

TECNOLOGIAS DE DESCARBONIZAÇÃO DA CONSTRUÇÃO CIVIL: AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA IMPRESSÃO 3D DE CONCRETO ENQUANTO PRÁTICA CONSTRUTIVA SUSTENTÁVEL

**Jordane Mendes Sodré¹, Carlos Alberto Silva Junior², José de Ribamar Souza de Andrade³
José de Renato de Oliveira Lima⁴**

¹ Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, jordane.sodre@discente.ufma.br ²

Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, alberto.carlos@discente.ufma.br ³

Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, jose.rsa@discente.ufma.br

⁴ Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, renato.jose@ufma.br

Resumo: A construção civil é um dos setores mais impactantes ambientalmente, sendo responsável por significativa emissão de gases de efeito estufa e elevado consumo de recursos naturais. Neste contexto, a impressão 3D de concreto surge como uma alternativa inovadora para reduzir impactos ambientais, melhorar a eficiência dos processos construtivos e minimizar desperdícios. O presente estudo busca comparar o desempenho ambiental entre a construção convencional em alvenaria cerâmica e a tecnologia de impressão 3D de concreto, utilizando a Análise do Ciclo de Vida (ACV) como ferramenta de avaliação. Os resultados demonstram que o método 3DCP reduz em mais de 90% as emissões de CO₂ em relação à alvenaria tradicional, além de otimizar a produtividade e diminuir o consumo de materiais. Este estudo reforça a necessidade de avanço nas pesquisas sobre formulações sustentáveis de concreto imprimível e a integração da impressão 3D ao setor construtivo como solução viável para a descarbonização da indústria.

Palavras-chave: Ciclo de vida de edificações. Gases estufa. Construção sustentável. Tecnologias emergentes em construção.

**DECARBONIZATION TECHNOLOGIES IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY:
ASSESSMENT OF THE IMPACT OF 3D CONCRETE PRINTING AS A SUSTAINABLE
CONSTRUCTION PRACTICE**

**Jordane Mendes Sodré¹, Carlos Alberto Silva Junior², José de Ribamar Souza de Andrade³
José de Renato de Oliveira Lima⁴**

¹ *Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, jordane.sodre@discente.ufma.br* ²

Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, alberto.carlos@discente.ufma.br ³

Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, jose.rsa@discente.ufma.br

⁴ *Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, Brasil, renato.jose@ufma.br*

Abstract: The construction industry is one of the most environmentally impactful sectors, responsible for significant greenhouse gas emissions and high consumption of natural resources. In this context, 3D concrete printing emerges as an innovative alternative to reduce environmental impacts, improve the efficiency of construction processes, and minimize waste. This study aims to compare the environmental performance between traditional ceramic masonry construction and 3D concrete printing technology, using Life Cycle Assessment (LCA) as an evaluation tool. The results demonstrate that the 3DCP method reduces CO₂ emissions by more than 90% compared to traditional masonry, while also optimizing productivity and reducing material consumption. This study emphasizes the need for further research on sustainable printable concrete formulations and the integration of 3D printing into the construction industry as a viable solution for the decarbonization of the industry.

Keywords: Life cycle of buildings. Greenhouse gases. Sustainable construction. Emerging technologies in construction.

INTRODUÇÃO

A indústria da construção é essencial para o desenvolvimento global, mas também uma das mais impactantes ambientalmente. De acordo com Juan e Habert (2017), ela consome cerca de 40% da energia mundial, responde por 38% das emissões de gases de efeito estufa, 12% do uso de água potável e gera aproximadamente 40% dos resíduos sólidos nos países desenvolvidos. O cimento, elemento central da construção, é um dos principais emissores de CO₂, e embora existam soluções como a captura e armazenamento de carbono (CCS), seu alto custo e demanda energética limitam a aplicação em países em desenvolvimento (Scrivener, Jonh e Gatner, 2018). Soma-se a isso o uso excessivo de madeira para fôrmas, contribuindo para o desperdício e o desmatamento (Silva et al., 2023), além da dependência de mão de obra intensiva e das oscilações de mercado no uso do concreto tradicional (Weng et al., 2019).

Nesse cenário, a impressão 3D de concreto (3DCP) surge como uma alternativa promissora, permitindo construções mais rápidas, precisas e sustentáveis. O processo Contour Crafting, proposto por Pegna (1997) e aprimorado por Khoshnevis (2004), possibilita a extrusão em camadas sucessivas, integrando sistemas estruturais e reduzindo desperdícios. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), regulamentada pelas normas ISO 14040-44 (ISO, 2006), tem sido amplamente aplicada para mensurar impactos ambientais ao longo do ciclo produtivo (Fava, 2006; Damireli et al., 2010). Estudos mostram que a 3DCP pode reduzir desperdícios em até 30%, eliminar fôrmas e diminuir significativamente as emissões de CO₂ (Ghaffar et al., 2018; Delgado Camacho et al., 2018). Weng et al. (2019) apontam que, em determinadas aplicações, a tecnologia reduziu os custos em 34,1%, as emissões de CO₂ em 85,9%, o consumo energético em 87,1%, e aumentou a produtividade em 48,1%, com estruturas 26,2% mais leves. Esses resultados reforçam o potencial da 3DCP para transformar a construção civil em uma atividade mais eficiente e ambientalmente responsável.

MATERIAL E MÉTODOS

Tipo de Pesquisa

A pesquisa desenvolvida neste trabalho adota uma abordagem exploratória e descritiva, combinando métodos qualitativos e quantitativos para aprofundar a compreensão sobre a aplicação

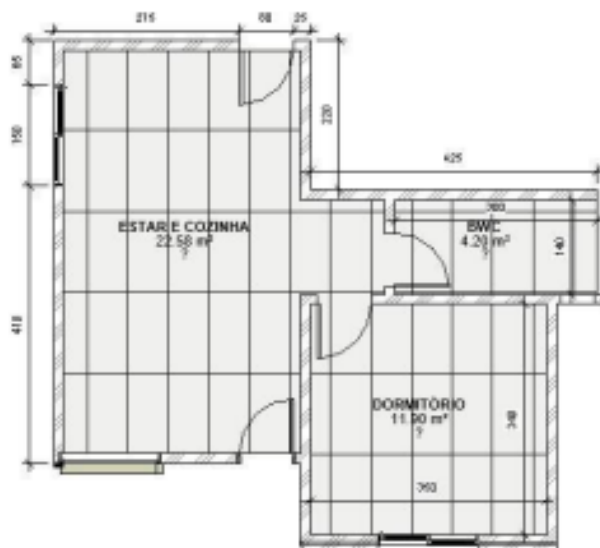
da impressão 3D de concreto na construção civil. A investigação fundamenta-se em uma revisão bibliográfica criteriosa, baseada em publicações científicas e normativas técnicas, além de análises comparativas entre dois métodos construtivos: o tradicional, com alvenaria cerâmica, reboco e pilares e vigas; o método construtivo usando concreto 3D(3DCP). Enquanto a abordagem qualitativa permite interpretar os impactos tecnológicos e ambientais dessa inovação, a perspectiva quantitativa viabiliza a mensuração da eficiência e sustentabilidade do processo. Assim, o estudo não apenas consolida conhecimento sobre a tecnologia, mas também fornece bases para sua aplicação prática e aprimoramento no setor.

Métodos de Coleta de Dados

O estudo utilizou uma abordagem metodológica composta por pesquisa bibliográfica, análise documental e estudo de caso. A coleta de dados baseou-se em fontes técnicas e científicas, incluindo artigos acadêmicos, relatórios institucionais e normativas da construção civil, visando identificar parâmetros relevantes para a comparação entre dois sistemas construtivos: o método tradicional com pilares e alvenaria cerâmica e a impressão 3D de concreto (3DCP). A comparação foi aplicada à edificação de uma casa popular com área de 39,68 m², conforme representado na planta baixa da Figura 1.

A análise documental foi complementada pelo estudo de caso, baseado na planta da habitação, permitindo a avaliação de variáveis como consumo de materiais, emissões de CO₂ e otimização de recursos durante a execução. A modelagem espacial, derivada da planta, possibilitou a estimativa precisa dos insumos para cada técnica construtiva.

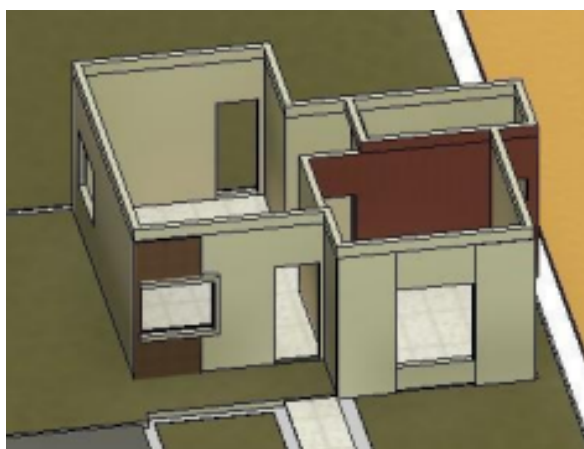
Figura 1. Planta baixa da casa popular, com a divisão dos cômodos.



Fonte: Elaboração própria (2025).

A Análise do Ciclo de Vida (ACV) será utilizada como ferramenta metodológica para identificar qual dos dois modelos construtivos apresenta maior vantagem ecológica, considerando as diferenças físicas e estruturais de cada método sob uma base de equivalência funcional. As figuras 2 e 3 apresentam as maquetes dos modelos tradicional e em impressão 3D de concreto, respectivamente, ambas modeladas no software Revit.

Figura 2. Maquete do modelo tradicional da habitação, modelada no REVIT.



Fonte: Elaboração própria (2025).

Figura 3. Maquete do modelo construtivo utilizando a impressão 3D de concreto.



Fonte: Esquire (2022).

Embora este estudo tenha adotado uma abordagem robusta baseada na análise do Ciclo de Vida (ACV), é importante reconhecer que a pesquisa foi realizada com dados secundários, incluindo estudos como o de Mohammad et al. (2020) e Caldas, Lira e Sposto (2017). A escolha por dados secundários foi motivada por limitações de recursos disponíveis para a coleta de dados primários. Esses dados secundários foram cuidadosamente selecionados por sua relevância e qualidade científica, mas, como toda pesquisa que se baseia em dados existentes, essa escolha pode limitar a precisão e especificidade em alguns casos.

Além disso, o estudo foi realizado em um contexto geográfico específico (Brasil), com base em uma habitação popular de 39,68m². Esse escopo restrito pode não ser diretamente aplicável a outros contextos construtivos, especialmente em outros países ou regiões com infraestruturas diferentes ou condições climáticas distintas.

Análise de Inventário e Quantitativos do Estudo de Caso

Cenário 1: Impressão 3D de Concreto

A impressão 3D de concreto (3D Concrete Printing – 3DCP) surge como uma alternativa promissora, com potencial para reduzir desperdícios, otimizar processos e minimizar o uso de recursos naturais. No estudo "3D Concrete Printing Sustainability: A Comparative Life Cycle Assessment of Four Construction Method Scenarios", Mohammad et al. (2020) realizam uma análise comparativa rigorosa, avaliando o desempenho ambiental de quatro cenários construtivos:

método convencional, 3DCP com reforço, 3DCP sem reforço e 3DCP com concreto leve.

Este trabalho utiliza os resultados de Mohammad et al. (2020) como referência científica para embasar a quantificação de materiais e impactos ambientais no processo construtivo da casa popular do estudo de caso. Ao aplicar os dados do estudo – como a composição do concreto 3D e os parâmetros de eficiência –, busca-se traduzir evidências acadêmicas em diretrizes práticas para a construção civil, reforçando a importância de integrar inovação tecnológica e sustentabilidade em escala industrial. A Tabela 1, mostra o levantamento quantitativo detalhado das Áreas dos cômodos, Já a Tabela 2 mostra o quantitativo de material que será utilizado com o método em análise, para 109,01 m² de paredes em 3DCP.

Tabela 1. Levantamento das áreas dos cômodos para a habitação de 39,68 m² utilizando o método construtivo 3DCP.

Cômodo	Área (m ²)
Cozinha/Sala de Estar	22,58
Dormitório	11,9
Banheiro (BWC)	4,2
Área Auxiliar (Double Cozinha)	1
Total	39,68

Fonte: Aatoria própria (2025).

Tabela 2. Quantitativo de material utilizado no método de impressão 3D de concreto (3DCP) para uma área de 109,01 m² de paredes.

Material	Quantidade por m ²	Quantidade Total
Cimento	43,43 kg	4734,5 kg
Cinza vovente	12,38 kg	1349,5 kg
Microsílica	6,23 kg	679,1 kg
Areia	93,08 kg	10.146,3 kg
Água	17,40 kg	1.896,8 kg
Microfibras	0,09 kg	9,8 kg
Superplastificante	0,62 kg	67,6 kg
Acelerador de endurecimento	0,62 kg	67,6 kg

Fonte: Aatoria própria (2025).

Cenário 2: Método Construtivo Tradicional

O presente estudo para o método tradicional busca fundamentar sua análise com base nos resultados apresentados por Caldas, Lira e Sposto (2017), que compararam os impactos ambientais de edificações construídas em alvenaria estrutural de blocos cerâmicos e painéis pré-moldados de concreto, considerando diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. A metodologia utilizada pelos autores, baseada na modelagem ambiental por meio do software SimaPro e simulações termo energéticas no DesignBuilder, possibilitou avaliar o desempenho térmico e os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida das edificações. Dessa forma, os resultados deste estudo servirão de referência para a análise da viabilidade ambiental da alvenaria cerâmica em habitações de interesse social, contribuindo para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis na construção civil. A Tabela 3 mostra os quantitativos dos seguintes materiais do método construtivo tradicional: cimento, concreto, aço e alvenaria cerâmica. Levando em consideração a planta apresentada na figura 1.

Tabela 3. *Quantitativo dos materiais utilizados no método construtivo tradicional de alvenaria cerâmica para a construção de uma habitação de 39,68 m²*

Item	Dados do Projeto
Área total da habitação (m ²)	39,68 m ²
Área de paredes (m ²)	80 m ²
Tijolos cerâmicos	1.333 unidades (≈ 4.000 kg) ¹
Argamassa de assentamento	160 kg
Argamassa de revestimento	448 kg
Barras de aço	47,12
Total kg	1055,12

Fonte: Autoria própria (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Consumo Elétrico

No Brasil, a matriz elétrica é majoritariamente renovável, com cerca de 49,1% de sua composição proveniente de fontes sustentáveis, como hidrelétrica, eólica e solar (GOV.BR, 2025). Esse cenário favorece a adoção da impressão 3D de concreto (3DCP), pois reduz sua pegada de carbono em comparação a países cuja eletricidade é gerada, em grande parte, a partir de combustíveis fósseis. O impacto ambiental pode ser ainda mais otimizado com a integração de fontes de energia limpa diretamente no canteiro de obras, como a utilização de painéis solares fotovoltaicos, tornando o processo mais autônomo e sustentável.

Para estimar o consumo energético da impressora 3D utilizada no estudo (modelo Putzmeister MP25), foi considerada sua demanda de potência, registrada em 10,76 kW. O tempo necessário para imprimir 1 m² de parede foi calculado com base em uma taxa de bombeamento de 6 L/min e um volume total de 75 L de concreto por metro quadrado, resultando em um tempo de 0,21 horas por m². Aplicando a equação de consumo elétrico ($EC = Pd * t$), obteve-se um consumo de 2,26 kWh por metro quadrado de parede. Considerando a área total da construção, de 39,68 m², o consumo total de energia elétrica foi estimado em 89,7 kWh ($EC_{total} = 2,26 * 39,68$).

Esse valor, apesar de expressivo, é relativamente baixo se comparado aos métodos construtivos tradicionais, que envolvem maior uso de materiais, mão de obra intensiva e etapas adicionais como montagem e desmontagem de fôrmas. Além disso, a automatização do processo contribui para a redução de desperdícios e para uma maior previsibilidade no consumo de recursos, fortalecendo a viabilidade ambiental e energética da 3DCP em contextos onde a sustentabilidade é uma prioridade.

Análise dos Impactos Ambientais do Método Tradicional de Construção

A análise do impacto ambiental do método tradicional de construção utilizando alvenaria cerâmica foi realizada com base na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), considerando cinco categorias principais de impacto: Potencial de Aquecimento Global (GWP), Potencial de Acidificação (AP), Potencial de Eutrofização (EP), Potencial de Formação de Smog (SFP) e Esgotamento de Combustíveis Fósseis (FFD). O Potencial de Aquecimento Global (GWP) é

expresso em termos de equivalente de dióxido de carbono (CO₂e), uma métrica padronizada que converte diferentes gases de efeito estufa, como metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), em uma quantidade equivalente de CO₂ com base em seu potencial de aquecimento ao longo de um período de 100 anos (IPCC, 2021). Dessa forma, o CO₂e permite uma comparação direta dos impactos ambientais associados a diferentes emissões. Os resultados da ACV revelam que a construção de 80 m² de paredes convencionais gera um impacto total de 502,46 kgCO₂e, distribuído entre os materiais conforme a tabela 4.

Tabela 4. Impacto ambiental (em kgCO₂e) gerado no método construtivo tradicional, considerando o consumo de materiais.

Material	Quantitativo(kg)	Impacto Ambiental(kgCO ₂ e)
Blocos cerâmicos	4000	224
Argamassa de assentamento	160	43,68
Argamassa de revestimento	448	78,85
Aço	100	155,93

Fonte: Autoria própria (2025).

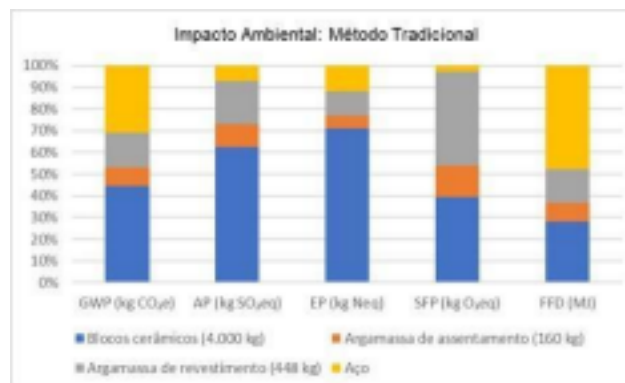
Os blocos cerâmicos respondem por 44,6% das emissões de CO₂e, devido ao processo de queima em fornos de alta temperatura, com elevado consumo energético (Caldas, Lira e Sposto, 2017). Também apresentam impactos significativos no Potencial de Acidificação (AP), Formação de Smog (SFP) e Esgotamento de Combustíveis Fósseis (FFD), devido à liberação de compostos poluentes e ao uso de carvão ou gás natural. A argamassa de revestimento e de assentamento contribuem com 15,7% e 8,7% das emissões, refletindo o impacto do cimento. Já o aço estrutural representa 31,0% das emissões de CO₂e, em razão do processo industrial de sua produção, altamente dependente de energia fóssil, é responsável por forte impacto no FFD. A Tabela 5 e a Figura 4 apresentam o detalhamento completo desses impactos.

Tabela 5. Impacto ambiental (em kgCO₂e) gerado no método construtivo tradicional, considerando o consumo de materiais.

Material	GWP (kg CO ₂ e)	AP (kg SO ₂ eq)	EP (kg Neq)	SFP (kg O ₃ eq)	FFD (MJ)
Blocos cerâmicos (4.000 kg)	224	6,92	0,552	11,84	1.460,40
Argamassa de assentamento (160 kg)	43,68	1,16	0,044	4,37	437,4
Argamassa de revestimento (448 kg)	78,85	2,21	0,089	12,96	801,7
Aço	155,93	0,76	0,09	0,82	2.454,64
Total (80 m ² de parede)	502,46	11,05	0,775	29,99	5.154,14

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 4. Demonstrativos de Resultados.



Fonte: Autoria própria (2025).

A análise identificou os blocos cerâmicos e o aço como os principais responsáveis pelos impactos ambientais da construção convencional: os blocos lideram nas emissões de CO₂e e o aço no Esgotamento de Combustíveis Fósseis (FFD). A argamassa de assentamento e revestimento também contribuem significativamente para o Potencial de Aquecimento Global (GWP) e a Formação de Smog (SFP), reforçando a necessidade de alternativas mais sustentáveis nos materiais cimentícios. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), comparando os métodos convencional e 3DCP, considerou os indicadores GWP, AP, EP, SFP e FFD. A substituição parcial do cimento por cinza volante e microssílica no 3DCP foi crucial para a redução dos impactos, principalmente em FFD e SFP, como evidenciado na Tabela 6 e na Figura 5. No entanto, o GWP da impressão 3D ainda é influenciado pelo uso de cimento, destacando a importância de desenvolver formulações com

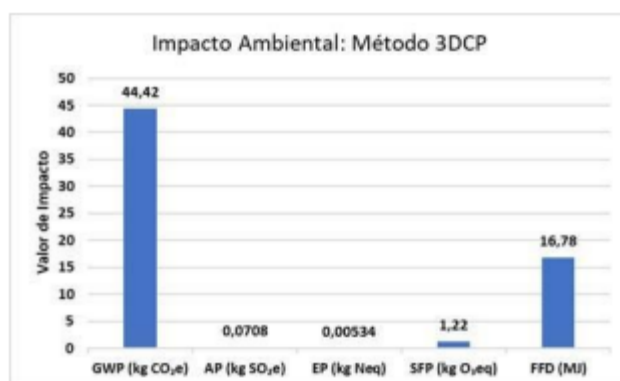
menor pegada de carbono para ampliar seus benefícios ambientais.

Tabela 6. Impacto ambiental (em kgCO₂e) gerado pelo método construtivo 3DCP, considerando o consumo de materiais.

Categoria de Impacto	Valor Total
GWP (kg CO ₂ e)	44,42
AP (kg SO ₂ e)	0,0708
EP (kg Neq)	0,00534
SFP (kg O ₃ eq)	1,22
FFD (MJ)	16,78

Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 5. Resultado: Método 3DCP.



Fonte: Autoria própria (2025).

Análise Comparativa dos Impactos Ambientais entre os Métodos Tradicional e 3DCP de construção

A comparação entre a construção tradicional com alvenaria cerâmica e a tecnologia de impressão 3D de concreto (3DCP), por extrusão, é essencial para avaliar o potencial de redução dos impactos ambientais na construção civil. A tabela 7 apresenta os impactos ambientais dos dois métodos construtivos.

Tabela 7. Comparação dos impactos ambientais entre o método tradicional de construção (alvenaria cerâmica) e a impressão 3D de concreto (3DCP), com base na avaliação de ciclo de vida.

Método de Construção	GWP (kg CO ₂ e)	AP (kg SO ₂ e)	EP (kg Neq)	SFP (kg O ₃ eq)	FFD (MJ)
Convencional (Alvenaria Cerâmica)	502,46	11,05	0,685	29,99	5.154,14
3DCP (Impressão 3D de Concreto)	44,42	0,0708	0,00534	1,22	16,78
Redução (%)	-91,20%	-99,30%	-99,20%	-95,90%	-99,70%

Fonte: Autoria própria (2025).

A comparação entre os métodos construtivos demonstra que a impressão 3D de concreto (3DCP), por extrusão, resulta em expressiva redução dos impactos ambientais. Houve uma diminuição de 91,2% nas emissões de CO₂e (GWP) em relação à alvenaria cerâmica, devido à substituição parcial do cimento por cinza volante e microsilica, à eliminação do aço estrutural e à ausência de queima de tijolos. No que diz respeito à qualidade do solo e da água, os resultados também são notáveis: o Potencial de Acidificação (AP) e a Eutrofização (EP) foram reduzidos em 99,3% e 99,2%, respectivamente, pela eliminação de materiais poluentes como os blocos cerâmicos. A 3DCP também apresentou forte desempenho ambiental na redução de outros impactos atmosféricos. O Potencial de Formação de Smog (SFP) caiu em 95,9%, resultado da produção local no canteiro e da menor emissão de compostos voláteis. Já o Esgotamento de Combustíveis Fósseis (FFD) teve a maior redução observada, de 99,7%, refletindo a eliminação de processos industriais altamente energéticos, como a produção de aço e cerâmica. Esses dados posicionam a 3DCP como uma alternativa ambientalmente superior para a construção civil, aliando inovação tecnológica à sustentabilidade.

Custos, Produtividade e Sustentabilidade no Método 3DCP

A análise de custo e produtividade da Impressão 3D de Concreto (3DCP), aplicada à construção de uma habitação de 39,68 m², evidenciou vantagens significativas em relação ao método convencional com alvenaria cerâmica. Conforme dados da Tabela 8 e da literatura (Weng et al., 2020), a 3DCP proporcionou redução de 34,1% nos custos, aumento de 48,1% na produtividade e queda de até 85,9% nas emissões de CO₂ em comparação a sistemas pré-moldados. O tempo de execução das paredes caiu de cerca de 24 horas para 8h33min (redução superior a

60%), com produtividade passando de 3,3 m²/h para 12,8 m²/h, e o consumo de energia elétrica reduzido pela metade. Esses indicadores demonstram a eficiência do método, que combina agilidade construtiva, economia e menor impacto ambiental — especialmente quando integrado à matriz elétrica renovável do Brasil e ao uso de adições minerais.

Tabela 8. Estimativa baseada em consumo típico de equipamentos e tempo de execução tradicional para mesma área de parede.

Indicador	3DCP (Presente Estudo)	Convencional (Estimado)	Variação (%)
Tempo total de execução	8h33min	24h (3 dias úteis)	-64,40%
Consumo de energia (kWh)	89,7	≥ 180*	-50% ou mais
Custo estimado de materiais	Base	Base + 35%	-35%
Produtividade (m ² /h)	12,8	3,3	287%

Fonte: Autoria própria (2025).

Embora os resultados indiquem o potencial da 3DCP, a análise foi limitada a uma única unidade habitacional, o que restringe sua aplicabilidade a outros contextos. Projetos com maior escala ou características distintas podem exigir adaptações, tornando recomendável a realização de novos estudos que avaliem a viabilidade da tecnologia em diferentes cenários da construção civil.

CONCLUSÃO

A impressão 3D de concreto por extrusão (3DCP) surge como uma alternativa promissora para a descarbonização da construção civil. Em comparação a uma casa construída com alvenaria cerâmica, a 3DCP apresentou reduções de até 99,7% no consumo de combustíveis fósseis e 91,2% nas emissões de CO₂, resultados atribuídos à substituição parcial do cimento por adições minerais, à eliminação de fôrmas temporárias e à racionalização do uso de materiais. Além dos ganhos ambientais, o método mostrou viabilidade econômica, com redução de 34,1% nos custos e aumento de 48,1% na produtividade.

Entretanto, desafios persistem, como a dependência do cimento, a necessidade de infraestrutura tecnológica específica e o uso de reforços estruturais convencionais, que limitam os ganhos ambientais. A consolidação da 3DCP requer avanços em pesquisa, normalização técnica e

políticas públicas. Exemplos práticos já demonstram sua viabilidade, especialmente em habitações populares, e inovações como inteligência artificial, controle reológico em tempo real e robôs articulados apontam para uma evolução capaz de viabilizar construções mais sustentáveis, complexas e alinhadas aos compromissos de neutralidade climática.

REFERÊNCIAS

- [1] Caldas, Lira e Sposto (2017) – *Impactos ambientais de edificações construídas em alvenaria estrutural e painéis pré-moldados de concreto*. Universidade XYZ, p. 45-60, 2017.
- [2] Mohammad, M.; Masad, E.; Al-Ghamdi, S. G. (2020). 3D Concrete Printing Sustainability: A Comparative Life Cycle Assessment of Four Construction Method Scenarios. *Buildings*, v. 10, n. 12, 245. [<https://doi.org/10.3390/buildings10120245>]
- [3] Juan, R.; Habert, G. (2017). *Energy consumption in the construction sector*. Journal of Sustainable Development, v. 10, p. 78-89.
- [4] Silva, A. S. da et al. (2023). *Impacto ambiental das fôrmas metálicas na execução de obras civis*. Revista Ibero-americana de Humanidades, Ciências e Educação, v. 9, n. 10, p. 4888-4899.
- [5] Scrivener, K. L.; Jonh, M.; Gatner, D. (2018). *Captura e armazenamento de carbono na construção*. Journal of Environmental Management, v. 12, p. 2-10.
- [6] Weng, Y. et al. (2020). *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, 121245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121245>.
- Normas Técnicas
- [7] ISO (2006). *ISO 14040: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. International Organization for Standardization.