REFORÇOS POLIMÉRICOS IMPRESSOS EM 3D NA MANUFATURA ADITIVA DE MATRIZES CIMENTÍCIAS: ESTUDO DE ARQUITETURAS COMPLEXAS INSPIRADAS NA NATUREZA

Eduarda Silveira Floriano, Matheus Frederico Ferreira Henckmaier, José da Silva Andrade Neto

INTRODUÇÃO

O concreto é o material mais amplamente empregado na construção civil devido ao seu elevado desempenho mecânico sob esforços de compressão. Entretanto, sua natureza frágil constitui um desafio estrutural relevante, limitando significativamente sua aplicação em situações submetidas a tensões de tração e flexão (Carpinteri et al., 2017). O Concreto de Alto Desempenho (CAD), por sua vez, representa uma evolução do concreto convencional, caracterizando-se por porosidade reduzida, elevada resistência à compressão e maior ductilidade (Neville, 1998). Ainda assim, o material mantém um comportamento predominantemente frágil, apresentando fissurações estruturais quando não associado a reforços mecânicos adequados.

Nesse contexto, a manufatura aditiva surge como uma alternativa promissora de reforço estrutural (Camacho et al., 2018), por meio da utilização de filamentos como PETG e ABS, capazes de incrementar a resistência mecânica do compósito. A impressão 3D por deposição de material possibilita a criação de estruturas complexas e parametrizadas (Nordin et al., 2013), projetadas para otimizar a distribuição de tensões ao longo de toda a estrutura, de maneira análoga ao que se observa em estruturas presentes na natureza.

A biomimética é o estudo que sobre estruturas biológicas, funções, processos e formas na natureza, a fim de encontrar soluções aplicáveis em outros campos da ciência. Imitar a natureza, por sua vez, encontra-se presente em diversas áreas multidisciplinares, como a arquitetura, a engenharia civil, a engenharia aeronáutica, entre outras indústrias voltadas à inovação e à otimização de desempenho. Isso se justifica pelo fato de que as estruturas biológicas resultam de um extenso processo evolutivo orientado à redistribuição eficiente de tensões e à economia de energia, mecanismos fundamentais para a preservação e a sobrevivência dos organismos (Detanico et al., 2010).

Este trabalho visa compreender o comportamento de reforços poliméricos em matriz cimentícias, com o objetivo de superar a característica frágil do concreto por meio de estratégias biomiméticas estruturais. Para isso, corpos de prova foram submetidos a ensaios de flexão e deformação específica, o que permite avaliar a tenacidade dos materiais.

DESENVOLVIMENTO

Com base na revisão bibliográfica, foram identificados *scripts* destinados à geração dos modelos das malhas. Em um primeiro momento, optou-se pelo uso do filamento PLA para fins de aprendizagem e testes preliminares de impressão, sendo este posteriormente substituído por materiais de maior desempenho mecânico (Efstathiadis et al., 2023).

A malha biomimética foi otimizada parametricamente via diagramas de Voronoi nos softwares Rhinoceros e Grasshopper, visando conciliar a viabilidade da manufatura aditiva com a integridade mecânica e morfológica da estrutura (Figura 1a–b).

Foram desenvolvidas variações estruturais definidas pela quantidade de nós do diagrama (60, 80, 100, 120 e 140 nós). A partir de ensaios de flexão e percolação da matriz cimentícia, a malha de 100 nós foi selecionada para a realização da pesquisa, empregando-se os filamentos de PETG e ABS. Em

todas as configurações, manteve-se constante o raio/espessura dos elementos em 1,5 mm, com parâmetro de suavização igual a 1. As dimensões globais das amostras permaneceram inalteradas, correspondendo a 143 mm × 38 mm × 38 mm (Figura 1c).
Na sequência, as malhas foram preenchidas com uma matriz de CAD autoadensável (Figura 1d). Utilizou-se traço 1:1 (cimento:areia), em massa, com relação água/cimento de 0,28 e teor de superplastificante (ADVA Flow 880) de 0,30% em relação à massa de cimento.
Foram confeccionados três corpos de prova (CPs) para cada tipo de filamento, além de outros três CPs de referência, compostos exclusivamente por CAD autoadensável, sem a presença da malha.
Por fim, foram realizados ensaios de flexão, com determinação das respectivas curvas de força *versus* deformação, por meio de uma prensa hidráulica (Figura 1e–f).

RESULTADOS

Os resultados foram satisfatórios. Os CPs sem a malha voronoi apresentaram ruptura brusca e sem ductilidade, enquanto aqueles que continham os reforços resistiram à flexão mesmo após o rompimento da matriz. Ou seja, a malha redistribuiu as tensões, absorveu energia e superou a característica frágil do concreto. Entretanto, notam-se divergências na curva força–deformação entre os reforços de ABS e PETG (Figura 2a–b), sendo o último mais tenaz. Como o concreto é um material altamente alcalino e de pH elevado, é possível que alguns termoplásticos se deteriorem e comprometam o desempenho mecânico da estrutura. O resultado corrobora com os estudos de Santana (2021), em que o PETG não perde resistência mecânica após ser inserido em ambientes alcalinos. Entretanto, de acordo com Soto-Bernal (2026), o ABS como reforço em matrizes cimentícias é promissor. Foram feitos ensaios de deformação específica com os filamentos (Figura 2c–d), os resultados ressaltam que o PETG apresenta uma maior resistência à tração e possui maior deformabilidade. Ou seja, tanto em termos de deformação absoluta quanto de deformação específica, o PETG suporta maior alongamento antes da falha, indicando um comportamento mais dúctil em comparação ao ABS, que rompe de forma mais abrupta e com menor deformação total.

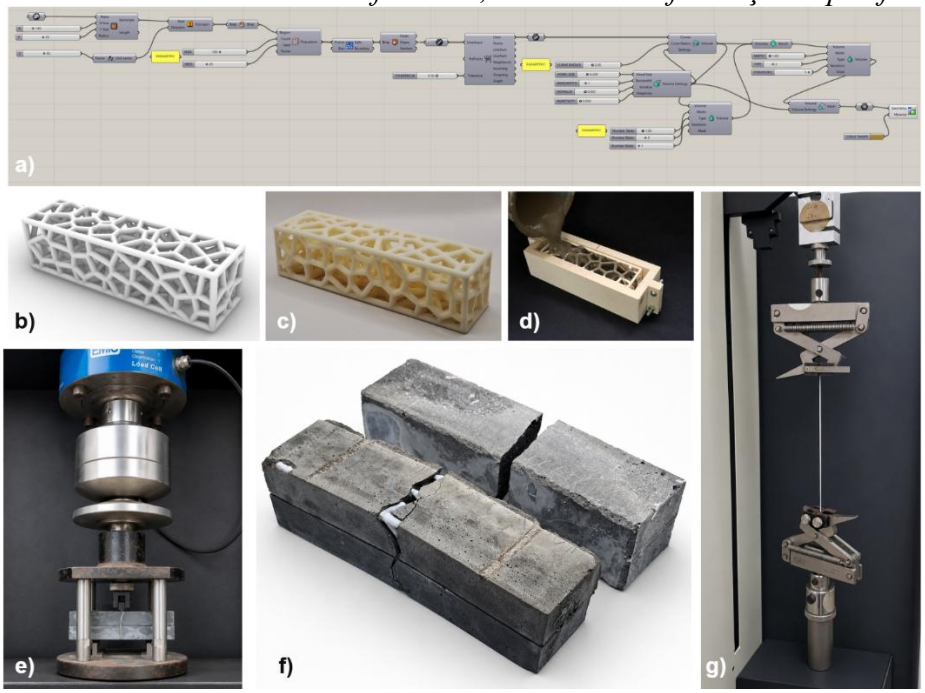
CONSIDERAÇÕES FINAIS

O concreto, embora seja o material mais utilizado na construção civil, não é capaz de suportar todos os esforços mecânicos aos quais uma estrutura pode ser submetida, mesmo quando se utiliza uma classe mais sofisticada, como o CAD. Diante disso, o uso de reforços em matrizes cimentícias torna-se indispensável. Nesse contexto, a manufatura aditiva surge como uma ferramenta promissora, pois possibilita a criação de estruturas complexas e parametrizadas, como malhas biomiméticas, inspiradas em estruturas biológicas otimizadas ao longo de um extenso processo evolutivo.
Os resultados mostraram que os CPs sem a malha romperam com maior facilidade, enquanto aqueles reforçados com a estrutura biomimética apresentaram melhor desempenho, atenuando a fragilidade característica do concreto. Além disso, observou-se que as malhas impressas em PETG tiveram desempenho superior às impressas em ABS.
Apesar desses achados, ainda há uma lacuna na literatura quanto à comparação entre esses dois filamentos em ambientes alcalinos, condição típica do concreto. Assim, estudos futuros devem investigar a resistência química de ambos os materiais, a fim de definir qual filamento apresenta melhor desempenho como reforço para matrizes cimentícias.

Palavras-chave: (CAD; voronoi; biomimética; malha; filamento.)

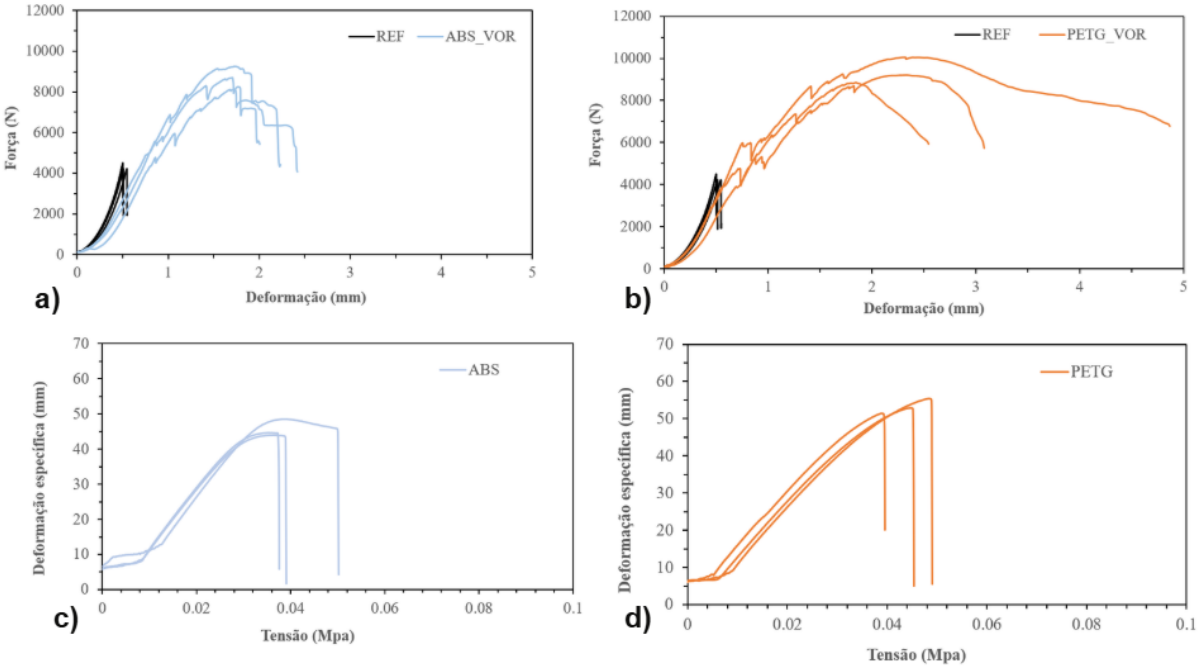
ANEXOS

Figura 1. *Etapas da Metodologia: (a) Parametrização Voronoi via Grasshopper; (b) Modelo digital; (c) Impressão da malha em ABS; (d) Moldagem do CP; (e) Ensaios de flexão; (f) CPs rompidos com malha PETG e a referência; Ensaio de Deformação específica (g).*



Fonte: Autores (2026).

Figura 2. *Ensaio de flexão, ABS e PETG (a–b); Ensaios de Deformação específica, ABS e PETG (c–d)*



Fonte: Autores (2026).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMACHO, Daniel Delgado; CLAYTON, Patricia; O'BRIEN, William J.; SEEPERSAD, Carolyn; JUENGER, Maria; FERRON, Raissa; SALAMONE, Salvatore. Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review. *Automation in Construction*, v. 89, p. 110-119, 2018. ISSN 0926-5805. DOI: doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031.

CARPINTERI, Andrea; FORTESE, Giovanni; RONCHEI, Camilla; SCORZA, Daniela; VANTADORI, Sabrina. Mode I fracture toughness of fibre reinforced concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, v. 91, p. 66-75, 2017. ISSN 0167-8442. DOI: doi.org/10.1016/j.tafmec.2017.03.015.

DETANICO, Flora Bittencourt; TEIXEIRA, Fábio Gonçalves; SILVA, Tania Luisa Koltermann da. A biomimética como método criativo para o projeto de produto. *Design & Tecnologia* [recurso eletrônico]. Porto Alegre, RS, v. 1, n. 2, p. 101-113, 2010.

EFSTATHIADIS, Alexandros; SYMEONIDOU, I.; TSONGAS, K.; TZIMTZIMIS, E. K.; TZETZIS, Dimitrios. Parametric Design and Mechanical Characterization of 3D-Printed PLA Composite Biomimetic Voronoi Lattices Inspired by the Stereom of Sea Urchins. *Journal of Composites Science*, v. 7, n. 1, artigo 3, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/jcs7010003.

MISHRA, Vishal; BHARAT, Nikhil; KUMAR, Vijay; VEEMAN, D.; VELLAISAMY, Murugan. Assessment of physio-mechanical characteristics of ABS/PETG blended parts fabricated by material extrusion 3D printing. *Physica Scripta*, v. 99, n. 12, artigo 125033, 2024. DOI: 10.1088/1402-4896/ad8fe0.

NORDIN, Axel; HOPF, Andreas; MOTTE, Damien. Generative design systems for the industrial design of functional mass producible natural-mathematical forms. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF INTERNATIONAL ASSOCIATION OF SOCIETIES OF DESIGN RESEARCH, 5., 2013, Tokyo. *Anais [...]*. Tokyo: International Association of Societies of Design Research (IASDR), 2013. p. 2931-2941.

SANTANA, Henrique A.; ANDRADE NETO, José S.; RIBEIRO, Daniel V.; CILLA, Marcelo S.; DIAS, Cleber M. R. Accelerated Alkaline Attack of 3D Printing Polymers to Assess Their Durability in Geopolymer-Based Matrices. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, n. 11, nov. 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003960.

SUMRA, Y.; PAYAM, S.; ZAINAH, I. The pH of Cement-based Materials: A Review. *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition*, v. 35, p. 908-924, 2020. DOI: 10.1007/s11595-020-2337-y.