenho térmico dos edifícios.

ABSTRACT

Improving the thermal performance of buildings can contribute to energy efficiency and conservation of the environment. One of the parameters used in the calculation of the thermal performance is the thermal resistance, whose calculation involves several factors, mainly environmental. In order to determine this magnitude there are several equations in the literature, but the results are divergent, since, studies indicate that it is possible to obtain differences between 20% and 40% in the calculation of energy demand. In "NBR 15220 - Thermal performance of buildings", average values of internal and external surface thermal resistance are suggested and used throughout the country, regardless of the environmental characteristics of each region. The aim of the present work is to compare the different equations for the calculation of the coefficients of heat exchange by convection and, thus, calculate the heat production in winter and summer. As an example, a multi-storey building without mechanical cooling was used. It was verified an overestimation of the convective

heat exchange coefficients that led to a heat production difference of 258% in summer and 34% in winter. These results indicate that NBR 15220 is more suitable for regions with low temperatures, since the difference is greater when applied in regions with higher temperatures

Keywords: Convection film coefficient. Superficial thermal resistance. Thermal performance of buildings.

1 INTRODUÇÃO

Os vários parâmetros de entrada utilizados nas simulações computacionais do desempenho de edifícios têm origem empírica ou teórica. Entre esses parâmetros, estão os coeficientes de transporte de calor da superfície, que podem ser por radiação, ou por convecção (MIRSADEGHI *et al.*, 2013).

Com relação a esses coeficientes, estudos realizados demonstraram relações significativas da transferência de calor por convecção no balanço energético. Segundo Obyn e Moeseke (2015) existem divergências entre os programas de simulação térmica, que podem estar relacionadas aos diferentes métodos utilizados para determinar o coeficiente de troca de calor por convecção.

A partir de alguns estudos, foi verificado que as escolhas dos coeficientes de troca de calor por convecção externos podem resultar em diferenças de 20% a 40% no consumo de energia do edifício (EMMEL *et al.*, 2007; SHAO *et al.*, 2009). Para o coeficiente de troca de calor por convecção interno essas diferenças podem ser de até 8% (PEETERS *et al.*, 2011). Esses números são de grande interesse para as empresas do setor, justificando uma busca mais aprofundada desses coeficientes.

Através do coeficiente de troca de calor por convecção, h , é possível determinar a quantidade de calor que se transfere da superfície até o fluido ou meio. Esse coeficiente depende basicamente da geometria da superfície, da natureza do escoamento do fluido, propriedades termodinâmicas e do transporte do fluido (HOLMAN, 1981).

O inverso do coeficiente de troca de calor por convecção representa a resistência térmica superficial por convecção. Essa grandeza é normalmente utilizada na bibliografia ligada ao tema. A norma “NBR 15220 - Desempenho Térmico de Edificações” (ABNT 2005) sugere alguns valores típicos de resistência térmica superficial para a utilização no dimensionamento da perda ou ganho de calor da edificação. Esses valores sugeridos pela norma são amplamente utilizados em todas as zonas bioclimáticas do Brasil, sem diferenciação. Sabe-se que existem muitas incertezas e variáveis envolvidas, e os dados ambientais regionais poderiam influenciar os cálculos da resistência térmica superficial (OHLSSON *et al.*, 2016).

O Brasil está dividido em oito zonas bioclimáticas. Para os cálculos de resistência térmica superficial, com a utilização dos dados climáticos típicos de cada zona, seria possível obter um projeto mais próximo da realidade de cada uma delas. O objetivo do presente trabalho é apresentar o método utilizado que resultou nos valores de resistências térmicas sugeridas na NBR 15220 (ABNT 2005) e verificar qual a variação desses valores quando são inseridos os dados climáticos típicos do Brasil. Também serão apresentados outros procedimentos disponíveis na literatura para o

cálculo de resistência térmica superficial para comparação, de modo a gerar contribuições para o seu aprimoramento.

2.12 MÉTODO

Para o desenvolvimento do presente trabalho foram levantadas as equações e os parâmetros utilizados que resultaram nos valores das resistências térmicas superficiais apresentadas na NBR 15220 (ABNT 2005). Com isso, é possível analisar se os parâmetros estão adequados às características climáticas do Brasil. Após, outras formas de cálculo disponíveis na literatura foram levantadas para comparação dos resultados. Os resultados foram aplicados em um exemplo de dimensionamento de produção de calor em um edifício.

2.1 Procedimento de cálculo para obtenção das resistências térmicas superficiais da NBR 15220

O fluxo de calor que um ambiente transfere ao outro depende da resistência térmica entre os ambientes, além da diferença de temperatura e da área de interface. A norma brasileira NBR 15220 (ABNT 2005), no item 4, apresenta algumas equações, tal como da resistência térmica total descrita na equação 1.







$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (1)$$

Onde

- R_T representa a resistência térmica total em $(m^2 \cdot K)/W$;
- R_{se} representa a resistência do ar para a superfície externa em $(m^2 \cdot K)/W$;
- R_t representa a resistência da superfície externa até a superfície interna $(m^2 \cdot K)/W$;
- R_{si} representa a resistência superficial interna para o ar em $(m^2 \cdot K)/W$.

Para o caso de uma parede, R_t representa a resistência térmica da parede propriamente dita, R_{se} representa a resistência térmica da superfície externa da parede para o ar, e R_{si} a resistência térmica da superfície interna para o ar.

Com relação às resistências térmicas superficiais, na norma brasileira NBR 15220 (ABNT 2005) são apresentados alguns valores médios recomendados no seu anexo A, conforme a Tabela 1.

$R_{si} (m^2 \cdot K)/W$			$R_{se} (m^2 \cdot K)/W$		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
					
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: NBR 15220 (ABNT 2005)

Tabela 1 – Resistência térmica superficial interna e externa

Vale ressaltar que os valores de resistência térmica superficial podem variar com a emissividade, temperatura e velocidade do ar sobre a superfície, e superfícies próximas.

Pode-se verificar a similaridade com a tabela 1 da norma ISO 6946:1997 “Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods”, transcrita na Tabela 2.

	Direção do fluxo de calor		
	Ascendente	Horizontal	Descendente
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

Fonte: ISO 6946:1997

Tabela 2 – Resistência superficial ($m^2 \cdot K/W$)

A NBR 15220 (ABNT 2005) utilizou o mesmo procedimento de cálculo para a obtenção dos valores da tabela 1 da norma ISO 6946:1997. As equações de 2 a 5 descrevem como os valores da tabela 2 foram calculados.

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (2)$$

Onde

- R_s é a resistência térmica superficial em $(m^2 \cdot K)/W$;
- h_c é o coeficiente de troca de calor por convecção em $W/(m^2 \cdot K)$;
- h_r é o coeficiente de troca de calor por radiação térmica em $W/(m^2 \cdot K)$.

Para o cálculo do coeficiente de radiação utiliza-se as equações 3 e 4.




$$h_r = \varepsilon h_{ro} \quad (3)$$

$$h_{ro} = 4\sigma T_m^3 \quad (4)$$

Onde

- h_r é o coeficiente de troca de calor por radiação térmica em $W/(m^2 \cdot K)$;
- ε é a emissividade da superfície;
- h_{ro} é o coeficiente de radiação para uma superfície de corpo negro em $(w/m^2 \cdot K)$;
- σ é a constante de Stefan-Boltzmann [$5,67 \times 10^{-8}$] em $W/(m^2 \cdot K)$;
- T_m é a temperatura termodinâmica média da superfície e para os seus arredores em kelvin (K).

O coeficiente de troca de calor por convecção h_c possui duas formas de cálculo, e cada uma delas é utilizada dependendo de qual resistência superficial se quer encontrar, ou seja, se é resistência superficial interna ou externa. Para encontrar a resistência térmica superficial interna, o valor de h_c é tabelado, e depende da direção do fluxo de calor, conforme mostra a Tabela 3, onde h_c é igual a h_{ci} (coeficiente de troca de calor por convecção interno).

Coeficiente de troca de calor por convecção interno h_{ci} [W/(m ² ·K)]		
Direção do fluxo de calor		
Ascendente	Horizontal	Descendente
		
5,0	2,5	0,7

Fonte: Adaptado ISO 6946:1997

Tabela 3 – Coeficiente de troca de calor por convecção interno

Para encontrar a resistência térmica superficial externa, o coeficiente convectivo é calculado e depende basicamente da velocidade do vento, conforme Equação 5, onde h_c é igual a h_{ce} (coeficiente de troca de calor por convecção externo).

$$h_{ce} = 4 + 4v \quad (5)$$

Onde

- h_{ce} é o coeficiente de troca de calor por convecção da superfície externa em W/(m²·K);
- v é a velocidade do vento adjacente à superfície em m/s.

Os dados utilizados nas equações que resultaram nos valores de resistências térmicas superficiais internas e da ISO 6946:1997 estão expostos na Tabela 4.

Dados de entrada			
Emissividade	Temperatura interna (°C)	Temperatura externa (°C)	Velocidade do vento (m/s)
0,9	20	0	4

Fonte: Adaptado ISO 6946:1997

Tabela 4 – Dados utilizados nos cálculos

Os valores de h_{ro} foram retirados da ISO6946:1997 transcrita na Tabela 4 para as temperaturas de 0 °C e 20 °C e a Tabela 5 apresenta os resultados.

Temperatura (°C)	Temperatura (K)	h_{ro} (w/m ² ·K)
0	273,15	4,62
20	293,15	5,71

Fonte: Adaptado ISO 6946:1997

Tabela 5 – Dados utilizados nos cálculos

Percebe-se que os parâmetros ambientais utilizados são típicos de países com inverno rigoroso, onde a temperatura externa, considerada numa média anual, atinge facilmente 0 °C, pois esse foi o valor utilizado para obtenção dos valores de resistência térmica superficial externa, conforme exposto na Tabela 1.

2.2 Métodos de cálculo para obtenção das resistências térmicas superficiais

Na literatura, existem outros métodos para a determinação dos valores dos coeficientes de troca de calor por convecção, que podem ser divididos em métodos analíticos, aplicáveis para geometrias simples, estudos numéricos, através da Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics* ou CFD) e estudos experimentais, podendo ser utilizados em escala reduzida (medições em túnel de vento e pequenos modelos) e ensaios à escala real (medições em fachadas de edifícios reais).

As Tabelas 6 e 7 apresentam algumas correlações disponíveis para o cálculo do coeficiente de troca de calor por convecção, linearizadas. As equações são bem conhecidas e frequentemente utilizadas em softwares de simulações.

Modelos em escala reduzida	Descrição	Equações
McAdams (1954)	Medições em túnel de vento (aplicações para superfície lisa ou rugosa)	$h_{c,ext} = 5,678 \left[m+n \left(\frac{V_f}{0,3048} \right)^p \right]$
CIBS (1979)	Medições em túnel de vento	$h_{c,ext} = 4,1V_{loc} + 5,8$
Jayamaha (1996)	Medições em campo	$h_{c,ext} = 1,444V + 4,955$
Modelos completos	Descrição	Equações
Sturrock (1971)	Superfície exposta	$h_{c,ext} = 6,1V_r + 11,4$
	Superfície normal	$h_{c,ext} = 6V_r + 5,7$
Nicol (1977)	Medições noturnas para uma janela externa, nas regiões árticas no Canadá	$h_{c,ext} = 7,55V_r + 4,35$
Hagishima & Tanimoto (2003)	Medições em um edifício composto por 2 andares (9,9 m), anexado e protegido por um de 4 andares - Superfícies horizontais	$h_{c,ext} = 2,28V_r + 8,18$
	Medições em um edifício composto por 2 andares (9,9 m), anexado e protegido por um de 4 andares - Superfícies verticais	$h_{c,ext} = 10,21V_{loc} + 4,47$
Loveday mixe	Sem referências da publicação original, é aplicado sem considerar tipo de construção, textura da superfície, orientação, e tipos de terreno.	$h_{c,ext} = 16,7V_{loc}^{0,5}$

ISO 6946: (2007) Nenhuma informação pode ser encontrada sobre o experimental - Este modelo não leva em conta as variações no tipo de construção, a superfície, orientação de superfície, condições de acolhimento e do tipo de terreno.

$$h_{c,ext} = 4V + 4$$

Fonte: MIRSADEGHI *et al.*, (2013)

Tabela 6 – Equações para determinação do coeficiente de troca de calor por convecção externo

Modelos	Descrição	Equações W/(m ² ·C)
ASHRAE (1997)	Placas grandes verticais – fluxo turbulento	$h_{c,nat}=0,19(\Delta T_{sa})^{0,33}$
	Placas pequenas verticais – laminar	$h_{c,nat}=0,29\left(\frac{\Delta T_{sa}}{L}\right)^{0,25}$
	Placas grandes horizontais, voltadas para cima quando o ar é aquecido ou virados para baixo quando é resfriado – turbulento	$h_{c,nat}=0,22(\Delta T_{sa})^{0,33}$
	Placas grandes horizontais, voltadas para cima quando o ar é aquecido ou virados para baixo quando é resfriado – fluxo laminar	$h_{c,nat}=0,27\left(\frac{\Delta T_{sa}}{L}\right)^{0,25}$
	Placas pequenas horizontais, voltadas para cima quando o ar é resfriado ou virados para baixo quando o ar é aquecido	$h_{c,nat}=0,12\left(\frac{\Delta T_{sa}}{L}\right)^{0,25}$
ISO 6946:1997	Fluxo ascendente (tabelado)	5,0
	Fluxo horizontal (tabelado)	2,5
	Fluxo descendente (tabelado)	0,7
TRNSYS	Superfícies verticais	$h_{c,nat}=1,5\Delta T^{0,25}$
Fohanno e Polidori	Superfícies verticais – interno - laminar	$h_{c,nat}=1,332\left(\frac{\Delta T}{H}\right)^{1/4}$
	Superfícies verticais – interno - turbulento	$h_{c,nat}=1,235\exp(0,0467H)(\Delta T)^{0,316}$
Min	Todas as superfícies	$h_{c,nat}=1,646\left(\frac{\Delta T^{0,32}}{H^{0,05}}\right)$
Awbi and Hatton	-	$h_{c,nat}=1,832\left(\frac{\Delta T^{0,293}}{H^{0,121}}\right)$

Fonte: HARKOUSS (2013) e WANG (2000)

Tabela 7 – Equações para determinação do coeficiente de troca de calor por convecção interno

A primeira equação da Tabela 6, desenvolvida por McAdams, possui alguns parâmetros para diferenciar superfícies lisas de rugosas, que são determinados a partir da Tabela 8.

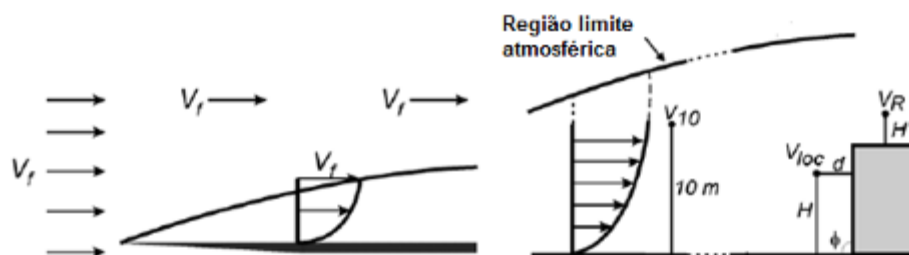
Tipo de superfície	$V_f < 4,88 \text{ m/s}$			$4,88 \text{ m/s} \leq V_f < 30,48 \text{ m/s}$		
	m	n	p	m	n	p

Lisa	0,99	0,21	1	0	0,50	0,78
Rugosa	1,09	0,23	1	0	0,53	0,78

FONTE: Adaptado MIRSADEGHI et al., (2013)

Tabela 8 - Parâmetros do modelo MCadams

Para a velocidade do vento, as equações da Tabela 6 possuem definições do local onde a velocidade foi considerada, conforme a ilustrado na Figura 1.



FONTE: MIRSADEGHI et al., (2013)

Figura 1: Definições dos locais das velocidades de vento

Na Figura 1 pode-se verificar que os ventos considerados nas equações são definidos como:

V_{10} é a velocidade de vento medido a 10 m de altura do solo (m/s);

V_f é a velocidade de vento medido em local longe de qualquer objeto e das bordas (m/s);

V_{loc} é a velocidade de vento medido a uma certa distância, d , da edificação e a uma certa altura H do solo (m/s).

V_r é a velocidade de vento medido a uma certa altura H' do telhado da edificação. (m/s).

As equações descritas nos métodos de Jayamaha de 1996 e pela ISO 6946 não possuem informação de qual é o local onde foi considerada a velocidade do vento, com isso, é simbolizada apenas por: v (m/s).

2.3 Comparação dos valores de resistências térmicas superficiais para diferentes métodos

Com as equações descritas anteriormente foram realizados diversos cálculos para que fosse possível se obter maior sensibilidade com relação ao impacto da utilização de diferentes valores da velocidade do ar e de temperatura no cálculo de h_c externo e interno.

A Figura 2 mostra as variações dos resultados para os coeficientes convectivos externos. Para os métodos que não exibiam informação da faixa de vento aplicável, foi considerada uma velocidade máxima de 4 m/s, pois é a mesma aplicada na NBR 15220-2. A curva em vermelho corresponde ao método que considera a radiação em suas equações.

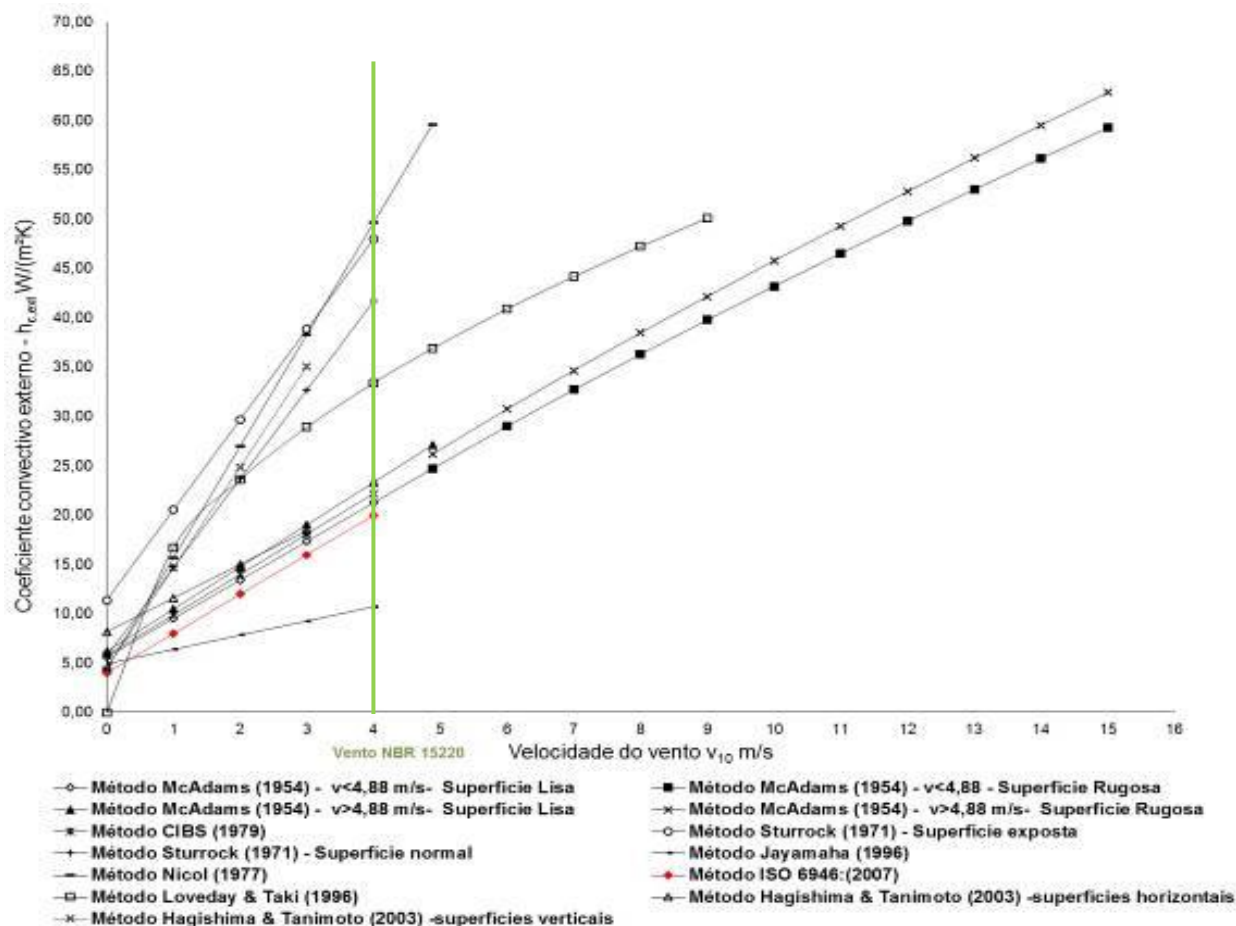
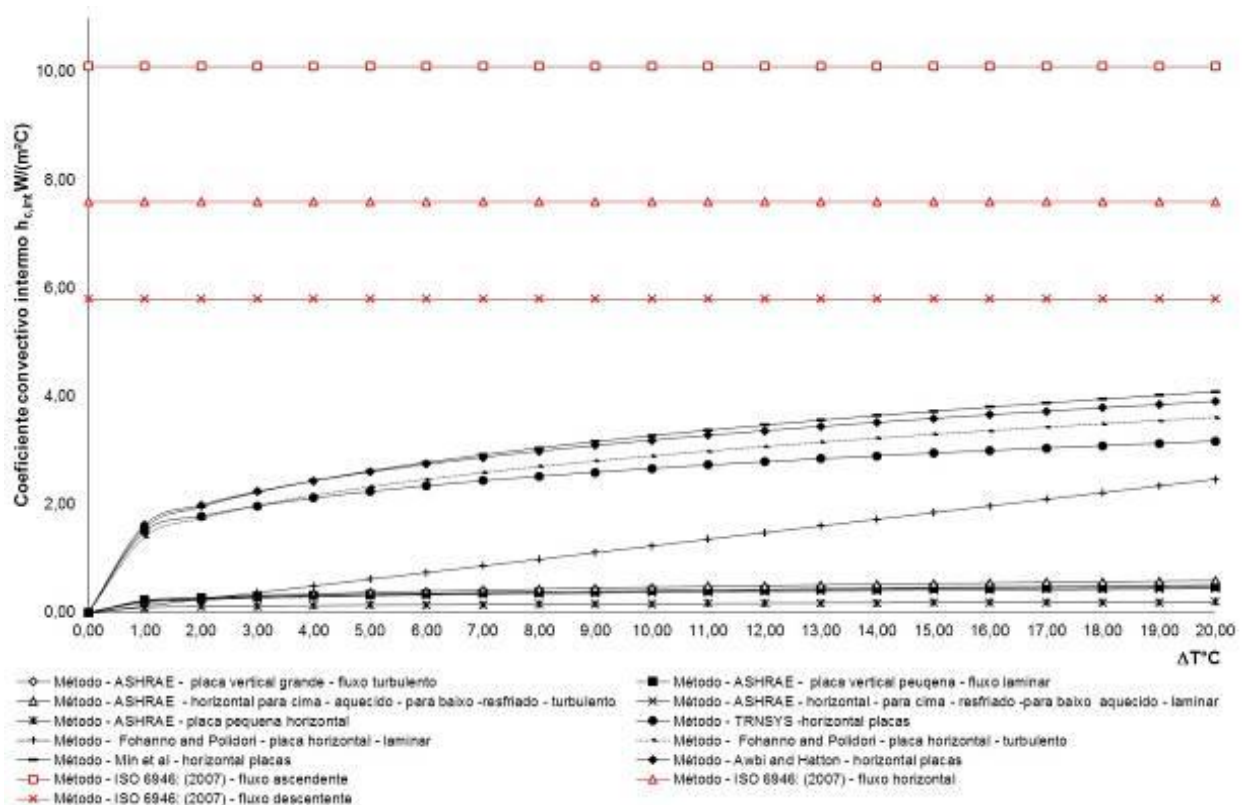


Figura 2 – Variação do coeficiente convectivo externo com a velocidade do vento

Conforme a Figura 2 existe uma grande variedade de modelos de cálculos de $h_{c,ext}$ que, se utilizado da maneira correta, contribui para atingir o valor mais adequado para cada situação específica. As equações são classificadas conforme o tipo do experimento para a obtenção do modelo, podendo ser escala reduzida ou escala real.

Para o coeficiente convectivo interno, verifica-se que os métodos disponíveis, apresentados na TABELA 7, demonstram forte dependência da diferença de temperatura entre a parede e o ambiente. Com isso, foi realizada uma análise inserindo-se vários valores de diferença de temperaturas, em cada método, para obtenção do valor do coeficiente convectivo interno. Os resultados estão descritos no gráfico da Figura 3. As curvas em vermelho correspondem aos métodos que consideram a radiação em suas equações.

Nos resultados demonstrados na Figura 4.3 verifica-se que os coeficientes convectivos internos podem variar de 0 a 10 W/(m²K) quando a diferença de temperatura varia de 0 a 20 °C. O método utilizado na ISO 6946 não apresenta variação, pois os valores apresentados na norma são constantes, sem descrição do processo utilizado para sua obtenção, e são os maiores valores quando comparados com outros métodos.



Fonte: Os autores

Figura 3 – Equações para o cálculo do $h_{c,int}$

2.4 Determinação de locais com variação climática para simulações métodos

O Brasil está dividido em oito zonas bioclimáticas, caracterizadas pela média das temperaturas mínimas, das máximas e umidade relativa, conforme método apresentado na norma NBR 15220-3 (ABNT 2005).

Para a simulação e análise do impacto dos diferentes métodos de cálculo dos coeficientes convectivos serão consideradas as oito zonas. Para isso, serão realizadas simulações em uma cidade de cada zona bioclimática. As cidades e suas respectivas zonas bioclimáticas estão descritas na Tabela 9.

Para o levantamento dos dados climáticos de cada cidade foi consultada a base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Os arquivos apresentam temperaturas médias horárias no período de 2001 até 2010.

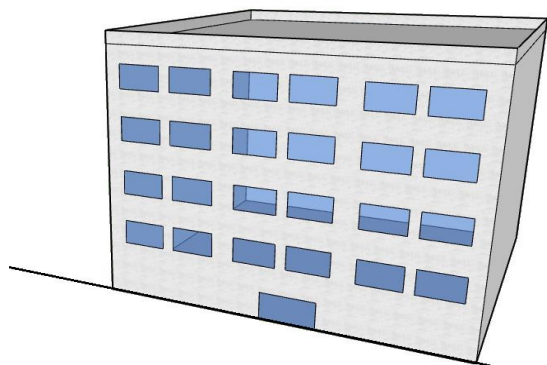
Cidade	Zona Bioclimática
Curitiba	1
Santa Maria	2
Belo Horizonte	3
Brasília	4
Vitória da Conquista	5
Campo Grande	6
Cuiabá	7
Belém	8

FONTE: A Autora (2017).

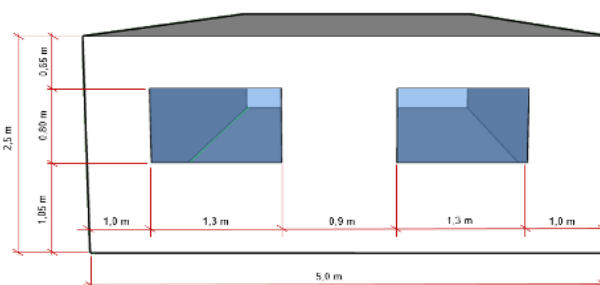
TABELA 8 - Cidades a serem utilizadas nas simulações

2.4 Exemplo de aplicação

Para verificar o impacto de se usar diferentes valores para hc_{int} e hc_{ext} , adotou-se um edifício de múltiplos andares. Tal edificação possui área retangular e dimensões de 5,5 m de largura, 9 m de profundidade e altura do pé direito de 2,5 m. As dimensões estão demonstradas nas Figuras 4 e 5 e na Tabela 10.



FONTE: A Autora (2017).
FIGURA 0 - Edifício de múltiplos andares



FONTE: A Autora (2017).
FIGURA 5 – Elevação frontal

Apenas uma superfície foi considerada em contato com o exterior, composta de parede de alvenaria e duas janelas de vidro temperado, sem esquadria. É importante ressaltar que a edificação a ser utilizada é relativamente simples, pois o

objetivo principal é obter os resultados para efeito de comparação entre os resultados dos diferentes métodos.

Componente	Espessura (m)	Condutividade térmica (W/(mK))	Área (m ²)	Resistência térmica (m ² K)/W
Alvenaria	0,120	0,600	11,670	0,200
Vidro	0,004	1,000	2,080	0,004

FONTE: A Autora (2017).

TABELA 10 - Valores dos materiais utilizados

Segundo a NBR 15220 (ABNT 2005), o Brasil é dividido em oito diferentes zonas bioclimáticas definidas por semelhanças climáticas, as quais possuem diretrizes construtivas específicas para cada uma delas, para garantir um maior conforto térmico aos usuários.

Para análise de alguns desses parâmetros foram realizados cálculos para duas situações típicas, verão e inverno referente as características da zona bioclimática brasileira 1 para a cidade de Curitiba no Paraná. Os valores utilizados de temperatura externa e interna foram para períodos de verão respectivamente 31,4 °C e 23 °C (diferença de -8,4 °C) e para períodos de inverno respectivamente 0,7 °C e 23 °C (diferença de 22,3 °C). Considerando-se o fluxo de ar na ventilação dado pelo valor mínimo por pessoa de 27 m³/h, conforme Portaria 3523 (BRASIL, 1998), com duas pessoas.

Para a edificação não foi considerado o uso de condicionamento mecânico e, portanto, sujeito somente à perda natural de calor. Apenas uma superfície de área A_s esteja em contato com o exterior, composta de parede de alvenaria, de área A_p , e duas janelas de vidro temperado, sem esquadria, simples, de área A_j . Outras superfícies são consideradas adiabáticas, já que separam a unidade em análise dos pavimentos acima e abaixo, das unidades ao lado e ainda o corredor de circulação, que se encontram sob mesmas condições térmicas.

Em condição livre da radiação solar, a perda de calor pela parede externa é dada pela Equação 6.

$$q = \frac{(T_i - T_e)}{R_e} \quad (6)$$

Onde

- q é o fluxo de calor em W/m²;
- T_i é a temperatura da face interna da parede em kelvin (K);
- T_e é a temperatura da face externa da parede em kelvin (K);
- R_e é a resistência térmica da parede em m²·K/W.

R_e , por sua vez, é a combinação em paralelo das resistências térmicas da parede e do vidro. O Quadro 1 mostra as características dos materiais utilizados.

Foi considerando, também, que o fluxo de calor perdido devido à ventilação no verão q_v é igual a 164 W e no inverno q_v igual a 435 w. Para o cálculo da produção de calor foram utilizados diversos valores de hc_{int} e de hc_{ext} para verificação dos impactos nos resultados.

Componente	Espessura (m)	Condutividade térmica (W/(m·K))	Área (m ²)	Resistência térmica (m ² ·K)/W
Alvenaria	0,150	0,600	11,670	0,250
Vidro	0,004	1,000	2,080	0,004

Fonte: Os autores
Quadro 1 – Valores dos materiais utilizados

3 RESULTADOS.

3.1 Produção de calor para diferentes valores de h_c

A produção de calor q [W] no exemplo proposto para o verão e para diversos valores de hc_{int} e de hc_{ext} estão apresentados no Quadro 2. No inverno, utilizando a mesma variação dos valores do hc_{int} e hc_{ext} para o exemplo do edifício, os valores de produção de calor q [W] são apresentados no Quadro 3.

Percebe-se, ao analisar o Quadro 2, que uma superestimação hipotética de hc_{int} e hc_{ext} , por exemplo, 8 (W/m²K) e 25 (W/m²K) respectivamente, comparado com valores de 4 (W/m²K) e 10 (W/m²K), pode resultar em uma diferença de extração de calor de 258 % no verão.

hc_{ext} (W/m ² K)	hc_{int} (W/m ² K)						
	3	4	5	6	7	8	
5	6	-15	-30	-42	-52	-60	
10	-19	-49	-72	-90	-106	-119	
15	-30	-64	-90	-112	-131	-147	
20	-36	-72	-101	-125	-146	-164	
25	-40	-77	-108	-134	-156	-176	
30	-42	-81	-112	-140	-163	-184	

Fonte: Os autores

Quadro 2 – Valores de produção de calor no verão q [W] para manter -8,4 °C de diferença entre o ar interior e o exterior, para diferentes valores de hc_{int} e hc_{ext}

Tal superestimação dos coeficientes de troca de calor por convecção levaria, no verão, a um erro grosseiro de subdimensionamento do sistema de refrigeração, contrário à segurança.

Fazendo uma análise similar percebe-se uma diferença de produção de calor de 34% no inverno, portando, no inverno, existe a possibilidade de leve superdimensionamento, contrário à economicidade, porém em favor da segurança.

$h_{c_{ext}}$ (W/m ² K)	$h_{c_{int}}$ (W/m ² K)					
	3	4	5	6	7	8
5	854	909	950	982	1008	1029
10	922	1000	1061	1110	1151	1186
15	950	1039	1110	1169	1219	1262
20	966	1061	1138	1203	1259	1307
25	976	1075	1156	1225	1285	1337
30	982	1085	1169	1241	1303	1358

Fonte: Os autores

Quadro 3 – Valores de produção de calor no inverno q [W] para manter 22,3 °C de diferença entre o ar interior e o exterior, para diferentes valores de $h_{c_{int}}$ e $h_{c_{ext}}$

4 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou algumas equações para determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção externo e interno, com foco no procedimento utilizado pela norma NBR 15220 (ABNT 2005). O $h_{c_{ext}}$ é influenciado principalmente pela rugosidade da superfície, velocidade do vento e direção do vento. O modelo utilizado na norma brasileira foi baseado na ISO 6946:1997, contudo, assim como citado por outros autores, não foi possível encontrar informações sobre o projeto experimental utilizado para a metodologia, porém, foi possível verificar que o cálculo do coeficiente externo não leva em conta as variações do tipo de construção, da rugosidade da superfície, orientação da superfície e tipo de terreno. O coeficiente de troca de calor por convecção interno na ISO 6946:1997 é apresentado em forma de tabela dependendo somente da direção fluxo de calor não considerando variações da temperatura da superfície e do ar. Os dados ambientais utilizados também não correspondem aos climas típicos de verão e inverno do território brasileiro pois, para o cálculo da norma ISO 6946:1997, foi aplicado o valor de 0 °C na temperatura externa anual média, o que corresponde ao clima de países com invernos rigorosos. Conforme apresentado existem discrepâncias entre os valores desses coeficientes, dependendo da equação empregada, o que pode levar a incertezas significativas no cálculo de produção total de energia. Através de um cálculo simplificado foi possível ter uma sensibilidade da superestimação dos coeficientes de troca de calor por convecção. Mostra-se, que a superestimação de $h_{c_{ext}}$ em 25 W/m²·K quando poderia ser 10 W/m²·K e de $h_{c_{int}}$ em 8 W/m²·K quando poderia ser 4 W/m²·K pode levar a um desvio significativo nos cálculos do calor a ser gerado ou retirado, no exemplo aplicado foi encontrado no inverno e no verão, respectivamente, 34 % e 258 % de diferença. Com isso, foi verificado que há evidências de que a norma está mais adequada para regiões mais frias.

REFERÊNCIAS

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220: Desempenho térmico de edificações*. Rio de Janeiro, 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Ministerial 3523, de 28.8.98. *Dispõe sobre Ar Condicionado*. Diário Oficial da União. Brasília, DF, 31 Ago. 1998. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/1998/prt3523_28_08_1998.html>. Acesso em 4 março 2016.

EMMEL, M. G.; ABADIE, M. O.; MENDES, N. *New external convective heat transfer coefficient correlations for isolated low-rise buildings*. Energy and Buildings, Elsevier 2007. p. 335-342.

HARKOUSS, F. *Sensitivity study of building thermal simulations to some input parameters*. Final year project. Mechanical Engineering Branch III. Lebanese University. Líbano, 2013.

HOLMAN, J. P. *Heat Transfer*, 5th ed, McGraw-Hill Book, 1981.

ISO INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 6946 – Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method*. British, 1997.

MIRSADEGHI M.; CÓSTOLA D.; BLOCKEN B.; HENSEN J.L.M. *Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs: Implementation and uncertainty*. Building Physics and Services. Eindhoven University of Technology. Volume 56. Netherlands, 2013.

OBYN, S.; MOESEKE, V. G. *Variability and impact of internal surfaces convective heat transfer coefficients in the thermal evaluation of office buildings*. Applied Thermal Engineering. Elsevier. 2015. p. 258 e 272.

OHLSSON, A. K. E.; ÖSTIN, R.; OLOFSSON, T. *Accurate and robust measurement of the external convective heat transfer coefficient based on error analysis*. Energy and Buildings. Elsevier. 2016. p. 83–90.

PEETERS, L.; BEAUSOLEIL-MORRISONB, I.; NOVOSELAC, A. *Internal convective heat transfer modeling: Critical review and discussion of experimentally derived correlations*. Energy and Buildings. Elsevier. 2011. p. 2227–2239.

SHAO, J. LIU J.; ZHAO J.; ZHANG W.; SUN D.; FU Z. *A novel method for full-scale measurement of the external convective heat transfer coefficient for building horizontal roof*. Energy and Buildings. Elsevier. 2009. p. 840–847

WANG, K. S. *Handbook of air conditioning and refrigeration*. 2nd ed. McGraw-Hill. United States of America, 2000.