ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Influência da umidade em modelos numéricos de transferência de calor para edificações: um estudo de caso

Influence of moisture on numerical heat transfer models for buildings: a case study

Mariana Moccellin de Farias
Universidade do Estado de Santa Catarina | Joinville | Brasil | mariana.mdf@edu.udesc.br
Fernanda Perazzolo Disconzi
Universidade do Estado de Santa Catarina | Joinville | Brasil | fernanda.disconzi@udesc.br
Fabrício Torres Borghi
Universidade Federal do Paraná | Curitiba | Brasil | fabricio.tb@gmail.com

Resumo

A mudança climática evidencia a inadequação das edificações em relação ao clima local. Diversos estudos sobre o desempenho termoenergético já foram desenvolvidos, mas ainda se percebe uma lacuna de estudo da influência da umidade no conforto térmico dentro das edificações. Nesse contexto, uma investigação computacional foi desenvolvida, considerando duas alternativas de modelagem numérica, *Conduction Transfer Function* (CFT) e *Combined Heat And Moisture Transfer Model* (HAMT), no programa *EnergyPlus*. Para complementar o estudo, foram realizados testes experimentais com o objetivo de calibrar e validar os resultados numéricos. O modelo CTF demonstrou maior amplitude térmica interna e divergências em relação aos valores medidos experimentalmente, sugerindo uma superestimação da temperatura interna. Por outro lado, os modelos HAMT, apresentaram resultados mais próximos às medições experimentais, destacando a importância da consideração da umidade na modelagem computacional.

Palavras-chave: Desempenho térmico. Umidade. Simulação computacional. Energy Plus

Abstract

Climate change highlights the inadequacy of buildings in relation to local climate. Several studies on thermo-energy performance have been conducted, but there is still a gap in studying the influence of moisture on thermal comfort within buildings. In this context, a computational investigation was developed, considering two numerical modeling alternatives, Conduction Transfer Function (CTF) and Combined Heat And Moisture Transfer Model (HAMT), in the EnergyPlus program. To complement the study, experimental tests were conducted aiming to calibrate and validate the numerical results. The CTF model presented a greater internal thermal amplitude and divergences in relation to the experimentally measured values, indicating an overestimation of the internal temperature. On the other hand, the HAMT models obtained

FARIAS, M. M.; DISCONZI, F. P.; BORGHI, F. T. Influência da umidade em modelos numéricos de transferência de calor: um estudo de caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

results closer to the experimental measurements, highlighting the importance of considering moisture in computational modeling.

Keywords: Thermal performance. Moisture. Computational simulation. Energy Plus

INTRODUÇÃO

A sociedade atual necessita de um elevado consumo energético para manter seu nível de vida e conforto. No Brasil, o setor residencial representa cerca de 30% do consumo de energia final [1]. A projeção global para esse segmento indica que seu consumo aumentará entre 1,0% e 1,6% ao ano entre 2022 e 2050 [2]. No território nacional, o incremento no consumo de energia pelas edificações residenciais foi de 2,0% de 2021 para 2022 [1]. Em relação à demanda por conforto térmico, estima-se que o consumo de energia elétrica devido à utilização de condicionadores de ar pelas residências brasileiras tenha triplicado entre os anos de 2005 e 2017 [3]. Esse aumento é devido à falta de planejamento urbano, que resulta em ilhas de calor urbano e outros impactos ambientais [4], e pela elaboração de projetos arquitetônicos que desconsideram a adequação da construção ao clima local [5]. Ainda, o aquecimento global e o avanço das mudanças climáticas, principalmente, a elevação das temperaturas, se destacam de forma global, até mesmo em regiões que antes não eram consideradas quentes. Nesse contexto, é necessário melhorar a performance térmica das edificações para reduzir o consumo de energia e garantir condições mais satisfatórias de conforto.

Ferramentas de simulação computacional para avaliação do desempenho de construções são amplamente utilizadas. De maneira geral, elas consideram condições de contorno dinâmicas e se baseiam em métodos numéricos com o intuito de fornecer soluções aproximadas para um modelo real complexo. O *software EnergyPlus* é uma dessas ferramentas de simulação, globalmente conhecido e aplicado para a avaliação do comportamento térmico e energético de edifícios [6]. Em geral, utiliza-se o modelo numérico padrão desse *software*, o *Conduction Transfer Function Model* (CTF), que calcula a condução de calor transiente através de uma camada de material homogênea com superfícies de propriedades térmicas constantes. No entanto, esse modelo não considera os efeitos de transporte e armazenamento de umidade, o que pode causar uma lacuna nos resultados de desempenho da edificação. Os modelos que consideram a transferência de calor e umidade simultaneamente são chamados de modelos higrotérmicos. Há dois modelos higrotérmicos disponíveis no *EnergyPlus*, sendo eles o *Effective Moisture Penetration Depth Model* (EMPD) e *Combined Heat and Moisture Transfer Model* (HAMT) [6]. Esse último demanda maior tempo de simulação para as análises, porém, é esperado ser mais realista fisicamente na modelagem de transporte e armazenamento de umidade do que o modelo EMPD [7]. Em [7], os resultados obtidos pela simulação higrotérmica com o modelo HAMT foram comparados com dados reais medidos, constatando-se que o erro relativo médio foi inferior a 2,5%. Há outras pesquisas que comprovaram maior tempo de simulação [[8],[9],[10],[11]]. [8] constatou que o tempo de simulação do modelo HAMT é cerca de cem vezes maior que o tempo de simulação do modelo padrão CTF. Em [9], o tempo computacional requerido pelo modelo HAMT foi 10^2-10^4 maior que outros modelos simplificados.

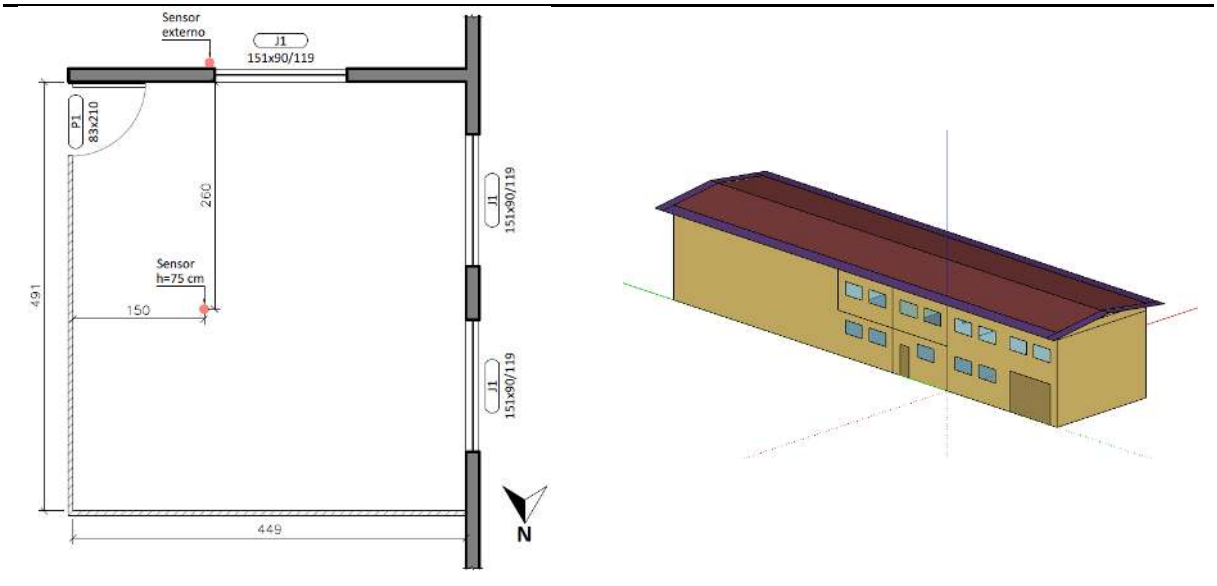
Estudos que levam em consideração os efeitos da umidade no desempenho térmico de edificações estão aumentando, porém, ainda são escassos em comparação à abordagem que considera apenas a condução de calor nos modelos numéricos. Nesse contexto, a presente pesquisa investigou duas alternativas de modelagem numérica, *Conduction Transfer Function* (CFT) e *Combined Heat And Moisture Finite Element* (HAMT), no programa *EnergyPlus*, para avaliar as condições de temperatura e umidade em uma sala de um edifício universitário. Para complementar o estudo, foram realizados testes experimentais com o objetivo de calibrar e validar os resultados numéricos.

MÉTODO

MODELO DA EDIFICAÇÃO

A edificação analisada nas simulações computacionais e nos testes experimentais é uma sala (Figura 1) de um edifício da Universidade do Estado de Santa Catarina, localizado na cidade brasileira de Joinville (latitude de -26.224°S e longitude de -48.797°O). O clima predominante na região é do tipo mesotérmico, úmido e sem estação seca, de acordo com a classificação de Köppen, e a umidade relativa média anual do ar é de 76,04% [12]. No contexto climático nacional, a cidade está inserida na zona bioclimática 5 (ZB5) [13]. A sala possui uma área total de 22,05 m² e pé-direito de 2,88 m, com duas janelas voltadas para o exterior da edificação e uma janela voltada para um átrio na parte interna do edifício.

Figura 1: Planta esquemática da sala (à direita) e modelo tridimensional do edifício (à esquerda)



Nota: dimensões da planta esquemática em centímetros. Fonte: os autores.

MODELO NUMÉRICO E CONDIÇÕES DE CONTORNO

As simulações computacionais foram realizadas no s*oftware EnergyPlus* V23-1-0. Foram utilizados os modelos numéricos *Conduction Transfer Function Model* (CTF), que

é o modelo padrão do programa, e *Combined Heat And Moisture Finite Element* (HAMT), que consiste em um algoritmo de solução de transferência de calor e umidade combinado, unidimensional, de elementos finitos, que simula simultaneamente os fluxos de calor e umidade em superfícies dos ambientes interno e externo. Além de simular os efeitos de atraso higrotérmico, o HAMT também é capaz de fornecer perfis de temperatura e umidade através das paredes e ajudar a identificar superfícies com alta umidade superficial [14].

Definiu-se a utilização dos dados anuais a partir do arquivo climático para a cidade de Itapoá (latitude de -26.120°S e longitude de -48.620°O) [15]. Isso se deu após uma análise comparativa entre os valores de temperatura e umidade relativa dos arquivos climáticos de Joinville e Itapoá e os valores medidos experimentalmente, mostrando que o arquivo climático de Itapoá é mais adequado para a condução das simulações (Figuras 2 e 3).

O número de *timesteps* utilizado nas simulações foi igual a 20 por hora, que representa o número mínimo de iterações recomendado para o modelo HAMT [14]. O intervalo de iteração diz respeito ao número de vezes em que os cálculos de transferência de calor são realizados no intervalo pré-definido de 1 hora. Sendo assim, o tamanho do *timestep* das simulações realizadas neste estudo foi de 3 min (0,05h).

Para simular a transferência de calor das superfícies horizontais em contato com o solo, considerou-se o modelo simplificado *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*, uma vez que a sala estudada se situa no 2º pavimento do edifício e, portanto, o contato com o solo não exerce influência direta sobre essa área.

As aberturas da sala foram consideradas fechadas, tanto para as simulações computacionais quanto para a medição local. As demais janelas do edifício foram mantidas abertas, então, utilizou-se o objeto *AirflowNetwork* para simular a ventilação natural. O coeficiente de descarga adotado foi o valor padrão de 0,001 e o coeficiente de pressão do vento foi calculado automaticamente pelo *software*.

Como contribuição das cargas internas, considerou-se apenas o funcionamento de dois aparelhos nobreak de 900 W cada e duas unidades centrais de processamento (CPU) de 65 W cada. Os dois monitores permaneceram desligados durante o intervalo de medição. Não foram considerados a ocupação de pessoas e o funcionamento do condicionador de ar e do sistema de iluminação.

PARÂMETROS TERMOFÍSICOS

Os parâmetros termofísicos da envoltória foram extraídos da NBR 15.220 [16] (Tabela 1). As propriedades higrotérmicas dos materiais podem variar amplamente para a mesma classe de materiais e a determinação apropriada de todas essas propriedades para um material representa um desafio técnico. Então, foram considerados os dados obtidos por [17] e pela base de dados do *software* WUFI Light 6.7 [18] como parâmetros higrotérmicos dos materiais aplicados na envoltória do objeto de estudo dessa pesquisa. Para a simulação inicial, o teor de umidade inicial considerado para todos os materiais foi 0,2 kg/kg, representando o valor padrão indicado pelo *EnergyPlus*. Posteriormente, foram considerados os valores obtidos pela interpolação

dos dados referentes às curvas de teor de umidade volumétrica (massa de água por volume de material), para cada material, obtida pelo WUFI, e considerando a umidade relativa correspondente ao início do período de simulação (88,8%). A partir das densidades dos materiais da edificação, apresentados na Tabela 1, foram calculados os teores de umidade mássico para cada material (massa de água por massa de material), conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 1: Parâmetros termofísicos dos materiais da envoltória

Material	Espessura [m]	Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m³]	Calor específico [J/kg.K]	Absortividade térmica	Absortividade solar
Reboco	0,02	1,15	1800	1000	0,3	0,3
Bloco cerâmico	0,09	0,7	1000	920	0,3	0,3
Piso cerâmico	0,0127	0,9	1600	920	0,3	0,3
Concreto	0,1	1,75	2200	1000	0,6	0,6
Placa de gesso	0,0125	0,35	750	840	0,2	0,2
Membrana PVC	0,00152	0,20	1500	1500	0,2	0,2
Divisória MDF	0,025	0,12	550	2300	0,7	0,7
Telha fibrocimento	0,006	0,95	1800	840	0,65	0,65

Fonte: adaptado de [6, 7, 8].

As paredes externas da sala são compostas por reboco e bloco cerâmico e as divisórias internas são feitas de painéis de fibras de madeira de média densidade (MDF). A sala possui forro composto por placa de gesso revestida com membrana de policloreto de vinila (PVC) e o telhado do prédio onde a sala está localizada é composto por telhas de fibrocimento.

Tabela 2: Teor inicial de água dos materiais da envoltória para umidade relativa de 88,8%

Material	Reboco	Bloco cerâmico	Piso cerâmico	Concreto	Placa de gesso	Membrana PVC	Div. MDF	Telha fibrocimento
Teor inicial de umidade [kg/kg]	0,0683	0,0248	0,00172	0,0566	0,0209	0,0000026	0,1513	0,1342

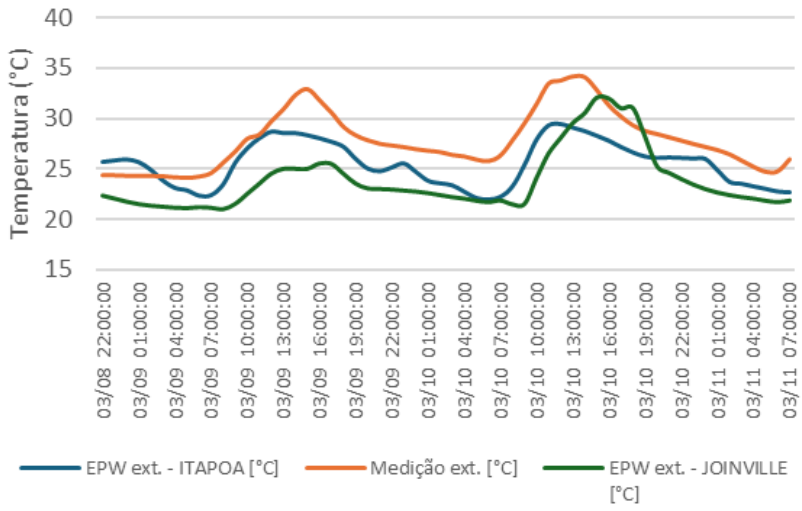
Fonte: elaborado pelos autores.

VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Para calibrar e validar os resultados numéricos, foram realizadas medições de temperatura e umidade da sala estudada. Foi utilizado um par de dataloggers com sensores de temperatura e umidade, sendo que um ficou na parte externa à edificação e o outro, posicionado a 75cm do piso da sala, conforme mostrado na Figura 1.

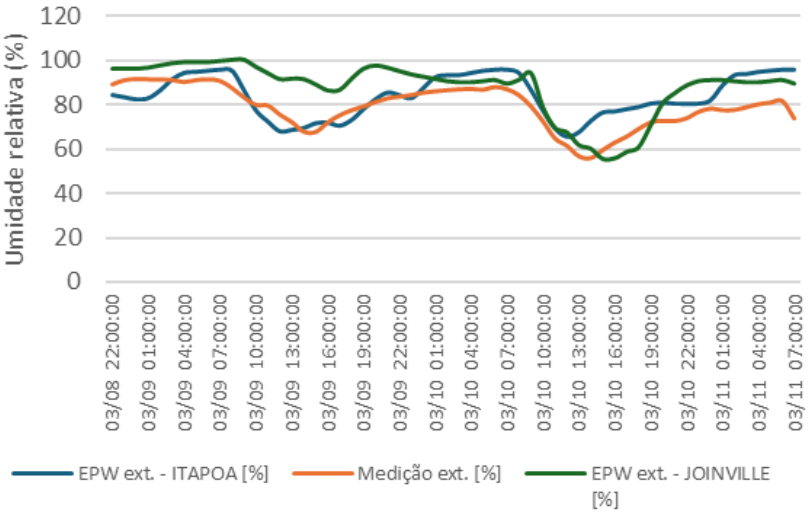
A posição do sensor externo se justificou pela configuração do prédio, que é um galpão com vãos abertos entre as paredes externas e o telhado. Essa posição permitiu a proteção do sensor a fim de não gerar interferências causadas pelo excesso de raios solares.

Figura 2: Temperatura externa de bulbo seco - medição local e arquivos climáticos



Fonte: os autores.

Figura 3: Umidade relativa - medição local e arquivos climáticos



Fonte: os autores.

Uma medição inicial dos índices de temperatura de bulbo seco e umidade relativa foi feita dentro de um intervalo de 57h, das 22h do dia 08/03/2024 até 7h do dia 11/03/2024. Os dados de temperatura e umidade foram registrados a cada minuto. A precisão do equipamento é de ±1°C para valores de temperatura e ±3,5% para valores de umidade relativa.

Durante a medição, a sala permaneceu com portas e janelas fechadas e sem ocupação de pessoas. O condicionador de ar, sistema de iluminação e demais equipamentos

ficaram desligados, com exceção dos dois nobreaks e das duas CPUs, que foram mantidos ligados.

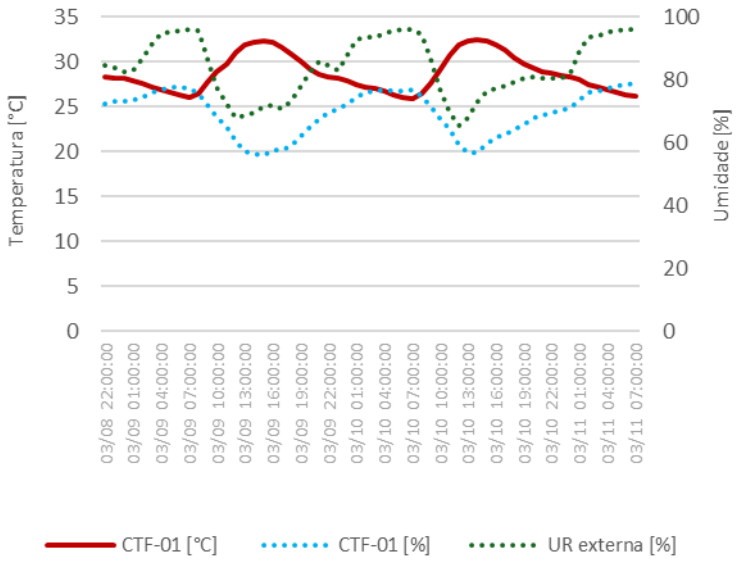
RESULTADOS E DISCUSSÃO

MODELOS NUMÉRICOS

Para a análise do ambiente interno, foram utilizados os seguintes dados de saída do *software*: temperatura média e umidade relativa do ar. Para a comparação com os valores medidos de temperatura externa, utilizou-se o dado de saída de temperatura de bulbo seco do ar externo. Todos os dados de saída foram reportados com uma frequência horária.

Os gráficos abaixo relacionam os valores de temperatura e umidade internas para a sala, obtidos pelas simulações computacionais, com os valores de umidade relativa externa referente ao arquivo climático utilizado. A Figura 4 refere-se ao modelo numérico padrão CTF, onde a curva vermelha representa a temperatura interna e a curva azul representa a umidade relativa interna, enquanto a curva verde mostra a umidade externa.

Figura 4: Temperatura e umidade internas, modelo CTF



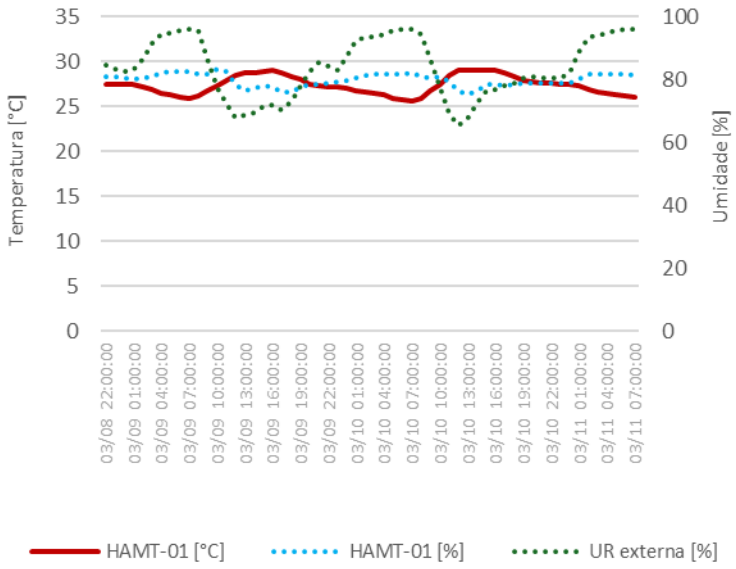
Fonte: os autores.

A Figura 5 mostra essas mesmas curvas, porém, com a utilização do modelo HAMT, que foi simulado duas vezes. Na primeira simulação com o modelo HAMT, considerou-se inicialmente o valor padrão de teor inicial de água para todos os materiais. A segunda simulação do modelo HAMT considerou os valores de teor inicial de água calculados na Tabela 2 para cada material (Figura 6).

No modelo CTF, a temperatura interna apresentou maior amplitude térmica, tendo valores máximo e mínimo de 32,4°C e 25,8°C, respectivamente. A umidade interna praticamente acompanhou a curva da umidade externa do arquivo climático,

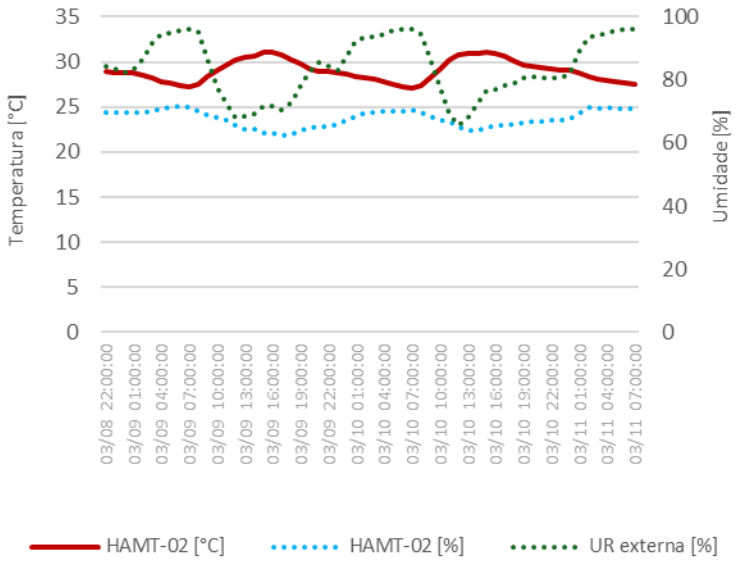
apresentando maior oscilação. Isso reflete na maior variação térmica obtida para o ambiente interno.

Figura 5: Temperatura e umidade internas, modelo HAMT com valor padrão de teor inicial de água



Fonte: os autores.

Figura 6: Temperatura e umidade internas, modelo HAMT com valores calculados de teor inicial de água



Fonte: os autores.

Os dois modelos HAMT mostraram menor oscilação para temperatura e umidade internas. Porém, o modelo com valor padrão do teor inicial de água (HAMT-01) resultou em uma faixa de umidade interna entre 75,4% e 83,3%, enquanto o modelo que considerou os valores calculados para o teor inicial de água (HAMT-02) exibiu taxas de umidade interna entre 62,5% e 71,6%. As temperaturas máximas e mínimas para o

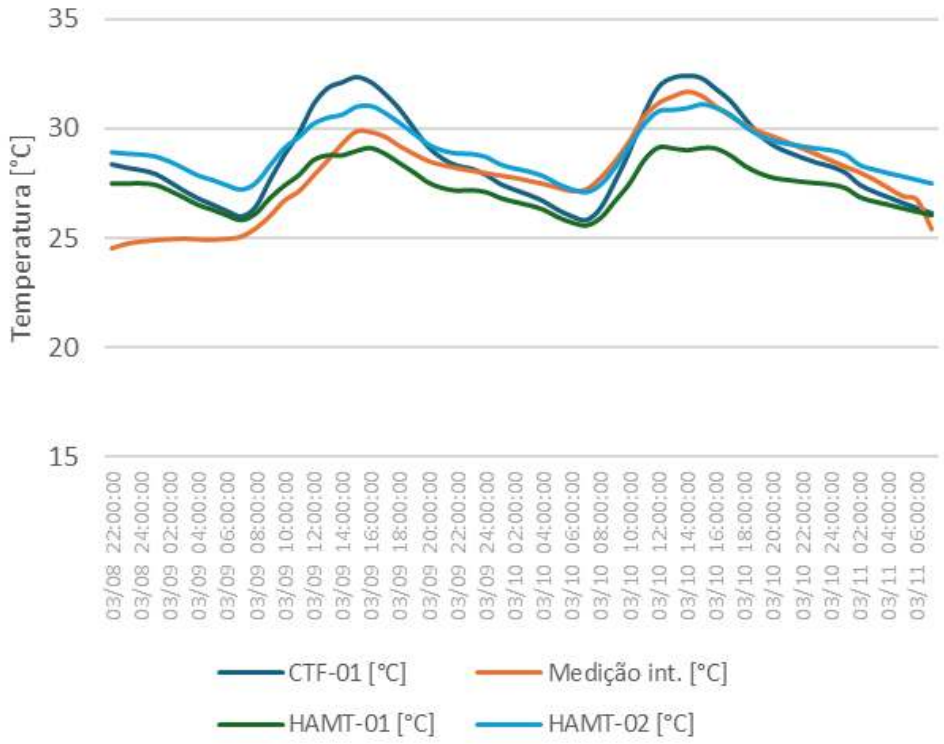
primeiro modelo HAMT foi de 29,1°C e 25,6°C e para o segundo modelo HAMT, 31,1°C e 27,1°C.

COMPARAÇÃO COM OS VALORES EXPERIMENTAIS

Relacionando os resultados obtidos a partir das simulações computacionais e os dados medidos em campo (Figuras 7 e 8), é possível perceber que a evolução temperatura interna para os dois modelos HAMT apresenta um comportamento semelhante à temperatura interna medida experimentalmente. Após as 10h iniciais de medição, as temperaturas internas do modelo HAMT-02 se aproximam dos valores medidos em campo. Esse desvio inicial é atribuído, provavelmente, à ocupação anterior da sala até às 21h do dia 08/03. O modelo CTF, por sua vez, apresentou maiores picos de temperatura, apresentando uma tendência de concordância com os valores medidos após 45h aproximadamente do início das medições.

Com relação à umidade relativa interna, o modelo HAMT-02 foi o que mais se aproximou do comportamento da curva da medição experimental. No entanto, percebe-se uma diferença da faixa de valores obtidos, sendo que os valores medidos ficaram entre 70% e 80% e o modelo HAMT-02 compreendeu uma faixa entre 60% e 70%. Essa diferença se deve muito provavelmente aos valores calculados para o teor inicial de água, que foram obtidos considerando a umidade do arquivo climático para a hora inicial da simulação.

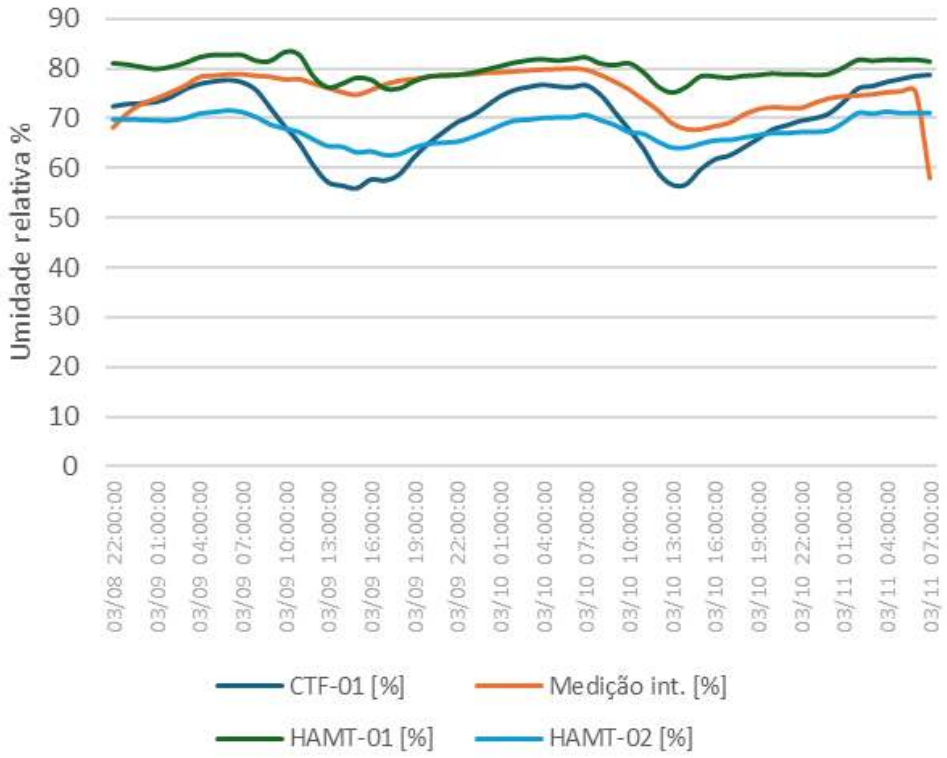
Figura 7: Temperatura interna dos modelos numéricos e medição experimental



Fonte: os autores.

O modelo HAMT-01 apresentou valores mais próximos, porém, mais elevados durante todo o intervalo de medição. Isso também se deve ao valor padrão para o teor inicial de água, distorcendo o comportamento higrotérmico de cada material da envoltória.

Figura 8: Umidade interna dos modelos numéricos e medição experimental



Fonte: os autores.

Finalmente, no modelo CTF é possível perceber o comportamento mais divergente para os valores de umidade interna. Isso influencia a determinação das temperaturas internas, levando a uma superestimação da temperatura interna.

CONCLUSÃO

O estudo de desempenho térmico de edificações é cada vez mais necessário, frente ao aumento do consumo de energia elétrica para garantir o nível de vida e conforto da sociedade atual. No entanto, a investigação computacional sobre o conforto térmico das construções ainda se concentra apenas na transferência de calor e não considera os efeitos da umidade.

Nesse contexto, foram realizadas simulações computacionais considerando dois modelos numéricos (CTF e HAMT), com o objetivo de investigar os efeitos da consideração da umidade nos cálculos de transferência de calor. Como complementação do estudo, foram realizados testes experimentais para calibrar e validar os resultados numéricos.

Com os resultados obtidos a partir das simulações computacionais e testes experimentais, foi possível perceber a divergência nos valores de temperatura e umidade causada pela não consideração da umidade no modelo CTF. O modelo HAMT se mostrou mais adequado para a determinação das condições de temperatura e umidade internas. Porém, parâmetros de entrada como o teor inicial de água exercem influência nos dados de saída.

Algumas limitações foram encontradas no desenvolvimento desse estudo. O período de simulação e testes considerado foi relativamente pequeno, não possibilitando uma análise que compreende outras estações do ano, abrangendo outras condições de umidade e temperatura. Outro fator limitante se relaciona com a base de dados das propriedades higrotérmicas dos materiais utilizados. Para esse estudo, foi necessária a utilização de uma base de dados europeia, devido à escassez de referências no país.

Por fim, os resultados evidenciaram a importância da consideração da umidade, pelo modelo HAMT, contribuindo para condução de estudos mais assertivos sobre o desempenho térmico de edificações.

REFERÊNCIAS

[1] EMPRESA DE PESQUISA BRASILEIRA. **Balanço Energético Nacional 2023**: Ano Base 2022. Balanço Energético Nacional. 2023. Rio de Janeiro, Brasil.

[2] EIA – U.S. Energy Information Administration. **International energy outlook 2023**. Disponível em: https://www.eia.gov/outlooks/ieo/narrative/index.php. Acesso em: 01 maio 2024.

[3] EMPRESA DE PESQUISA BRASILEIRA. **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro**: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Nota Técnica EPE 030/2018. 2018. Rio de Janeiro, Brasil.

[4] OKE, T.R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

[5] LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 3 ed., 192 p., 2013.

[6] ARAÚJO, M. T de.; SOUZA, H. A. de; GOMES, A. P. Computer Simulation of moisture transfer in walls: impacts on the termal performance of buildings. **Architectural, Engineering and Design Management**, v. 18, n. 4, p. 453-472, abr. 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/17452007.2021.1916426

[7] YU, S.; CUI, Y.; SHAO, Y.; HAN, F. Research on the Comprehensive Performance of Hygroscopic Materials in an Office Building Based on EnergyPlus. Energies, v.12, n. 1, p. 191, jan. 2019.

[8] GOFFART, J.; RABOUILLE, M.; MENDES, N. Uncertainty and sensitivity analysis applied to hygrothermal simulation of a brick building in a hot and humid climate. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 10, n. 1, p. 37-57, dec. 2015. DOI: https://doi.org/10.1080/19401493.2015.1112430

[9] WOODS, J.; WINKLER, J.; CHRISTENSEN, D. **Evaluation of the effective moisture penetration depth model for estimating moisture buffering in buildings**. National Renewable Energy Laboratory: Technical Report NERL/TP-5500-57441. 2013. Colorado, Estados Unidos.

[10] YANG, J.; FU, H.; QIN, M. Evaluation of Different Thermal Models in EnergyPlus for Calculating Moisture Effects on Building Energy Consumption in Different Climate Conditions. **Procedia Engineering**, v. 121, p. 1635-1641, 2015.

[11] LAUZET, N. et al. How building energy models take the local climate into account in an urban context – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2019, 116, pp.109390 -. ff10.1016/j.rser.2019.109390ff. ffhal-03489027

[12] PREFEITURA DE JOINVILLE. Joinville Cidade em dados 2018: aspectos físicos naturais. 2018. Joinville, Brasil.

[13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.220-3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

[14] DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **EnergyPLus Version 23.1.0 Documentation**: Engineering Reference. 2023.

[15] LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos INMET 2018**. 2018. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018. Acesso em: 08/05/2024.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.220-2: 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.

[17] SOUSA, L. R. de. **Análise do desempenho térmico de habitações multifamiliares de interesse social com paredes verdes**. 2020. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

[18] WUFI. **WUFI Light 6.7**. Disponível em: https://wufi.de/en/. Acesso em: 07 maio 2024.