

## **AVALIAÇÃO DE DIFERENTES ALTERNATIVAS DE MODELAGEM DE HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL NO PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO *ENERGYPLUS***

### *EVALUATION OF DIFFERENT ALTERNATIVES TO MODEL SOCIAL HOUSING IN ENERGYPLUS THERMAL PERFORMANCE SIMULATION PROGRAM*

Karin Maria Soares Chvatal<sup>1</sup>  
Tássia Helena Teixeira Marques<sup>2</sup>

**Resumo.** Inúmeros países incorporam a simulação computacional em suas normas e regulamentos voltados ao desempenho térmico de edifícios. O modelo virtual criado nesses programas é uma representação de um edifício real, sujeito a simplificações e limitações específicas. O objetivo deste trabalho é avaliar diferentes alternativas de modelagem de habitações de interesse social no programa de simulação de desempenho térmico *EnergyPlus*. Para tal, foram simuladas duas habitações no clima de São Carlos, SP, Brasil, considerando variadas possibilidades para os seguintes aspectos: temperatura do solo, caixilhos, venezianas, beirais e dimensões das superfícies. Os dados foram analisados através do índice de conforto adaptativo prescrito pela norma internacional ASHRAE 55 (soma anual dos graus-hora de frio e de calor) e do método de avaliação do desempenho térmico proposto pela norma brasileira ABNT NBR 15575 (dias típicos de verão e inverno). Os resultados indicaram o impacto significativo da temperatura do solo, e em menor proporção, das venezianas e dos beirais. Dessa forma, é possível fornecer subsídios quantitativos para a tomada de decisões conscientes durante o processo de simulação.

**Palavras-chaves:** Simulação computacional de desempenho térmico. Habitação social. *Energy Plus*.

**Abstract.** In several countries, building thermal performance Standards and Regulations require computational simulation. Simulation models intend to represent the real building considering specific limitations and simplifications. The aim of this study is to evaluate different alternatives for social housing modeling in *EnergyPlus* program. Two types of social housing were analyzed in the climate of São Carlos, SP, Brazil, by varying the following parameters: ground temperature, window frame, window shutters, presence of eaves and surfaces dimensions. Output data were verified using the adaptive comfort method described by ASHRAE 55 (sum of annual heating and cooling degree hours) and the thermal performance method proposed by ABNT NBR 15575 Brazilian Standard (summer and winter typical days). The results indicated great impact of the way to consider ground temperature and the presence or not of window shutters and eaves. Therefore, it is possible to provide information for making informed decisions during simulation modeling process.

**Keywords:** Thermal performance simulation. Social housing. *EnergyPlus*.

## **1 INTRODUÇÃO**

O uso de simulação computacional para a avaliação do desempenho termo-energético de edifícios tem se intensificado nas últimas décadas. No ambiente profissional, há o aumento do interesse por edificações e sistemas mais eficientes – visando reduzir custos de operação –, aliado à busca por eficiência energética requerida por certificações ambientais – o que traz a simulação como ferramenta para se prever o comportamento do edifício em projeto (Westphal, 2007). No meio acadêmico, esta é uma alternativa que permite a avaliação do

---

<sup>1</sup> Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos – SP, 13566-590. Responsável por receber correspondências.

<sup>2</sup> Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos – SP, 13566-590.

desempenho de um edifício e a influência de uma série de parâmetros de forma razoavelmente rápida e de baixo custo, além de por si só ser objeto de estudo, visando o seu aperfeiçoamento ou o aumento da sua confiabilidade.

Atualmente, inúmeros países incorporam a simulação computacional em suas normas e regulamentos voltados ao desempenho térmico de edifícios. No Brasil, isso também ocorre nos atuais regulamentos (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais / RTQ-R (INMETRO, 2012); Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos / RTQ-C (INMETRO, 2010)), e na norma ABNT NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013).

Os programas de simulação do desempenho termo-energético se baseiam em métodos de cálculo complexos e apresentam grande quantidade de dados de entrada, exigindo conhecimento aprofundado dos conceitos teóricos a eles relacionados. O modelo criado no programa é uma representação de um edifício real, sujeito a limitações e simplificações. Dentre os dados de entrada, muitos apresentam incertezas, as quais podem impactar significativamente os resultados. Há uma série de estudos que procuram avaliar o impacto de determinados dados de entrada na simulação do desempenho termo-energético dos edifícios (Silva *et al.*, 2014; Georgescu e Mezic', 2015; Goyal e Barooah, 2012).

Dentro deste contexto surge este trabalho, cujo objetivo é avaliar diferentes alternativas de modelagem de habitações de interesse social no programa de simulação de desempenho térmico *EnergyPlus* (EERE, 2012). Foram selecionadas alternativas para as quais habitualmente surgem dúvidas durante o processo de elaboração do arquivo de entrada das simulações. A intenção é verificar o impacto que diferentes soluções de modelagem apresentam na avaliação do desempenho térmico dessas moradias, segundo métodos usualmente adotados ou indicados em Normas. Dessa forma, é possível fornecer subsídios para a tomada de decisões mais conscientes durante o processo de detalhamento do modelo de simulação.

## 2 METODOLOGIA

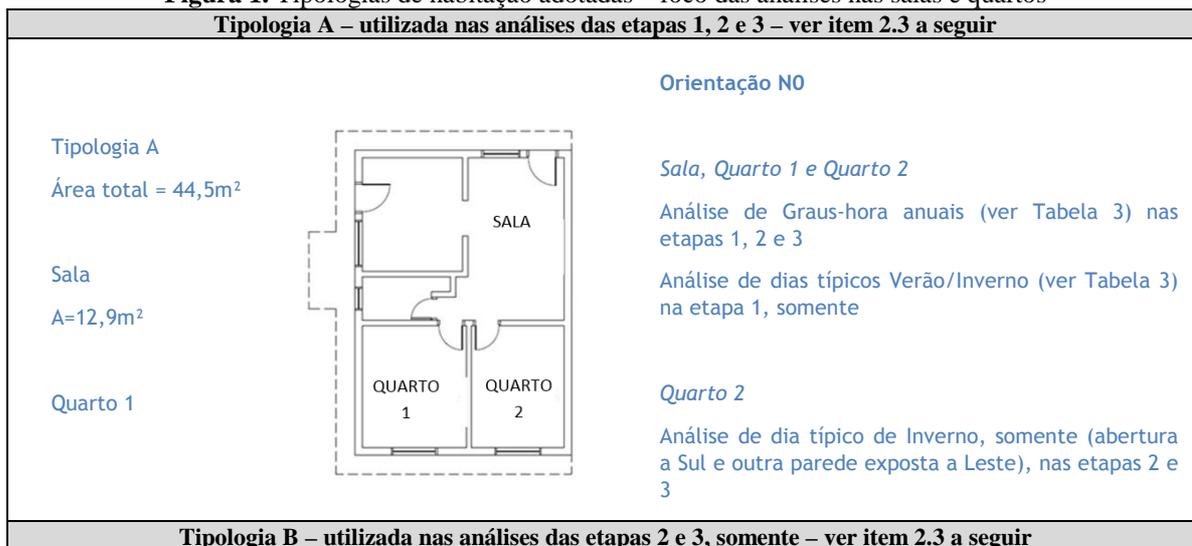
### 2.1 PROGRAMA DE SIMULAÇÃO

O programa de simulação do desempenho térmico escolhido para este estudo foi o *EnergyPlus* (EP) (EERE, 2012). Ele possui acesso livre, é amplamente adotado em todo o mundo e é validado pela ASHRAE 140 (ASHRAE, 2014).

### 2.2 TIPOLOGIAS DE HABITAÇÃO ADOTADAS E SEUS DADOS DE ENTRADA

Foram estudadas duas tipologias de habitação, uma unifamiliar térrea, isolada e sem geminação (A), e outra multifamiliar, composta pelo térreo mais três pavimentos (B), ambas apresentadas na Figura 1. Considerou-se essas habitações situadas na cidade de São Carlos, estado de São Paulo, no Brasil (latitude 22° 01' 03" sul, e altitude de 854 metros). Elas correspondem a modelos representativos do que é mais empregado atualmente nessa região, tendo sido obtidas junto a dois importantes agentes promotores habitacionais: Caixa Econômica Federal (CEF) e Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU). As suas soluções construtivas (Tabela 1) representam padrões usuais do mercado, segundo informações obtidas também através da CEF e da CDHU. São ainda indicadas as propriedades térmicas da envolvente, as quais foram calculadas de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 15220 (ABNT, 2005).

**Figura 1.** Tipologias de habitação adotadas – foco das análises nas salas e quartos



**Tabela 1.** Soluções construtivas das habitações

Parâmetros	Tipologia A	Tipologia B
Solução construtiva das paredes externas	argamassa (2,5 cm) + bloco de concreto(14 cm) + argamassa (2,5 cm) U=2,76 W/m <sup>2</sup> .K e CT= 266 KJ/m <sup>2</sup> .K	
Absortância das superfícies das paredes externas e internas	cor branco absortância solar = 0,30	
Solução construtiva das coberturas (ordem dos materiais do exterior para o interior)	telha cerâmica (1 cm) + ático + laje cerâmica pré-moldada (12 cm) U=1,78 W/m <sup>2</sup> .K e CT= 189 KJ/m <sup>2</sup> .K <sup>1</sup>	telha fibrocimento (0,8 cm) + ático + laje cerâmica pré-moldada (12 cm) U=1,80 W/m <sup>2</sup> .K e CT= 181 KJ/m <sup>2</sup> .K <sup>1</sup>
Absortância da superfície exterior da cobertura	0,75	0,53 Fonte: Uemoto, Sato e John (2010)
Solução construtiva das paredes internas	argamassa (2,5 cm) + bloco de concreto (9 cm) + argamassa (2,5 cm) U=2,27 W/m <sup>2</sup> .K e CT= 206 KJ/m <sup>2</sup> .K	
Piso ou laje entre pavimentos	brita (3cm) + concreto (8 cm) + argamassa (2,5 cm) + revestimento cerâmico (0,4 cm)	concreto (8 cm) + argamassa (2,5 cm) + revestimento cerâmico (0,4 cm)
Janelas das Salas	Janela de correr (abertura efetiva de 50%). Peitoril de 1,10m;dimensões 1,20x1,0m (largura x altura) Vidro incolor, 4 mm, fator solar de 0,87	Janela tipo maxim-ar45°(abertura efetiva de 50%). Peitoril de 0,80m; dimensões 0,80x1,65m (largura x altura) Vidro incolor, 4 mm, fator solar de 0,87
Janelas dos Quartos	Janelas de correr com veneziana (abertura efetiva de 50%). Peitoril de 1,10m, dimensões 1,20x1,0m (largura x altura) Vidro incolor, 4 mm, fator solar de 0,87	Janelas de correr com veneziana (abertura efetiva de 50%). Peitoril de 1,0m, dimensões 1,20x1,20m (largura x altura) Vidro incolor, 4 mm, fator solar de 0,87
<i>Notas:</i> <sup>1</sup> O U e o CT da solução construtiva da cobertura foram calculados considerando o conjunto telha, ático (câmara de ar) e laje.		

Segundo o projeto original, há beirais de 50 cm de largura em três fachadas da moradia A, e não há beirais na moradia B (Figura 1). Além disso, as habitações possuem venezianas de alumínio nas janelas dos quartos. A Tabela 2 apresenta as características das venezianas e dos caixilhos considerados na modelagem.

**Tabela 2.** Características das venezianas e dos caixilhos na modelagem do *EnergyPlus*

<b>Venezianas</b>	Nos quartos, janela veneziana de correr em alumínio com 3 folhas, sendo duas folhas de veneziana (uma fixa, e outra, móvel) e uma folha em vidro (móvel). Espessura adotada para a folhe de alumínio de 2mm. Uma das folhas da veneziana é fechada na frente da folha de vidro, das 22:00 às 06:00 hrs (janela fechada).
<b>Caixilhos</b>	Caixilharia em alumínio Moldura ao redor da janela, largura de 6,50 cm Cozinha: divisor vertical adicional Sala: divisor horizontal adicional Absortância solar total para o alumínio: 0,7

Cada ambiente das habitações foi modelado como sendo uma zona térmica, inclusive o ático. No caso da tipologia B, foi simulada uma unidade habitacional do último andar, com a cobertura exposta e o piso e as paredes divisórias com outras unidades ou áreas comuns, como adiabáticos. Considerou-se a edificação sem ganhos internos e com taxa de infiltração constante de uma renovação por hora em todos os ambientes, inclusive no ático, conforme o método de simulação da ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013).

As habitações foram simuladas para um ano climático representativo e para dias típicos de verão e de inverno (segundo o método da ABNT NBR 15575). Os dados horários do ano climático foram obtidos em Roriz (Roriz, 2012). Já os dados dos dias típicos necessários para entrada no *EnergyPlus* (como temperaturas, radiação solar, nebulosidade e umidade) foram calculados a partir da média dos dados das semanas típicas identificadas no arquivo climático de São Carlos – 17 a 23 de fevereiro para o verão e 3 a 9 de agosto para o inverno (Roriz, 2012).

A orientações em relação ao Norte, indicadas na Figura 1, para cada tipologia, correspondem ao recomendado pela ABNT NBR 15575 para as simulações dos dias típicos de inverno e verão. Para a Tipologia A, na orientação N0 é avaliado o desconforto de inverno no quarto 2 (janela voltada a sul e a outra parede, a leste), e na N90, o desconforto de verão no quarto 1 (janela voltada a oeste e a outra parede, a norte). Já para a Tipologia B, na orientação N0 é avaliado o desconforto de inverno no quarto 1 da Unidade A (janela voltada a sul e a outra parede, a leste). E na orientação N90, o desconforto de verão no quarto 1 da Unidade D (janela voltada a oeste e a outra parede, a norte). Além disso, para a análise dos graus-hora de desconforto por calor e por frio, adotou-se a orientação N0 para a Tipologia A e a orientação N90 para a Unidade D da Tipologia B. Neste último caso, foram avaliados todos os ambientes de maior permanência (sala e quartos).

### 2.3 ALTERNATIVAS DE MODELAGEM AVALIADAS

As alternativas de modelagem avaliadas se referem aos parâmetros abaixo descritos.

- *Temperatura do solo.* A temperatura do solo é expressa através de doze dados de entrada, correspondentes ao seu valor médio mensal. Há ausência de pesquisas que indiquem valores mais precisos para esse parâmetro em edificações brasileiras. Devido a esta lacuna de informação, adotaram-se dois procedimentos: temperatura do solo igual à temperatura média do ar externo; temperatura do solo com base no programa auxiliar do EP, *Slab* (EERE, 2012), que a calcula com base nos valores médios de temperaturas internas e externas da edificação. Esta segunda opção, por exemplo, é a recomendada pelo RTQ-R (INMETRO, 2012). Além de este ser um parâmetro de grande incerteza, soma-se a isso o fato de possuir impacto considerável. A documentação do EP indica que estes dados têm grande influência em residências e em edifícios pequenos (LBNL, 2012). No Brasil não é usual a adoção de isolamento térmico no piso, e portanto o fluxo de calor através dele representa uma parcela representativa no balanço térmico do edifício, sendo diretamente influenciado pela

temperatura do solo. O objetivo aqui não é verificar a alternativa de modelagem mais correta para esse parâmetro, devido à ausência de dados reais medidos, mas sim avaliar o impacto das duas opções indicadas nos resultados da simulação de uma habitação térrea.

- *Caixilhos, venezianas e beirais.* O EP permite a modelagem dos caixilhos, mas esses usualmente não são considerados nas simulações, visando à redução do tempo de elaboração do arquivo de entrada. O mesmo ocorre, embora com menos frequência, com as venezianas nos dormitórios e os beirais, quando esses são previstos em projeto. É certo que um modelo que contemple esses aspectos apresentará resultados mais próximos da realidade. No entanto, o objetivo é quantificar o impacto desse tipo de simplificação, de modo a viabilizar a tomada de decisão por parte do simulador.

- *Medidas das superfícies.* No EP, a entrada da geometria do edifício é dada através das dimensões das suas superfícies. Essas dimensões são sempre as mesmas, não sendo alteradas caso se altere a espessura das paredes. Sendo assim, foram avaliadas duas alternativas de modelagem: considerando as superfícies delimitadas pela face externa ou interna das paredes. Essas são as duas alternativas mais extremas, e a intenção foi verificar se a adoção desses valores ocasionaria alguma diferença.

As simulações foram agrupadas em três etapas (Tabela 3). Em cada uma delas foram consideradas diferentes alternativas de modelagem para os parâmetros supracitados: temperatura do solo, na etapa 1, caixilhos, venezianas e beirais, na etapa 2, e medidas das superfícies (externas ou internas), na etapa 3.

**Tabela 3.** Etapas das simulações

Etapa	Parâmetros verificados	Tipologias simuladas	Variações adotadas	Demais dados adotados
1	Temperatura do solo	A, orientada a N0 <sup>1</sup>	Varição 1: temperatura mensal do solo igual à temperatura média mensal do ar exterior Varição 2: temperatura mensal do solo obtida por meio do programa Slab (programa auxiliar dentro do <i>EnergyPlus</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Com caixilhos, venezianas e beirais conforme o projeto original (descrição no item 2.2)</li> <li>• Modelagem com as medidas externas da geometria</li> </ul>
2	Caixilhos, venezianas e beirais	A, orientada a N0 e N90 <sup>2</sup> B, orientada a N0 e N90 <sup>2</sup>	Varição 1: com caixilhos, com venezianas e, para a moradia A, com beirais Varição 2: <b>sem caixilhos</b> , com venezianas e, para a moradia A, com beirais Varição 3: com caixilhos, <b>sem venezianas</b> e, para a moradia A, com beirais Varição 4 (somente para a moradia A): com caixilhos, com venezianas e <b>sem beirais</b> Varição 5: <b>sem caixilhos, sem venezianas e sem beirais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura do solo definida na etapa 1</li> <li>• Quando considerados na variação, os caixilhos, venezianas e beirais foram modelados conforme o projeto original (descrição no item 2.2)</li> <li>• A moradia B não possui beirais em nenhuma situação, pois este não é previsto em projeto</li> <li>• Modelagem com as medidas externas da geometria</li> </ul>
3	Medidas das superfícies	A, orientada a N0 e N90 <sup>2</sup> B, orientada a N0 e N90 <sup>2</sup>	Varição 1: modelagem com as medidas externas da geometria, ou seja, dimensões das superfícies considerando a face externa das paredes Varição 2: modelagem com as medidas internas da geometria, ou seja, dimensões das superfícies considerando a face interna das paredes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura do solo definida na etapa 1</li> <li>• Com caixilhos, venezianas e beirais conforme o projeto original (descrição no item 2.2)</li> </ul>

*Notas:* <sup>1</sup> O teste do impacto da temperatura do solo foi conduzido apenas na tipologia A por ser um parâmetro de maior relevância em edificações térreas. <sup>2</sup> Orientações conforme indicado no item 2.2.

## 2.4 FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados foram avaliados segundo os métodos mais comumente utilizados para esse tipo de edifício no Brasil: os graus-hora de desconforto anuais e o método de análise dos dias típicos proposto pela ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013). No primeiro caso, foi feita uma simulação considerando-se o total de 8760 horas do ano; no segundo caso, foram simulados apenas os dias típicos de verão e de inverno. Em todos os casos, o foco das análises se deu nos ambientes de maior permanência (sala e quartos), conforme já indicado na Figura 1.

Para os graus-hora anuais, tomou-se como referência o método adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010). De acordo com ele, a temperatura de conforto é função da temperatura média mensal do ar exterior ( $T_n = 17,8 + 0,31 \times T_{Med}$ ; onde:  $T_n$  (°C) = temperatura operativa interna ideal ou de “neutralidade térmica”;  $T_{Med}$  (°C) = Média mensal da temperatura do ar exterior, sendo a equação válida para  $T_{Med}$  entre 10.0 e 33.5 °C). Para estas habitações, considerou-se a faixa de conforto correspondente a 80% de aceitação por parte de seus ocupantes, ou seja, seus limites superior e inferior encontram-se 3,5 °C acima e abaixo da temperatura de neutralidade. Para cada hora do ano, caso a temperatura operativa dos ambientes se encontrasse acima ou abaixo desses limites, eram obtidos os graus-hora de calor e de frio, respectivamente – contabilizou-se e somou-se a quantidade de graus Celsius ultrapassada (para mais ou para menos) em cada horário, para as 8760 horas do ano.

A temperatura operativa é um dado de saída do *EnergyPlus*, sendo considerada como a média aritmética entre as temperaturas radiante média e do ar interior. Esse cálculo é aceitável, segundo a ASHRAE 55, para ocupantes em atividade sedentária, não expostos à radiação direta e a velocidades do ar maiores que 0,20 m/s (ASHRAE, 2010), o que é o caso destas simulações. Considerou-se como significativa uma diferença maior que 5% entre os graus-hora de calor ou de frio, em qualquer ambiente de maior permanência (quartos e sala) das diversas opções de modelagem.

Já o nível de desempenho pela ABNT NBR 15575 é obtido através da simulação para os dias típicos de verão e de inverno. Os critérios para a classificação se dão em função da diferença entre a temperatura mínima do ar no interior e a temperatura mínima do ar no exterior, para o inverno, ou tomando-se como referência a temperatura máxima, para o verão (Tabela4). Nesse caso, a diferença entre as opções de modelagem foi considerada significativa quando o nível de desempenho de verão ou de inverno foi alterado.

**Tabela 4.** Critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de verão e de inverno

	Nível de Desempenho	Critérios para a cidade de São Carlos-SP Zona Bioclimática 4 Te, máx = 26,9°C Te, mín = 14,9 °C
<b>Condições de Verão</b>	Insuficiente	Ti, máx > Te, máx
	Mínimo	Ti, máx ≤ Te, máx
	Intermediário	Ti, máx ≤ (Te, máx - 2 °C)
	Superior	Ti, máx ≤ (Te, máx - 4 °C)
<b>Condições de Inverno</b>	Insuficiente	Ti, mín < (Te, mín + 3 °C)
	Mínimo	Ti, mín ≥ (Te, mín + 3 °C)
	Intermediário	Ti, mín ≥ (Te, mín + 5 °C)
	Superior	Ti, mín ≥ (Te, mín + 7 °C)
Notas: Ti, máx é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação (°C); Te, máx é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação (°C); Ti, mín é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação (°C); Te, mín é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação (°C); Classificação de zona bioclimática para a cidade de São Carlos conforme ABNT, 2005; Temperaturas externas do ar conforme arquivo climático mencionado no item 2.2		

Fonte: Adaptado de NBR 15575 (ABNT, 2013)

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO SOLO

Na Tabela 5 têm-se as temperaturas médias mensais do solo correspondentes às duas variações consideradas, bem como a diferença entre elas. O uso do programa *Slab* (variação 2) resultou em temperaturas do solo maiores do que a adoção da temperatura média mensal (variação 1), com exceção do mês de junho, onde os valores são iguais a 18 °C, por esse ser o valor mínimo permitido para esse parâmetro nessa versão do EP. Com isso, em quase todos os meses do ano, na variação 2 a perda de calor para o solo é reduzida. Isso resulta em maiores temperaturas internas. Pode-se notar essa diferença na Tabela 6, que apresenta um maior desconforto por calor e menor por frio ao longo do ano, em todos os ambientes, para a variação 2. O maior impacto é sentido no desconforto por calor na sala, que é elevado em 38,3%. Também é possível perceber, na Tabela 6, que a sala, orientada a Norte, apresenta maior desconforto por calor e menor por frio, em comparação com os quartos, orientados a sul. Esse resultado vai de encontro ao esperado, devido ao fato da incidência solar total anual ser maior na fachada norte.

**Tabela 5.** Temperaturas médias mensais do solo correspondentes às variações 1 e 2 e a diferença entre elas (°C)

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tsolo variação 1 (°C)	21,7	22,5	21,6	20,5	18	18	18	19,8	19,5	22,3	21,8	21,7
Tsolo variação 2 (°C)	22,4	23,1	22,5	21,4	18,7	18	18,1	20,1	20,4	22,7	23,1	23,1
$\Delta$ (Tsolo var 2 - Tsolo var 1) (°C)	0,7	0,6	0,9	0,9	0,7	0	0,1	0,3	0,9	0,4	1,3	1,4

**Tabela 6.** Graus-hora (°C.h) devido ao calor e ao frio anuais para os ambientes de maior permanência da moradia A (sala e quartos 1 e 2), para as duas variações consideradas para a temperatura mensal do solo

Graus-Hora totais anuais – Tipologia A						
	Sala / Norte		Quarto 1 / Sul		Quarto 2 / Sul	
	°ChCalor	°ChFrio	°ChCalor	°ChFrio	°ChCalor	°ChFrio
Variação 1	420,7	1097,6	324,5	1358,5	373,8	1343,3
Variação 2	581,9	969,5	444,1	1213,3	506,8	1201,4
Aumento (+) ou Redução (-) dos graus-hora (Variação 2 em relação à Variação 1, em %)	+38,3	-11,7%	+36,9%	-10,7%	+35,6%	-10,6%

Quando se utiliza o critério preconizado pela ABNT NBR 15575 para a avaliação do desempenho térmico, o dia típico de verão ocorre em fevereiro e o de inverno, em agosto. Nesses meses, a diferença entre a temperatura do solo para as variações 2 e 1, segundo a Tabela 5, é de 0,6°C (verão) e 0,3°C (inverno). Consequentemente, as temperaturas internas máximas e mínimas são um reflexo dessa diferença, aumentando na ordem de 0,2 °C, o que não é suficiente para alterar o nível de desempenho da habitação (Tabela 7). De forma análoga ao já observado na Tabela 6, as temperaturas máximas ou mínimas da sala são sempre maiores no Verão e no Inverno, por haver maior incidência solar nessa orientação, nos dias típicos, se comparada à fachada sul (meses de fevereiro e agosto).

**Tabela 7.** Avaliação do desempenho térmico segundo a ABNT NBR 15575 para a moradia A, para as duas variações consideradas para a temperatura mensal do solo

Dia Típico												
	Sala / Norte				Quarto 1 / Sul				Quarto 2 / Sul			
	Verão		Inverno		Verão		Inverno		Verão		Inverno	
	$\Delta T$	D	$\Delta T$	D	$\Delta T$	D	$\Delta T$	D	$\Delta T$	D	$\Delta T$	D
Variação 1	+0,5	N	+4,5	M	+0,1	N	+4,1	M	+0,1	N	+4,0	M
Variação 2	+0,7	N	+4,6	M	+0,3	N	+4,3	M	+0,3	N	+4,2	M
Aumento (+) da $T_{i,máx}$ ou da $T_{i,mín}$ para a Variação 2, em relação à Variação 1	+0,2		+0,1		+0,2		+0,2		+0,2		+0,2	

*Notas:*  $\Delta T$  = para o Verão =  $(T_{i, máx} - T_{e, máx})$  / para o Inverno =  $(T_{i, mín} - T_{e, mín})$ ; **D** = Desempenho, segundo classificação da ABNT NBR 15575-2013, sendo: **M**= Mínimo, **I** = Intermediário, **S**= Superior. Para fins deste estudo, adotou-se ainda uma quarta especificação de nível **N** = Não Atende. Somente nesta etapa, foi obtido o nível de desempenho no inverno e no verão para todos os ambientes de permanência prolongada da moradia

Esses resultados confirmam o impacto da temperatura do solo nesse tipo de edificação. Vê-se que no caso da avaliação do desconforto pelos graus-hora, que considera o ano todo, chega-se a diferenças muito altas entre as duas opções. Já na avaliação pelo método da ABNT NBR 15575, como se trata da simulação em apenas um dia, essa influência é mais perceptível quanto maior for a diferença entre as temperaturas do solo adotadas. Alguns autores criticam o fato de a norma ABNT NBR 15575 não considerar a simulação horária anual (Silva et al, 2014; Chvatal, 2014). De fato, a simulação anual representa de forma mais apropriada o desempenho do edifício, por ser possível contemplar a dimensão do desconforto em todo o ano.

Para as simulações subsequentes, foi utilizada a temperatura do solo calculada pelo programa *Slab*(variação 2).

### 3.2 INFLUÊNCIA DOS CAIXILHOS, VENEZIANAS E BEIRAIS

Os resultados para os graus-hora de calor e de frio, para as variações analisadas para as moradias A e B, são apresentados na Tabela 8. A variação 1 é tida como referência, por considerar todos os elementos conforme o projeto (caixilhos, venezianas e beirais) e ser portanto a alternativa de modelagem mais exata. Os valores das demais variações são dados em porcentagem em relação à variação 1.

**Tabela 8.** Graus-hora (°C.h) anuais relativos devido ao calor e ao frio, para os ambientes de maior permanência das moradias A e B (sala e quartos 1 e 2), para as variações consideradas na etapa 2

	<b>Graus-Hora totais anuais (em % a partir do resultado da variação 1)</b>					
	Sala / Norte		Quarto 1 / Sul		Quarto 2 / Sul	
	°Ch Calor	°Ch Frio	°Ch Calor	°Ch Frio	°Ch Calor	°Ch Frio
<b>Tipologia A</b>						
Varição 1 <i>com caixilhos, venezianas e beirais</i>	492	1003,9	381,7	1248,3	430,9	1239,3
Varição 2 <i>idem 1, mas sem caixilhos</i>	+2,7%	-2,1%	+0,6%	-0,4%	+0,6%	-0,5%
Varição 3 <i>idem 1, mas sem venezianas</i>	+3,2%	-1,3%	+13,3%	-2,6%	+13,7%	-2,7%
Varição 4 <i>idem 1, mas sem beirais</i>	+9,2%	-0,2%	+4,7%	+0,5%	+4,2%	+0,5%
Varição 5 <i>sem caixilhos, venezianas e beirais</i>	+16,6%	-3,7%	+20,0%	-2,8%	+19,9%	-2,9%
	Sala / Oeste Unidade D		Quarto 1 / Oeste Unidade D		Quarto 2 / Oeste Unidade D	
<b>Tipologia B</b>	°Ch Calor	°Ch Frio	°Ch Calor	°Ch Frio	°Ch Calor	°Ch Frio
Varição 1 <i>com caixilhos e com venezianas</i>	1401,7	1606,8	1144,2	1851,7	1055	2145,8
Varição 2 <i>sem caixilhos, mas com venezianas</i>	+3,2%	-1,7%	+1,5%	-0,9%	+1,3%	-0,9%
Varição 3 <i>com caixilhos, mas sem venezianas</i>	+8,6%	-4,7%	+20,4%	-7,1%	+21,2%	-7,1%
Varição 4 - Não se aplica	-	-	-	-	-	-
Varição 5 <i>sem caixilhos e sem venezianas</i>	+12,0%	-6,3%	+22,3%	-8,1%	+22,9%	-8,0%
<i>Notas</i>						
A variação 4 não se aplica à tipologia B, que não apresenta beirais						

Os parâmetros que apresentam uma diferença maior que 5% (limite estabelecido na Metodologia) em relação à variação 1, em ao menos um dos ambientes, são as venezianas e os beirais. Para a tipologia A, a diferença máxima é de +13,7% para os graus-hora de calor no quarto 2, quando este é simulado sem a veneziana. Quando se retira o beiral, chega-se a +9,2% de diferença, para os graus-hora de calor na sala (tipologia A). Já os caixilhos, segundo o critério adotado, chegaram à diferença máxima de +2,7%, podendo ser dispensados da modelagem. Quando se retira ambos (venezianas e beirais) a diferença chega a +20% (tipologia A). Para a habitação B, os resultados são muito similares, indicando novamente que o elemento de maior impacto (diferença maior que 5% em ao menos um dos ambientes) é a veneziana (para a tipologia B, não foi avaliado o impacto do beiral, por este não ser considerado no projeto).

Já para os dias típicos (método da ABNT NBR 15575), os resultados são indicados na Tabela 9. Da mesma forma observada para avaliação da temperatura do solo, não há diferenças significativas como as observadas para os graus-hora, e o nível de desempenho não é alterado. Conforme já citado no item 3.1, novamente vê-se a melhor representatividade da simulação anual horária.

**Tabela 9.** Avaliação do desempenho térmico segundo a ABNT NBR 15575 para as moradias A e B, para as variações consideradas na etapa 2

<b>Dia Típico</b>				
<b>Tipologia A</b>	Quarto 1 / Verão Oeste		Quarto 2 / Inverno Sul	
	$\Delta T$	<b>D</b>	$\Delta T$	<b>D</b>
Varição 1 <i>com caixilhos, venezianas e beirais</i>	+1.5	N	+4.1	M
Varição 2 <i>idem 1, mas sem caixilhos</i>	+1.5	N	+4.2	M
Varição 3 <i>idem 1, mas sem venezianas</i>	+1.5	N	+4.2	M
Varição 4 <i>idem 1, mas sem beirais</i>	+1.6	N	+4.1	M
Varição 5 <i>sem caixilhos, venezianas e beirais</i>	+1.6	N	+4.2	M
<b>Tipologia B</b>	Quarto 1 / Verão Oeste, Unidade D		Quarto 2 / Inverno Sul, Unidade A	
	$\Delta T$	<b>D</b>	$\Delta T$	<b>D</b>
Varição 1 <i>com caixilhos e com venezianas</i>	+2.6	N	+4.0	M
Varição 2 <i>sem caixilhos, mas com venezianas</i>	+2.7	N	+4.0	M
Varição 3 <i>com caixilhos, mas sem venezianas</i>	+2.9	N	+4.1	M
Varição 4 - Não se aplica	-		-	
Varição 5 <i>sem caixilhos e sem venezianas</i>	+3.0	N	+4.1	M
<i>Notas</i>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\Delta T</math> = para o Verão = <math>(T_i, \text{máx} - T_e, \text{máx})</math> / para o Inverno = <math>(T_i, \text{mín} - T_e, \text{mín})</math></li> <li>• <b>D</b> = Desempenho, segundo classificação da ABNT NBR 15575-2013, sendo: <b>M</b>= Mínimo, <b>I</b> = Intermediário, <b>S</b>= Superior. Para fins deste estudo, adotou-se ainda uma quarta especificação de nível <b>N</b> = Não Atende</li> </ul>				

Nesta etapa conclui-se que os caixilhos podem ser dispensados da modelagem de habitações sociais em programas computacionais, por apresentarem um impacto mínimo. Já quanto às venezianas e beirais, se previstos em projeto, a simplificação do modelo deve ser feita de forma consciente pelo especialista, considerando as necessidades específicas de cada caso a ser avaliado.

### 3.3 INFLUÊNCIA DAS MEDIDAS DAS SUPERFÍCIES

No terceiro teste, as habitações A e B foram modeladas de acordo com o projeto original (com caixilhos, venezianas e se aplicável, beirais), considerando duas variações para as dimensões da geometria: o uso das medidas externas ou internas, conforme explicado na Metodologia.

O impacto dessas variações na avaliação do desconforto pelo método dos graus-hora é apresentado na Tabela 10. Nota-se que a diferença relativa é maior que 5% (e, no entanto, bem próximo a esse valor), somente no caso dos graus-hora de calor da sala da habitação A (+5,7%).

**Tabela 10.** Graus-hora (°C.h) devido ao calor e ao frio anuais relativos, para os ambientes de maior permanência das moradias A e B (sala e quartos 1 e 2), para as variações consideradas na etapa 3

	<b>Graus-Hora totais anuais (em % a partir do resultado da variação 1)</b>					
	Sala / Norte		Quarto 1 / Sul		Quarto 2 / Sul	
Tipologia A	°Ch Calor	°Ch Frio	°Ch Calor	°Ch Frio	°Ch Calor	°Ch Frio
Variação 1 Medidas externas	492	1003,9	381,7	1248,3	430,9	1239,3
Variação 2 Medidas internas	+5,7%	-0,3%	+4,2%	+1,1%	+4,5%	+0,8%
	Sala / Oeste Unidade D		Quarto 1 / Oeste Unidade D		Quarto 2 / Oeste Unidade D	
Tipologia B	°Ch Calor	°Ch Frio	°Ch Calor	°Ch Frio	°Ch Calor	°Ch Frio
Variação 1 Medidas externas	1401,7	1606,8	1144,2	1851,7	1055	2145,8
Variação 2 Medidas internas	-2,8%	-2,8%	+0,8%	-1,1%	+1,5%	-1,3%

De forma similar, a alteração das medidas da geometria não causou impacto considerável nas temperaturas máximas e mínimas dos dias típicos, ocasionando um aumento ou redução nesses valores de apenas 0,1 °C (ver Tabela 11). Desta forma, considerou-se que este não é um parâmetro de significativa influência na modelagem.

**Tabela 11.** Avaliação do desempenho térmico segundo a ABNT NBR 15575 para as moradias A e B, para as variações consideradas na etapa 3

<b>Dia Típico</b>				
Tipologia A	Quarto 1 / Verão Oeste		Quarto 2 / Inverno Sul	
	$\Delta T$	D	$\Delta T$	D
Variação 1 Medidas externas	+1.5	N	+4.1	M
Variação 2 Medidas internas	+1.6	N	+4.2	M
Tipologia B	Quarto 1 / Verão Oeste, Unidade D		Quarto 2 / Inverno Sul, Unidade A	
	$\Delta T$	D	$\Delta T$	D
Variação 1 Medidas externas	+2.6	N	+4.0	M
Variação 2 Medidas internas	+2.7	N	+3.9	M
<i>Notas</i>				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\Delta T</math> = para o Verão = (Ti, máx - Te, máx) / para o Inverno = (Ti, mín - Te, mín)</li> <li>• D = Desempenho, segundo classificação da ABNT NBR 15575-2013, sendo: M= Mínimo, I = Intermediário, S= Superior. Para fins deste estudo, adotou-se ainda uma quarta especificação de nível N = Não Atende</li> </ul>				

## 4 CONCLUSÕES

O estudo avaliou diferentes alternativas de modelagem de habitações de interesse social no programa de simulação de desempenho térmico *EnergyPlus*. Foram simuladas duas tipologias (unifamiliar e multifamiliar), no clima de São Carlos, SP, considerando variações para: temperatura do solo, caixilhos, venezianas, beirais e dimensões das superfícies. Foram analisados os graus-hora anuais de calor ou frio obtidos (método de conforto adaptativo da

ASHRAE 55), e as temperaturas dos dias típicos de verão e inverno (método da NBR 15575).

Os resultados indicaram grande impacto da temperatura do solo na habitação unifamiliar. Em ambas as tipologias, a presença de venezianas e beirais também apresentou impacto significativo. Quanto aos caixilhos e ao uso das medidas externas ou internas das paredes para definição das superfícies, ocasionaram pouca alteração nos resultados. Por fim, verificou-se maior influência das diferentes alternativas de modelagem para as análises horárias anuais que para os dias típicos, e maior representatividade dessa forma de avaliação.

## REFERÊNCIAS

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

\_\_\_\_\_. NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ANSI/ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2010.

\_\_\_\_\_. ANSI/ASHRAE Standard 140: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. Atlanta, 2014.

CHVATAL, K. M. S. Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 119-134, out./dez. 2014. ISSN 1678-8621. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. *EnergyPlus*. Version 7.1.0.012. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2012. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/EnergyPlus/>>. Acesso em: 22 jun. 2012.

GEORGESCU, M. & MEZIC', I. Building energy modeling: A systematic approach to zoning and model reduction using Koopman Mode Analysis. In: *Energy and Buildings*, v. 86, p. 794-802, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814008913>>. Acesso em: 09 feb. 2015.

GOYAL, S. & BAROOAH, P. A method for model-reduction of non-linear thermal dynamics of multi-zone buildings. In: *Energy and Buildings*, v. 47, p. 332-340, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811006001>>. Acesso em : 09 feb. 2015.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. RTQ-C - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos. Rio de Janeiro, 2010.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. RTQ-R - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais. Rio de Janeiro, 2012.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. *EnergyPlus Input Output Reference: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*. California, May, 2012.

MORISHITA, C. & SORGATO, M. J. & VERSAGE, R. & TRIANA, M. A. & MARINOSKI, D. L. & LAMBERTS, R. Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (v.5). LabEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

RORIZ, M. Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros. ANTAC – Associação Nacional

de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. Relatório Interno, 2012. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acesso em: 12 maio 2012.

SILVA, A. S. & SORGATO, M. J. & MAZAFERRO, L. & MELO, A. P. & GHISI, E. Incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 para a avaliação do desempenho térmico de habitações. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 103-117, out./dez. 2014. ISSN 1678-8621. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

UEMOTO, K. L. & SATO, N. M. N. & JOHN, V. M. Estimating thermal performance of cool colored paints. In: Energy and Buildings, v. 42, n. 1, p. 17-22, 2010. ISSN 0378-7788. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809001546>>. Acesso em: 01 set. 2012.

WESTPHAL, F. S. Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.