

Design Paramétrico Aplicado à Impressão 3D em Concreto: Análise de Viabilidade De Um Cobogó Modular Sustentável

Parametric Design Applied to 3D Concrete Printing: Feasibility Analysis of a Sustainable Modular Breeze Block

Fernanda Nobre Negrão, Bacharel, UEMG Escola de Design

fernanda.0198401@discente.uemg.br

Carlos Alberto Silva de Miranda, Doutor, UEMG Escola de Design

carlos.miranda@uemg.br

Fernando Monteiro de Barros Neto, Especialista, UEMG Escola de Design

fernando.barros.neto@uemg.br

Marcus Paulo Santos Brandão, Especialista, UEMG Escola de Design

marcus.brandao@uemg.br

Paulo Henrique Campos Prado Tavares, Doutor, UEMG Divinópolis

paulo.tavares@uemg.br

Número da sessão temática da submissão – [03]

Resumo

A construção civil apresenta elevado impacto ambiental, especialmente em função do consumo intensivo de recursos naturais e da geração de resíduos sólidos. Nesse contexto, a impressão 3D em concreto (3D Concrete Printing – 3DCP) surge como uma tecnologia associada à Construção 4.0, com potencial para ampliar a eficiência material e reduzir desperdícios, sobretudo quando integrada a estratégias avançadas de projeto. Este artigo tem como objetivo analisar a viabilidade do design paramétrico aplicado à impressão 3D em concreto, por meio do desenvolvimento de um cobogó modular não estrutural baseado no Diagrama de Voronoi. A metodologia adotada caracteriza-se como pesquisa aplicada, de natureza exploratória, estruturada como estudo de caso projetual, envolvendo revisão bibliográfica, modelagem paramétrica, validação digital por Análise de Elementos Finitos (FEA) e avaliação da viabilidade técnica do componente. Os resultados indicam que a geometria parametrizada apresenta desempenho mecânico compatível com aplicações não estruturais, além de potencial para redução do consumo de material e personalização em massa. Conclui-se que a integração entre design paramétrico e impressão 3D em concreto representa uma abordagem promissora para o desenvolvimento de soluções sustentáveis e inovadoras no ambiente construído.

Palavras-chave: Impressão 3D em concreto; Design paramétrico; Sustentabilidade; Cobogó; Construção 4.0.

Abstract

The construction sector presents significant environmental impacts, particularly due to intensive natural resource consumption and solid waste generation. In this context, 3D Concrete Printing (3DCP)

emerges as a Construction 4.0–related technology with potential to improve material efficiency and reduce waste, especially when integrated with advanced design strategies. This paper aims to analyze the feasibility of applying parametric design to 3D concrete printing through the development of a non-structural modular breeze block based on the Voronoi Diagram. The adopted methodology is characterized as applied and exploratory research, structured as a project-based case study, including a literature review, parametric modeling, digital validation using Finite Element Analysis (FEA), and technical feasibility assessment. The results indicate that the parameterized geometry presents mechanical performance suitable for non-structural applications, as well as potential for material reduction and mass customization. It is concluded that the integration of parametric design and 3D concrete printing represents a promising approach for the development of sustainable and innovative solutions for the built environment.

Keywords: 3D concrete printing; Parametric design; Sustainability; Breeze block; Construction 4.0.

1. Introdução

A construção civil figura entre os setores produtivos de maior impacto ambiental, sendo responsável por elevados níveis de consumo de recursos naturais e pela expressiva geração de resíduos sólidos. Estimativas indicam que cerca de 30% a 40% dos resíduos sólidos urbanos estão associados às atividades construtivas, incluindo construção, reforma e demolição (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2021). Esse cenário evidencia a necessidade de repensar métodos de projeto e produção, incorporando estratégias capazes de ampliar a eficiência material e reduzir impactos ambientais ao longo do ciclo de vida dos sistemas construtivos.

Nesse contexto, a manufatura aditiva aplicada à construção civil, especialmente a impressão 3D em concreto (3D Concrete Printing – 3DCP), tem se consolidado como uma tecnologia habilitadora da Construção 4.0. O processo permite a deposição controlada de material camada por camada, reduzindo a necessidade de fôrmas, minimizando perdas e possibilitando maior precisão dimensional (LIM et al., 2012). Estudos indicam que a 3DCP apresenta potencial significativo para a redução de desperdícios, otimização do uso de recursos e ampliação da liberdade formal no projeto arquitetônico (BUSWELL et al., 2018; ZHANG et al., 2021).

Pesquisas recentes também apontam contribuições ambientais e econômicas da impressão 3D em concreto, especialmente pela redução do consumo de materiais, da mão de obra intensiva e dos resíduos gerados no canteiro de obras, quando comparada a métodos construtivos tradicionais (BESKLOUBOVA; BUSWELL; BOS, 2024). Esses aspectos reforçam o papel da 3DCP como alternativa promissora para práticas construtivas mais sustentáveis.

Paralelamente, o design paramétrico tem promovido transformações nos processos projetuais, ao permitir a geração de geometrias adaptáveis por meio de relações algorítmicas. Conforme destaca Kolarevic (2003), essa abordagem favorece a integração entre concepção e fabricação digital, possibilitando processos orientados por desempenho. Quando associado à manufatura aditiva, o design paramétrico amplia o potencial de otimização geométrica, eficiência material e personalização em massa de componentes arquitetônicos.

Apesar do avanço internacional dessas tecnologias, observa-se que, no contexto brasileiro, ainda são limitados os estudos que integrem de forma sistemática o design paramétrico e a impressão 3D em concreto no desenvolvimento de elementos arquitetônicos não estruturais, especialmente sob a perspectiva da sustentabilidade em projeto. Essa lacuna é relevante considerando o potencial desses componentes — como cobogós e elementos vazados — para contribuir com conforto ambiental, ventilação natural e desempenho térmico.

Diante desse contexto, este artigo tem como objetivo analisar a viabilidade do design paramétrico aplicado à impressão 3D em concreto, por meio do desenvolvimento de um cobogó modular não estrutural baseado no Diagrama de Voronoi. Busca-se avaliar o potencial dessa abordagem para promover inovação formal, eficiência material e adequação técnica, ampliando o repertório de soluções sustentáveis para o ambiente construído no âmbito da Construção 4.0.

O artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão bibliográfica; a Seção 3 descreve os procedimentos metodológicos; a Seção 4 expõe os resultados; a Seção 5 discute os achados à luz da literatura; e a Seção 6 apresenta as considerações finais e perspectivas futuras.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Sustentabilidade e resíduos na construção civil

A sustentabilidade na construção civil está diretamente associada à redução do consumo de recursos naturais, à eficiência no uso de materiais e ao adequado gerenciamento dos resíduos de construção e demolição (RCC). Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021), o setor é responsável por aproximadamente 30% a 40% dos resíduos sólidos urbanos, o que evidencia seu elevado impacto ambiental. A destinação inadequada desses resíduos contribui para a degradação ambiental, ocupação de áreas para disposição final e desperdício de materiais com alto valor energético incorporado.

Diante desse cenário, estratégias voltadas à redução do desperdício na origem têm se mostrado mais eficazes do que ações restritas à reciclagem posterior. Nesse sentido, decisões de projeto, métodos construtivos e tecnologias empregadas desempenham papel central na promoção da sustentabilidade no ambiente construído, ao permitir maior previsibilidade e racionalização do uso de insumos.

A manufatura aditiva aplicada à construção civil destaca-se como uma alternativa promissora por atuar diretamente na origem do desperdício. Ao possibilitar a deposição controlada do material apenas onde necessário, esse processo reduz sobras, elimina o uso intensivo de fôrmas e favorece a eficiência material (LIM et al., 2012; BUSWELL et al., 2018). A impressão 3D em concreto (3DCP), nesse contexto, permite a produção de componentes personalizados, com menor geração de resíduos e maior controle do processo construtivo.

Sob a perspectiva da economia circular, a 3DCP apresenta potencial para maximizar o valor dos recursos empregados, especialmente quando associada à redução do consumo de matéria-prima e à possibilidade de incorporação de materiais alternativos em misturas

cimentícias (BESKLOUBOVA; BUSWELL; BOS, 2024). Assim, a integração entre tecnologias digitais e decisões projetuais configura um caminho relevante para o desenvolvimento de soluções arquitetônicas mais eficientes e sustentáveis.

2.2. Impressão 3D em concreto (3DCP)

A impressão 3D em concreto consiste na deposição automatizada de material cimentício em camadas sucessivas a partir de um modelo digital tridimensional. Diferentemente dos métodos construtivos convencionais, a 3DCP reduz ou elimina a necessidade de fôrmas, amplia a liberdade geométrica e integra diretamente o projeto digital ao processo de fabricação (LIM et al., 2012; BUSWELL et al., 2018).

Conceitualmente, o processo envolve a interação entre material, equipamento e modelo digital. O concreto deve apresentar propriedades reológicas específicas, como extrudabilidade e estabilidade entre camadas, enquanto o equipamento — geralmente sistemas de pórtico ou braços robóticos — executa trajetórias definidas digitalmente. O modelo computacional, por sua vez, orienta a fabricação e permite ajustes paramétricos prévios (ZHANG et al., 2021).

Entre os métodos mais difundidos destacam-se o *Contour Crafting*, o *Concrete Printing* e o *D-Shape*. O *Contour Crafting* é frequentemente aplicado à construção em maior escala, enquanto o *Concrete Printing* apresenta maior flexibilidade geométrica, sendo adequado à produção de componentes arquitetônicos não estruturais. O *D-Shape*, baseado na aglutinação de material granular, oferece elevada precisão formal, embora ainda enfrente limitações quanto à escalabilidade e custo (BUSWELL et al., 2018).

Do ponto de vista ambiental, a 3DCP tem sido apontada como uma tecnologia com potencial para reduzir a geração de RCC, otimizar o uso de matéria-prima e diminuir etapas intermediárias do processo construtivo (ZHANG et al., 2021). Entretanto, permanecem desafios técnicos relevantes, como o comportamento anisotrópico do material impresso, a aderência entre camadas e a ausência de normativas consolidadas, fatores que limitam sua aplicação estrutural em larga escala (BUSWELL et al., 2018).

Nesse contexto, observa-se maior maturidade tecnológica da impressão 3D em concreto na produção de elementos arquitetônicos não estruturais, nos quais a liberdade formal e a eficiência material assumem papel central, especialmente quando associadas a estratégias avançadas de projeto.

2.3. Design paramétrico e Diagrama de Voronoi

O design paramétrico configura-se como uma abordagem estratégica no contexto da digitalização do projeto arquitetônico, fundamentando-se na definição de parâmetros e relações algorítmicas capazes de gerar múltiplas variações formais. Essa metodologia amplia a capacidade de resposta do projeto a requisitos funcionais, construtivos e ambientais, superando limitações do desenho geométrico fixo (KOLAREVIC, 2003).

Ao favorecer a integração entre concepção e fabricação digital, o design paramétrico torna-se particularmente relevante quando associado à manufatura aditiva, possibilitando a personalização em massa sem aumento significativo de custo ou complexidade produtiva (OXMAN, 2017). Nesse contexto, a forma passa a ser compreendida como resultado de relações paramétricas orientadas por desempenho.

Entre as estratégias geométricas amplamente utilizadas destaca-se o Diagrama de Voronoi, modelo matemático baseado no particionamento espacial a partir da proximidade entre pontos geradores. Inspirado em padrões naturais, o Voronoi permite a geração de estruturas celulares irregulares que combinam leveza formal, permeabilidade e eficiência material (LIMA, 2017).

Na arquitetura, o Voronoi tem sido aplicado no desenvolvimento de fachadas, divisórias e elementos vazados, nos quais a distribuição “não uniforme” de vazios e sólidos favorece a redução de material e o desempenho funcional. Estudos indicam que essas estruturas podem apresentar bom comportamento mecânico relativo, ao mesmo tempo em que contribuem para a racionalização de recursos (LIMA, 2017; OXMAN, 2017).

Quando associado à impressão 3D em concreto, o Diagrama de Voronoi potencializa os benefícios do design paramétrico, permitindo o controle preciso de parâmetros como espessura, densidade da malha e proporção de vazios. Dessa forma, a complexidade formal deixa de representar ineficiência e passa a atuar como instrumento de desempenho e sustentabilidade, alinhando-se aos princípios da Construção 4.0 e da economia circular.

3. Procedimentos Metodológicos

A pesquisa caracteriza-se como aplicada, de natureza exploratória e abordagem qualitativa, uma vez que investiga o potencial de integração entre design paramétrico e impressão 3D em concreto no desenvolvimento de soluções sustentáveis para o ambiente construído. A adoção de uma abordagem exploratória justifica-se pelo caráter ainda emergente da tecnologia, sobretudo no contexto nacional, onde são limitadas aplicações consolidadas associadas a estratégias avançadas de projeto (BUSWELL et al., 2018).

O delineamento metodológico corresponde a um estudo de caso projetual, orientado ao desenvolvimento de um elemento arquitetônico não estrutural, possibilitando a análise aprofundada de um objeto específico. O procedimento foi estruturado em cinco etapas principais, integrando fundamentação teórica, concepção projetual e validação digital.

Inicialmente, realizou-se uma revisão bibliográfica sistematizada sobre sustentabilidade na construção civil, resíduos de construção e demolição, impressão 3D em concreto, design paramétrico e aplicações do Diagrama de Voronoi, com o objetivo de embasar teoricamente o estudo (LIM et al., 2012; ZHANG et al., 2021). Em seguida, foram definidos os requisitos de projeto para um cobogó modular não estrutural, priorizando critérios de sustentabilidade, eficiência material, viabilidade construtiva por manufatura aditiva e potencial de personalização.

A modelagem paramétrica foi desenvolvida em ambiente CAD, adotando o Diagrama de Voronoi como estratégia geométrica central, permitindo a geração de estruturas celulares

irregulares a partir da variação de parâmetros geométricos, conforme Figura 1 (KOLAREVIC, 2003; LIMA, 2017).

Posteriormente, o modelo foi submetido à Análise de Elementos Finitos (FEA) para avaliação do comportamento mecânico sob carregamentos compatíveis com aplicações não estruturais, utilizando parâmetros de resistência reportados na literatura (ZHANG et al., 2021).

Por fim, realizou-se a análise integrada dos resultados, relacionando o desempenho estrutural e a eficiência material do componente aos objetivos de sustentabilidade propostos, considerando a complexidade geométrica como instrumento de desempenho e racionalização de recursos (OXMAN, 2017; BESKLOUBOVA; BUSWELL; BOS, 2024).

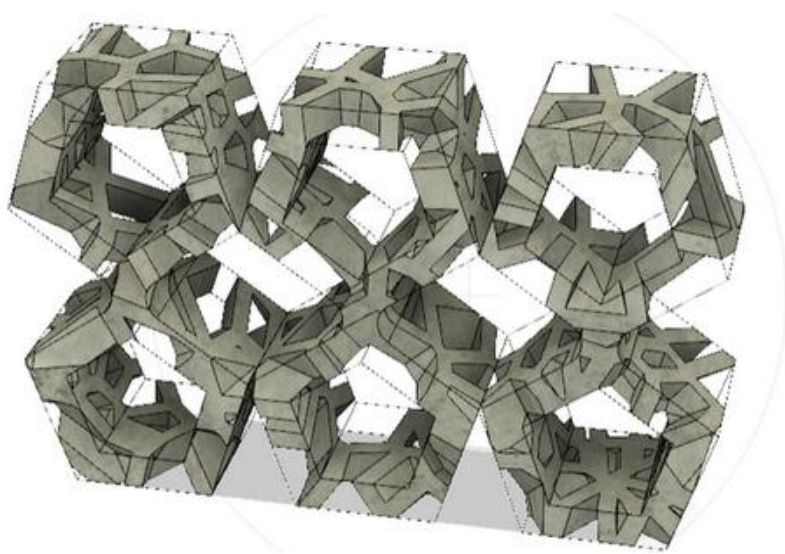


Figura 1: Modelagem paramétrica 3D, com adoção do Diagrama de Voronoi com diferentes valores.
Fonte: Os autores (2025).

4. Resultados

Os resultados apresentados nesta seção referem-se às etapas de modelagem paramétrica, validação digital por Análise de Elementos Finitos (FEA) e avaliação da viabilidade técnica do componente arquitetônico desenvolvido. O objeto de estudo consiste em um cobogó modular não estrutural, concebido para fabricação por impressão 3D em concreto, com geometria baseada no Diagrama de Voronoi.

4.1. Modelo paramétrico e configuração geométrica

O modelo paramétrico desenvolvido permitiu a geração de uma estrutura celular irregular a partir da definição de pontos geradores controláveis por parâmetros geométricos. Entre os principais parâmetros definidos destacam-se: dimensão global do módulo, espessura mínima das paredes, densidade da malha de Voronoi e proporção entre vazios e sólidos. A variação desses parâmetros possibilitou a obtenção de múltiplas configurações formais a partir de um único algoritmo, mantendo a coerência geométrica e a compatibilidade com o processo de impressão 3D em concreto.

A geometria final selecionada apresenta distribuição não uniforme dos vazios, característica típica de estruturas baseadas em Voronoi, favorecendo a permeabilidade visual e a leveza formal. Do ponto de vista construtivo, a configuração adotada respeita limitações técnicas associadas à extrusão do concreto, como continuidade das trajetórias de impressão e ausência de balanços excessivos, garantindo a viabilidade do processo de manufatura aditiva.

4.2. Avaliação da eficiência material

A estrutura vazada resultante do uso do Diagrama de Voronoi demonstrou potencial para redução do volume de material quando comparada a um bloco maciço de dimensões equivalentes. Embora não tenha sido realizada uma análise quantitativa completa de ciclo de vida, a comparação volumétrica entre a geometria parametrizada e uma geometria sólida indicou diminuição significativa da massa total do componente, evidenciando ganhos em eficiência material.

Essa redução está diretamente associada à capacidade do design paramétrico de distribuir material apenas nas regiões necessárias para garantir estabilidade formal, reforçando o papel da complexidade geométrica como estratégia para racionalização de recursos em elementos não estruturais.

4.3. Análise estrutural por Elementos Finitos (FEA)

A validação digital do modelo foi realizada por meio de Análise de Elementos Finitos (FEA), considerando carregamentos estáticos compatíveis com aplicações não estruturais. As simulações indicaram que as tensões máximas se concentraram nas regiões de menor seção transversal, especialmente nas junções entre células do Voronoi. Ainda assim, os valores de tensão obtidos permaneceram abaixo dos limites estimados de resistência à compressão do material cimentício adotado como referência, conforme dados reportados na literatura técnica (Figura 2).

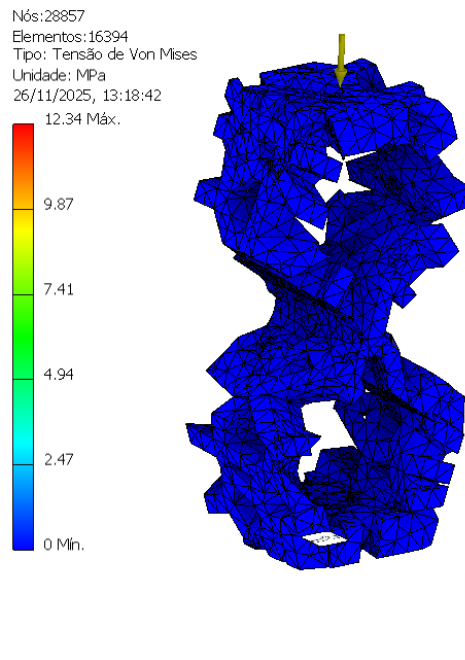


Figura 2: Validação digital por Análise de Elementos Finitos (FEA) através do Software AutoDesk Inventor. Fonte: Os autores (2025).

O comportamento estrutural observado sugere que a geometria parametrizada apresenta estabilidade mecânica adequada para aplicações não estruturais, como divisórias, elementos vazados e cobogós. A análise também evidenciou que ajustes paramétricos na espessura das paredes e na densidade da malha permitem controlar o desempenho estrutural do componente, possibilitando sua adaptação a diferentes requisitos de uso.

4.4. Viabilidade técnica para impressão 3D em concreto

A avaliação da viabilidade técnica do componente considerou critérios relacionados à compatibilidade geométrica com o processo de impressão 3D em concreto, incluindo continuidade das trajetórias de extrusão, estabilidade das camadas depositadas e ausência de geometrias incompatíveis com o processo sem fôrmas. Os resultados indicaram que o modelo desenvolvido atende aos requisitos básicos para fabricação por 3DCP, especialmente no que se refere à deposição camada a camada e à manutenção da forma durante o processo construtivo.

Além disso, a natureza paramétrica do modelo permite ajustes rápidos em função de limitações específicas de equipamentos ou materiais, ampliando sua adaptabilidade a diferentes contextos produtivos. Essa flexibilidade reforça o potencial do design paramétrico como ferramenta de suporte à manufatura aditiva, especialmente no desenvolvimento de componentes arquitetônicos customizáveis.

4.5. Síntese dos resultados

De forma sintética, os resultados obtidos demonstram que:

- i. o modelo paramétrico baseado no Diagrama de Voronoi é compatível com os princípios da impressão 3D em concreto;
- ii. a geometria desenvolvida apresenta potencial de redução de material em relação a soluções maciças;
- iii. a validação digital por FEA indica desempenho mecânico adequado para aplicações não estruturais; e
- iv. o componente possui viabilidade técnica para fabricação por manufatura aditiva, com possibilidade de personalização a partir da variação de parâmetros geométricos.

Esses resultados fornecem base objetiva para a análise e discussão apresentada na seção seguinte, na qual são exploradas as implicações dos achados à luz da literatura e dos princípios de sustentabilidade em projeto.

5. Análise e Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos corroboram a literatura recente ao indicar que a impressão 3D em concreto (3DCP) apresenta viabilidade técnica significativa para a produção de elementos arquitetônicos não estruturais, especialmente quando associada a estratégias avançadas de projeto digital. A compatibilidade do modelo desenvolvido com o processo de deposição camada a camada reforça achados anteriores que apontam a manufatura aditiva como uma alternativa promissora à construção convencional, sobretudo no que se refere à redução de desperdícios e à ampliação da liberdade formal (LIM et al., 2012; BUSWELL et al., 2018).

A análise estrutural por Elementos Finitos (FEA) demonstrou que, mesmo apresentando geometria complexa e irregular, o cobogó parametrizado baseado no Diagrama de Voronoi manteve níveis de tensão compatíveis com aplicações não estruturais. Esse resultado dialoga diretamente com estudos que indicam que estruturas celulares e reticulares, inspiradas em padrões naturais, podem distribuir esforços de maneira eficiente, mesmo com menor quantidade de material empregado (KOLAREVIC, 2003; LIMA, 2017). Assim, a complexidade formal observada não se configura como fator de fragilidade, mas como um instrumento de desempenho estrutural relativo, quando adequadamente controlada por parâmetros geométricos.

Do ponto de vista da eficiência material, os resultados reforçam a ideia de que o design paramétrico, aliado à manufatura aditiva, permite romper com o paradigma histórico que associa formas complexas a maior consumo de recursos. Conforme discutido por Oxman (2017), a complexidade geométrica, quando orientada por desempenho e viabilizada por fabricação digital, pode contribuir para a redução de material e para a otimização funcional dos componentes. No caso analisado, a estrutura vazada baseada em Voronoi demonstrou potencial para diminuir o volume de material em comparação a geometrias maciças,

alinhando-se aos princípios de racionalização de recursos e sustentabilidade em projeto (Figura 3).



Figura 3: Imagens renderizadas dos cobogós desenvolvidos, com auxílio de IA Gemini. Fonte: Os autores (2025).

Sob a perspectiva ambiental, os resultados obtidos estão em consonância com estudos que apontam a 3DCP como uma tecnologia capaz de atuar na origem do desperdício, reduzindo significativamente a geração de resíduos de construção e demolição (RCC) (BUSWELL et al., 2018; BESKLOUBOVA; BUSWELL; BOS, 2024). Embora o presente estudo não tenha incluído uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) completa, a redução do volume de material e a eliminação do uso de fôrmas indicam um potencial relevante de mitigação de impactos ambientais, especialmente quando comparado a métodos construtivos tradicionais.

A escolha do Diagrama de Voronoi como estratégia geométrica mostrou-se particularmente adequada ao contexto da impressão 3D em concreto, uma vez que sua lógica de particionamento espacial permite controle preciso de parâmetros como espessura, densidade e proporção de vazios. Essa flexibilidade paramétrica possibilita ajustar o desempenho do componente a diferentes requisitos técnicos e ambientais, reforçando o papel do design paramétrico como ferramenta estratégica para a inovação sustentável (KOLAREVIC, 2003; OXMAN, 2017). Além disso, a aplicação do Voronoi em elementos vazados, como cobogós, potencializa benefícios relacionados à permeabilidade visual, ventilação natural e qualidade ambiental dos espaços, aspectos relevantes no contexto do ambiente construído brasileiro (Figura 4).

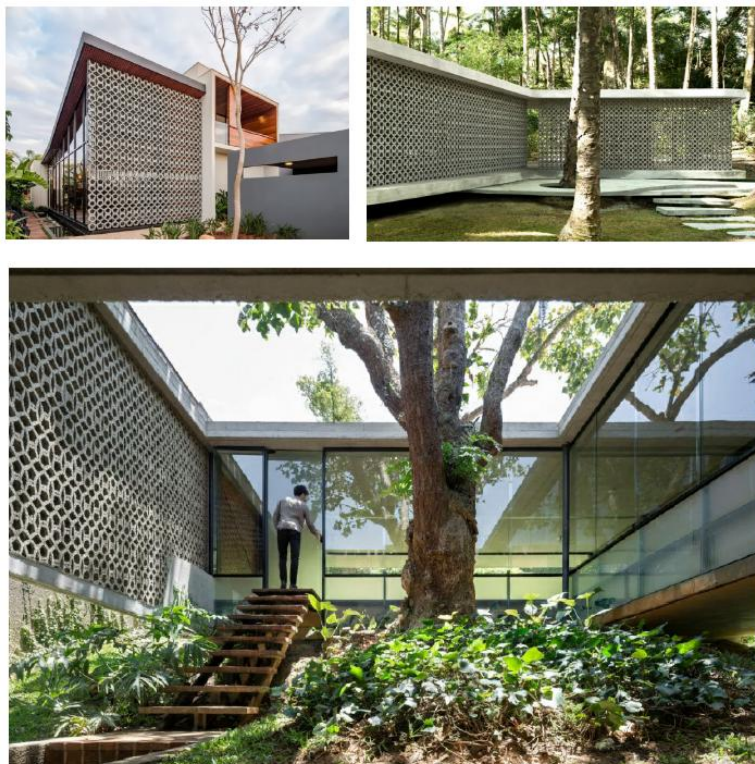


Figura 4: Simulações do cobogó aplicado em fachadas. Fonte: Os autores (2025).

Entretanto, os resultados também evidenciam limitações importantes, em consonância com a literatura. A validação exclusivamente digital, por meio de FEA, não substitui ensaios físicos em escala real, especialmente no que se refere ao comportamento anisotrópico do concreto impresso e à aderência entre camadas, amplamente discutidos por Buswell et al. (2018) e Zhang et al. (2021). Assim, embora os resultados indiquem viabilidade técnica preliminar, a aplicação prática do componente requer etapas adicionais de validação experimental e ajustes de material e processo.

Por fim, os achados reforçam que a aplicação mais imediata e segura da 3DCP reside no desenvolvimento de componentes arquitetônicos não estruturais, nos quais as exigências normativas são menos restritivas e a inovação formal e ambiental assume papel central. Nesse sentido, o estudo contribui para preencher uma lacuna identificada na literatura nacional, ao demonstrar, por meio de um estudo de caso projetual, o potencial da integração entre design paramétrico, Diagrama de Voronoi e impressão 3D em concreto como estratégia para o desenvolvimento de soluções sustentáveis e inovadoras para o ambiente construído.

6. Considerações Finais e Conclusão

O presente estudo analisou a viabilidade da aplicação do design paramétrico associado à impressão 3D em concreto no desenvolvimento de um cobogó modular não estrutural, com enfoque em sustentabilidade, eficiência material e inovação em projeto. A partir de um estudo

de caso projetual baseado no Diagrama de Voronoi, foi possível demonstrar que a integração entre parametrização geométrica e manufatura aditiva constitui uma abordagem tecnicamente viável e alinhada aos princípios da Construção 4.0.

Os resultados indicaram que a geometria parametrizada apresenta desempenho mecânico compatível com aplicações não estruturais, além de potencial para redução do consumo de material quando comparada a soluções maciças convencionais. A flexibilidade inerente ao modelo paramétrico permitiu ainda a exploração de múltiplas configurações formais a partir de um único algoritmo, evidenciando o potencial da personalização em massa como estratégia para o desenvolvimento de componentes arquitetônicos mais eficientes e adaptáveis ao ambiente construído.

Sob a perspectiva da sustentabilidade em projeto, a pesquisa reforça o papel da impressão 3D em concreto como tecnologia capaz de atuar na origem do desperdício, contribuindo para a redução de resíduos de construção e demolição e para a racionalização do uso de recursos. Nesse sentido, a complexidade formal, frequentemente associada a maior impacto ambiental, mostrou-se um instrumento de desempenho e eficiência material quando orientada por critérios paramétricos e viabilizada por processos de fabricação digital.

Como limitação, destaca-se a ausência de ensaios físicos em escala real, restringindo a validação dos resultados ao ambiente digital. Assim, estudos futuros devem contemplar a prototipagem em concreto impresso, ensaios mecânicos e análises de durabilidade, bem como a incorporação de ferramentas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para quantificação mais precisa dos impactos ambientais. Ainda assim, o estudo contribui para o avanço do conhecimento no campo da sustentabilidade aplicada ao projeto, ao demonstrar o potencial da integração entre design paramétrico e impressão 3D em concreto no desenvolvimento de soluções inovadoras para o ambiente construído brasileiro.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15112:2021**. Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2021.

BESKLOUBOVA, E.; BUSWELL, R. A.; BOS, F. P. **Environmental and economic assessment of 3D concrete printing in construction**. Journal of Cleaner Production, v. 389, 2024.

BUSWELL, R. A. et al. **3D concrete printing: A review of research and development**. Cement and Concrete Research, v. 112, p. 37–49, 2018.

KOLAREVIC, B. **Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing**. New York: Spon Press, 2003.

LIM, S. et al. **Development in construction-scale additive manufacturing processes**. Automation in Construction, v. 21, p. 262–268, 2012.

LIMA, F. **Diagrama de Voronoi aplicado à arquitetura e ao design**. São Paulo: Blucher, 2017.

OXMAN, N. **Material ecology**. Journal of Design and Science, v. 1, n. 1, 2017.

ZHANG, Y. et al. **Printable concrete: Materials, processes and structural performance**. Cement and Concrete Composites, v. 122, 2021.