



ENTAC 2024

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



Impressão 3D na construção civil: uma revisão sistemática com foco no desempenho termoenergético

3D printing in construction: a systematic review focusing on thermoenergetic performance

Luana Toralles Carbonari

UEL | Londrina | Brasil | luanatcarbonari@gmail.com

Berenice Martins Toralles

UEL | Londrina | Brasil | toralles@uel.br

Thalita Gorban Ferreira Giglio

UEL | Londrina | Brasil | thalita@uel.br

Resumo

A construção civil tem passado por diversas transformações devido ao emprego da digitalização e automação. Um exemplo é a manufatura aditiva, também chamada de impressão 3D. Este artigo visa identificar os principais métodos de análise térmica e energética que tem sido utilizado para avaliar o desempenho dessa tecnologia aplicada no ambiente construído. Para isso, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura e análise bibliométrica. Os resultados indicam que uma diversidade de métodos tem sido empregados, como: estudos de caso; estudos experimentais da composição do material de impressão; ensaios laboratoriais para determinação das propriedades físicas do material de impressão; construção de protótipos (geralmente painéis) para testes e monitoramento; simulações computacionais; estudo e teste de diferentes geometrias de vedação com e sem material de isolamento térmico adicionado; análise de elementos finitos da seção de parede; dentre outros. A sistematização e análise de como esses métodos tem sido empregados e os principais resultados obtidos é a principal contribuição deste estudo.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva. Impressão 3D. Desempenho da Edificação. Eficiência Energética. Revisão Sistemática.

Abstract

The construction industry has experienced a number of transformations due to the use of digitalization and automation. One example is additive manufacturing, also known as 3D printing. The aim of this paper is to identify the main thermal and energy analysis methods that have been used to evaluate the performance of this technology applied to the built environment. To this end, a Systematic Literature Review and bibliometric analysis were carried out. The results indicate that a variety of methods have been used, such as: case studies; experimental studies of the printing material composition; laboratory tests to determine the physical properties of the printing material; construction of prototypes (usually panels) for testing and monitoring; computer simulations; study and test of different sealing geometries with and without added thermal insulation material; finite element analysis of the wall section; among



Como citar:

CARBONARI, L. T.; TORALLES, B. M.; GIGLIO, T. G. F. Impressão 3D na construção civil: uma revisão sistemática com foco no desempenho termoenergético. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2024.

others. The systematization and analysis of how these methods have been used and the main results obtained is the main contribution of this study.

Keywords: Additive Manufacturing. 3D Printing. Building Performance. Energy Efficiency. Systematic Review.

INTRODUÇÃO

A construção civil é responsável por 36% do consumo final global de energia e 39% do total de emissões diretas e indiretas de CO₂ [1]. Além disso, em nível mundial, o resfriamento artificial consome 60% do total de energia em edificações, pois o conforto térmico é uma das principais prioridades, especialmente em climas quentes [2]. Devido a isso, diversos pesquisadores têm buscado alternativas para uma construção mais otimizada, com menor impacto ambiental e maior desempenho térmico, além de uma maior economia de tempo, materiais e custos, buscando promover a conservação de energia e reduzir as emissões de carbono [3,4]. Nesse sentido, uma tecnologia cada vez mais explorada é a manufatura aditiva, que combina a manufatura com a fabricação digital, também conhecida como impressão 3D [5,6].

O uso da manufatura aditiva na construção civil vai ao encontro de questões atuais, como Cidades Inteligentes, Desenvolvimento Sustentável e Transformação Digital, incorporando os conceitos de digitalização, automação e conectividade da Indústria 4.0. A impressão 3D pode tornar a construção mais eficiente e proporcionar um crescimento sustentável, estimulando os princípios da circularidade [5]. Nesse contexto, o uso dessa tecnologia com materiais cimentícios (*3D concret printing* - 3DCP) vem surgindo como uma alternativa para automatizar os processos de construção, permitindo a impressão rápida de estruturas em escala real [6,7] e, ao mesmo tempo, reduzindo o tempo de construção e a geração de resíduos [8,9]. Além disso, o uso de fôrmas de madeira para moldagem de concreto é desnecessário, as atividades manuais são consideravelmente reduzidas [10,11] e a 3DCP pode reduzir os custos de construção em até 35% se comparada à construção convencional [12].

Com a necessidade de moradias acessíveis e de baixo custo aumentando, o 3DCP se torna cada vez mais atrativo para o setor de construção, tendo sido amplamente estudado como uma inovação promissora [13-15]. No entanto, a maioria dos estudos se concentra nas propriedades mecânicas e reológicas do material e não na eficiência energética e no desempenho térmico da edificação. Esses aspectos têm grande influência no impacto ambiental da construção e no conforto dos usuários, sendo necessário avaliá-los para garantir que a sustentabilidade ambiental não seja comprometida pelo custo e pela velocidade da construção. Além disso, enquanto a construção tradicional é feita com vários materiais, cada um deles com uma finalidade específica, na impressão 3D as misturas terão de ser capazes de cumprir essas mesmas funções, inclusive atuando como material de isolamento térmico [5].

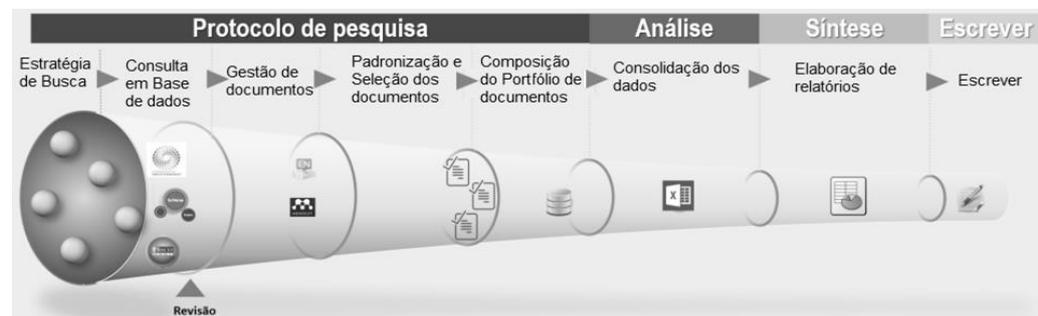
Portanto, a eficiência termoenergética do 3DCP exige uma investigação mais aprofundada antes que essa tecnologia possa ser aplicada em larga escala na construção civil. Sendo assim, este artigo visa apresentar uma Revisão Sistemática da Literatura - RSL, identificando os principais métodos de análise do desempenho

termoenergético que têm sido utilizados para avaliar a aplicação do 3DCP na construção civil.

MÉTODO

Para atingir o objetivo proposto, realizou-se a RSL e análise bibliométrica. A RSL tem por finalidade pesquisar a literatura sobre um tema específico, disponibilizando um resumo das evidências encontradas sobre um determinado assunto, organizando e explicitando de forma sistemática o modo como foram feitas as buscas, análise e sínteses das publicações encontradas [16]. Para realizar a RSL utilizou-se o *Systematic Search Flow* – SSF [16], método não aleatório ou exploratório, que segue um procedimento metodológico que garante a repetibilidade da pesquisa, minimizando a seleção tendenciosa de documentos (Figura 1).

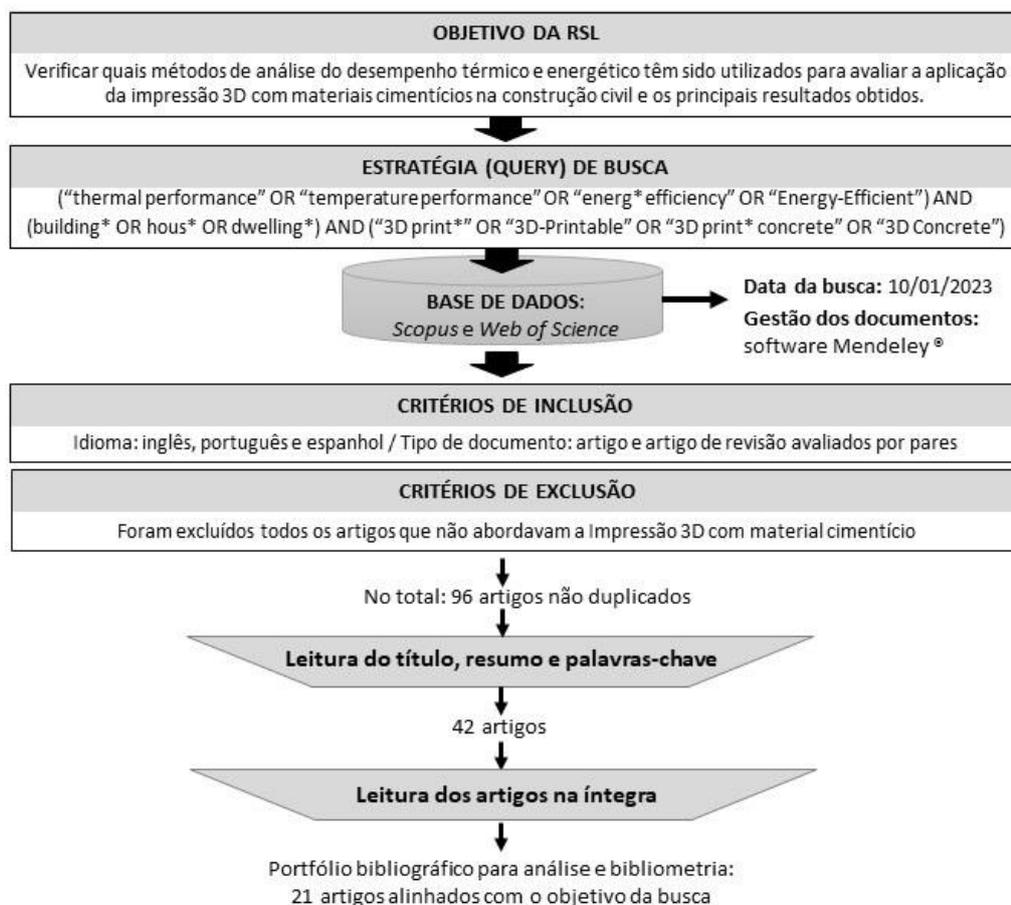
Figura 1: Fases e atividades do método SSF



Fonte: [16].

Este estudo seguiu as 4 fases e 8 atividades do método SSF. Os critérios de seleção de literatura se basearam nas palavras chave "thermal and temperature performance, energy efficiency, building, 3D concrete printing" e estão sintetizados na Figura 2.

Figura 2: Critérios de seleção de literatura usados na RSL

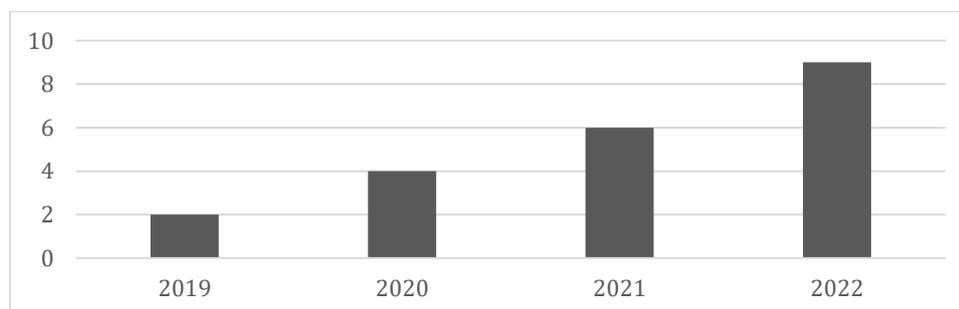


Fonte: o autor.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Figura 3 é apresentado um gráfico do ano das publicações que compõe o portfólio bibliográfico desta RSL.

Figura 3: Número de artigos por ano

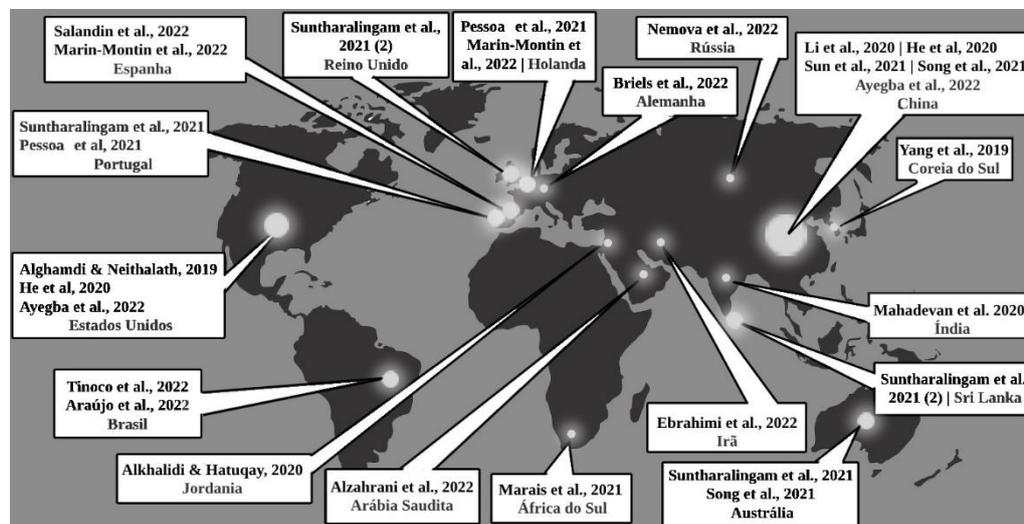


Fonte: o autor.

Observa-se que o assunto investigado é recente, com as primeiras publicações datando de 2019, e que existe um interesse crescente sobre o tema no cenário

internacional. Na Figura 4 é possível visualizar os autores, ano e local onde foram desenvolvidas as pesquisas.

Figura 4: Autores, ano e local das pesquisas



Fonte: o autor.

Os 21 artigos que compõem o portfólio bibliográfico estão distribuídos em 17 localidades, sendo a China o país com maior número de publicações (5 estudos). Além disso, é possível verificar que 7 estudos integram pesquisadores de diferentes países, como Reino Unido, Sri Lanka, Austrália e Portugal [24,27], Estados Unidos e China [22,31], Portugal e Holanda [5], Espanha e Holanda [35] e China e Austrália [26], evidenciando que o tema abordado tem promovido a cooperação e o esforço conjunto em projetos de pesquisa globais.

Para a compreensão das abordagens de pesquisa adotadas, os 21 estudos foram subdivididos em três grupos de estratégias de análise do desempenho termoenergético: a) análise isolada do bloco / painel de parede; b) análise da resposta global da edificação em 3DCP; e c) estudos com ambas abordagens. As pesquisas também foram segmentadas com base no método de análise empregado, sendo ele por simulação computacional ou experimento físico. No Quadro 1 é feita uma síntese analítica das estratégias de análises e métodos adotados nas pesquisas.

Quadro 1: Síntese analítica com a estratégia de análise e método adotado

Referência / País	Estratégia de análise		Método de análise	
	Bloco/Painel de parede isolado	Resposta global da edificação	Simulação computacional	Experimento físico
Yang et al. [17] / Coreia do Sul		X	X	
Alghamdi; Neithalath [18] / EUA	X			X
Li et al. [19] / China	X	X	X	X
Mahadevan et al. [20] / Índia		X	X	
Alkhalidi; Hatuqay [21] / Jordania	X	X	X	
He et al. [22] / EUA e China	X	X	X	
Marais et al. [23] / África do Sul	X		X	X
Suntharalingam et al. [24] / Reino Unido, Sri Lanka e Portugal	X		X	
Sun et al. [25] / China		X		X
Song et al. [26] / China e Austrália	X		X	X
Suntharalingam et al. [27] / Reino Unido, Sri Lanka e Austrália	X		X	
Alzahrani et al. [28] / Arábia Saudita	X		X	
Nemova et al. [29] / Rússia	X	X	X	X
Ebrahimi et al. [30] / Iran		X	X	
Ayegba et al. [31] / China e EUA		X	X	
Salandin et al. [32] / Espanha		X	X	X
Briels et al. [33] / Alemanha	X		X	X
Araújo et al. [34] / Brasil	X			X
Marin-Montin et al. [35] / Espanha e Holanda	X		X	X

Fonte: o autor.

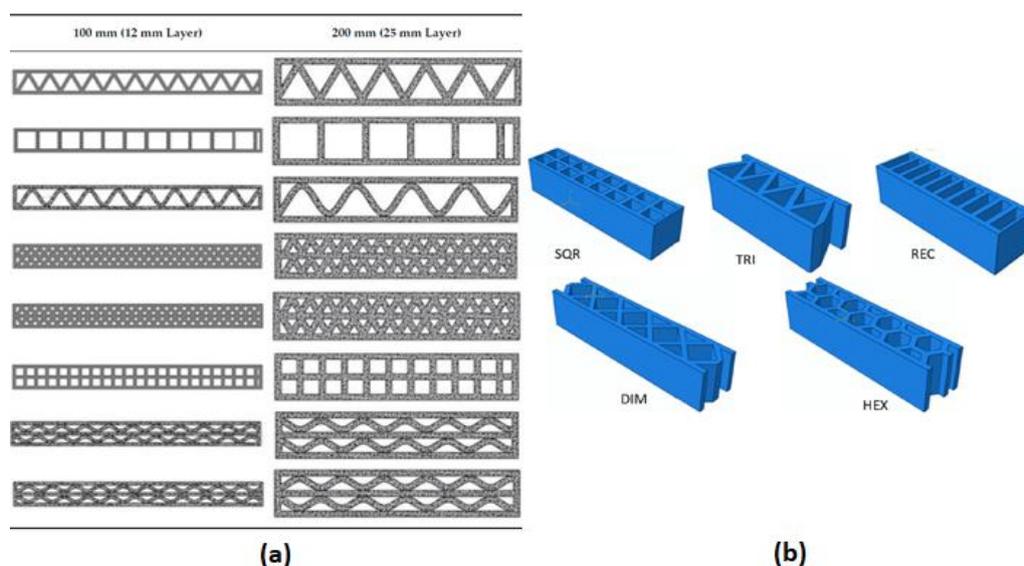
A partir da análise do Quadro 1 é possível verificar que a maioria dos estudos (47%) analisou isoladamente o desempenho de blocos / painéis de parede [18,23,24,26-28,33-35], sem interferência de outros componentes construtivos e da configuração espacial de um ambiente. Já 32% consideraram a resposta global da edificação, seja a partir de experimentos físicos ou computacionais [17,20,25,30-32]. Além disso, algumas pesquisas integram essas duas abordagens, analisando o material cimentício impresso de uma maneira mais completa [19,21,22,29]. A seguir, tem-se os principais pontos destacados nos estudos.

a) Estudos com abordagem para a análise isolada do bloco / painel de parede

De modo geral, foi observado que, além da composição do material de impressão, outros parâmetros de projeto influenciam significativamente o comportamento térmico das paredes de 3DCP. Por exemplo, a inclusão de cavidades de ar ou materiais de preenchimento para isolamento, a variação nas espessuras das camadas e da seção da parede e a geometria da seção transversal são algumas estratégias avaliadas para melhorar o desempenho térmico. Nesse sentido, alguns estudos se concentram na avaliação do efeito das configurações de cavidade das paredes de 3DPC no desempenho térmico geral da parede. Marais et al. [23] realizaram um estudo em paredes de 3DPC com cavidades retangulares, concluindo que o efeito da radiação da cavidade e, em menor escala, da convecção, tem influência significativa nos resultados de temperatura. Suntharalingam et al. [24,27] avaliaram por simulação diferentes geometrias de seção de parede (Figura 5a), com e sem isolamento, variando a

espessura da parede e o material de impressão, porém, as frações de volume de material cimentício em seus modelos não eram as mesmas. A pesquisa de Alzahrani et al. [28] supera esse quesito, analisando por simulação paredes de 3DPC com diferentes geometrias de seção (Figura 5b) e frações de volume de material iguais, comparando as formas examinadas com os materiais de construção convencionais. De acordo com o estudo, a alteração da geometria da seção da parede influencia a condutividade térmica, sendo a geometria do tipo diamante (DIM) a de menor condutividade.

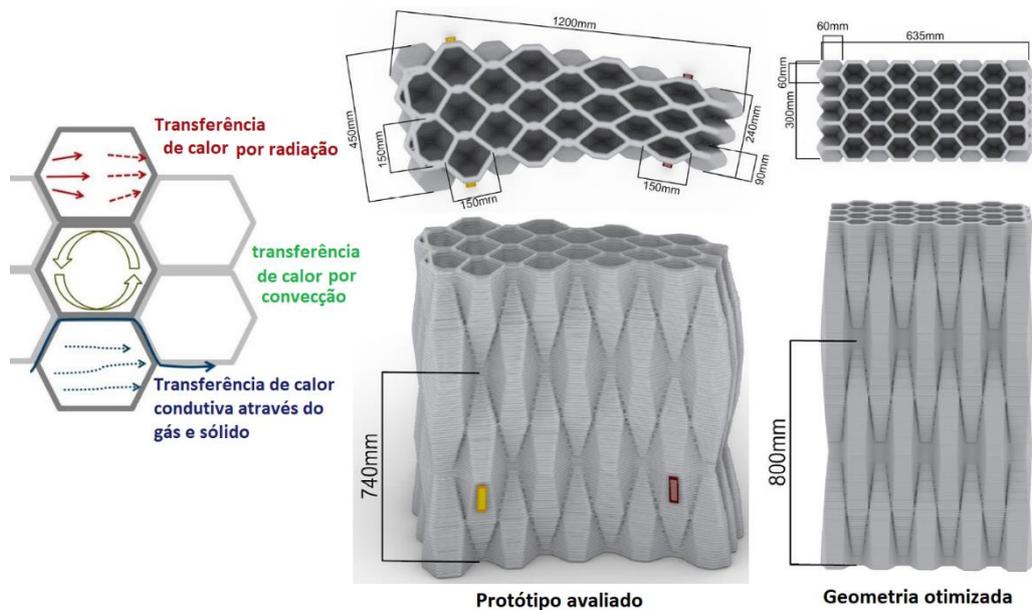
Figura 5: (a) Configurações de parede analisadas por Suntharalingam et al. [24] e (b) Configurações analisadas por AlZahrani et al. [28]



Fonte: adaptado de [24,28].

Briels et al. [33] desenvolveram um concreto leve otimizado para extrusão, criando uma estrutura celular interna (Figura 6) com o objetivo de melhorar o desempenho térmico da parede e reduzir o consumo de materiais. Por meio de simulações de transferência de calor 2D (método de elementos finitos) e 3D (método de célula finitas) e de um estudo experimental por medições de fluxo de calor em um protótipo concluíram que a proporção de material sólido em relação ao ar é o principal fator de influência sobre a condutividade térmica, além do diâmetro da célula, da altura da célula e da espessura da parede da célula. Além disso, por meio de uma otimização geométrica feita com base nas análises foi possível reduzir a transmitância térmica em até 24%, chegando a 0,58 W/m² K.

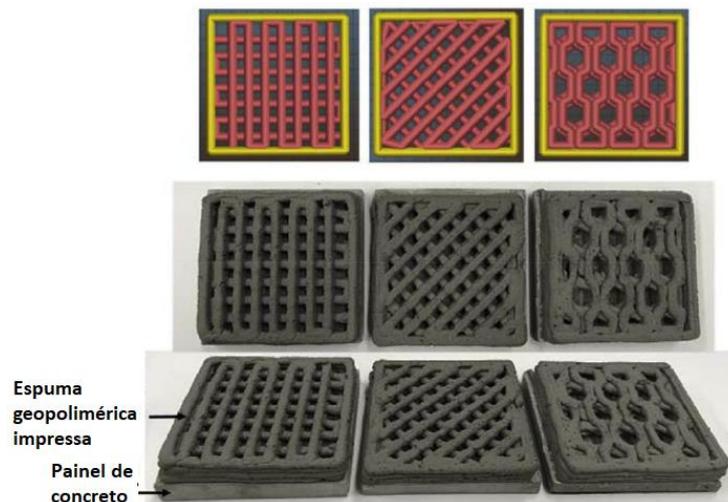
Figura 6: Protótipo avaliado por Briels et al [33] e geometria otimizada



Fonte: adaptado de [33].

Os estudos de Alghamdi & Neithalath [18], Song et al. [26] e Marin-Montin et al. [35] utilizaram uma abordagem diferente das anteriores, que estavam voltadas para a análise de diferentes geometrias de seção de parede, com e sem isolamento, variando ou não a composição do material cimentício, considerando a impressão das paredes em camadas. Alghamdi & Neithalath [18] desenvolveram um estudo experimental físico para analisar o desempenho térmico de uma espuma geopolimérica impressa em 3D, utilizada como material de preenchimento de um painel de parede de concreto sanduíche (Figura 7), reduzindo a condutividade térmica desse painel através da substituição do material isolante comercial por uma camada de espuma com geometrias que são possibilitadas pelo 3DCP.

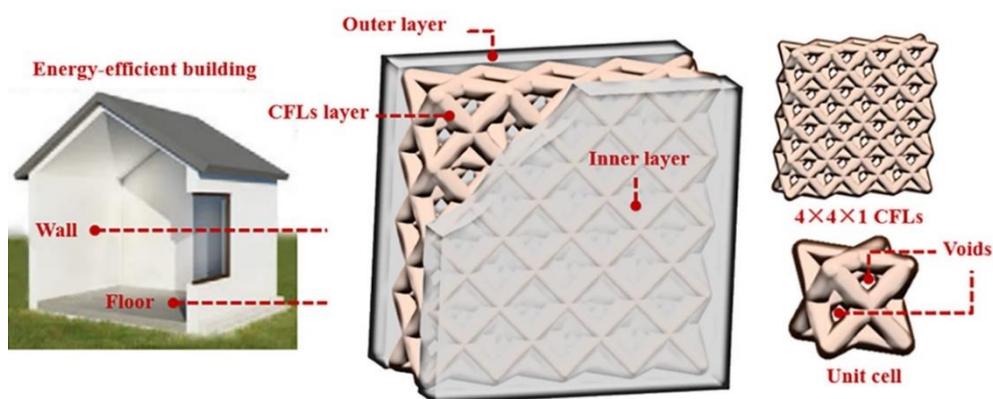
Figura 7: Diferentes composições geométricas usando espuma impressa em 3D



Fonte: adaptado de [18].

Song et al. [26] também realizaram um estudo experimental físico para determinar a condutividade térmica de uma nova categoria de material cimentício inspirado em treliça (FCLM). A rede de treliça polimérica foi impressa com estereolitografia (SLA), sendo preenchida com um material cimentício composto por cimento de sulfato-aluminato, micro cinzas volantes, areia fina de sílica e aditivo redutor de água à base de ácido β -naftalenofônico. Segundo os autores, a baixa condutividade térmica do FCLM ($0,272 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) é atribuída à característica da estrutura, que tem alta porosidade e é composta por várias treliças. Na Figura 8 pode-se visualizar uma possível aplicação de um sistema de construção que incorpora os FCLMs.

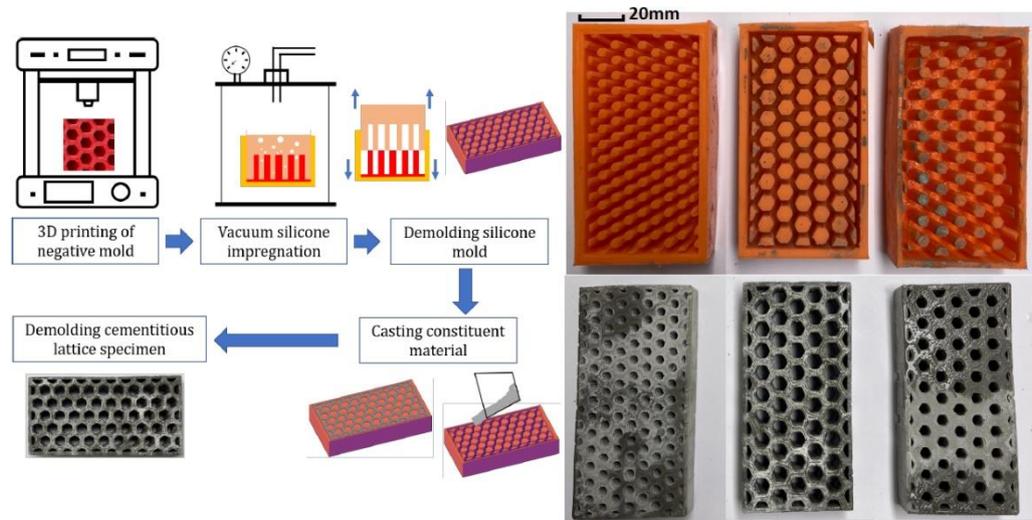
Figura 8: Exemplo de sistema de construção com FCLMs.



Fonte: adaptado de [26].

Marin-Montin et al. [35] avaliaram, por meio de simulação computacional e estudo experimental físico, blocos com diferentes tamanhos de células (vazios), denominados HEXCEM (Figura 9), feitos com uma matriz cimentícia com adição de material de mudança de fase microencapsulado em diferentes frações de volume (V_f) para aumentar o armazenamento de calor. O método de elementos finitos foi utilizado para caracterizar numericamente as misturas e criar uma estrutura de simulação, sendo feita uma análise térmica dos blocos usando uma configuração de placa quente e uma câmara térmica FLIR A320. Os resultados obtidos indicam que o HEXCEM tem benefícios como: melhor isolamento térmico, redução do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa e redução do peso específico. Além disso, o material de mudança de fase microencapsulado, dentro da temperatura de transição de fase, pode levar a um atraso térmico de 1,8 x para $V_f = 10\%$ e de 3,4 x para $V_f = 30\%$.

Figura 9: Passos da produção dos blocos HEXCEM com diferentes tamanhos de vazios



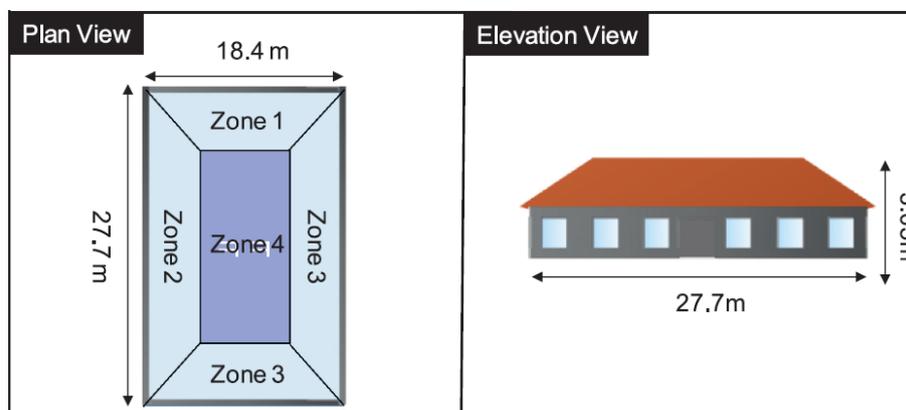
Fonte: adaptado de [35].

b) Estudos com abordagem considerando a resposta global da edificação em 3DCP

Dentre os estudos com abordagem de análise do desempenho termoenergético considerando a resposta global da edificação, a maior parte utilizou como método de análise a simulação computacional [17,20,30,31].

O estudo de Yang et al. [17] teve como objetivo provar que a aplicação de um material de alto armazenamento de calor pode complementar as condições de isolamento térmico de uma edificação feita em 3DCP. Para isso, utilizou um método dinâmico de análise de transferência de calor por simulação para comparar diferentes composições de materiais, incorporando um material de mudança de fase e *Loess*, e identificou que o aumento do consumo de energia pode ser minimizado pelo emprego de um sistema híbrido de armazenamento de calor. A simulação foi feita com o software Energy Plus, utilizando um edifício de referência (escritório pequeno ASHRAE 90.1) para realizar a modelagem e avaliação do desempenho energético (Figura 10).

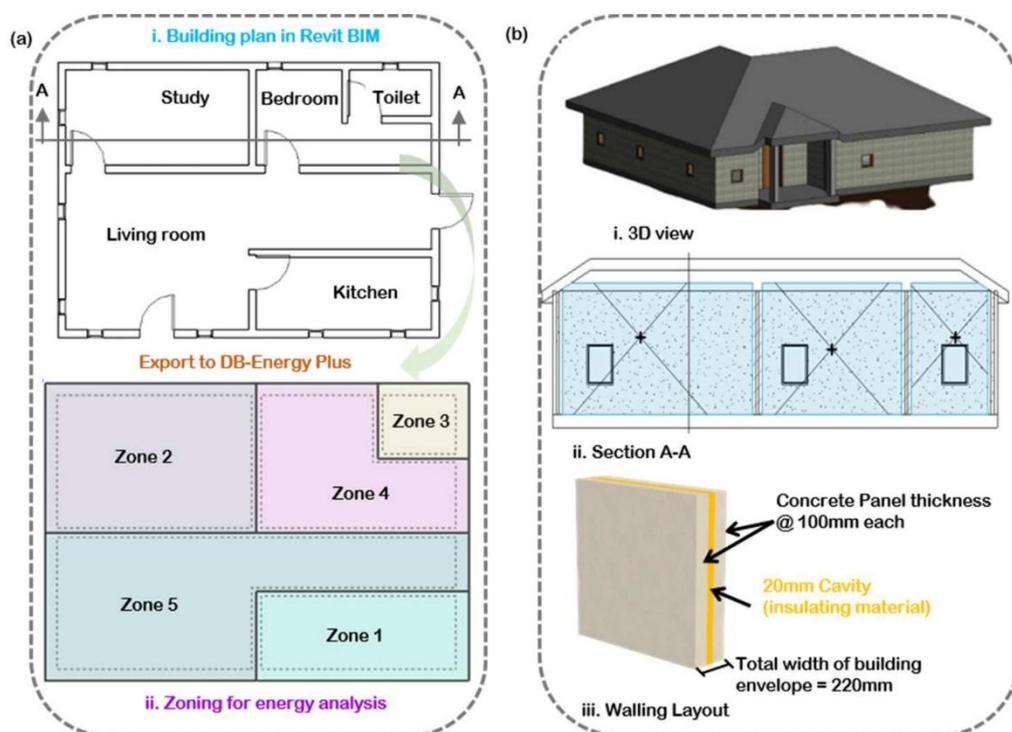
Figura 10: Características do edifício modelado por Yang et al [17].



Fonte: [17].

O trabalho de Ebrahimi et al. [30] também utilizou um material de mudança de fase e fez uma análise por simulação para calcular a carga térmica de um edifício com dois tipos de cimento (óxido de magnésio reativo e sulfoaluminato de cálcio). Já Ayebe et al [31] analisou uma edificação por simulação (Figura 11a e b) para comparar a eficiência energética, a emissão de carbono operacional e o conforto térmico de vedações em 3DCP com diferentes composições de material cimentício, avaliando vedações com cavidade de ar comparadas com a adição de diferentes isoamentos. Segundo os autores, o isolamento melhora consideravelmente o desempenho energético do edifício, sendo identificado maior potencial de economia de energia das paredes com cimento projetado reforçado com fibra e isolamento de poliuretano.

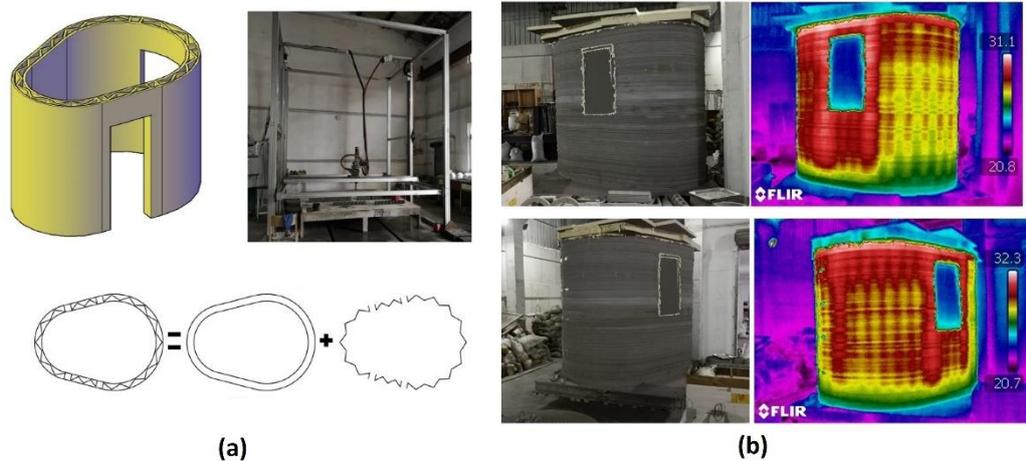
Figura 11: (a) Planta baixa do edifício e zonas; (b) Perspectiva, Corte e Layout das paredes.



Fonte: [31].

Em comparação com essas pesquisas, que avaliaram o desempenho global da edificação por simulação computacional, os estudos de Sun et al. [25] e Salandin et al. [32] analisaram um protótipo e um edifício impressos a partir de experimentos físicos. Sun et al. [25], testaram experimentalmente o desempenho térmico das paredes de um protótipo feito em 3DPC (Figura 12a). Após construído, o protótipo ficou 18 meses dentro de uma fábrica sem exposição às intempéries e as análises foram feitas pelo método de termografia por infravermelho (Figura 12b) e por monitoramento com sensores HOBO U12-012, medindo a temperatura e a umidade relativa. Os autores identificaram uma distribuição não uniforme de temperatura pela parede do protótipo, que foi atribuída às variações no caminho de impressão e à geometria da seção transversal.

Figura 12: a) Esquema do protótipo e impressora; b) Imagem termográfica e visual



Fonte: adaptado de [25].

Salandin et al. [32] investigaram o desempenho térmico da primeira casa em 3DCP feita na Espanha (Figura 13). As análises foram realizadas por medições in loco, utilizando dois dispositivos Testo 635 para medir a transmitância térmica. O estudo foi complementado por simulações para avaliação do ciclo de vida da edificação, comparando a casa com outras tipologias de parede (blocos de alvenaria e de concreto). Segundo os autores, a casa apresentou um bom desempenho térmico, com transmitância térmica média de $0,24 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, adequada a todas as zonas climáticas da Espanha. Porém, destacam que são necessários estudos focados no desenvolvimento de materiais cimentícios mais leves e com menos cimento, pois a análise do ciclo de vida mostrou que a casa em 3DCP não foi uma alternativa mais sustentável que as construções convencionais.

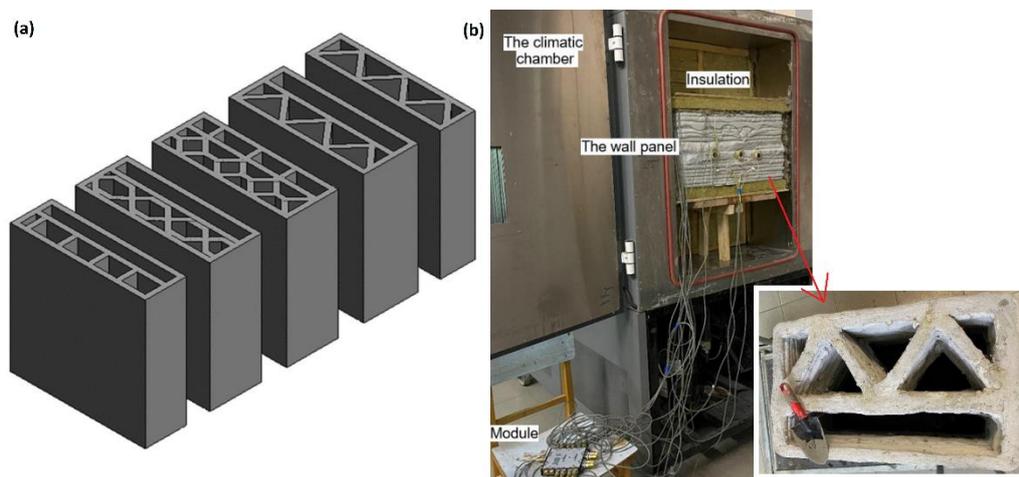
Figura 13: Casa com e sem acabamento e planta baixa com os dispositivos de medição



Fonte: adaptado de [32].

Nemova et al. [29] avaliaram diferentes geometrias de seção (Figura 16a), com e sem isolamento, mantendo a mesma composição de material. Porém, em comparação com os estudos anteriores, complementaram as análises por simulação com um estudo experimental (Figura 16b), avaliando uma amostra em uma câmara climática e fazendo uma simulação energética de um edifício com diferentes configurações de parede.

Figura 16: (a) Configurações de parede analisadas e (b) Estudo experimental



Fonte: adaptado de [29].

De modo geral, observou-se que os estudos avaliados utilizam diferentes métodos de análise termoenergética para avaliar o desempenho do 3DCP, explorando principalmente a simulação computacional [17,20-22,24,27,28,30,31] em comparação com os estudos com experimentos físicos [18,25,34]. Além disso, um número considerável de pesquisas integram esses dois tipos de análise [19,23,26,29,32,33,35].

Com relação à simulação, a maior parte das pesquisas utilizam o método dos elementos finitos [17,23,24,27-29,33,35] e um estudo aplica o método de células finitas [33]. Os principais pacotes e *softwares* utilizados são o *EnergyPlus* [17,19,21,31] e o *FEM ABAQUS* [23,24,27,28], mas alguns estudos também utilizam o *Design Builder* [30,31], *Sefaira* [20], *Green Building Studio* [21] e *ANSYS CFX* [29].

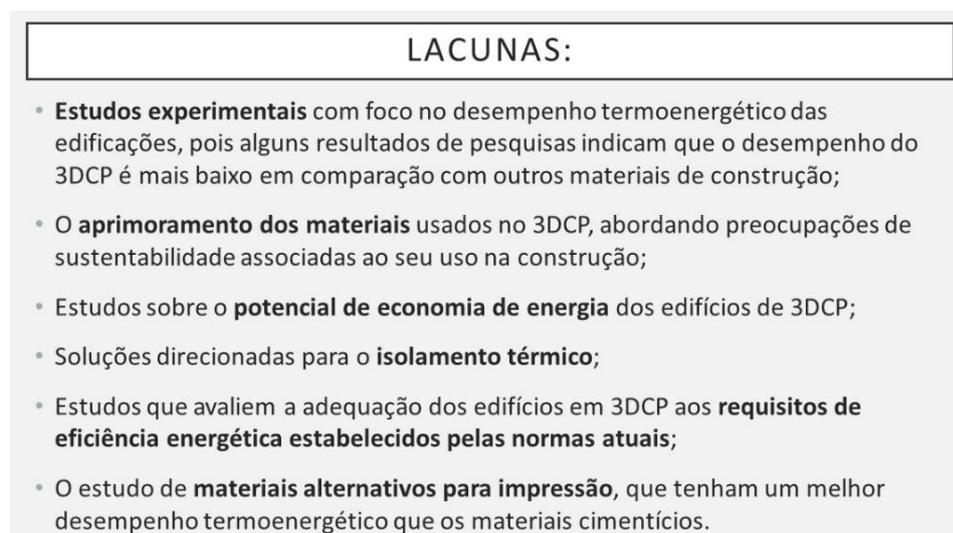
Com relação aos experimentos físicos, algumas pesquisas utilizam o método da placa quente protegida (ASTM C 177) [18], o método de fonte de plano quente (HFM 436) [19,26] ou uma adaptação do método da caixa quente protegida (NBR 6488) [34] para determinar a condutividade e a transmitância térmica das paredes em 3DCP. Além disso, alguns estudos realizam a análise e monitoramento de edifícios em 3DCP utilizando a termografia por infravermelho e sensores *HOB0 U12-012* para medir temperatura e umidade relativa [25] e dispositivos *Testo 635* para medir a transmitância térmica [32]. Outros recursos utilizados para análises térmicas são a câmara climática [29]; a câmera térmica *FLIR A320* e o *software ThermaCAM Researcher Pro* [35].

Além desses estudos, sistematizados no Quadro 1 e discutidos até aqui, duas pesquisas realizaram uma revisão sistemática da literatura [5,36]. Pessoa et al. [5] identificaram três principais caminhos a serem seguidos para melhorar o desempenho térmico das paredes em 3DCP: 1) aplicação de isolamento térmico nos vazios internos das

camadas; 2) impressão de diferentes camadas ao mesmo tempo com diferentes bicos de extrusão e; 3) alteração da composição do material de impressão. Por outro lado, Tinoco et al. [36] concluíram que os principais impactos associados à impressão 3D estão relacionados ao consumo de cimento, ao transporte de matérias-primas e ao consumo de eletricidade pelo braço robótico.

Por fim, a Figura 17 indica algumas lacunas do conhecimento apontadas pelos estudos, que sinalizam novas perspectivas para futuras pesquisas envolvendo o tema.

Figura 17: Lacunas do conhecimento



Fonte: autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou os principais métodos de análise termoenergética utilizados para avaliar o desempenho do 3DCP aplicado no ambiente construído. Observou-se estudos substanciais que analisam aspectos relativos à composição do material cimentício e a geometria da seção da parede, avaliando a incorporação de material isolante nos vazios e estabelecendo, em alguns casos, uma análise comparativa com outros sistemas construtivos.

Destaca-se que, os estudos com enfoque no bloco / painel de parede de modo isolado concentram suas análises em experimentos físicos para determinar a condutividade térmica de amostras impressas e realizar medições de fluxo de calor, avaliando, em muitos casos, a composição do material e a configuração da parede. Também realizam análises por simulação computacional, para determinar o efeito do número, da geometria e do tamanho das cavidades em diferentes configurações de paredes, variando ou não a composição do material de impressão, com e sem isolamento nas cavidades. Já os estudos que apresentam uma abordagem para a resposta global da edificação, além de avaliarem aspectos relativos a composição do material e à geometria da seção da parede, também consideram a configuração espacial do edifício e seu desempenho para diferentes zonas climáticas mundiais, determinando, em alguns casos, as melhores opções de material e geometria de parede considerando o

contexto de implantação da edificação. Além disso, observou-se a necessidade de mais pesquisas que avaliem por meio de estudos experimentais o desempenho termoenergético de edifícios / protótipos físicos, pois apenas 2 dos artigos analisados avaliaram esse tipo de situação.

Por fim, observa-se que a pesquisa e o aprimoramento no campo do 3DCP estão evoluindo rapidamente, colaborando para que ele se torne uma tecnologia de destaque no setor da construção. Entretanto, destaca-se a necessidade de que os edifícios em 3DCP sejam eficientes térmica e energeticamente, pois esses parâmetros têm grande influência na sustentabilidade do ambiente construído. Sendo assim, são necessárias mais pesquisas com esse enfoque e que avaliem também outros materiais como alternativa aos materiais cimentícios analisados neste estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a bolsa de pós-doutorado concedida pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (168166/2022-4) em parceria com a Fundação Araucária a um dos autores desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global energy & CO2 status report**. 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>. Acesso em: 23 mai. 2024.
- [2] AL-OBAIDI, K. M. *et al.* Biomimetic building skins: An adaptive approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 1472–1491, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.028>
- [3] ALHUMAYANI, H. *et al.* Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 270, p. 122463, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122463>
- [4] WENG, Y. *et al.* Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 121245, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121245>
- [5] PESSOA, S. *et al.* 3D printing in the construction industry-A systematic review of the thermal performance in buildings. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 141, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110794>.
- [6] NGO, T.D. *et al.* Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. **Compos. B Eng.** v. 143, p. 172–196, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- [7] PAUL, S.C. *et al.* A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects. **Rapid Prototyp. J.** v. 24, p. 784–798, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2016-0154>.
- [8] LI, V.C. *et al.* On the emergence of 3D printable Engineered, strain hardening cementitious composites (ECC/SHCC). **Cement Concr. Res.** V. 132, p. 106038, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106038>.

- [9] LU, B. A systematical review of 3D printable cementitious materials. **Construct. Build. Mater.** v. 207, p. 477–490, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144>.
- [10] KHAN, S.A.; KOÇ, M.; AL-GHAMDI, S.G. Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: a systematic review for built environmental applications. **J. Clean. Prod.** v. 303, p. 127027, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127027>.
- [11] HOSSAIN, M.A. *et al.* A review of 3D printing in construction and its impact on the labor market. **Sustainability** v. 12, p. 1–21, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12208492>.
- [12] TOBI, A.L.M. *et al.* Cost viability of 3D printed house in UK. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Institute of Physics Publishing, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/319/1/012061>.
- [13] ZHANG, X. *et al.* Large-scale 3D printing by a team of mobile robots. **Autom. Construct.** v. 95, p. 98–106, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.08.004>.
- [14] SOLTAN, D.G.; LI, V.C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. **Cement Concr. Compos.** v. 90, p. 1–13, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017>.
- [15] XIA, M.; SANJAYAN, J. Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications, **Mater. Des.** v. 110, p. 382–390, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.07.136>.
- [16] FERENHOF, H. A.; FERNANDES, R. F. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SFF. **Revista ACB**, Florianópolis, v. 21, n. 3, p. 550–563, 2016. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1937.2401/1>.
- [17] YANG, S. *et al.* Novel proposal to overcome insulation limitations due to nonlinear structures using 3D printing: Hybrid heat-storage system. **Energy and Buildings**, v. 197, p. 177–187, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.048>.
- [18] ALGHAMDI, H.; NEITHALATH, N. Synthesis and characterization of 3D-printable geopolymeric foams for thermally efficient building envelope materials. **Cement & Concrete Composites**, v. 104, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103377>.
- [19] LI, L. *et al.* 3D face-centered-cubic cement-based hybrid composites reinforced by tension-resistant polymeric truss network. **Automation in Construction**, v. 120, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103380>.
- [20] MAHADEVAN, M.; FRANCIS, A.; THOMAS, A. A simulation-based investigation of sustainability aspects of 3D printed structures. **Journal of Building Engineering**, v. 32, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101735>.
- [21] ALKHALIDI, A.; HATUQAY, D. Energy efficient 3D printed buildings: Material and techniques selection worldwide study. **Journal of Building Engineering**, v. 30, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101286>.
- [22] HE, Y. *et al.* Energy-saving potential of 3D printed concrete building with integrated living wall. **Energy and Buildings**, v. 222, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110110>.
- [23] MARAIS, H. *et al.* Computational assessment of thermal performance of 3D printed concrete wall structures with cavities. **Journal of Building Engineering**, v. 41, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102431>.
- [24] SUNTHARALINGAM, T. *et al.* Energy Performance of 3D-Printed Concrete Walls: A Numerical Study. **Buildings**, v. 11, n. 10, p. 432, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11100432>.

- [25] SUN, J. *et al.* Experimental study on the thermal performance of a 3D printed concrete prototype building. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 241, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110965>.
- [26] SONG, J. *et al.* Lightweight and low thermal conducted face-centered-cubic cementitious lattice materials (FCLMs). **Composite Structures**, v. 263, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113536>.
- [27] SUNTHARALINGAM, T. *et al.* Numerical Study of Fire and Energy Performance of Innovative Light-Weight 3D Printed Concrete Wall Configurations in Modular Building System. **Sustainability**, v. 13, n. 4, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13042314>.
- [28] ALZHRANI, A. A.; ALGHAMDI, A. A.; BASALAH, A. A. Computational Optimization of 3D-Printed Concrete Walls for Improved Building Thermal Performance. **Buildings**, v. 12, n. 12, p. 2267, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12122267>.
- [29] NEMOVA, D. *et al.* Experimental Study on the Thermal Performance of 3D-Printed Enclosing Structures. **Energies**, v. 15, n. 12, p. 4230, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15124230>.
- [30] EBRAHIMI, M. *et al.* Investigation of thermal performance and life-cycle assessment of a 3D printed building. **Energy and Buildings**, v. 272, p. 112341, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112341>.
- [31] AYEGBA, B. O. *et al.* Resource Efficiency and Thermal Comfort of 3D Printable Concrete Building Envelopes Optimized by Performance Enhancing Insulation: A Numerical Study. **Energies**, v. 15, n. 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15031069>.
- [32] SALANDIN, A. *et al.* The First 3D-Printed Building in Spain: A Study on Its Acoustic, Thermal and Environmental Performance. **Sustainability**, v. 14, n. 20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142013204>.
- [33] BRIELS, D. *et al.* Thermal Optimization of Additively Manufactured Lightweight Concrete Wall Elements with Internal Cellular Structure through Simulations and Measurements. **Buildings**, v. 12, n. 7, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12071023>.
- [34] ARAÚJO, R. A. *et al.* Thermal performance of cement-leca composites for 3D printing. **Construction and Building Materials**, v. 349, p. 128771, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128771>.
- [35] MARIN-MONTIN, J. *et al.* Thermomechanical Performance Analysis of Novel Cement-Based Building Envelopes with Enhanced Passive Insulation Properties. **Materials**, v. 15, n. 14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15144925>.
- [36] TINOCO, M. P. *et al.* Life cycle assessment (LCA) and environmental sustainability of cementitious materials for 3D concrete printing: A systematic literature review. **Journal of Building Engineering**, v. 52, p. 104456, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104456>.