



DISCUSSÃO DOS REQUISITOS E DOS LIMITES DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS PARA GARANTIA DE CONFORTO TÉRMICO SEGUNDO AS NORMAS BRASILEIRAS

Camila Carvalho Ferreira (1); Henor Artur de Souza (2); Eleonora Sad de Assis (3)

- (1) Doutora, Professora da Universidade Estadual de Minas Gerais, camilaccferreira@yahoo.com.br
(2) Doutor, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, henorster@gmail.com,
(3) Doutora, Professora do Laboratório de Conforto Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, eleonorasad@yahoo.com.br

RESUMO

O usual baixo desempenho térmico de edificações residenciais ocasiona o aumento de consumo de energia em razão do uso de condicionamento artificial para a obtenção de conforto térmico dos usuários. Objetivando regular o desempenho térmico mínimo de uma edificação, foram instituídas normas nacionais de desempenho. Atualmente, estão em vigor no Brasil duas normas que abordam o desempenho térmico das edificações residenciais: a NBR 15.220 (2005) e a NBR 15.575 (2013). Estudos desenvolvidos apontam inconsistências nessas normas, além de haver uma dissociação entre as recomendações e a garantia de conforto térmico do usuário. Assim, o objetivo deste artigo é propor uma integração dos requisitos de desempenho térmico das normas NBR 15.220 e NBR 15.575, além de novos requisitos que possam garantir as condições de conforto térmico dos usuários. As análises foram realizadas por meio de simulação computacional para uma edificação residencial multifamiliar em três cidades de cada zona bioclimática. Para avaliar o impacto das propriedades térmicas a envoltória foi alterada em 6 tipos de paredes, 4 tipos de coberturas e 4 condições de aberturas. Os resultados apontaram que as principais propriedades para o desempenho térmico foram a capacidade térmica das paredes, a transmitância térmica da cobertura e a absorvância da envoltória, assim como o controle do ganho térmico pelas aberturas nos climas quentes. Sugere-se assim valores limites para as variáveis transmitância térmica, atraso térmico e absorvância solar de paredes e coberturas e para avaliar as aberturas o fator, além da necessidade de ventilação.

Palavras-chave: simulação computacional, normas, desempenho térmico.

ABSTRACT

The usual nether thermal performance of residential buildings occasioned the increase of energy consumption due to the use of artificial conditioning to obtain thermal comfort of the users. In order to regulate the minimum thermal performance of a building, national performance standards were established. Currently, two standards that approach the thermal performance of residential buildings are ruling in Brazil: NBR 15.220 (2005) and NBR 15.575 (2013). Studies developed indicate inconsistencies in these norms, besides there is a dissociation between the recommendations and the guarantee of thermal comfort of the user. Thus, the objective of this article is to propose an integration of the thermal performance requirements of NBR 15.220 and NBR 15.575, in addition to new requirements that can guarantee the thermal comfort conditions of users. The analyzes were carried out by means of computational simulation for a multifamily residential building in three cities of each bioclimatic zone. To evaluate the impact of thermal properties the envelope was altered in 6 types of walls, 4 types of coverings and 4 conditions of openings. The results indicated that the main properties for the thermal performance were the thermal capacity of the walls, the thermal transmittance of the roof and the absorbance of the envelope, besides the control of the thermal gain by the openings in hot climates. It is suggested that limit values for the thermal variables, also the need for ventilation.

Keywords: computer simulation, standards, thermal performance.

1. INTRODUÇÃO

As normas de desempenho térmico São instituídas com o intuito de se estabelecerem como ferramentas regulamentadoras de um desempenho térmico mínimo para as edificações e, conseqüentemente, garantam as condições de conforto destas para os usuários e a redução de consumo de energia para o condicionamento artificial dos ambientes. Estão em vigor no Brasil duas normas que abordam o desempenho térmico de edificações residenciais: as normas NBR 15.220 (ABNT, 2005) e NBR 15.575 (ABNT, 2013), cujas abordagens baseiam-se principalmente na delimitação dos ganhos através das superfícies externas opacas, estabelecendo valores limites para as características termofísicas de transmitância térmica, absorvância à radiação solar e capacidade térmica.

A primeira norma brasileira de desempenho foi a norma NBR 15.220 (ABNT, 2005), estabelecendo três tipos de paredes (leve, leve refletora e pesada) e três tipos de coberturas (leve isolada, leve refletora e pesada) a serem selecionadas conforme as condições climáticas da referida zona bioclimática. Para cada tipo de parede e cobertura foram determinados valores limites de transmitância térmica, atraso térmico (função da capacidade e da resistência térmica do componente) e do fator solar (função da transmitância térmica e da absorvância à radiação solar). As demais recomendações de projeto constantes nesta norma referem-se ao tamanho das aberturas para ventilação natural e à necessidade de sombreamento.

Já a norma NBR 15.575 (ABNT, 2013) aborda o desempenho térmico verificando o atendimento de critérios mínimos referentes às características termofísicas de transmitância térmica e capacidade térmica, para os sistemas de fechamento e de cobertura. Quanto às superfícies transparentes, nenhuma das normas estabelecem valores limites para o ganho térmico. Tanto os valores limites da norma NBR 15.220 quanto da NBR 15.575 são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores limites para as características termofísicas dos elementos opacos, segundo as normas NBR 15.220 e NBR 15.575

DESEMPENHO TÉRMICO DE PAREDES									
Zona Bioclimática		ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
NBR 15220	Transmitância térmica – U (W/m ² K)	U ≤ 3,00		U ≤ 3,60	U ≤ 2,20	U ≤ 3,60		U ≤ 2,20	U ≤ 3,60
	Atraso térmico – φ (h)	φ ≤ 4,3		φ ≤ 4,3	φ ≥ 6,5	φ ≤ 4,3		φ ≥ 6,5	φ ≤ 4,3
	Fator Solar – FS _o (%)	FS _o ≤ 5,0		FS _o ≤ 4,0	FS _o ≤ 3,5	FS _o ≤ 4,0		FS _o ≤ 3,5	FS _o ≤ 4,0
NBR 15575	Transmitância térmica – U (W/m ² K)	U ≤ 2,50		U ≤ 3,70 para α ≤ 0,6 U ≤ 2,50 para α > 0,6					
	Capacidade térmica – CT (kJ/m ² K)			CT ≥ 130					
DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS									
Zona Bioclimática		ZB1	ZB2	ZB3	ZB4	ZB5	ZB6	ZB7	ZB8
NBR 15220	Transmitância térmica – U (W/m ² K)	U ≤ 2,00						U ≤ 2,00	U ≤ 2,30. FT ¹
	Atraso térmico – φ (h)	φ ≤ 3,3						φ ≥ 6,5	φ ≤ 3,3
	Fator Solar – FS _o (%)	FS _o ≤ 6,5						FS _o ≤ 6,5	FS _o ≤ 6,5
NBR 15575	Transmitância térmica – U (W/m ² K)	U ≤ 2,30		U ≤ 2,30 para α ≤ 0,6 U ≤ 1,50 para α > 0,				U ≤ 2,30 FT ¹ para α ≤ 0,4 U ≤ 1,50 FT ¹ para α > 0,4	

¹Calculada a partir da equação $FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$ (ABNT, 2005), considerando os valores limites da transmitância térmica e de fator de ganho de calor solar de elementos opacos.

²FT = 1,17 - 1,07h^{-1,04}

Fonte: adaptada da ABNT NBR 15.220 (ABNT, 2005) e ABNT NBR 15.575 (ABNT, 2013).

O primeiro ponto de questionamento em relação aos valores normativos das propriedades termofísicas das envoltórias refere-se às incongruências entre os valores limites de cada norma para uma mesma zona bioclimática, assim como na forma de abordagem divergente da inércia térmica pelas normas. Enquanto uma restringe o valor do atraso térmico a um valor máximo para “paredes leves” e “leves refletoras”, e um valor mínimo para as “paredes pesadas”, a outra define apenas um valor mínimo para a capacidade térmica.

Pereira e Assis (2005) observaram que para Belo Horizonte, ZB 3, o valor da transmitância térmica sugerido pela norma NBR 15.220 (ABNT, 2005) é mais elevado do que o valor que seria adequado. Também referente a esta norma, Bogo (2008) argumenta que o valor da transmitância térmica de 2,00 W/m²K é alto para as coberturas classificadas como “leve e isolada”. No estudo conduzido por Matos (2007) os resultados obtidos apontaram que alguns limites estabelecidos pela norma NBR 15.220 para o atraso térmico não se justificam, uma vez que valores de atraso térmico superiores ao limite estabelecido pela norma resultaram

em melhor desempenho térmico. No trabalho desenvolvido por Oliveira (2012), o autor analisou a pertinência dos valores recomendados pela norma NBR 15.220 (ABNT, 2005) e observou que para se obter as melhores condições de conforto, valores mais elevados do que os limites da norma NBR15.220 para a zona bioclimática 2 de atraso térmico e de absorvância resultaram em melhores condições para o interior da edificação.

Chvatal (2014) observou que a capacidade térmica influencia os limites da transmitância térmica e da absorvância solar, não devendo os parâmetros termofísicos serem avaliados de forma desassociada. Soares (2014) avaliou as prescrições da norma NBR 15.575 (ABNT, 2013) para a zona bioclimática 2 e concluiu que os limites dos parâmetros termofísicos propostos pela norma mostraram-se muito elevados.

Ferreira, Souza e Assis (2016) compararam o desempenho térmico obtido por simulação de uma edificação residencial multifamiliar para 3 localidades de cada uma das 8 zonas bioclimáticas com as recomendações normativas. Os autores observaram haverem divergências entre as recomendações normativas e as melhores condições de conforto. Além disso, alguns valores limites das recomendações apontaram ser permissivos. As melhores condições de conforto para cada uma das localidades estudadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo das recomendações obtidas por simulações para cada uma das cidades analisadas por zona bioclimática

ZB	Cidade	Paredes			Aberturas		Coberturas				Horas de Conforto [%]
		U_{par}	CT_{par}	α_{par}	Somb	F_{vent}	U_{cob}	CT_{cob}	α_{cob}	F_{atico}	
ZB1	Campos do Jordão	■	■	■	■	■	■	■	■	■	80.9
	Maringá	■	■	■	■	■	■	■	■	■	87.8
	São Joaquim	■	■	■	■	■	■	■	■	■	54.9
ZB2	Florestal	■	■	■	■	■	■	■	■	■	84.9
	Santa Maria	■	■	■	■	■	■	■	■	■	87.1
	Teresópolis	■	■	■	■	■	■	■	■	■	78.5
ZB3	Belo Horizonte	■	■	■	■	■	■	■	■	■	98.0
	Florianópolis	■	■	■	■	■	■	■	■	■	96.6
	Ponta Porã	■	■	■	■	■	■	■	■	■	87.5
ZB4	Brasília	■	■	■	■	■	■	■	■	■	100.0
	Pirapora	■	■	■	■	■	■	■	■	■	90.8
	São Carlos	■	■	■	■	■	■	■	■	■	80.7
ZB5	Garanhuns	■	■	■	■	■	■	■	■	■	99.6
	Vitória da Conquista	■	■	■	■	■	■	■	■	■	91.4
	Campos	■	■	■	■	■	■	■	■	■	83.6
ZB6	Jataí	■	■	■	■	■	■	■	■	■	99.5
	Bom Jesus da Lapa	■	■	■	■	■	■	■	■	■	72.0
	João Pinheiro	■	■	■	■	■	■	■	■	■	91.1
ZB7	Bom Jesus do Piauí	■	■	■	■	■	■	■	■	■	95.8
	Cabrobó	■	■	■	■	■	■	■	■	■	96.5
	Cuiabá	■	■	■	■	■	■	■	■	■	93.8
ZB8	Manaus	■	■	■	■	■	■	■	■	■	83.9
	Pão de Açúcar	■	■	■	■	■	■	■	■	■	79.1
	Rio de Janeiro	■	■	■	■	■	■	■	■	■	87.3

- recomendações mandatórias
- recomendações opcionais
- recomendações sazonais

Fonte: Ferreira, Souza e Assis, 2016

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é propor uma integração dos requisitos de desempenho térmico das normas NBR 15.220 e NBR 15.575, além de novos requisitos que possam garantir as adequadas condições de conforto térmico dos usuários de acordo com o clima.

3. MÉTODO

A análise da influência das propriedades termofísicas no desempenho térmico de uma edificação residencial foi realizada por meio de simulações de um objeto de estudo utilizando o programa EnergyPlus versão 8.1.0.008. As simulações são realizadas para o período de um ano para três cidades brasileiras representativas de cada uma das oito zonas bioclimáticas. O dado de saída solicitado para avaliação dos resultados são as horas de conforto.

São testadas diferentes conformações de envoltórias para fins de comparação, variando as propriedades termofísicas das envoltórias, de forma que em cada caso uma variável esteja presente ou a combinação delas. Os resultados obtidos no presente trabalho são confrontados com os resultados obtidos por Ferreira, Souza e Assis (2016), com o intuito de fazer uma análise combinada das variáveis. A partir desta comparação são estabelecidas as melhores recomendações para cada uma das zonas bioclimáticas, assim como os valores limites das recomendações. A seguir as etapas da metodologia serão detalhadas.

3.1. Modelagem para a simulação

3.4.1. Geometria da edificação

A edificação é modelada conforme suas características geométricas (Figura 1). A unidade habitacional analisada é uma das quatro que se encontra no último pavimento, possibilitando assim a análise dos efeitos da radiação na cobertura. A unidade habitacional é dividida em seis zonas térmicas (dormitórios zonas térmicas 1 e 2, banheiro zona térmica 3, sala zona térmica 4, cozinha zona térmica 5 e área de serviço zona térmica 6), conforme é mostrado na Figura 2. O ambiente analisado é o dormitório 1, zona 1, (destacado em vermelho, Figura 2).

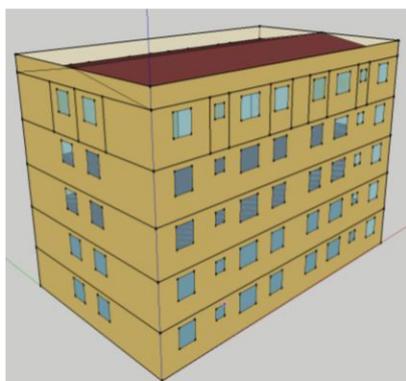


Figura 1 - Perspectiva da edificação estudo de caso



Figura 2 - Planta baixa da edificação em estudo

3.4.2. Parâmetros de entrada

A escolha das envoltórias é baseada em suas características termofísicas, conforme os valores limites propostos por Mahoney (UNITED NATIONS, 1971), (Tabela 3). A partir destes limites são estabelecidos 6 tipos de paredes externas: parede base (parede leve e não isolante), parede isolante, parede pesada, parede escura (parede leve e não isolante), parede pesada isolante e parede isolante escura e 5 tipos de coberturas: cobertura base (cobertura leve e não isolante), cobertura isolante, cobertura pesada, cobertura escura (leve e não isolante) e cobertura isolante escura. Além disso, as superfícies foram variadas em superfícies claras ($\alpha = 0,3$) e escuras ($\alpha = 0,7$). Esta variação foi realizada nas simulações alterando-se o valor de entrada da absorvância solar, de forma simplificada. Na realidade, é preciso considerar o impacto nas propriedades termofísicas de se pintar a telha cerâmica, por exemplo, de branco. Além disso, são avaliadas as aberturas no que se refere ao isolamento térmico do vidro, a presença de sombreamento e a presença de ventilação natural. As envoltórias utilizadas são encontradas no mercado e têm sua composição descrita na Tabela 4.

Para o cálculo das propriedades térmicas das envoltórias são adotados os valores de densidade de massa aparente, condutividade térmica e calor específico de materiais referenciados na norma brasileira NBR 15.220 (2005).

A resistência térmica considerada para a câmara de ar da parede é de $0,16 \text{ m}^2\text{K/W}$, para superfícies de alta emissividade com espessura de 2,0 cm a 5,0 cm. Já para a cobertura, a resistência térmica considerada

da câmara de ar com superfícies de alta emissividade com espessura de 6,0 cm com fluxo descendente é de 0,21 m²K/W (ABNT, 2005).

Tabela 3 - Valores limites para as características termofísicas segundo Mahoney

	Transmitância Térmica - U (W/m ² K)	Fator Solar - FS _o (%)	Atraso térmico - φ (h)
PAREDES			
Leve	U ≤ 2,80	FS _o ≤ 4,0	φ ≤ 3,0
Pesada	U ≤ 2,80	FS _o ≤ 4,0	φ ≥ 8,0
Leve e Isolante	U ≤ 2,00	FS _o ≤ 4,0	φ ≤ 3,0
Pesada e Isolante	U ≤ 2,00	FS _o ≤ 4,0	φ ≥ 8,0
COBERTURAS			
Leve	U ≤ 1,10	FS _o ≤ 4,0	φ ≤ 3,0
Pesada	U ≤ 1,10	FS _o ≤ 3,0	φ ≥ 8,0
Leve e Isolante	U ≤ 0,85	FS _o ≤ 3,0	φ ≤ 3,0
Pesada e Isolante	U ≤ 0,85	FS _o ≤ 3,0	φ ≥ 8,0

Fonte: UNITED NATIONS, 1971.

Tabela 4 - Envoltórias utilizadas no estudo e suas respectivas propriedades termofísicas

Envoltória	U (W/m ² K)	CT (kJ/m ² K)	φ (h)	α
<i>Parede base</i> Argamassa externa (2,5 cm), bloco de concreto (9,0 cm), gesso (0,2 cm)	2,97	159,0	2,99	0,3
<i>Parede isolante</i> Argamassa (2,5 cm), bloco cerâmico (14,0 cm), gesso (0,2 cm)	1,85	105,0	2,97	0,3
<i>Parede pesada</i> Adobe (22,0 cm)	2,80	331,5	8,00	0,3
<i>Parede escura</i> Argamassa externa (2,5 cm), bloco de concreto (9,0 cm), gesso (0,2 cm)	2,97	159,0	2,99	0,7
<i>Parede isolante pesada</i> Argamassa (2,5 cm), bloco de concreto (14,0 cm), câmara de ar (2,0 a 5,0 cm), bloco de concreto (14,0 cm), argamassa (2,5 cm)	1,43	439,0	9,43	0,3
<i>Parede isolante escura</i> Argamassa (2,5 cm), bloco cerâmico (14,0 cm), gesso (0,2 cm)	1,85	105,0	2,97	0,7
<i>Cobertura base</i> Telha cerâmica, câmara de ar (>5,0 cm), forro de gesso (3,0 cm)	1,94	37,0	1,50	0,3
<i>Cobertura escura</i> Telha cerâmica, câmara de ar (>5,0 cm), forro de gesso (3,0 cm)	1,94	37,0	1,50	0,7
<i>Cobertura isolante</i> Telha cerâmica, câmara de ar (>5,0 cm), espuma rígida de poliuretano (2,0cm), forro de pvc (1,0 cm)	0,85	31,8	2,37	0,3
<i>Cobertura pesada</i> Telha fibrocimento, câmara de ar (>5,0 cm), laje maciça (10,0 cm)	2,06	233,0	5,00	0,3
<i>Cobertura isolante e escura</i> Telha cerâmica, câmara de ar (>5,0 cm), espuma rígida de poliuretano (2,0cm), forro de pvc (1,0 cm)	0,85	31,8	2,37	0,7

Para avaliar as aberturas são simuladas 3 alternativas de aberturas translúcidas: com vidro comum (FS_t=0,87 e transmissão luminosa de 0,898), com vidro isolante (FS_t=0,34 e transmissão luminosa de 0,51) e com vidro comum e venezianas metálicas (FS_t=0,19).

O dispositivo modelado para sombreamento das aberturas é uma veneziana horizontal, com refletância de 0,5. Nos testes com sombreamento é considerada a presença do sombreamento durante todo o dia.

Para uma avaliação mais precisa do impacto da ventilação no desempenho térmico da edificação, optou-se por simular a ventilação natural no módulo “Airflow Network” do EnergyPlus. Os coeficientes de pressão são calculados pelo programa. Os coeficientes de descarga adotados são de 0,65 para as portas e de 0,6 para as janelas, conforme manual do próprio programa. São testadas inicialmente, duas condições de ventilação: com e sem ventilação, sendo que neste último caso nos ambientes de permanência transitória (banheiro, cozinha e área de serviço) as janelas são mantidas abertas durante todo o período das simulações. Tal decisão se baseou no estudo desenvolvido por Loura (2006) que apontou que o método de cálculo CTF para simulações com taxas de renovação de ar muito baixas em edificações naturalmente ventiladas

apresenta algumas interferências nos resultados. Assim, para superar esta limitação, as janelas dos ambientes de permanência transitória, como banheiros e cozinhas, são mantidas abertas durante todo o período considerado nas simulações.

3.4.3. Parâmetros de saída

As variáveis de saída solicitadas pelo software de simulação são a temperatura externa do ar horária (°C), a temperatura neutra ou de conforto horária (°C), a temperatura operativa interna horária das zonas térmicas (°C) e a temperatura do ar interno horária das zonas térmicas (°C). As temperaturas de conforto são utilizadas para o cálculo da faixa de conforto e as temperaturas operativas para a verificação da condição de conforto ou não.

3.4.4. Definição das horas de conforto

Para a quantificação das horas de conforto, o modelo adotado é o desenvolvido por deDear e Brager (2002), adotado pela norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013). A faixa de conforto utilizada é a de $\pm 3,5$ °C, de acordo com a recomendação da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013). Se as temperaturas operativas se apresentam dentro da faixa, são contabilizadas como horas de conforto, caso contrário, como horas de desconforto. As condições simuladas com maior número de horas de conforto são consideradas como as recomendações de projeto para cada uma das localidades analisadas.

3.2. Climas estudados

Foram selecionadas 24 cidades brasileiras, três para cada Zona Bioclimática (ZB) definida na NBR 15.220-3 (2005). As cidades escolhidas foram Maringá (PR), São Joaquim (SC) e Campos do Jordão (SP) para a zona bioclimática 1; Santa Maria (RS), Florestal (MG) e Teresópolis (RJ) para a zona bioclimática 2; Belo Horizonte (MG), Florianópolis (SC) e Ponta Porã (MS) para a zona bioclimática 3; Brasília (DF), Pirapora (MG) e São Carlos (SP) para a zona bioclimática 4; Garanhuns (PE), Vitória da Conquista (BA) e Campos (RJ) para a zona bioclimática 5; Jataí (GO), Bom Jesus da Lapa (BA) e João Pinheiro (MG) para a zona bioclimática 6; Bom Jesus do Piauí (PI), Cabrobó (PE) e Cuiabá (MT) para a zona bioclimática 7; e Manaus (AM), Pão de Açúcar (AL) e Rio de Janeiro (RJ) para a zona bioclimática 8.

As cidades foram selecionadas de acordo a disponibilidade de arquivo climático que pudessem ser utilizados nas simulações e também de forma a contemplar boa parte do território brasileiro.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos por meio das simulações para a obtenção das horas de conforto para cada uma das localidades e condições avaliadas.

4.1. Análise dos resultados para as paredes externas

Na **Tabela 5** são apresentados a compilação de resultados de horas de conforto obtidas por simulação para os seis tipos de paredes em análise para as três cidades de cada uma das oito zonas bioclimáticas.

Tabela 5 - Resultados de horas de conforto para as variações das paredes externas

LOCALIDADE	ZB	HORAS DE CONFORTO [%]					
		Parede base	Parede isolante	Parede pesada	Parede escura	Parede isolante e pesada	Parede isolante e escura
Campos do Jordão	1	22,7	22,7	29,7	42,2	59,5	44,7
Maringá	1	71,1	72,6	74,9	57,8	62,5	59,1
São Joaquim	1	15,2	15,4	20,3	29,2	41,3	30,5
Florestal	2	70,2	72,1	74,3	64,8	76,0	67,2
Santa Maria	2	42,9	44,4	47,9	43,6	50,2	45,9
Teresópolis	2	49,5	49,4	64,5	57,2	56,3	57,3
Belo Horizonte	3	74,2	75,8	46,8	46,8	73,6	51,2
Florianópolis	3	63,4	64,7	67,4	65,5	64,9	61,7
Ponta Porã	3	61,0	63,8	68,8	56,4	68,4	59,4
Brasília	4	83,1	90,0	95,6	67,3	76,5	69,5

São Carlos	4	71,2	71,8	82,8	71,3	76,7	73,1
Pirapora	4	76,4	77,7	58,7	57,8	75,3	58,5
Campos	5	77,5	78,2	68,5	66,9	77,8	67,9
Garanhuns	5	75,0	77,9	85,0	72,8	97,7	77,7
Vitória da Conquista	5	79,3	81,0	83,7	74,5	87,3	76,0
Jataí	6	80,8	85,8	93,0	69,9	83,0	75,2
Bom Jesus da Lapa	6	60,3	61,3	32,7	39,5	55,2	39,2
João Pinheiro	6	86,0	87,2	83,2	75,4	89,8	77,0
Bom Jesus do Piauí	7	69,4	69,5	68,4	45,5	37,8	41,9
Cabrobó	7	69,3	68,2	59,1	44,9	40,9	41,6
Cuiabá	7	41,0	36,4	24,1	18,0	10,9	14,8
Manaus	8	42,4	36,5	19,7	13,5	3,1	10,1
Pão de Açúcar	8	58,5	55,0	45,0	35,0	33,6	32,3
Rio de Janeiro	8	74,0	73,9	67,1	44,3	37,7	41,8

Comparando os resultados para as paredes isolantes em relação à parede base para todas as zonas bioclimáticas, o que foi observado é que a redução do valor da transmitância térmica pouco influenciou nas horas de conforto obtidas, sendo que para a zona bioclimática 8 houve uma redução das horas de conforto.

No caso das paredes pesadas, apresentaram maior contribuição para as horas de conforto em geral. No caso das zonas bioclimáticas 7 e 8 e algumas cidades de outras zonas (Belo Horizonte, Pirapora, Campos e Bom Jesus da Lapa), as paredes pesadas resultaram em uma redução das horas de conforto.

Em relação à absorvância, comparando as paredes escuras com a parede base, esta se apresentou uma variável de grande influência nas horas de conforto devendo ser limitada a valores baixos, com exceção das cidades de Campos do Jordão, São Joaquim, Santa Maria, Teresópolis e Florianópolis, cidades com períodos de maior rigor térmico por frio. Um ponto importante de se ressaltar, que mesmo quando as paredes eram isolantes e escuras, houve uma redução das horas de conforto, apontando que limitar a transmitância em valores mais restritivos não é suficiente para compensar a influência da absorvância solar.

As paredes leves, não isolantes e claras foram as melhores condições para as cidades das zonas bioclimáticas 7 e 8. Para as cidades de Belo Horizonte, Campos e Bom Jesus da Lapa as paredes isolantes e claras apresentaram como as melhores soluções. As paredes pesadas claras apresentaram o maior número de horas de conforto para as cidades de Maringá, Florianópolis, Ponta Porã, Brasília, São Carlos e Jataí. Apenas para a cidade de Teresópolis as paredes leves e escuras mostraram-se a melhor solução. Para as demais cidades, a melhor solução foram as paredes isolantes, pesadas e escuras.

É importante ressaltar que estes resultados foram obtidos sem considerar a interação entre as variáveis analisadas de forma global.

4.2. Análise dos resultados para as aberturas

Os resultados das horas de conforto para a análise das aberturas são expostos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de horas de conforto para as variações das aberturas

LOCALIDADE	ZB	HORAS DE CONFORTO [%]			
		Vidro comum sem sombreamento (caso base)	Vidro isolante sem sombreamento	Vidro comum com sombreamento	Permeabilidade à ventilação natural
Campos do Jordão	1	22.7	18.2	19.5	20.0
Maringá	1	57.5	57.9	58.6	53.9
São Joaquim	1	15.2	12.0	13.2	15.5
Florestal	2	70.2	66.7	69.9	62.2
Santa Maria	2	42.9	41.8	53.6	51.7
Teresópolis	2	49.5	40.2	45.4	37.9
Belo Horizonte	3	74.2	83.0	81.1	77.3
Florianópolis	3	63.4	60.3	67.3	67.2
Ponta Porã	3	61.0	60.5	61.2	58.0
Brasília	4	83.1	81.3	84.5	79.4
São Carlos	4	71.2	62.6	68.3	58.4
Pirapora	4	76.4	84.0	81.4	78.6
Campos	5	77.5	80.9	80.0	77.9
Garanhuns	5	75.0	71.2	73.0	71.4

Vitória da Conquista	5	49.5	40.2	45.4	37.9
Jataí	6	80.8	79.7	81.0	75.9
Bom Jesus da Lapa	6	60.3	75.7	69.0	74.0
João Pinheiro	6	86.0	85.5	87.2	78.9
Bom Jesus do Piauí	7	69.4	74.9	73.0	67.0
Cabrobó	7	69.3	74.7	72.6	68.4
Cuiabá	7	41.0	48.3	44.7	50.3
Manaus	8	42.4	52.5	47.3	60.3
Pão de Açúcar	8	58.5	64.1	61.5	59.8
Rio de Janeiro	8	74.0	78.7	74.0	37.7

Avaliando a utilização de vidros isolantes, observou-se que sua aplicação representou um aumento nas horas de conforto para as cidades das zonas bioclimáticas 7 e 8, de clima bem quente. Nas cidades com um período frio, esta solução resultou em uma redução nas horas de conforto. Contudo, deve-se considerar que para que o vidro isolante tenha seu desempenho adequado, as janelas devem permanecer fechadas, impedindo a ventilação natural, o que resultaria em prejuízo do conforto para o clima quente e úmido.

Já o sombreamento, representou em um aumento nas horas de conforto das cidades com clima misto ou um período significativo quente. Em geral seu desempenho foi superior ao uso de vidro isolante. É importante ressaltar, que esta solução permite também a permeabilidade à ventilação, que o vidro isolante não permite.

A influência da ventilação nem sempre foi positiva, reduzindo as horas de conforto em alguns casos. Uma das possíveis razões para isto pode ser a necessidade de controlar a ventilação conforme o período do ano.

É importante ressaltar que estes resultados foram obtidos sem considerar a interação entre as variáveis analisadas de forma global.

4.3. Análise dos resultados para as coberturas

Os resultados das horas de conforto para a análise das coberturas são expostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Resultados de horas de conforto para as variações das coberturas

LOCALIDADE	ZB	HORAS DE CONFORTO [%]				
		Cobertura base	Cobertura isolante	Cobertura pesada	Cobertura escura	Cobertura isolante e escura
Campos do Jordão	1	16.8	17.2	16.7	20.6	18.5
Maringá	1	51.6	51.9	51.7	51.9	52.1
São Joaquim	1	11.2	11.3	11.1	13.5	12.1
Florestal	2	57.0	56.8	55.6	58.2	58.6
Santa Maria	2	49.9	51.3	50.9	50.3	51.5
Teresópolis	2	32.2	31.7	30.9	34.0	34.0
Belo Horizonte	3	74.4	75.7	75.2	74.2	76.3
Florianópolis	3	62.2	63.0	62.7	63.1	63.8
Ponta Porã	3	54.3	55.0	54.6	54.7	55.5
Brasília	4	70.5	72.1	71.8	73.2	73.7
São Carlos	4	53.0	52.8	51.8	54.5	54.7
Pirapora	4	77.8	77.8	77.3	77.7	78.0
Campos	5	74.8	74.8	74.1	75.1	75.2
Garanhuns	5	60.0	61.4	60.8	65.0	64.0
Vitória da Conquista	5	56.2	55.9	55.2	58.0	58.2
Jataí	6	72.0	73.6	72.8	73.3	74.6
Bom Jesus da Lapa	6	74.6	75.1	75.0	73.7	73.9
João Pinheiro	6	72.7	72.6	71.6	73.8	74.0
Bom Jesus do Piauí	7	75.0	75.2	75.4	71.1	73.8
Cabrobó	7	77.3	77.4	77.6	73.4	75.8
Cuiabá	7	59.4	59.9	59.6	54.8	58.0
Manaus	8	70.4	70.8	70.8	62.0	67.6
Pão de Açúcar	8	70.5	70.5	70.6	65.0	68.5
Rio de Janeiro	8	82.2	83.1	82.8	80.4	82.9

As coberturas isolantes, em geral, representaram um aumento nas horas de conforto em relação aos demais casos analisados. Em alguns casos a cobertura isolante não representou uma alteração significativa. As coberturas pesadas não apresentaram alterações significativas nas horas de conforto. As coberturas escuras representaram uma redução das horas de conforto nas cidades de clima quente e um aumento nas cidades de clima frio ou com um período frio considerável. No caso das cidades de clima quente, mesmo se as coberturas fossem isolantes e escuras, há uma redução das horas de conforto.

4.4. Recomendações para cada uma das zonas bioclimáticas

Os resultados obtidos apontaram que limitar a transmitância térmica das paredes externas apenas não é suficiente para garantir boas condições de conforto em nenhuma das zonas bioclimáticas. Os valores da capacidade térmica e absorvância solar devem também ser limitados, sendo que paredes pesadas apresentaram melhores condições de conforto, com exceção da zona 8. No caso das zonas bioclimáticas 1 e 2, as paredes devem ser pesadas e isolantes ($U \leq 1,85 \text{ W/m}^2\text{K}$), enquanto que nas zonas 3 e 7 as paredes isolantes são opcionais contribuindo para a melhoria das horas de conforto, mas não sendo fundamental ($U \leq 3,00 \text{ W/m}^2\text{K}$). Paredes escuras são admissíveis apenas em climas frios.

Com relação às aberturas, reduzir o ganho térmico por radiação é importante nas zonas 2 a 8 ($FS \leq 0,35$), sendo que nas zonas 7 e 8 esta redução deve ser maior que as demais ($FS \leq 0,25$). Em todas as zonas bioclimáticas a ventilação natural deve ser controlável permitindo que ocorra apenas nos períodos quentes, com exceção da zona 8 em que a ventilação deve ser permanente.

Já para as coberturas, observou-se que o conforto térmico foi definido pela transmitância térmica e pela absorvância solar. Ao contrário das paredes externas, a capacidade térmica apresentou pouca influência. Para todas as zonas bioclimáticas, as coberturas devem ser leves ($\varphi \leq 3,0 \text{ hs}$), isolantes ($U \leq 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$) e claras ($\alpha \leq 0,3$).

Os resultados obtidos para as paredes apresentaram maiores impactos no conforto térmico entre as variações testadas em relação aos resultados das aberturas e das coberturas. Contudo, conforme o apresentado por Ferreira, Souza e Assis (2016) (Tabela 2), é a combinação das especificações das envoltórias e aberturas que resultará em condições de conforto térmico adequadas, conforme a recomendação da ASHRAE 55 (2013) de no mínimo 80% das horas de conforto.

Comparando os resultados apresentados nos itens anteriores com aqueles obtidos por Ferreira, Souza e Assis (2016) (Tabela 2) foram obtidas as recomendações para as paredes externas, coberturas e aberturas para cada uma das zonas bioclimáticas. A partir das recomendações foram estabelecidos os valores limites de acordo com os valores adotados por Mahoney (UNITED NATIONS, 1971). Estes resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Recomendações de projeto para cada zona bioclimática e seus valores limites

ZB	PAREDES EXTERNAS			ABERTURAS		COBERTURAS				
	Tipo	U_{par} W/m^2K	ϕ_{par} hs	α_{par} $adim.$	FS_t $adim.$	Ventilação $adim.$	Tipo	U_{cob} W/m^2K	ϕ_{cob} hs	α_{cob} $adim.$
ZB1	Pesada isolante	$\leq 1,85$	$\geq 8,00$	$\leq 0,7$	$\leq 0,87$	Controlável	Leve isolante	$\leq 0,85$	$\leq 3,00$	$\leq 0,3$
ZB2	Pesada isolante	$\leq 1,85$	$\geq 8,00$	$\leq 0,7$	$\leq 0,35$	Controlável	Leve isolante	$\leq 0,85$	$\leq 3,00$	$\leq 0,3$
ZB3	Pesada	$\leq 3,00$	$\geq 8,00$	$\leq 0,7$	$\leq 0,35$	Controlável	Leve isolante	$\leq 0,85$	$\leq 3,00$	$\leq 0,3$
ZB4	Pesada	$\leq 3,60$	$\geq 8,00$	$\leq 0,3$	$\leq 0,35$	Controlável	Leve isolante	$\leq 0,85$	$\leq 3,00$	$\leq 0,3$
ZB5	Pesada	$\leq 3,60$	$\geq 8,00$	$\leq 0,3$	$\leq 0,35$	Controlável	Leve isolante	$\leq 0,85$	$\leq 3,00$	$\leq 0,3$
ZB6	Pesada	$\leq 3,60$	$\geq 8,00$	$\leq 0,3$	$\leq 0,35$	Controlável	Leve isolante	$\leq 0,85$	$\leq 3,00$	$\leq 0,3$
ZB7	Pesada	$\leq 3,00$	$\geq 8,00$	$\leq 0,3$	$\leq 0,20$	Controlável	Leve isolante	$\leq 0,85$	$\leq 3,00$	$\leq 0,3$
ZB8	Leve	$\leq 3,60$	$\leq 3,00$	$\leq 0,3$	$\leq 0,20$	Permanente	Leve isolante	$\leq 0,85$	$\leq 3,00$	$\leq 0,3$

5. CONCLUSÕES

As normas de desempenho térmico são importantes instrumentos para garantir um desempenho térmico mínimo das edificações. Atualmente vigoram no Brasil as normas de desempenho térmico NBR 15.220 (2005) e a NBR 15.575 (2013). Estudos desenvolvidos no país apontaram que em alguns casos eles não são suficientes para a obtenção de conforto, além de não serem os mesmos entre as normas.

A partir dos resultados obtidos por simulações é possível observar que a transmitância térmica das paredes externas não é um parâmetro suficiente para garantir o desempenho térmico da edificação, sendo que a capacidade térmica e a absorvância são fatores de maior influência. Para todas as zonas bioclimáticas, com exceção da zona 8, as paredes devem ser pesadas. Paredes escuras são admissíveis apenas nas zonas 1, 2 e 3.

Para a zona bioclimática 8 as paredes devem ser leves, não isolantes e claras. Em relação às coberturas, o que se observou é que a transmitância térmica e a absorvância solar desempenham papel fundamental. Para todas as zonas bioclimáticas, as coberturas devem ser isolantes e claras.

Apesar das normas atualmente em vigor não abordarem as propriedades térmicas das aberturas, sendo estabelecido apenas o tamanho das aberturas, estas se mostraram relevantes para o desempenho térmico da edificação. Assim, são definidos valores limites de fator solar de elementos transparentes, assim como a necessidade de ventilação (controlável e permanente). O sombreamento mostrou-se uma estratégia de impacto. De forma geral, a ventilação contribui para a melhoria do desempenho térmico nos períodos quentes.

Entende-se que, além das paredes externas e coberturas, as aberturas devem ser consideradas pelas normas para um adequado desempenho térmico da edificação. Sugere-se que para a avaliação das aberturas, seja adotado o fator solar, variável que permitiria tanto o uso de vidros isolantes como de dispositivos de sombreamento para a redução dos ganhos térmicos por radiação pelas aberturas, conforme as demandas sazonais locais. Com base nos resultados obtidos, sugere-se que as seguintes variáveis sejam adotadas para análise de requisitos mínimos de desempenho térmico de uma edificação: a transmitância térmica, o atraso térmico (em substituição à capacidade térmica) e a absorvância solar das paredes externas; o fator solar e a ventilação para as aberturas; e, por fim, a transmitância térmica, o atraso térmico (em substituição à capacidade térmica) e a absorvância solar das coberturas. Ressalta-se a importância de limitar o valor da absorvância das superfícies, independente da sua transmitância. A partir do estudo desenvolvido, foram estabelecidos novos valores limites para estas variáveis. Estes valores limites são baseados nos valores de Mahoney (UNITED NATIONS, 1971). Para refinamento dos resultados, estudos paramétricos devem ser realizados para cada uma das variáveis sugeridas em cada uma das zonas bioclimáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR 15575** - Edifícios habitacionais: desempenho. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2013.
- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, 2013.
- BOGO, A. J. **Limitações quanto aos Parâmetros de Desempenho Térmico e Estratégias Bioclimáticas Recomendadas pela Norma Brasileira de Desempenho Térmico de Habitações de Interesse Social**. Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- CHVATAL, K. M. S. Avaliação do Procedimento Simplificado da NBR 15.575 para Determinação do Nível de Desempenho Térmico de Habitações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 119-134. 2014.
- FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A.; ASSIS, E. S. D. Discussão dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos segundo as normas de desempenho térmico brasileiras. **Ambiente Construído**, Port Alegre, jan./mar. 2017. 183-200.
- LOURA, R. M.. **Procedimentos de Identificação de Variáveis e Análise de sua Pertinência em Avaliações Termo-Energéticas de Edificações**. Belo Horizonte : Dissertação (Pós-Graduação em Ciências e Técnicas Nucleares do Departamento de Engenharia Nuclear da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais), 2006. p. 212.
- MATOS, M. **Simulação Computacional do Desempenho Térmico de Residências em Florianópolis Utilizando a Ventilação Natural**. 2007. 108f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- OLIVEIRA, L. D. S. **Avaliação dos Limites das Propriedades Térmicas dos Fechamentos Opacos da NBR 15.220-3, para Habitações de Interesse Social, da Zona Bioclimática 2**. 2012. 156 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2012.
- PEREIRA, I.; ASSIS, E. S. D. Discussão das Estratégias Propostas pelo Projeto de Norma de Desempenho Térmico de Edificações através de Estudo de Caso. In: **VIII ENTAC - Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e IV ENLAC - Encontro Latino de Conforto no Ambiente Construído**, Macéio, 2005. 1480-1489.
- SOARES, M. M. **Avaliação dos Parâmetros de Desempenho Térmico da NBR 15.575/2013: habitações de interesse social na zona bioclimática 2**. 2014. 159 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Pós- Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2014.
- UNITED NATIONS. **Climate and House Design**. New York: [s.n.], v. 1, 1971.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG.