**Desempenho termoenergético de blocos e painéis em impressão 3D com materiais cimentícios: uma revisão**

***Thermo-energetic performance of 3D-printed blocks and panels with cementitious materials: a review***

**Luana Toralles Carbonari, doutora, Universidade Estadual de Londrina – UEL**

luanatcarbonari@gmail.com

**Berenice Martins Toralles, doutora, Universidade Estadual de Londrina – UEL**

toralles@uel.br

**Alexandre Ferreira Fernandes Vieira, especialista, Engenheiro Civil**

Affv2610@gmail.com

**Thalita Gorban Ferreira Giglio, doutora, Universidade Estadual de Londrina UEL**

thalita@uel.br

Número da sessão temática da submissão – [ 6 ]

**Resumo**

Este artigo apresenta uma Revisão da Literatura para explorar o cenário de pesquisa em torno da avaliação do desempenho termoenergético de blocos e painéis de impressão 3D com materiais à base de cimento. O objetivo do estudo é fornecer uma visão abrangente do estado atual da aplicação dessa tecnologia na construção. O artigo começa apresentando a metodologia de revisão aplicada, seguida de uma visão geral do portfólio bibliográfico e de uma análise e discussão dos principais resultados. As descobertas indicam que, considerando as especificidades dos materiais cimentícios impressos, vários fatores podem influenciar a melhoria do seu desempenho termoenergético, incluindo o tamanho da cavidade, a otimização da geometria, a adição de materiais isolantes, a otimização da composição do material de impressão, entre outros. Assim, este estudo é um passo importante para futuras pesquisas sobre o aprimoramento do desempenho termoenergético de elementos impressos em 3D, ajudando a consolidar um referencial para o projeto e a construção de edifícios com maior eficiência energética e menor impacto ambiental.

**Palavras-chave:** Manufatura Aditiva; Impressão 3D; Materiais Cimentícios; Desempenho de Edifícações; Conforto Térmico.

***Abstract***

*This article presents a Literature Review to explore the research landscape surrounding the evaluation of the thermo-energetic performance of 3D printing blocks and panels with cement-based materials. The aim of the study is to provide a comprehensive overview of the current state of the application of this technology in construction. The article begins by presenting the review methodology applied, followed by an overview of the bibliographic portfolio and an analysis and discussion of the main results. The findings indicate that, considering the specificities of printed cementitious materials, several factors can influence the improvement of their thermo-energetic performance, including cavity size, geometry optimisation, the addition of insulating materials, optimisation of the composition of the printing material, among others. Thus, this study is an important step for future research into improving the thermo-energetic performance of 3D printed elements, helping to consolidate a benchmark for the design and construction of buildings with greater energy efficiency and lower environmental impact.*

***Keywords:*** *Additive Manufacturing; 3D Printing; Cementitious Materials; Building Performance; Thermal Comfort.*

1. **Introdução**

A construção civil é frequentemente considerada um setor de baixa inovação tecnológica quando comparada a outras indústrias, enfrentando desafios como alto consumo energético, lentidão nos processos construtivos e o uso de técnicas ultrapassadas (Pessoa *et al.*, 2021). Além disso, esse setor é responsável por aproximadamente 38% das emissões de gases de efeito estufa, 40% da geração de resíduos sólidos e 12% do consumo de água potável. Com o crescimento da demanda por infraestrutura, a tendência é que esses impactos ambientais se intensifiquem nos próximos anos (Khan; Koç; Al-Ghamdi, 2021).

Além disso, em escala global, o resfriamento artificial representa 60% do consumo total de energia em edifícios, uma vez que o conforto térmico é uma das principais preocupações, especialmente em regiões de clima quente (Al-Obaidi *et al.*, 2017). Diante desse cenário, torna-se essencial reduzir o consumo energético das construções para mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Por isso, diversas pesquisas têm explorado soluções para edificações mais eficientes, com menor impacto ambiental e melhor desempenho térmico, além de otimizar o uso de tempo, materiais e custos, promovendo a conservação de energia e a redução das emissões de carbono (Alhumayani *et al*., 2020; Weng *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a Manufatura Aditiva (MA) tem ganhado destaque como uma tecnologia promissora, pois combina fabricação digital com processos de manufatura, sendo amplamente conhecida como impressão 3D (Ngo *et al.*, 2018; Pessoa *et al.*, 2021). A aplicação da MA na construção civil responde a desafios contemporâneos, como o desenvolvimento de cidades inteligentes, a sustentabilidade e a transformação digital, incorporando os conceitos de digitalização, automação e conectividade característicos da Indústria 4.0. Além disso, a impressão 3D na construção pode aumentar a eficiência e reduzir impactos ambientais, promovendo os princípios da economia circular (Pessoa *et al.*, 2021).

O uso dessa tecnologia com materiais cimentícios (3D Concrete Printing - 3DCP) surgiu como uma alternativa para automatizar os processos construtivos, possibilitando a impressão rápida de estruturas em escala real (Ngo *et al.*, 2018; Paul *et al.*, 2018) e, ao mesmo tempo, reduzindo o tempo de construção e a geração de resíduos (Li *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2019). Além disso, o uso de fôrmas de madeira para moldagem de concreto é desnecessário, as atividades manuais são consideravelmente reduzidas (Hossain *et al.*, 2020; Khan; Koç; Al-Ghamdi, 2021) e a 3DCP pode reduzir os custos de construção em até 35% em comparação com a construção convencional (Tobi *et al.*, 2018).

A aplicação da 3DCP em larga escala está crescendo e, portanto, sujeita a pesquisas intensivas, devido ao seu potencial disruptivo para revolucionar o setor de arquitetura, engenharia e construção. No entanto, a maioria dos estudos se concentra nas propriedades mecânicas e reológicas do material, e não na eficiência energética e no desempenho térmico do edifício. Esses aspectos têm grande influência sobre o impacto ambiental da construção e o conforto dos usuários, sendo necessário avaliá-los para garantir que a sustentabilidade ambiental não seja comprometida pelo custo e pela velocidade da construção. Portanto, a necessidade de pesquisa sobre o desempenho termoenergético do 3DCP requer mais investigações antes que essa tecnologia possa ser aplicada em larga escala na construção civil.

Diante disso, este artigo apresenta uma meta-análise para explorar o cenário de pesquisa em torno da avaliação do desempenho termoenergético de blocos e painéis de impressão 3D com materiais cimentícios, pois, segundo Hassan et al. (2024), atualmente esse é o principal material usado na construção aditiva. O objetivo do estudo é fornecer uma visão geral abrangente do estado atual, identificando as tendências predominantes e os possíveis caminhos para a inovação e o avanço. A seleção e a categorização de artigos relevantes por meio de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) são parte integrante da abordagem utilizada, contribuindo de forma exclusiva para a base de conhecimento do campo. A medida que a tecnologia de impressão 3D na construção progride, é essencial acompanhar seu desenvolvimento, o que justifica uma demanda constante por artigos de revisão que abordem os últimos avanços.

1. **Procedimentos Metodológicos**

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 (Ferenhof; Fernandes, 2016). Para realizar a RSL utilizou-se o *Systematic Search Flow* – SSF (Ferenhof; Fernandes, 2016), método não aleatório ou exploratório, que segue um procedimento metodológico que garante a repetibilidade da pesquisa, minimizando a seleção tendenciosa de documentos (Figura 1).

Uma imagem com texto, captura de ecrã

Descrição gerada automaticamente

**Figura 1: Fases e atividades do método SSF. Fonte: Ferenhof; Fernandes (2016).**

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



**Figura 2: Critérios de seleção de literatura usados na RSL. Fonte: Autores.**

1. **Resultados e Discussões**

O Quadro 1 apresenta um resumo analítico do país, ano de publicação e métodos de análise adotados nos estudos para avaliar o desempenho termoenergético dos painéis/blocos em 3DCP.

Quadro 1: Síntese analítica com o(s) método(s) de análise adotados nos estudos.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **(Referência, Ano) / País** | **Método de análise** | |
| **Simulação computacional** | **Experimento físico** |
| (Alghamdi; Neithalath, 2019) / EUA |  | **X** |
| (Marais *et al.*, 2021) / África do Sul | **X** | **X** |
| (Suntharalingam *et al.*, 2021a) / Reino Unido, Sri Lanka, Portugal | **X** |  |
| (Song *et al.*, 2021) / China, Austrália | **X** | **X** |
| (Suntharalingam *et al.*, 2021b) / Reino Unido, Sri Lanka, Austrália | **X** |  |
| (AlZahrani; Alghamdi; Basalah, 2022) / Arábia Saudita | **X** |  |
| (Briels *et al.*, 2022) / Alemanha | **X** | **X** |
| (Araujo *et al.*, 2022) / Brasil |  | **X** |
| (Marin-Montin *et al.*, 2022) / Espanha, Países Baixos | **X** | **X** |
| (Ravula; Gatheeshgar, 2023) / Reino Unido | **X** |  |
| (Gao *et al.*, 2023) / China, Países Baixos | **X** | **X** |
| (Pessoa *et al.*, 2023) / Portugal, Países Baixos |  | **X** |
| (Christen *et al.*, 2023) / África do Sul | **X** | **X** |
| (Briels *et al.*, 2023) / Alemanha | **X** |  |
| (Dey; Panda, 2023) / Índia |  | **X** |
| (Volpe *et al.*, 2023) / Portugal, Itália | **X** | **X** |
| (Cuevas *et al.*, 2023) / Alemanha, Jordânia, Polônia, Coreia do Sul, Reino Unido | **X** |  |
| (Chamatete; Yalçınkaya, 2024) / Turquia | **X** |  |
| (Bianchi *et al.*, 2024) / Itália | **X** |  |
| (Bodur *et al.*, 2024) / Turquia |  | **X** |

Fonte: Autores.

Observa-se que o assunto investigado é recente, com a primeira publicação datando de 2019, e que existe um interesse crescente sobre o tema no cenário internacional. Os 20 artigos que compõem o portfólio bibliográfico estão distribuídos em 18 localidades, sendo o Reino Unido o local com maior número de publicações (4 estudos).

Com base no Quadro 1 é possível verificar que 8 estudos adotaram como método de análise a simulação computacional, 5 estudos realizaram experimentos físicos e 7 pesquisas integram esses dois métodos de análise dos blocos/painéis de 3DCP.

A seguir, são apresentados o foco e os principais resultados dos estudos, organizados em: Quadro 2 - artigos que utilizaram como método de análise a simulação computacional, Quadro 3 – artigos que realizaram experimentos físicos e Quadro 4 – artigos que utilizaram ambas abordagens.

Quadro 2: Foco dos estudos, principais resultados e objeto de estudo, avaliados por simulação computacional.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Foco do estudo** | **Principais resultados** | **Objeto de estudo** |
| Suntharalingam *et al.* (2021b, 2021a) simularam diferentes geometrias de seção de parede, com e sem isolamento, variando a espessura da parede e o material de impressão (variando as frações de volume do material cimentício). | - A transmitância térmica diminuiu com o aumento da espessura da parede, independentemente da configuração da seção transversal.  - A adição de E-PLA nas cavidades reduziu a transmitância térmica, melhorando o desempenho térmico dos painéis de parede em todas as configurações.  - O painel de parede de seção triangular de 100 mm obteve a maior eficiência térmica. | Uma imagem com padrão, tecido, monocromático  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| AlZahrani; Alghamdi; Basalah, (2022) analisaram elementos de 3DCP com diferentes geometrias de seção, mantendo proporções iguais de vazio e material cimentício. Também fizeram uma análise comparativa com materiais de construção convencionais. | - A geometria da seção dos elementos de 3DCP influencia a sua condutividade térmica e, portanto, o desempenho térmico do edifício.  - A condutividade térmica das geometrias de preenchimento variou entre 0,122 W/(mK) (DIM) e 0,17 W/(mK) (TRI). | Uma imagem com Azul elétrico  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Ravula; Gatheeshgar (2023) avaliaram a influência de diferentes espessuras de isolamento da cavidade no desempenho termoenergético de elementos de 3DCP, variando a largura do elemento e os materiais de isolamento. | - A proporção e o tipo de isolamento tem grande influência na transmit. térmica dos elementos de 3DCP.  - O uso de E-PLA resultou em uma menor transmitância térmica.  - Foi desenvolvida uma equação para estimar a transmitância térmica de elementos de 3DCP com diferentes proporções de isolamento. | Uma imagem com texto, captura de ecrã, Paralelo, Retângulo  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Briels *et al.* (2023) investigaram 4.500 variações de elementos de fachada derivados de um layout de célula hexagonal com diferentes espessuras, executados com três processos de manufatura aditiva, material cimentício com e sem agregados leves e três estratégias de isolamento diferentes. | - 313 configurações de fachada obtiveram transmitância térmica inferior a 0,28W/(m2K), sendo a maioria referente à manufatura aditiva do tipo 3DCP (80%).  - A adição de material isolante nas cavidades demonstrou ser a estratégia de isolamento mais eficaz. | Uma imagem com esboço, diagrama, desenho, design  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Cuevas *et al.* (2023) desenvolveram um elemento de parede de 3DCP com propriedade isolante para uso em envoltórias de edifícios. O desempenho térmico de 7 diferentes tipologias foi avaliado usando uma mistura de controle e uma mistura leve com microesferas termoplásticas expandidas (ETM). | - Quanto maior o número de câmaras fechadas, menores serão os valores de transferência de calor.  - O principal fator que rege o desempenho térmico é o material de preenchimento dos vazios.  - Os elementos avaliados podem ser usados em climas quentes (valor U menor que 0,7 W/(m2K) - com espuma de concreto) e em climas frios (valor U menor que 0,2 W/(m2K) - preenchimento com espuma de poliuretano). | Uma imagem com texto, captura de ecrã, design  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Chamatete; Yalçınkaya (2024) examinaram o impacto da geometria da seção no desempenho térmico do envelope 3DCP. Três geometrias foram avaliadas (mesma espessura, comprimentos de contorno, vazios, % de isolamento). Foram estudados os efeitos da largura do filamento e do uso de esferas de poliestireno expandido e perlita de preenchimento solto. | - O desempenho térmico em condições de ar estagnado é influenciado principalmente pela área vazia (quanto maior pior o desempenho).  - Quando as cavidades são preenchidas com isolamento, o desempenho térmico tem maior influência das pontes térmicas devido às propriedades geométricas.  - A eficiência térmica do material de isolamento varia entre 26 e 44%, devido às pontes térmicas. | Uma imagem com texto, diagrama, file, Tipo de letra  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Bianchi *et al.* (2024) estudaram as propriedades térmicas de elementos obtidos com o uso de três tecnologias de manufatura aditiva, aplicadas em: construção monolítica, pré-fabricação e fôrmas finas impressas em 3D para componentes de concreto fundido. | À medida que o número de sinusóides no enchimento e a espessura dos elementos aumentam, observa-se um acréscimo no uso de materiais e nos impactos. Portanto, as paredes finas produzidas com pré-fabricação em 3D e com fôrmas baseadas em *Fused Deposition Modelling* - FDM podem reduzir os impactos, mantendo o mesmo desempenho térmico. | Uma imagem com texto, padrão  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |

Fonte: Autores.

De modo geral, observa-se que os estudos sistematizados no Quadro 2, que utilizam como método de avaliação a simulação computacional, concentram suas análises principalmente na geometria da seção do elemento em 3DCP, verificando a proporção entre as cavidades de ar, o tipo e espessura do material de isolamento incorporado nas cavidades e a composição e espessura do material cimentício usado na impressão.

Os resultados indicam que esses parâmetros (geometria da seção, composição do material de impressão, cavidades de ar e adição de materiais de isolamento térmico) influenciam significativamente o comportamento térmico dos elementos de 3DCP. Suntharalingam *et al.* (2021b, 2021a), por exemplo, observaran que a transmitância térmica diminui com o aumento da espessura da parede, independente da configuração da seção tranversal, e que a adição de material isolante nas cavidades melhorou o desempenho térmico dos elementos em todas as configurações avaliadas. No entanto, sinalizam que o elemento que obteve a maior eficiência térmica foi o de seção triangular com espessura de 100 mm. O estudo de AlZahrani e Alghamdi; Basalah (2022) também conclui que a geometria da seção dos elementos de 3DCP influencia na sua condutividade térmica e, portanto, o desempenho térmico do edifício, porém em sua pesquisa a seção com geometria do tipo diamante foi a que obteve a menor condutividade térmica.

Por outro lado, Ravula e Gatheeshgar (2023) centraram seus estudos na largura do elemento de 3DCP e no material de isolamento térmico, conlcuindo que a proporção e o tipo material isolante tem grande influência na transmitância térmica dos elementos, sendo o E-PLA o que resultou em uma menor transmitância térmica. De fato, a relevância da adição de material isolante nas cavidades dos elementos de 3DCP é um dos pontos mais destacados nos estudos e demonstrou ser uma das estratégias de isolamento térmico mais eficaz ((Briels *et al.*, 2023; Cuevas *et al.*, 2023). No entanto, Chamatete e Yalçınkaya (2024) atentam para a influência das pontes térmicas no desempenho dos elementos de 3DCP, que ocorre devido a influência da geometria da seção do elemento, sinalizando que a eficiência térmica do material de isolamento varia entre 26 e 44%, devido às pontes térmicas.

Quadro 3: Foco dos estudos, principais resultados e objeto de estudo, avaliados por experimento físico.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Foco do estudo** | **Principais resultados** | **Objeto de estudo** |
| Alghamdi; Neithalath (2019) analisaram o desempenho térmico de matrizes de geopolímeros à base de cinzas volantes espumadas imprimíveis em 3D para isolamento térmico. As matrizes foram usadas como material de enchimento de um painel de parede sanduíche de concreto. | A espuma geopolimérica atingiu condutividades térmicas de 0,15 a 0,25 W/(mK) (inferior aos níveis dos materiais de isolamento usuais). No entanto, é possível reduzir esses valores por meio da arquitetura cuidadosa da espuma geopolimérica, que é possibilitada pela impressão 3D (substituindo os materiais isolantes comerciais). | Uma imagem com Eletrodoméstico de cozinha, eletrodoméstico, máquina de waffles  Descrição gerada automaticamente |
| Araujo *et al.* (2022) investigaram a substituição de agregados finos tradicionais por agregado leve de argila expandida (LECA) no desenvolvimento de um compósito leve à base de cimento para impressão 3D, visando melhorar o isolamento térmico. | - A substituição dos agregados convencionais pelo LECA aumentou o isolamento térmico sem afetar as propriedades estruturais essenciais, como a resistência mecânica e a porosidade.  - A substituição de 100% diminuiu a condutividade térmica de 1,19 W/(mK) para 0,68 W/(mK). | Uma imagem com captura de ecrã, design  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Pessoa *et al.* (2023) analisaram as propriedades térmicas e hídricas do material à base de cimento usado para construir aditivamente a primeira casa impressa em 3D do projeto Milestone. | O material cimentício apresentou uma densidade seca de 2.060 kg/m3, uma condutividade térmica de 1,33 W/(mK) e um desempenho higrotérmico semelhante ao do concreto tradicional, indicando a necessidade de materiais de isolamento térmico adicionais para um desempenho térmico adequado. | Uma imagem com casa de banho, banheira, Material composto, parede  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Dey; Panda (2023) compararam o desempenho térmico de painéis de sólidos e ocos impressos em 3D contendo duas geometrias diferentes de cavidade, com e sem material de isolamento, para serem usados potencialmente como elementos de parede. | - A introdução de material de isolamento nas cavidades ocas resultou em uma temperatura interna semelhante à do painel sólido, sem alterar muito o seu peso.  - A criação de cavidades nos painéis de 3DCP pode ser vantajosa para o desempenho térmico, pois pode reduzir a temp. da superfície interna. | Uma imagem com Retângulo, design  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Bodur *et al.* (2024) avaliaram o comportamento de compósitos de cimento leve impressos em 3D e emborrachados (3DLC) reforçados com microattapulgita bruta (ATP) e microfibras de aço (MSF), usando agregados de resíduos de pneus como substituto do agregado fino. | A maior condutividade térmica foi obtida na mistura de 3DLC contendo 10% de ATP e 2% de MSF, um aumento de 3,64% na condutividade térmica quando comparada à mistura correspondente sem ATP. A menor condutividade foi encontrada nas misturas de 3DLC contendo 20% de ATP e 0% de MSF. | Uma imagem com banana, ferramenta, pessoa, interior  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |

Fonte: Autores.

Conforme pode ser observado no Quadro 3, os estudos experimentais físicos estão menos focados em analisar uma ampla variedade de geometrias de seção e possibilidades de materiais de isolamento para os elementos de 3DCP, centrando-se, por exemplo, na avaliação da composição do material cimentício com o objetivo de melhorar seu desempenho térmico, sem afetar as propriedades estruturais do material. Araujo *et al.* (2022), por exemplo, substituiram os agregados finos tradicionais por agregado leve de argila expandida (LECA) e verificaram que essa substituição aumentou o isolamento térmico do material de impressão sem afetar as propriedades estruturais essenciais, como a resistência mecânica e a porosidade. No estudo, a substituição de 100% dos agregados finos tradicionais por LECA diminuiu a condutividade térmica do material de 1,19 W/(mK) para 0,68 W/(mK). Já o estudo de Bodur *et al.* (2024) avaliou o comporamento de compósitos de cimento leve e emborrachados (3DLC) impressos em 3D reforçados com microattapulgita bruta (ATP) e microfibras de aço (MSF), usando agregados de resíduos de pneus como substituto do agregado fino. Os autores verificaram uma menor condutividade nas misturas de 3DLC contendo 20% de ATP e 0% de MSF.

Assim como nos estudos avaliados por simulação computacional, observa-se uma preocupação com a incorporação de materiais de isolamento térmico nos elementos de 3DCP para alcançar um desempenho térmico adequado nas edificações feitas com essa tecnologia. O estudo de Dey e Panda (2023), por exemplo, comparou o desempenho térmico de painéis sólidos e ocos feitos em 3DCP e verifiou que a introduçção de material de isolamento nas cavidades resultou em uma temperatura interna semelhante a do painel sólido, sem alterar muito o seu peso. Também concluiu que a criação de cavidades nos painéis de 3DCP pode ser vantajosa para o desempenho térmico, pois pode reduzir a temperatura da sua superfície interna. De outra parte, Alghamdi e Neithalath (2019) desenvolveram matrizes de geopolímero espumadas à base de cinzas volantes para serem usadas em impressão 3D como material de isolamento térmico de painéis de parede sanduíche. Os autores concluíram que esse material pode ter um desempenho melhor que os materiais isolantes comerciais graças às possibilidades geometricas que são possibilitadas pela impressão 3D.

Quadro 4: Foco dos estudos, principais resultados e objeto de estudo, avaliados por simulação computacional e experimento físico.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Foco do estudo** | **Principais resultados** | **Objeto de estudo** |
| Marais *et al.* (2021) analisaram o desempenho térmico de dois tipos de materiais de impressão (concreto com espuma e concreto de alto desempenho), avaliando um painel com cavidades retangulares. | - A geometria da cavidade deve ser definida com base nas propriedades do material de impressão.  - O efeito da radiação e, em menor grau, da convecção da cavidade tem uma influência significativa no desempenho térmico do elemento.  - O aumento do número de cavidades melhora o isolamento térmico para a mesma proporção de cavidade por área impressa. | Uma imagem com esboço, captura de ecrã, design, arte  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Song *et al.* (2021) determinaram a condutividade térmica de uma nova categoria de material cimentício inspirado em treliça (FCLM), integrando o 3DCP e a tecnologia de fundição tradicional. | A condutividade térmica relativamente baixa do FCLM (0,272 W m-1 K-1 a 20 °C) é atribuída principalmente à característica da estrutura, que tem uma alta porosidade e é composta por várias treliças. | Uma imagem com padrão, origami  Descrição gerada automaticamente |
| Briels *et al.* (2022) desenvolveram um concreto leve otimizado para extrusão, criando uma estrutura celular (tetrakaidecahedron) com o objetivo de melhorar o desempenho térmico do elemento de 3DCP e reduzir o consumo de material. | - A proporção de material sólido em relação ao ar dentro das células é o principal fator que influencia a condutividade térmica, juntamente com o diâmetro da célula, sua altura e a espessura da parede da célula.  - Por meio da otimização geométrica, foi possível reduzir a transmitância térmica em até 24%, chegando a 0,58 W/(m2K). | Uma imagem com padrão  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Marin-Montin *et al.* (2022) avaliaram blocos com diferentes tamanhos de células (vazios), denominados HEXCEM, feitos com uma matriz cimentícia com a adição de materiais de mudança de fase microencapsulados em diferentes frações de volume (Vf) para aumentar o armazenamento de calor. | - O HEXCEM obteve um melhor isolamento térmico, uma redução no consumo de energia e nas emissões de gases de efeito estufa e uma redução no peso específico do bloco.  - O material de mudança de fase microencapsulado, dentro da temp. de transição de fase, pode levar a um retardo térmico de 1,8 x para Vf = 10% e 3,4 x para Vf = 30%. | Uma imagem com padrão, arte  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Gao *et al.* (2023) desenvolveram um painel cimentício com graduação funcional impressa em 3D (3DPFGC) integrando concreto EPS econômico. Eles analisaram o impacto do cimento sulfoaluminado (SAC) no desempenho do 3DCP no início da idade. | - O efeito da adição de SAC na condutividade térmica é mínimo.  - O aumento de EPS na camada isolante intermediária melhorou o desempenho térmico do painel.  - A amostra S20E25 tem uma condutividade térmica de 0,33 W/(mK), uma densidade de 1.688 kg/m3 e 28,8 MPa. | Uma imagem com design  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Christen *et al.* (2023) criaram um modelo 2D para determinar a transferência de calor através de fachadas de edifícios em 3DCP contendo material de mudança de fase (PCM). Duas geometrias de seção foram avaliadas e uma abordagem iterativa foi usada para modelar a convecção da cavidade e a temperatura ambiente interna. | - O modelo de simulação validado mostra resultados promissores para o caso em que 100% do agregado natural é substituído por agregado de tijolo reciclado, infundido com PCM de duas temperaturas de fusão (18◦C / 28◦C).  - A abordagem iterativa é necessária para não restringir demais o modelo com as temperaturas internas e da fachada definidas. | Uma imagem com edifício, captura de ecrã, ar livre, inverno  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |
| Volpe *et al.* (2023) propõem uma abordagem metodológica para projetar um bloco de construção imprimível em 3D usando argamassa à base de cimento com agregados reciclados como material imprimível juntamente com material isolante reciclado. | - O formato do componente (inspirado em favos de mel) pode ser personalizado para atingir o desemp. térmico necessário usando materiais reciclados no processo de impressão.  - Os blocos que contêm agregados de borracha e vidro têm os valores de transmitância mais próximos do valor de referência (0,34 W/(m2K)). | Uma imagem com captura de ecrã, design  Os conteúdos gerados por IA poderão estar incorretos. |

Fonte: Autores.

De modo geral, observa-se que os estudos sistematizados no Quadro 4 também estão centrados na análise da geometria da seção de painéis e blocos de 3DCP, de diferentes composições do material cimentício e da influência de materiais de isolamento no desempenho térmico dos elementos impressos. No entando, desenvolvem uma avaliação mais completa desses elementos, pois integram os dois tipos de métodos de avaliação (simulação computacional e experimento físico).

Com relação a geometria da seção, são avaliadas diversas possibilidades de elementos em 3DCP, como painéis com cavidades retangulares (Marais *et al.*, 2021); elementos com estrutura celular interna hexagonal (Briels *et al.*, 2022); elementos inspirados em treliça, integrando o 3DCP com a tecnologia de fundição tradicional (Song *et al.*, 2021); e blocos com diferentes tamanhos de células (vazios) com geometrias hexagonais (Marin-Montin *et al.*, 2022; Volpe *et al.*, 2023). Briels *et al.* (2022), por exemplo, realizaram simulações de transferência de calor 2D (método de elementos finitos) e 3D (método de célular finitas) e um estudo experimental com medições de fluxo de calor em um protótipo, concluindo que a proporção de material sólido em relação ao ar dentro das células é o principal fator de influência sobre a condutividade térmica, além do diâmetro, da altura 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, o que evidencia o potencial de estudos que integram avaliações por simulação e experimento físico. Isso é observado também no estudo de Marin-Montin *et al.* (2022), em que o método de elementos finitos foi utilizado para caracterizar numericamente as misturas do material de impressão e criar uma estrutura de simulação, sendo feita uma análise térmica dos blocos usando uma configuração de placa quente e uma câmara térmica.

Com relação à composição do material cimentício, os estudos exploram o uso de concreto com espuma e concreto de alto desempenho (Marais *et al.*, 2021), a incorporação de materiais de mudança de fase para armazenamento de calor (Christen *et al.*, 2023; Marin-Montin *et al.*, 2022), a adição de cimento sulfoaluminado (Gao *et al.*, 2023); e a incorporação de agregados reciclados (Volpe *et al.*, 2023). No estudo de Marin-Montin *et al.* (2022), por exemplo, observou-se que o material de mudança de fase microencapsulado, dentro da temperatura de transição de fase, pode levar a um atraso térmico de 1,8 vezes para frações de volume de 10% e de 3,4 vezes para frações de volume de 30%. Já o estudo de Volpe *et al.* (2023), observou que a incorporação de agregados de borracha e vidro no material cimentício utilizado para a produção dos blocos gerou valores de transmitância térmica mais próximos do valor de referência do estudo (0,34 W/(m2K)).

Em uma análise comparativa entre as variáveis “geometria da seção” e “composição do material cimentício”, Marais *et al.* (2021), apontam que a geometria da cavidade deve ser determinada com base nas propriedades do material de impressão e que o efeito da radiação da cavidade e, em menor grau, da convecção, tem influência significatva no desempenho térmico do elemento impresso.

Por fim, observa-se que os estudos que desenvolveram análises por simulação computacional conseguiram avaliar uma gama maior de variáveis relacionadas à geometria da seção, à composição do material de impressão e à adição de material de isolamento nas cavidades. No entanto, os experimentos físicos mostraram-se fundamentais para avaliar na prática a aplicabilidade do 3DCP e seu desempenho térmico. Com base nos estudos analisados neste artigo, foram identificadas três principais estratégias para serem seguidas em estudos futuros, com vistas a melhorar o desempenho termoenergético de elementos em 3DCP:

1) Estudos focados na otimização da geometria da seção transversal dos blocos/painéis de 3DCP, estabelecendo uma relação com a composição do material de impressão e com a adição ou não de material isolante nas cavidades;

2) Estudos que avaliem a aplicabilidade de materiais de isolamento térmico nos elementos de 3DCP;

3) Estudos focados no aprimoramento da composição do material cimentício, visando melhorar o seu desempenho térmico e reduzir seu impacto ambietal.

1. **Considerações Finais**

Este artigo explorou o cenário de pesquisa atual em torno da avaliação do desempenho termoenergético de blocos e painéis feitos por impressão 3D com materiais cimentícios, com o objetivo de fornecer uma visão abrangente do estado atual da aplicação dessa tecnologia na construção e sinalizar direções futuras. Observou-se estudos substanciais que analisam aspectos relativos à composição do material cimentício, à geometria da seção horizontal e à incorporação de material isolante, principalmente nos vazios internos, visando melhorar o desempenho térmico dos elementos analisados.

Destaca-se que, os estudos que desenvolveram análises por simulação computacional conseguiram, de modo geral, avaliar um número maior de variáveis. No entanto, os experimentos físicos mostraram-se fundamentais para avaliar na prática a aplicabilidade do 3DCP e seu desempenho térmico. Deste modo, a integração desses dois tipos de análise se mostra promissora para estudar de modo mais global os elementos feitos em 3DCP.

As principais descobertas indicam que vários fatores influenciam a melhoria do desempenho termoenergético de blocos e painéis em impressão 3D e a redução de seu impacto ambiental, incluindo o tamanho das cavidades, a otimização da geometria da seção horizontal, a adição de materiais isolantes e o aprimoramento da composição do material de impressão. Além disso, conclui-se que esses fatores são interdependentes e devem ser avaliados em conjunto, sempre que possível, e que a sua análise e definição deve ser feita ainda na etapa de projeto, seja por avaliações por simulação, experimentos físicos ou integrando ambas abordagens.

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. Nesse sentido, este estudo é um passo importante para futuras pesquisas sobre o desempenho termoenergético de elementos impressos em 3D, ajudando a consolidar um referencial para o projeto e a construção de edifícios com melhor desempenho termoenergético e menor impacto ambiental.

##### **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**

ALGHAMDI, H.; NEITHALATH, N. Synthesis and characterization of 3D-printable geopolymeric foams for thermally efficient building envelope materials. CEMENT & CONCRETE COMPOSITES, [*s. l.*], v. 104, 2019.

ALHUMAYANI, H. *et al.* Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete. Journal of Cleaner Production, [*s. l.*], v. 270, p. 122463, 2020.

AL-OBAIDI, K. M. *et al.* Biomimetic building skins: An adaptive approach. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [*s. l.*], v. 79, p. 1472–1491, 2017.

ALZAHRANI, A. A.; ALGHAMDI, A. A.; BASALAH, A. A. Computational Optimization of 3D-Printed Concrete Walls for Improved Building Thermal Performance. BUILDINGS, [*s. l.*], v. 12, n. 12, 2022.

ARAUJO, R. A. *et al.* Thermal performance of cement-leca composites for 3D printing. CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS, [*s. l.*], v. 349, 2022.

BIANCHI, I. *et al.* Life cycle assessment of building envelopes manufactured through different 3D printing technologies. Journal of Cleaner Production, [*s. l.*], v. 440, 2024.

BODUR, B. *et al.* Durability of green rubberized 3D printed lightweight cement composites reinforced with micro attapulgite and micro steel fibers: Printability and environmental perspective. Journal of Building Engineering, [*s. l.*], v. 90, p. 109447, 2024.

BRIELS, D. *et al.* Monolithic AM façade: multi-objective parametric design optimization of additively manufactured insulating wall elements. Frontiers in Built Environment, [*s. l.*], v. 9, 2023.

BRIELS, D. *et al.* Thermal Optimization of Additively Manufactured Lightweight Concrete Wall Elements with Internal Cellular Structure through Simulations and Measurements. BUILDINGS, [*s. l.*], v. 12, n. 7, 2022.

CHAMATETE, K.; YALÇINKAYA, Ç. Numerical Evaluation on Thermal Performance of 3D Printed Concrete Walls: The Effects of Lattice Type, Filament Width and Granular Filling Material. Buildings, [*s. l.*], v. 14, n. 4, 2024.

CHRISTEN, H. *et al.* Validated simulation of thermal performance of phase change material infused recycled brick aggregate in 3D printed concrete. Construction and Building Materials, [*s. l.*], v. 404, 2023.

CUEVAS, K. *et al.* Towards development of sustainable lightweight 3D printed wall building envelopes-Experimental and numerical studies. CASE STUDIES IN CONSTRUCTION MATERIALS, [*s. l.*], v. 18, 2023.

DEY, D.; PANDA, B. An experimental study of thermal performance of 3D printed concrete slabs. MATERIALS LETTERS, [*s. l.*], v. 330, 2023.

FERENHOF, H.; FERNANDES, R. Desmistificando a revisão de literatura como base para redação científica: método SSF. Revista ACB: Biblioteconomia em Santa Catarina, [*s. l.*], v. 21, n. 3, p. 550–563, 2016.

GAO, H. *et al.* Thermal and mechanical performance of 3D printing functionally graded concrete: The role of SAC on the rheology and phase evolution of 3DPC. Construction and Building Materials, [*s. l.*], v. 409, 2023.

HASSAN, H. *et al.* Towards innovative and sustainable buildings: A comprehensive review of 3D printing in construction. Automation in Construction, [*s. l.*], v. 163, 2024.

HOSSAIN, Md. A. *et al.* A Review of 3D Printing in Construction and its Impact on the Labor Market. Sustainability, [*s. l.*], v. 12, n. 20, p. 8492, 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. 2021.

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. Journal of Cleaner Production, [*s. l.*], v. 303, p. 127027, 2021.

LI, V. C. *et al.* On the emergence of 3D printable Engineered, Strain Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC). Cement and Concrete Research, [*s. l.*], v. 132, p. 106038, 2020.

LU, B. *et al.* A systematical review of 3D printable cementitious materials. Construction and Building Materials, [*s. l.*], v. 207, p. 477–490, 2019.

MARAIS, H. *et al.* Computational assessment of thermal performance of 3D printed concrete wall structures with cavities. JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING, [*s. l.*], v. 41, 2021.

MARIN-MONTIN, J. *et al.* Thermomechanical Performance Analysis of Novel Cement-Based Building Envelopes with Enhanced Passive Insulation Properties. MATERIALS, [*s. l.*], v. 15, n. 14, 2022.

NGO, T. D. *et al.* Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering, [*s. l.*], v. 143, p. 172–196, 2018.

PAUL, S. C. *et al.* A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects. Rapid Prototyping Journal, [*s. l.*], v. 24, n. 4, p. 784–798, 2018.

PESSOA, S. *et al.* 3D printing in the construction industry - A systematic review of the thermal performance in buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews, [*s. l.*], v. 141, p. 110794, 2021.

PESSOA, S. *et al.* Experimental characterisation of hygrothermal properties of a 3D printed cementitious mortar. Case Studies in Construction Materials, [*s. l.*], v. 19, 2023.

RAVULA, R.; GATHEESHGAR, P. On the thermal-energy performance of 3D printed concrete wall panels designed with varying insulation ratios. Journal of Building Engineering, [*s. l.*], v. 77, 2023.

SONG, J. *et al.* 3D printed polymeric formwork for lattice cementitious composites. JOURNAL OF BUILDING ENGINEERING, [*s. l.*], v. 43, 2021.

SUNTHARALINGAM, T. *et al.* Energy Performance of 3D-Printed Concrete Walls: A Numerical Study. BUILDINGS, [*s. l.*], v. 11, n. 10, 2021a.

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, [*s. l.*], v. 13, n. 4, 2021b.

TOBI, A. L. M. *et al.* Cost viability of 3D printed house in UK. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, [*s. l.*], v. 319, p. 012061, 2018.

VOLPE, S. *et al.* 3D printed concrete blocks made with sustainable recycled material. VITRUVIO-INTERNATIONAL JOURNAL OF ARCHITECTURAL TECHNOLOGY AND SUSTAINABILITY, [*s. l.*], v. 8, n. SI, p. 70–83, 2023.

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, [*s. l.*], v. 261, p. 121245, 2020.