

MODELAGEM MATEMÁTICA NA INFLUÊNCIA DO TAMANHO DOS POROS NO CRESCIMENTO DE CÉLULAS ÓSSEAS EM SCAFFOLDS DE PLA/HIDROXIAPATITA FABRICADOS POR IMPRESSÃO 3D

Amanda Naomi Ohe (PIBIC/CNPq/FA/UEM), Thelma S. P. Cellet (coorientadora),
João Debastiani Neto (orientador). E-mail: jdneto@uem.br

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Exatas, CRG, Goioerê, PR.

Área e subárea do conhecimento: Matemática / Matemática Aplicada

Palavras-chave: *Scaffolds*; impressão 3D; PLA.

Resumo

A engenharia de tecidos busca alternativas eficientes para regeneração óssea, sendo scaffolds poliméricos fabricados por impressão 3D uma estratégia promissora. Este trabalho objetivou otimizar a modelagem e impressão 3D de scaffolds de ácido polilático (PLA) pela técnica de modelagem por fusão e deposição (FDM). Três modelos (PLA-01, PLA-02 e PLA-03) foram projetados no Autodesk Inventor, fatiados no PrusaSlicer e impressos em Elegoo Neptune 3 PRO. A caracterização por FTIR-ATR e MEV confirmou a composição química do material e a viabilidade da técnica. Os resultados demonstraram alta precisão dimensional e integridade estrutural dos scaffolds, com porosidade uniforme e interconectividade adequada. Verificou-se que parâmetros de impressão influenciam significativamente a qualidade final das estruturas. Conclui-se que a FDM é viável para produção de scaffolds de PLA, porém requer otimização de parâmetros para aplicações em engenharia tecidual.

Introdução

Os métodos convencionais de reparo de lesões ósseas apresentam limitações, o que impulsiona a busca por alternativas. Scaffolds poliméricos por impressão 3D surgem como solução promissora, permitindo estruturas com porosidade controlada e propriedades mecânicas adequadas (CHIA; WU, 2015). A técnica FDM destaca-se pela acessibilidade e pelo uso de PLA, polímero biocompatível e biodegradável, cujas limitações podem ser minimizadas por modificações de superfície (MONDAL et al., 2020). Este estudo objetivou desenvolver scaffolds de PLA impressos em 3D com modificação superficial por hidrólise básica e posterior deposição de hidroxiapatita em solução SBF (KOKUBO et al., 2005).

[Digite aqui]

Materiais e Métodos

Modelagem e impressão dos scaffolds

O PLA foi obtido comercialmente na forma de filamento de 1,75 mm de diâmetro. A modelagem 3D foi baseada em Rahatuzzaman et al. (2024), utilizando Autodesk Inventor para projetar três modelos com diferentes geometrias de poros. Os arquivos foram convertidos para STL, fatiados no PrusaSlicer e impressos na Elegoo Neptune 3 PRO com os seguintes parâmetros: temperatura do bico 205°C, plataforma 60°C, velocidade de impressão 30 mm/s e primeira camada a 20 mm/s. Os scaffolds possuem dimensões de 8,89 × 8,89 × 24,13 mm, com poros variando conforme o modelo: PLA-01 (0,635 × 0,635 mm), PLA-02 (0,898 × 0,898 mm) e PLA-03 (1,27 × 1,796 mm).

Hidrólise alcalina e deposição de CaP

Os scaffolds foram submetidos à hidrólise alcalina com NaOH (0,1; 0,5 e 1,0 mol·L⁻¹) a 90°C por 15 minutos, lavados com água deionizada e secos. Para a deposição de CaP, utilizaram-se *solução de fluido corporal simulado* (SBF) preparada conforme Kokubo et al. (2005). Os scaffolds hidrolisados foram imersos em 60 mL de SBF por 7 e 14 dias, com troca do meio a cada 24 horas.

Caracterização

Os espectros de FTIR-ATR foram obtidos em espectrômetro Bruker Vertex 70-RAM II (128 varreduras, resolução 4 cm⁻¹). A análise morfológica foi realizada por MEV (Shimadzu SS 550) com metalização prévia das amostras com ouro.

Resultados e Discussão

Os parâmetros de impressão otimizados permitiram a produção de scaffolds com alta precisão dimensional e integridade estrutural (BAPTISTA et al., 2020). A análise macroscópica confirmou porosidade uniforme e interconectividade entre os poros (Figura 2), parâmetros críticos para viabilidade celular e difusão de nutrientes (CHIA; WU, 2015).

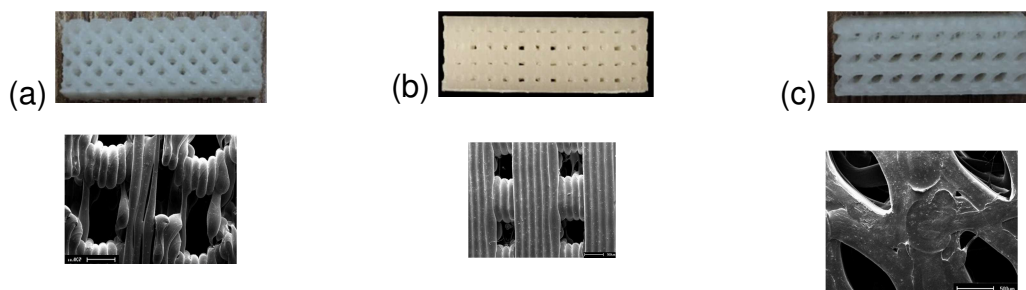


Figura 1: Foto digital e micrografias de MEV dos *scaffolds* (a) PLA-01, (b) PLA-02 e (c) PLA-03.

[Digite aqui]

As micrografias de MEV (Figura 1) revelaram características distintas: PLA-01 apresentou filamentos enrolados e poros irregulares; PLA-02 exibiu camadas alternadas com falta de uniformidade; PLA-03 mostrou maior homogeneidade, mas com adesão frágil entre camadas, refletindo imprecisões inerentes ao processo FDM (RAHATUZZAMAN et al., 2024).

A análise por FTIR-ATR (figura 2) confirmou a composição química do PLA puro através das bandas características em 1750 cm^{-1} (C=O), 1452 cm^{-1} e 1361 cm^{-1} (CH_3), 1175 cm^{-1} e 1080 cm^{-1} (SABEE et al., 2016).

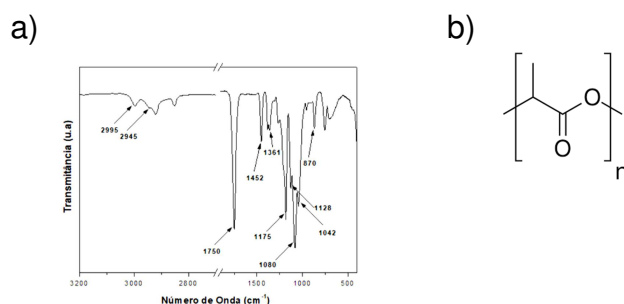


Figura 2: (a) Espectro de FTIR-ATR e (b) estrutura química do PLA.

A hidrólise básica com NaOH 0,5 e $1,0\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (Figura 3) promoveu a clivagem das ligações ésteres nos scaffolds PLA-02 e PLA-03, formando grupos hidroxila e carboxila e carboxílicos na superfície (SABEE et al., 2016).

Esses grupos atuaram como sítios de nucleação para deposição de hidroxiapatita carbonatada durante imersão em SBF (Figura 4), confirmada pelas bandas em 1021 cm^{-1} (fosfato) e 870 cm^{-1} (carbonato) (MONDAL et al., 2020). Não houve deposição significativa no PLA-01 ou com NaOH 0,1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

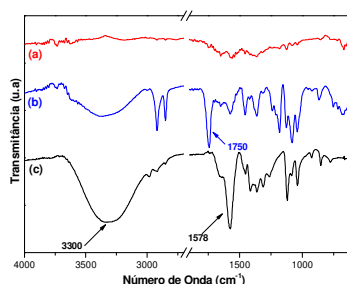


Figura 3: Espectro de FTIR-ATR dos scaffolds de PLA após hidrólise com NaOH 1,0M (a) PLA-01-NaOH1M, (b) PLA-02NaOH1M e (c) PLA-03NaOH1M.

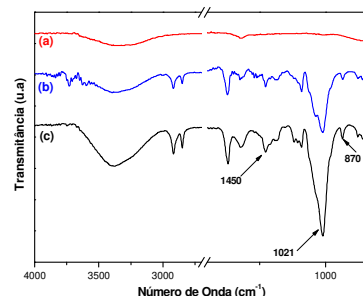


Figura 4: Espectro de FTIR-ATR dos scaffolds de PLA após imersão por 14 dias em SBF (a) PLA-01, (b) PLA-02NaOH1M-SBF e (c) PLA-03NaOH1M-SBF.

Conclusões

[Digite aqui]

A impressão 3D por FDM mostrou-se viável para fabricar scaffolds de PLA. A hidrólise alcalina com $\text{NaOH} \geq 0,5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ permitiu a modificação superficial eficaz e subsequentemente a deposição de hidroxiapatita carbonatada via método biomimético. O modelo PLA-03 apresentou melhor desempenho em termos de uniformidade estrutural. São necessários ajustes nos parâmetros de impressão para melhorar a precisão dimensional, e testes biológicos são recomendados para validar a eficácia dos scaffolds.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Estadual de Maringá (UEM), ao Departamento de Ciências (DCI) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro, imprescindível para a condução deste estudo.

Referências

BAPTISTA, R. et al. On the effect of design and fabrication parameters on mechanical performance of 3D printed PLA scaffolds. *Bioprinting*, v. 20, e00096, 2020.

CHIA, H. N.; WU, B. M. Recent advances in 3D printing of biomaterials. *Journal of Biological Engineering*, v. 9, n. 1, p. 4, 2015.

KOKUBO, T. et al. Process and kinetics of bonelike apatite formation on sintered hydroxyapatite in a simulated body fluid. *Biomaterials*, v. 26, p. 4366–4373, 2005.

MONDAL, S. et al. Hydroxyapatite nano bioceramics optimized 3D printed poly lactic acid scaffold for bone tissue engineering application. *Ceramics International*, v. 46, n. 3, p. 3443-3455, 2020.

RAHATUZZAMAN, M. et al. Design, fabrication, and characterization of 3D-printed ABS and PLA. *Results in Engineering*, v. 21, p. 101685, 2024.

SABEE, M. M. S. et al. Characterization and in vitro study of surface modified PLA microspheres treated with NaOH. *Journal of Polymer Materials*, v. 33, n. 1, p. 191, 2016.

[Digite aqui]