

INFLUÊNCIA DE INCERTEZAS NAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DE SISTEMA CONSTRUTIVO SOBRE O DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL

Guilherme Molnar Castro (1); Maria Akutsu (2); Adriana Camargo de Brito (2); Fulvio Vittorino (2);

(1) Estagiário de física do IPT, gmolnar@ipt.br

Pesquisador(a) do IPT, akutsuma@ipt.br, adrianab@ipt.br, fulviov@ipt.br

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, Laboratório de Conforto Ambiental e Sustentabilidade, São Paulo- SP, 05508-901, Tel.: (11) 3767-4579

RESUMO

O uso de simulações computacionais para avaliação do desempenho térmico de edificações se tornou uma ferramenta comum entre projetistas e pesquisadores. Isso levou também à elaboração de normas técnicas que abrangem a questão das simulações do desempenho térmico. É possível encontrar facilmente na literatura valores típicos para propriedades físicas e térmicas de diversos materiais constituintes dos sistemas construtivos, entre eles o concreto. Nesse trabalho é estudada a influência que calor específico, da massa específica e da condutividade térmica na resposta térmica de uma habitação, considerando-se valores típicos utilizados e possíveis correlações entre esses parâmetros. Foi feita uma regressão linear para valores de condutividade térmica em função da massa específica obtidos de valores encontrados em literatura. Utilizando-se valores obtidos da regressão para condutividade em função da massa específica e valores aleatórios dentro de uma faixa típica de valores de calor específico, foram feitas 8400 simulações para determinação da incerteza nos valores da temperatura máxima do ar interno.

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

ABSTRACT

The use of computational simulations for building thermal performance evaluation has become a common tool used by designers and researchers. This has been used for elaboration of standards that covers the issue of thermal performance simulation. It is easy to find in the literature typical values for physical and thermal properties of many materials used in construction, among them the concrete. In this paper, we study the influence of the specific heat, the specific mass and the thermal conductivity in the thermal performance of a dwelling, considering typical values used and possible correlations between parameters. It was made a linear regression of the thermal conductivity and the specific mass. Then, using values obtained from this linear regression and random values within a range of typical values of the specific heat, it was performed 8400 simulations in order to obtain the uncertainty of the maximum value of the inside air temperature.

Keywords: uncertainty, computational simulation, thermal performance.

1. INTRODUÇÃO

Os valores das propriedades térmicas de materiais são, em geral, um ponto de dúvida no momento de se inserir dados em programas de simulação do desempenho térmico de edificações. Idealmente, tais propriedades deveriam ser determinadas para cada empreendimento a ser avaliado, o que proporcionaria maior precisão nos resultados.

Quando se trata de materiais utilizados na construção civil, de longa data, é esperado que se encontrem valores tabelados com alta confiabilidade, como por exemplo, aqueles que podem ser obtidos no Anexo B.2 da norma NBR 15220 parte 2 (ABNT, 2008). Isso, entretanto, não é a realidade.

Mesmo quando se tratam de materiais comuns como o concreto, um dos materiais mais utilizados e estudados na construção civil contemporânea, ainda se verificam, na literatura, faixas relativamente largas de valores de condutividade térmica, para uma mesma densidade. Situação similar ocorre quanto aos dados referentes ao calor específico. O próprio valor da densidade do concreto, a mais básica das suas propriedades, muitas vezes é alvo de dúvida, uma vez que se encontram valores apresentados sem maior rigor em memoriais descritivos de empreendimentos imobiliários.

Dentre todos os dados que precisam ser inseridos em programas computacionais para se efetuar a simulação da resposta térmica de edifícios, seja para avaliar seu desempenho térmico ou sua eficiência energética, as características térmicas e físicas dos materiais que constituem a envoltória são alguns dos principais fatores que podem interferir nos resultados. Isso requer a escolha adequada dos valores das propriedades dos materiais.

Todavia, quando se trata de materiais convencionais, geralmente deixa-se a cargo do avaliador escolher os valores das propriedades térmicas a serem inseridas nos programas, o que nem sempre proporciona resultados consistentes.

Nesse sentido, vários trabalhos, publicados atualmente, têm apresentado análises do efeito de incertezas em características térmicas de determinados materiais, como a condutividade térmica, por exemplo, sobre cargas térmicas de climatização de edificações expostas a diversas condições climáticas ou na eficiência de coletores solares (STRUCK e HENSEN, 2007; DOMÍNGUEZ-MUÑOZ et al., 2009). Há também métodos e ferramentas para analisar incertezas quanto a esses fatores (BIPM, 2008; LOMAS e EPEL, 1992; WIT e AUGENBROE, 2001).

Entretanto, há pouca disponibilidade de trabalhos que identifiquem o efeito de variações conjuntas nas características dos materiais que compõe a envoltória, no comportamento térmico de edificações, especialmente naquelas naturalmente ventiladas, expostas a condições climáticas predominantemente de verão, como é o caso da maior parte do território brasileiro.

Essas questões ganham grande relevância no momento presente em que a simulação computacional é utilizada em um dos métodos de avaliação do desempenho térmico de edificações habitacionais apresentado na norma NBR 15.575 (ABNT, 2013). A referida norma é utilizada também como referência para a avaliação de sistemas construtivos inovadores no âmbito do SINAT – Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (MITIDIERI, CLETO e WEBER, 2008). Quando há comprovação do desempenho adequado dos sistemas construtivos, os resultados das avaliações são utilizados como requisitos para a aprovação do financiamento da construção de milhares de habitações. Isso requer que os resultados das avaliações sejam confiáveis para proporcionar edificações com o nível de desempenho esperado.

Nesse contexto, para se ter resultados consistentes das avaliações do desempenho térmico de habitações, informações sobre o efeito de incertezas nos valores das propriedades térmicas de materiais na sua resposta térmica são fundamentais. Neste trabalho é analisada a influência de incertezas conjuntas no calor específico, na massa específica e na condutividade térmica da envoltória de uma habitação de interesse social sobre a sua resposta térmica.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo determinar a influência combinada das incertezas em valores do calor específico, da massa específica e da condutividade térmica do concreto utilizado na envoltória de uma edificação de interesse social sobre o valor máximo diário da temperatura do ar interior. Também se discute o impacto de tais incertezas no resultado da avaliação do desempenho térmico da habitação.

3. MÉTODO

Foi analisada a resposta térmica da sala de uma habitação de interesse social localizada na cidade de São Paulo, que faz parte da Zona Bioclimática 3, de acordo com a norma NBR 15220 (ABNT, 2008). O comportamento térmico da edificação foi obtido por meio de simulações computacionais, conforme os procedimentos e métodos apresentados na norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

A habitação foi simulada sem fontes internas de calor, com ventilação a uma taxa de 1 Ren/h (Renovação do volume de ar do ambiente por hora), sem dispositivos de sombreamento de aberturas.

Foram consideradas as condições climáticas de um dia típico de verão da cidade de São Paulo. Os dados geográficos e os dados referentes às condições climáticas da cidade de São Paulo são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1– Dados geográficos da cidade de São Paulo

UF	Zona bioclimática	Cidade	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
SP	3	São Paulo	23,5 S	46,62 W	792

Fonte: ABNT NBR 15575 (2013)

Tabela 2 - Dados climáticos de um dia típico de verão da cidade de São Paulo

Cidade	Temperatura máxima diária (°C)	Amplitude diária de temperatura (°C)	Temperatura de bulbo úmido (°C)	Radiação solar (Wh/m ²)
São Paulo	31,9	9,2	21,3	5180

Fonte: ABNT NBR 15575 (2013)

Para o período de verão, a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) apresenta critérios para a avaliação do desempenho térmico de habitações que levam em conta o valor da temperatura máxima diária do ar interior de ambientes de permanência prolongada, como sala e dormitórios, e o valor máximo diário da temperatura do ar exterior. Caso o valor máximo da temperatura do ar interior seja menor ou igual ao valor máximo da temperatura do ar exterior, é atendido o critério referente ao nível mínimo de desempenho térmico. Para a cidade de São Paulo, isso significa que a temperatura máxima do ar no interior dos recintos precisa ser menor ou igual a 31,9 °C, para que seja atendido o nível mínimo de desempenho térmico.

3.1 O Projeto

As características das vedações verticais e horizontais da habitação de interesse social, utilizadas como referência no trabalho, são apresentadas na Tabela 3. O projeto arquitetônico, obtido da Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU, 1997) é indicado nas Figuras 1 e 2, respectivamente uma planta e um corte da habitação.

Tipo de vedação	Descrição
Paredes	Painéis monolíticos de concreto maciço, com espessura de 10 cm, pintados externamente em cor clara, com absorvância à radiação solar igual a 0,3.
Cobertura	Laje de concreto maciço, com espessura de 10 cm de sob telhado em telhas cerâmicas, com absorvância à radiação solar das telhas igual a 0,7.
Piso	Piso da edificação de concreto (radier), com 10 cm de espessura, em contato direto com o solo.

Tabela 3 - Características das vedações da edificação.

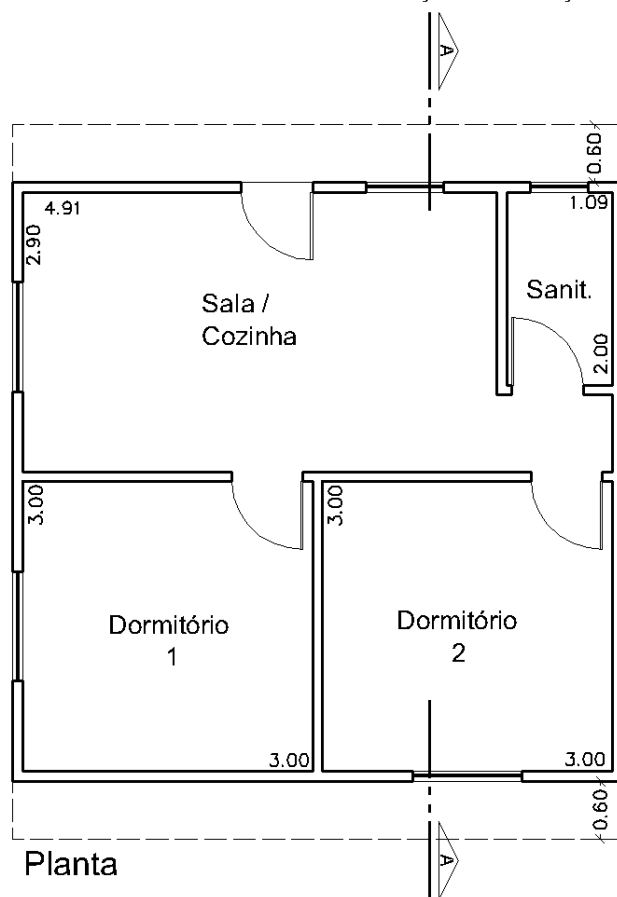


Figura 1 - Planta de habitação de interesse social analisada, sem escala (CDHU, 1997).

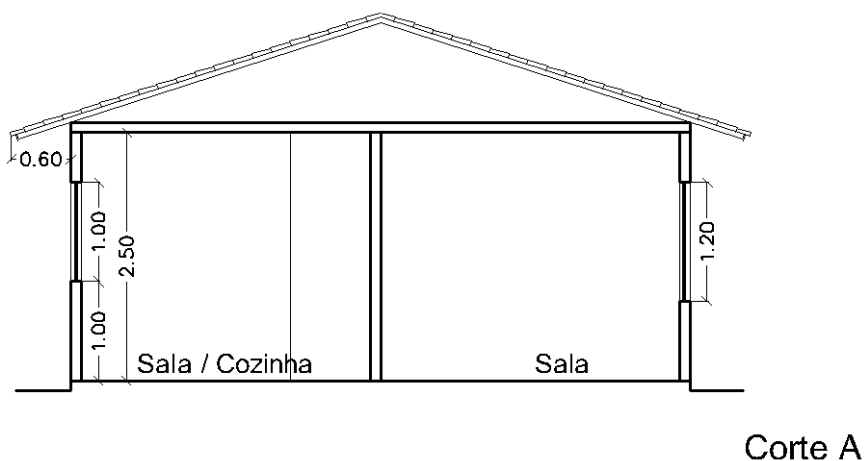


Figura 2 - Corte de habitação de interesse social analisada, sem escala (CDHU, 1997).

3.2 Propriedades Térmicas dos materiais

Após análise das propriedades térmicas do concreto, que estão disponíveis em literatura, não se encontrou para o calor específico, correlação com outras características ou propriedades do material, mas foram identificados valores variando entre 840 J/(kg.K) a 1.000 J/(kg.K). Também, a partir da análise de várias fontes bibliográficas é possível observar uma correlação positiva entre massa específica e a condutividade

térmica do concreto, como pode ser visto na Figura 3. A partir dos dados brutos, que geraram a reta de regressão, determinou-se um intervalo de confiança com 95% de probabilidade de se conter a condutividade térmica para cada valor de densidade.

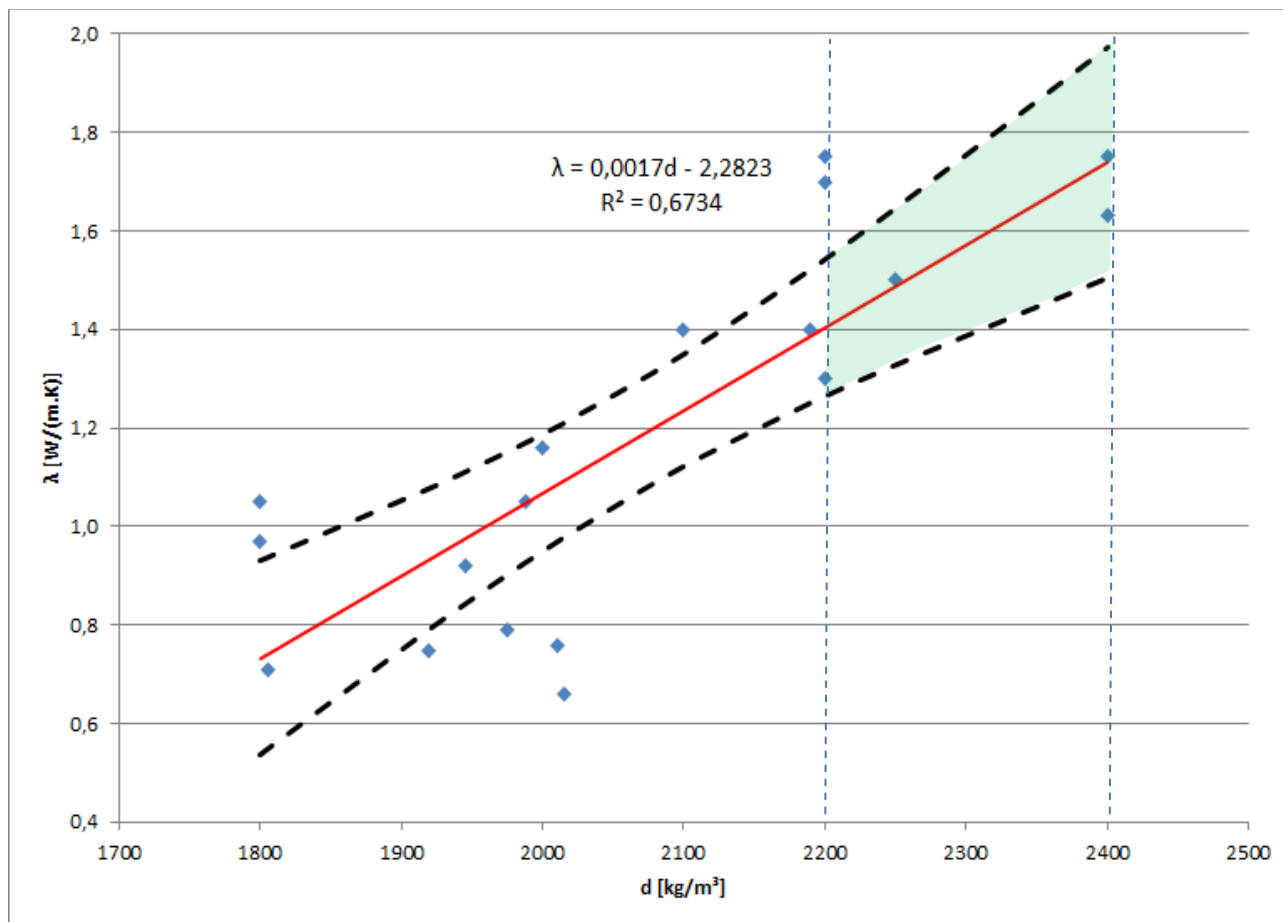


Figura 3 - Regressão linear para valores de condutividade térmica em função da massa específica do concreto

3.3 Simulações Paramétricas

As simulações paramétricas foram realizadas com a utilização do software jEPlus (ZHANG, 2009), que aciona o programa EnergyPlus e, além disso, gera valores de parâmetros com distribuições diversas, entre elas a uniforme e normal, utilizada nesse trabalho. O programa computacional EnergyPlus determina o comportamento térmico de edificações considerando condições dinâmicas de exposição ao clima, sendo uma poderosa ferramenta para análise do desempenho térmico e energético de edificações, já validada por diversos autores e recomendada pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013) para a realização de simulações computacionais de edificações habitacionais.

Para a análise de sensibilidade, foram utilizados valores de massa específica entre 2200 kg/m³ e 2400 kg/m³ conforme valores estabelecidos na norma NBR 15220 (ABNT, 2008), para o concreto convencional, em intervalos de 10 em 10 kg/m³ e, para cada um, foram gerados 20 valores de condutividade térmica dentro dos limites superior e inferior representados na Figura 3, usando distribuição de probabilidade “t”. Esses valores foram combinados, aleatoriamente com 20 valores, também gerados aleatoriamente, de calor específico com distribuição uniforme entre 840 J/(kg.K) e 1000 J/(kg.K). Isso resultou em 21 séries de valores de densidade em um total de 8400 simulações.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Regressão linear

O coeficiente de correlação de Pearson da reta ajustada na Figura 3 ($\lambda = -2,2823 + 0,0017d$, sendo λ a condutividade térmica e d a massa específica) é de 0,67, o que é um resultado pobre, demonstrando que mesmo utilizando-se um ajuste resultante de várias fontes bibliográficas, ainda se tem muitos resultados fora dos limites com 95% de confiança.

4.2 Simulações

Das 21 séries de simulações foram calculados os valores médios das temperaturas máximas do ar interno da sala, representados no gráfico da Figura 4.

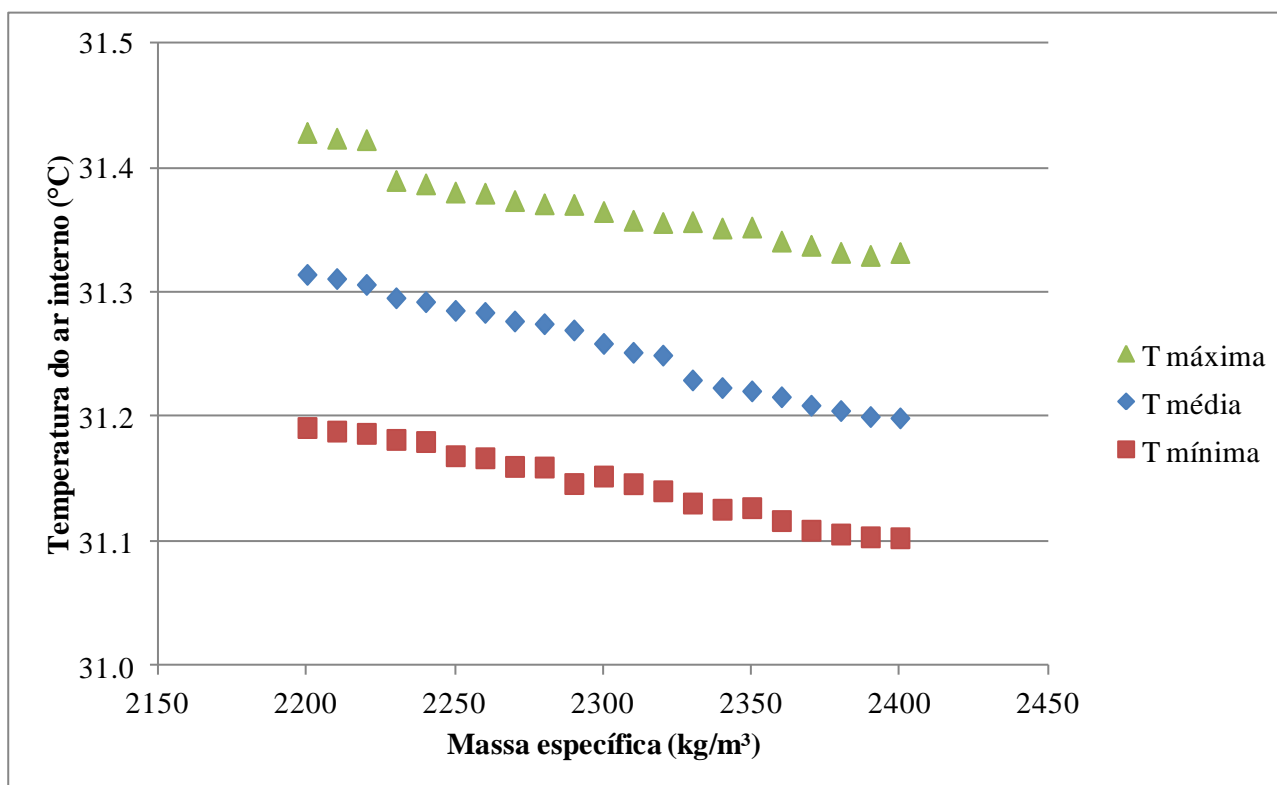


Figura 4 - Valores médio, mínimo e máximo para cada série de simulações da temperatura máxima do ar interno da sala

Como pode ser visto na Figura 4, para um mesmo valor de massa específica do concreto, a variabilidade da condutividade térmica associada com a aleatoriedade do calor específico pode ocasionar em diferenças da ordem de 0,2°C na temperatura máxima do ar interno da habitação. Nota-se ainda que em todas as situações analisadas, com massa específica do concreto de 2200 a 2400 kg/m³, a temperatura máxima do ar interior é menor do que 31,9 °C, indicando que a habitação atende os critérios referentes ao nível mínimo de desempenho térmico de acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013).

Neste caso, as incertezas nos valores das propriedades térmicas do concreto não foram significativas o suficiente para alterar o nível de desempenho térmico obtido pela habitação. Outras variáveis tiveram papel mais determinante da resposta térmica do recinto.

4.3 Comparações com resultados obtidos por outros autores

Os resultados obtidos por outros autores como, por exemplo, Struck e Hensen (2007), indicam um efeito significativo de variações na condutividade térmica da envoltória na resposta térmica de edificações

climatizadas, tendo como referência a carga térmica de climatização de recintos. Nesse caso, a carga térmica de climatização está diretamente relacionada à resistência térmica da envoltória, da qual a condutividade térmica dos materiais é fator determinante.

Em contrapartida, no presente trabalho é considerada uma habitação não climatizada, exposta a condições climáticas de local com amplitude diária da temperatura do ar exterior da ordem de 10 °C. Nessa situação a inércia térmica tem papel importante no desempenho térmico de recintos (AKUTSU, 1998; BARRIOS et al., 2012). A inércia térmica de um ambiente depende, principalmente, de fatores como a capacidade térmica de componentes construtivos, que está relacionada à massa específica e ao calor específico dos materiais (GREGORY et al., 2008; YANG E YUGUO, 2008; OROSA e OLIVEIRA, 2012). Dessa forma, embora tenham sido realizadas grandes variações no valor da condutividade térmica do concreto, como esse não é o principal aspecto que afeta o desempenho térmico de recintos, como o analisado, houve variações pouco significativas no valor da temperatura máxima do ar interior, diferentemente do que acontece nos recintos climatizados avaliados por Struck e Hensen (2007). Por outro lado, a respeito do aspecto que, potencialmente, poderia apresentar maior efeito na resposta térmica da edificação, por ser relacionado à capacidade térmica dos componentes, ou seja, a massa específica do concreto, foi considerado um intervalo relativamente estreito de valores dessa grandeza, o que também afetou de modo pouco significativo o valor da temperatura máxima do ar interior.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que há uma grande variabilidade nos valores tabelados de condutividade térmica, para uma mesma densidade de concreto. Apesar disso, o impacto das incertezas sobre os valores finais da temperatura máxima diária do ar interior de um recinto é pequeno, de no máximo 0,3°C, para o projeto de habitação de interesse social, nas condições analisadas.

Essa pequena variabilidade demonstra que uma grande variação de condutividade térmica (0,9 a 1,95 W/(m.K)), dentro de uma faixa estreita de variação da densidade (2200 a 2400 kg/m³), tem efeito pouco significativo, quando se trata de edifícios não climatizados, em locais com amplitude térmica diária grande ($\geq 10^\circ\text{C}$) situação em que a inércia térmica é determinante.

Ressalta-se ainda que o uso de cores claras também contribui para esses resultados. Como continuidade dos trabalhos, essas simulações estão sendo repetidas incluindo também maiores intervalos de densidade do concreto, englobando concretos leves, considerando-se outras cores de paredes, condições climáticas e projetos de edificação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. **NBR-15575**: Edifícios Habitacionais de até Cinco Pavimentos – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- AKUTSU, M. **Método para avaliação do desempenho térmico de edificações no Brasil**. p. 150 Tese de doutorado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- BARRIOS, G. et al. Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. **Energy and Buildings**, 120-127,2012.
- BIPM, ISO. **Evaluation of measurement data** — Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty in measurement — Propagation of distributions using a Monte Carlo method, 2008.
- CDHU - Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano. **Caderno de Tipologias**. Disponível em: <http://portalshcdhu.cdhu.sp.gov.br>. Acesso em 12/08/2010.
- DOE – U. S. Department Of Energy. **Building Energy Software Tools Directory**. Disponível em: < <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 16/06/2015.
- _____. **Getting Started with EnergyPlus Basic Concepts Manual** - Essential Information You Need about Running EnergyPlus. Disponível em: < <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 16/06/2015.
- DOMÍNGUEZ-MUÑOZ, F.; ANDERSON, B.; CEJUDO-LÓPEZ, J. M.; CARRILLO-ANDRÉS, A. Uncertainty in the Thermal Conductivity of Insulation Materials. **Building Simulation**. 1008-1013. 2009.
- GREGORY, K; MOGHTADERI, B.;SUGO, H.; PAGE, A.. Effect of thermal mass on the thermal performance of various Australian residential constructions systems. **Energy and Buildings**. 40, 2008. 459-465..
- LOMAS, K. J.; EPEL, H. (1992). Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. **Energy and Buildings**, 19, 21–44.

- MITIDIERI F°, C.V.; CLETO, F.R. ;WEBER, M.S. . Implantação e consolidação do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas de Produtos Inovadores (SINAT). In: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2008. Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2008.
- OROSA, J. A.; OLIVEIRA, A. C. A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment. *Journal of Renewable Energy*. 37. 89-96. 2012.
- STRUCK, C.; HENSEN, J. On Supporting Design Decisions in Conceptual Design Addressing Specification Uncertainties Using Performance Simulation. **Building Simulation**. 1434–1439, 2007.
- WIT, S. D.; AUGENBROE, G. Uncertainty Analysis of Building Design Evaluations. **Building Simulation**. 319–326, 2001
- YANG, L.; YUGUO, L. Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation. **Energy and Buildings**. 2052–2058. 2008.
- ZHANG, Y. **Parallel EnergyPlus and the development of a parametric analysis tool**. (2009).