

Avaliação comparativa do comportamento térmico de paredes de concreto **construídas por impressão 3D**

RODRIGO DO VAL ANDRADE – DOUT. – (rodrigo.andrade@coc.ufrj.br) ;

EDUARDO DE MORAES REGO FAIRBAIRN – PROF. – <https://orcid.org/0000-0003-0321-7152> ;

OSCAR AURELIO MENDOZA REALES – PROF. – <https://orcid.org/0000-0002-4241-1321> ;

ANA BEATRIZ DE CARVALHO GONZAGA E SILVA – PROF. – <https://orcid.org/0000-0003-3688-3434> | **COPPE/UFRJ**

RESUMO

A TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D TEM DESPERTADO O INTERESSE NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL PELA POSSIBILIDADE DE PRODUIR ESTRUTURAS DE CONCRETO COMPLEXAS. A LIBERDADE DE CRIAÇÃO DE DIFERENTES GEOMETRIAS INTERNAS ATRAVÉS DESSE MÉTODO PODE MELHORAR SIGNIFICATIVAMENTE O COMPORTAMENTO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES, RESULTANDO POTENCIALMENTE EM UMA MENOR DEMANDA DE ENERGIA PARA CLIMATIZAÇÃO. ESTE TRABALHO TEM POR OBJETIVO ANALISAR A TRANSFERÊNCIA DE CALOR QUE OCORRE ATRAVÉS DE UMA PAREDE CONSTRUÍDA POR MEIO DE IMPRESSÃO 3D E COMPARAR OS RESULTADOS COM DOIS TIPOS DE PAREDES CONVENCIONAIS. AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS FORAM REALIZADAS NAS TRÊS CONFIGURAÇÕES GEOMÉTRICAS, UTILIZANDO O PERFIL DE TEMPERATURA E RADIAÇÃO SOLAR DO DIA MAIS QUENTE DE 2022 NO RIO DE JANEIRO. OS RESULTADOS REVELARAM QUE ELEMENTOS DE CONCRETO CONSTRUÍDOS ATRAVÉS DA IMPRESSORA PODEM OFERECER UMA EFICIÊNCIA TÉRMICA SUPERIOR ÀS CONSTRUÇÕES CONVENCIONAIS.

PALAVRAS-CHAVE: IMPRESSÃO 3D, CONCRETO, MODELAGEM COMPUTACIONAL, COMPORTAMENTO TÉRMICO.

1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0, com a impressão 3D como uma de suas principais inovações, revoluciona várias áreas de pesquisa, incluindo engenharia civil, automotiva, aeroespacial, odontologia e medicina, evidenciando seu papel transformador

em diversas disciplinas. Segundo Bogue (2013), este processo de fabricação aditiva destaca-se por sua eficiência, criando objetos sólidos ao unir materiais camada por camada.

Na construção civil, a impressão 3D de concreto começa com a mistura e o bombeamento do material para a extrusora, que, guiada por modelos 3D criados por programas computacionais especializados, é controlada com precisão por braços robóticos ou estruturas em pórtico, permitindo a construção de estruturas complexas (Bhushan Jindal e Jangra, 2023). Esse método responde a desafios do setor, como melhorar a produtividade, reduzir o desperdício de materiais e oferecer liberdade geométrica aos objetos estruturais (Filgueiras, Silva e Toralles, 2021).

Embora a impressão 3D exista desde os anos 80, sua aplicação na construção civil ganhou destaque na última década (Rutkin, 2014), incentivando o aumento nas pesquisas e no desenvolvimento de novas tecnologias de construção automatizada utilizando impressão 3D em concreto.

O interesse crescente na área levou a estudos comparativos que avaliam a eficiência das estruturas impressas em 3D em relação às convencionais, abordando custos, tempos de construção e sustentabilidade (J e Singh, 2023; Ahmed, 2023), bem como desempenho estrutural e térmico (Bello e Memari, 2023). No entanto, a pesquisa sobre o com-

portamento térmico de paredes impressas em 3D ainda é limitada, destacando uma oportunidade de uma análise mais profunda. O comportamento térmico influencia diretamente o conforto dentro das edificações e é afetado por fatores como o método construtivo e o clima local, além dos aspectos fisiológicos, psicológicos, sociais, físicos e contextuais. Dentre esses, os físicos e contextuais estão relacionados ao clima e ao design construtivo, respectivamente (Fabi et al., 2012).

Em construções convencionais, utiliza-se as cavidades de ar internas dos materiais de construção para controlar a transmitância térmica, adaptando-se às necessidades climáticas de cada localidade. No entanto, essas construções estão muitas vezes limitadas a formas geométricas simples. A impressão 3D em concreto, por outro lado, oferece a liberdade geométrica que permite moldar diferentes configurações de cavidades de ar nas paredes, o que tem um impacto significativo na resposta térmica e, conseqüentemente, na eficiência energética das edificações.

Diante deste contexto, este artigo compara, através da modelagem numérica, o comportamento térmico entre uma parede maciça, uma parede de tijolo convencional e uma parede construída com tecnologia de impressão 3D em concreto, considerando as temperaturas registradas na cidade do Rio de Janeiro no dia mais quente do ano de 2022.

2. METODOLOGIA

Neste estudo, foi abordada a análise da transferência de calor de paredes construídas com tecnologia de impressão 3D em concreto, utilizando o programa computacional Diana FEA para modelagem numérica. A ferramenta computacional emprega o método dos elementos finitos, permitindo a simulação aproximada das características térmicas das paredes, de acordo com a geometria e as propriedades térmicas reais do material.

O modelo foi definido de modo a incorporar as propriedades térmicas do material, a geometria da parede e condições de contorno específicas, refletindo as características térmicas reais. Foram considerados os parâmetros de condutividade térmica (k), capacidade térmica (C) e coeficientes de transferência de calor nas faces externa (h_{ext}), interna (h_{int}) e nas cavidades de ar (h_{cav}).

A partir disso, realizaram-se simulações para avaliar a resposta térmica sob condições climáticas extremas, representadas pelo dia mais quente do ano de 2022 na Vila Militar do Rio de Janeiro, Brasil. Esta análise abrangeu três configurações de paredes: impressa em concreto 3D, maciça e de alvenaria convencional, revelando informações importantes sobre a eficiência térmica proporcionada pela inovação na construção civil com impressão 3D.

2.1 Definição do modelo matemático

Para entender os processos térmicos que afetam materiais de construção e avaliar a eficiência térmica das paredes e

a dinâmica da transferência de calor, foi considerado o modelo matemático, conforme DEL COZ DÍAZ et al., 2007, baseado na equação de calor para materiais isotrópicos (equação 1), onde a condutividade térmica é uniforme, aplicado em regime transiente:

$$[1] \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Onde:
 $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$ e $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ = 2ª derivada parcial da temperatura em relação às coordenadas x , y e z , respectivamente;
 $\frac{\dot{q}}{k}$ = taxa de geração de calor dividida pela condutividade térmica do material;
 ρ = Densidade do material;
 c = Calor específico do material;
 k = Condutividade térmica;
 $\frac{\partial T}{\partial t}$ = Primeira derivada parcial da temperatura em relação ao tempo.

Para análises em regime estacionário (equação 2), onde a transferência de calor se mantém constante ao longo do tempo, a dependência temporal é removida, simplificando a equação.

$$[2] \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0$$

Os processos de transferência de calor incluem condução, convecção e radiação. O fluxo térmico nas fronteiras é quantificado pela equação 3:

$$[3] \quad q = q_{convecção} + q_{radiação}$$

O termo q indica o fluxo de calor total na interface da parede, compreendendo uma fração devida ao calor convectivo e outra decorrente do calor radiante. A parcela do fluxo de calor atribuída à convecção é calculada através da equação

4, utilizando a Lei de Resfriamento de Newton.

$$[4] \quad q_{convecção} = h (T_s - T_a)$$

Onde:

h = coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m^2K);

T_s = temperatura da superfície em contato com o ambiente;

T_a = temperatura do ambiente.

No que diz respeito à radiação, a contribuição para o fluxo de calor é definida pela Lei de Stefan-Boltzmann (equação 5):

$$[5] \quad q_{radiação} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_a^4)$$

Onde:

ϵ = a emissividade da superfície (entre 0 e 1);

σ = constante de proporcionalidade da Lei de Stefan-Boltzmann (valor de $5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$).

2.2 Escolha das diferentes geometrias de parede

Este tópico mostra as diferentes configurações de paredes, bem como os dados térmicos de entrada e os dados climáticos da estação meteorológica da Vila Militar, no Rio de Janeiro. Para as simulações, foram utilizados os registros de temperatura do período mais quente de 2022, destacando-se o dia 18 de janeiro, o mais quente do ano. Foi ajustada a incidência de radiação solar nos modelos, considerando-se 70% de absorção e 90% de emissividade para as superfícies de concreto. Como referência, a norma ABNT NBR 15220:2005 indica taxas entre 65% e 80% e entre 85% e 95%,

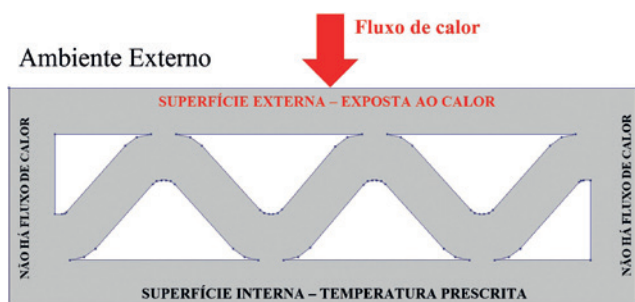


FIGURA 1

REPRESENTAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

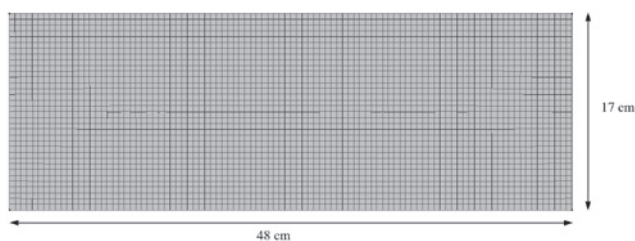


FIGURA 2

MODELO A – PAREDE MACIÇA DE CONCRETO COM 17 CM DE ESPESSURA

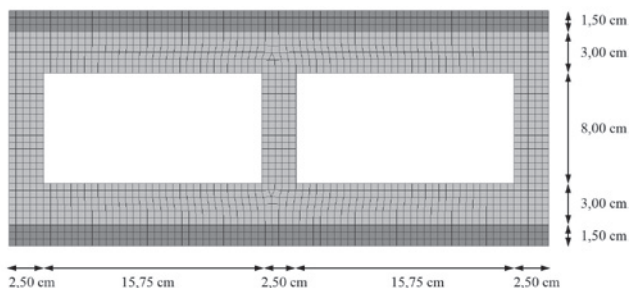


FIGURA 3
MODELO B – PAREDE CONVENCIONAL COMPOSTA DE BLOCO DE CONCRETO E ARGAMASSA, COM DUAS CAVIDADES

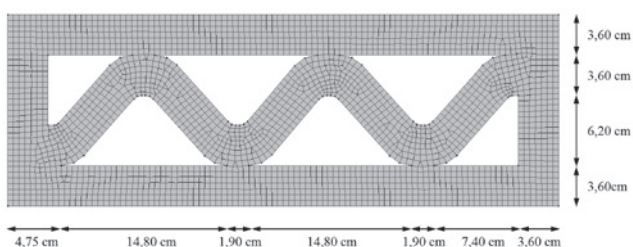


FIGURA 4
MODELO C - PAREDE DE CONCRETO IMPRESSA EM 3D COM 17 CM DE ESPESSURA

respectivamente. Esse ajuste visou uma representação mais próxima das condições reais de exposição das paredes ao sol. Para simular o comportamento térmico, desenvolveu-se um modelo onde uma face da parede é exposta ao calor,

quadrangulares com espaçamento de 5 mm entre eles. A parede maciça de concreto (Modelo A, Figura 2) foi representada com um total de 3332 elementos, enquanto a parede convencional de blocos de concreto com argamassa

simulando a incidência de energia térmica, enquanto a face oposta é configurada com uma temperatura fixa, baseada em medidas pré-determinadas, representando a ausência de exposição direta ao calor. As demais faces são tratadas como adiabáticas, impedindo o fluxo de calor através delas. A configuração desse modelo está ilustrada na Figura 1.

Foram simulados três modelos de paredes com características distintas, introduzindo uma malha de elementos finitos

e duas cavidades (Modelo B, Figura 3) foi modelada com 1649 elementos. A geometria relacionada à parede de concreto impressa em 3D (Modelo C, Figura 4) foi escolhida com base nas configurações mais frequentes mencionadas na literatura, contendo uma malha com 2527 elementos. Cada modelo foi submetido às mesmas condições climáticas para uma comparação justa de suas eficiências térmicas.

Os parâmetros de entrada do programa computacional foram definidos e disponibilizados na Tabela 1. Para as geometrias do modelo B e modelo C, foram utilizados coeficientes de transferência de calor englobando os efeitos combinados de convecção e radiação nas cavidades de ar, através de uma constante empírica $c = 0,065$, utilizada para o ajuste do fluxo de calor nas cavidades.

Baseando-se nos dados da simulação numérica, o programa computacional forneceu os resultados da transmitância térmica (U) e a diferença de temperatura das paredes, permitindo a análise comparativa da transferência de calor de cada geometria.

3. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos pela simulação numérica da transferência de calor em estado transiente em diversas configurações de paredes, visando comparar e determinar qual geometria proporciona o melhor comportamento térmico. Para tal, explorou-se as paredes construídas pelos métodos convencionais e também pelo método de impressão 3D, destacando-se o impacto das cavidades de ar.

Para alimentar o modelo numérico, foram coletados os dados de temperatura máxima e radiação global da estação a cada hora, identificando o pico de temperatura em 18 de janeiro de 2022. Para refletir o comportamento térmico real das paredes, incluiu-se os dados de temperatura e radiação dos dias 16, 17, 19 e 20 de janeiro. Isso porque os dados de entrada da temperatura são diferentes da temperatura distribuída ao longo da geometria interna da parede, sendo influenciada pelo ciclo diário de aquecimento e resfriamento. A Figura 5 mostra as temperaturas externa e interna da parede maciça, que atingiram,

TABELA 1

PARÂMETROS TÉRMICOS DOS MATERIAIS COMPONENTES DE CADA PAREDE DE ACORDO COM A NBR 15220 (2005)

k_{concreto} W/mK	$k_{\text{argamassa}}$ W/mK	ρ kg/m ³	C J/m ³ K	h_{ext} W/m ² K	h_{cav} W/m ² K	h_{int} W/m ² K
1,75	1,15	2300	$2,30 \times 10^6$	25	25	7,69

TABELA 2

COMPARAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO ENTRE AS GEOMETRIAS SIMULADAS

Modelo geométrico	% de área de cavidade	Temperatura máxima externa (°C)	Temperatura máxima interna (°C)	Diferença entre a temperatura externa e interna (°C)	U (W/m ² K)
Maciça	0%	53,6	38,6	15,0	3,7
Bloco	38%	57,4	39,6	17,8	2,9
Impressa	25%	57,0	37,7	19,3	3,4

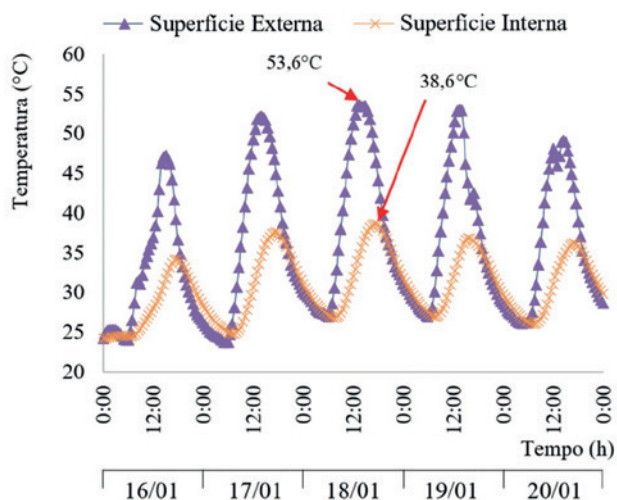


FIGURA 5

TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA DA PAREDE MACIÇA AO LONGO DO TEMPO

em média, 53,6 °C na superfície externa e 38,6 °C na superfície interna no dia 18 de janeiro, resultando em uma diferença de 15 °C. A distribuição térmica no pico interno é ilustrada na Figura 6.

A parede de bloco de concreto, conforme a Figura 7, registrou uma temperatura externa de 57,4 °C e uma interna de 39,6 °C, uma diferença de temperatura de 17,8 °C, atribuída às cavidades de ar que atuaram como barreira térmica, ilustrada na Figura 8.

A parede de concreto impressa mostrou temperaturas de 57,0 °C na superfície externa e 37,7 °C na superfície interna. Os resultados, ilustrados nas Figuras 9 e 10, mostram a temperatura nas superfícies interna e externa, bem como a distribuição de temperatura no momento do pico na superfície interna.

A comparação entre os resultados obtidos revela que, como esperado, a parede maciça é mais eficiente para

conduzir calor, se propagando de maneira contínua através da sua estrutura uniforme até a superfície interna, enquanto as cavidades na parede de bloco criaram resistência térmica adicional, afetando a diferença de temperatura entre as superfícies interna e externa. Os resultados da parede impressa, quando comparados com a parede convencional de bloco de concreto e argamassa, mostram que a geometria da parede impressa obteve uma resposta térmica superior à da parede de bloco de concreto, apesar de ter

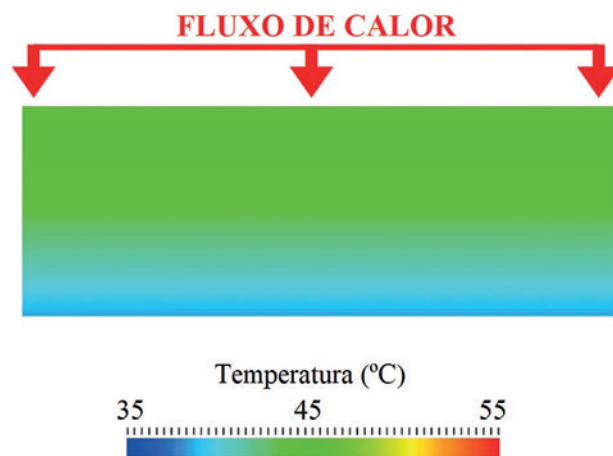


FIGURA 6

DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NA PAREDE MACIÇA NO PICO DE TEMPERATURA MÁXIMA

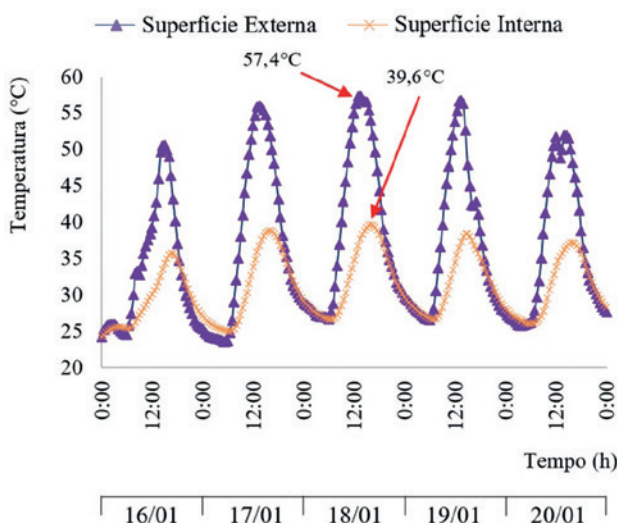


FIGURA 7

TEMPERATURA INTERNA E EXTERNA DA PAREDE DE BLOCO DE CONCRETO AO LONGO DO TEMPO

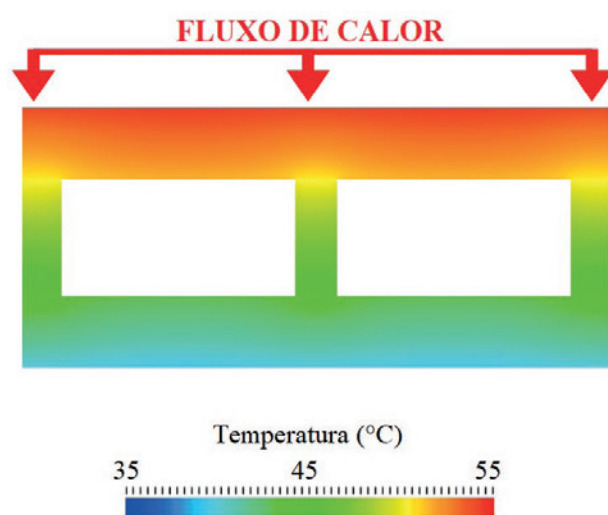


FIGURA 8

DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NA PAREDE DE BLOCO DE CONCRETO NO PICO DE TEMPERATURA MÁXIMA

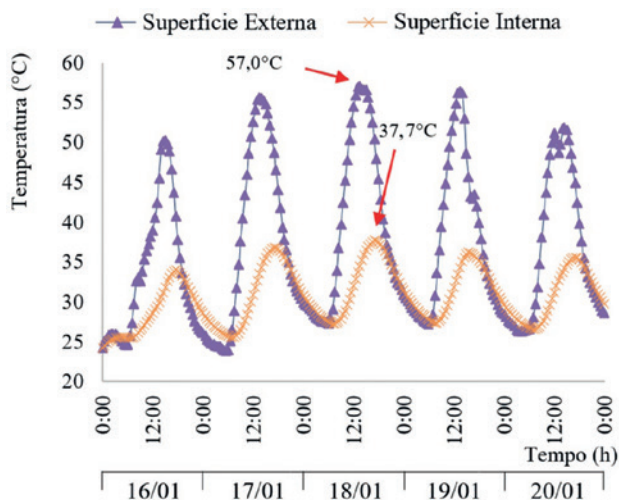


FIGURA 9

TEMPERATURA EXTERNA E INTERNA DA PAREDE IMPRESSA AO LONGO DO TEMPO

um percentual menor de área de cavidade. Acredita-se que isso possa estar associado com a diferença de formato das cavidades e ao número de filamentos conectando as superfícies interna e externa da parede, estabelecem caminhos preferenciais para a transferência de calor que atravessam as áreas de menor resistência térmica mais rapidamente - pesquisas adicionais precisam ser feitas para confirmar essa hipótese.

A Tabela 2 ilustra a comparação do comportamento térmico entre os

ressaltar que os valores foram obtidos através do programa computacional, pois as normas atuais não especificam o cálculo da transmitância térmica para configurações com cavidades triangulares.

4. LIMITAÇÕES DO MODELO

É importante destacar que o modelo de simulação desenvolvido para analisar a distribuição de temperatura em paredes de concreto impressas por uma impressora 3D oferece várias vantagens, mas também possui algumas limitações que devem

ser consideradas ao interpretar os resultados e ao generalizar as conclusões.

Uma das principais limitações do modelo é a falta de uma análise detalhada da dinâmica dos fluidos. O modelo se baseou em ajustes a partir de dados experimentais para simular o fluxo de calor nas cavidades de ar das paredes de concreto.

modelos simulados, destacando tanto a diferença de temperatura entre as faces externa e interna quanto a transmitância térmica (U) para cada configuração. Embora o modelo de bloco apresente a menor transmitância térmica, indicando teoricamente melhor isolamento, a maior diferença de temperatura observada sugere uma eficiência térmica inferior em comparação ao modelo impresso em 3D. Importante

Embora essa abordagem simplificada seja eficaz em muitos casos, ela não captura completamente a complexidade do comportamento do ar nas cavidades das paredes de concreto. Portanto, é importante considerar essa limitação ao aplicar os resultados em cenários com fluxos de ar complexos. A ocorrência de vórtices ou a estratificação do ar dentro das cavidades pode levar a variações que não foram capturadas pelo modelo simplificado.

Outra limitação a ser considerada é que o mesmo ajuste foi aplicado a todas as geometrias de paredes de concreto impressas por impressora 3D. Isso pode não levar em conta diferenças na consideração do fluxo de calor nas cavidades para diferentes geometrias. Apesar disso, o uso do modelo se justifica pelo seu baixo custo computacional. Ele fornece uma boa previsão do comportamento térmico sem a necessidade de recursos computacionais excessivos, tornando-o uma ferramenta acessível para a análise térmica de estruturas de concreto impressas em 3D. Devido à sua simplicidade e eficiência computacional, o modelo permite uma rápida avaliação térmica de paredes com diferentes geometrias. Isso possibilita a avaliação de várias configurações em um curto período de tempo, acelerando o processo de análise e tomada de decisões de projeto.

Essas limitações ressaltam a importância de futuras pesquisas que possam abordar as complexidades da dinâmica dos fluidos em simulações de transferência de calor em paredes de concreto impressas em 3D, bem como investigar métodos mais específicos de modelagem para diferentes geometrias e condições operacionais.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi estabelecida uma metodologia para avaliar comparativamente a transferência de calor entre paredes impressas em 3D e paredes convencionais de concreto, utilizando simulações computacionais. Com base nos resultados obtidos, observou-se que a configuração geométrica interna da parede impressa em 3D influencia significativamente o seu comportamento

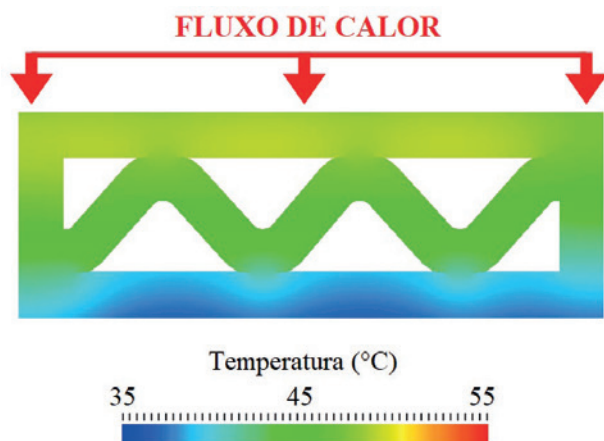


FIGURA 10

DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NA PAREDE IMPRESSA NO PICO DE TEMPERATURA MÁXIMA

térmico. Além disso, os resultados indicaram que a parede impressa em 3D tem uma eficiência térmica superior em comparação às paredes convencionais, destacando-se pela maior diferença entre as temperaturas externa e interna (19,3 °C), em contraste com as paredes maciças

(15 °C) e de bloco (17,8 °C). Essa diferença se deve aos filamentos da treliça, cuja geometria aumenta a distância que o calor precisa percorrer, conduzindo-o pelas áreas de concreto, que possuem menor resistência térmica em comparação com o ar nas cavidades. Conclui-se que

existe grande potencial para melhorar o comportamento térmico de paredes de concreto construídas por impressão 3D, uma vez que a técnica construtiva tem a capacidade de criar geometrias internas customizadas e com alto grau de complexidade. ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AHMED, G. H. A review of "3D concrete printing": Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*. v. 66, p. 105863, maio 2023.
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- [3] BELLO, N. D.; MEMARI, A. M. A Structural and Thermal Comparative Review of 3D-Printed Wall Shapes. *Designs*. v. 7, n. 3, p. 80, 19 jun. 2023.
- [4] BHUSHAN JINDAL, B.; JANGRA, P. 3D Printed Concrete: A comprehensive review of raw material's properties, synthesis, performance, and potential field applications. *Construction and Building Materials*. v. 387, p. 131614, Jul. 2023.
- [5] BOGUE, R. 3D printing: the dawn of a new era in manufacturing? *Assembly Automation*, v. 33, n. 4, p. 307-311, 23 set. 2013.
- [6] DEL COZ DÍAZ, J. J. et al. Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method. *Applied Thermal Engineering*, v. 27, n. 8-9, p. 1445-1456, jun. 2007.
- [7] FABI, V. et al. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. *Building and Environment*. v. 58, p. 188-198, dez. 2012.
- [8] FILGUEIRAS, M. DE B.; SILVA, L. F.; TORALLES, B. M. Elementos de concretos produzidos por impressão 3D com foco na aderência entre camadas: uma revisão. *ENSUS, Florianópolis*, v. IX, p. 583-595, 05-2021.
- [9] J, V.; SINGH, P. Comparative analysis of concrete 3D printing and conventional construction technique for housing. *Innovative Processes and Materials in Additive Manufacturing*. Elsevier, 2023, p. 177-190.
- [10] RUTKIN, A. Watch as the world's first 3D-printed house goes up. *New Scientist*, v. 221, n. 2960, p. 24, mar. 2014.

KIT de PRÁTICAS RECOMENDADAS sobre ENSAIOS de DURABILIDADE das ESTRUTURAS de CONCRETO

O conjunto de **Práticas Recomendadas Sobre os Ensaios de Durabilidade das Estruturas de Concreto** é fruto do trabalho do **Comitê Técnico IBRACON/ALCONPAT 702 Procedimentos para Ensaios de Avaliação da Durabilidade das Estruturas de Concreto**.



PROMOÇÃO: Kit com 5 Práticas + Guia de Prevenção da Reação Álcali-Agregado **SÓCIOS:** R\$ 300,00 | **NÃO SÓCIOS:** R\$ 550,00

Patrocínio



Adquira o seu na
Loja Virtual
do IBRACON:
<http://lojaibracon.org.br>