

CARACTERIZAÇÃO DE DISPOSITIVOS MÉDICOS PRODUZIDOS EM PLA E HIDROXIAPATITA VIA MANUFATURA ADITIVA

Caio Fernando da Silva – nandosilvapqt@gmail.com

Rosinei Batista Ribeiro - rosinei1971@gmail.com

Adilson Mello da Silva – prof.adilsonmello@gmail.com

Marcelino Rivas Santana - marcerivas2013@gmail.com

Palavras-chave: PLA, hidroxiapatita, interdisciplinaridade, caracterização microestrutural.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho surge a partir de uma parceria entre pesquisadores de forma, da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), a CGPEP / CEETEPS – Coordenação Geral de Pós-Graduação do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, a Universidad de Matanzas, Universidad de La Habana e o Instituto A.V. Lykov de Transferência de Calor e Massa da Academia Nacional de Ciências da Bielorrússia.

Em busca de aprimorar o tratamento de lesões ósseas traumáticas, que Segundo Einhorn & Gerstenfeld (2015), representam 10% dos casos de trauma em humanos e sua recuperação envolve uma fase que provoca o desenvolvimentos de novos tecidos óssos, e não se recuperam apropriadamente. Segundo González-González et al. (2023), a fabricação de dispositivos médicos representam um campo emergente que demanda especialização multidisciplinar para otimizar propriedades como permeabilidade, biocompatibilidade e resistência mecânica. Neste contexto, surge a necessidade de tornar o tratamento dessas lesões mais eficaz e acessível em termos de custo e viabilidade, especialmente para populações com acesso limitado a tecnologias avançadas e meios de produção.

Isto dá origem à este estudo exploratório, que tem como objetivo desenvolver e caracterizar dispositivos médicos a partir de PLA e Hidroxiapatita, materiais que podem oferecer alternativas para o tratamento de lesões ósseas. A pesquisa visa apresentar as

propriedades microestruturais, físicas e mecânicas desses dispositivos, com o intuito de otimizar implantes ósseos que não só recuperem a mobilidade e estabilidade corporal, mas que também auxiliem no processo de regeneração óssea.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Os materiais estão em contato conosco desde sempre, sua associação com a cultura consta desde à Idade da Pedra, passando pela Idade do Bronze, Idade do Ferro, entre outras (CALLISTER, 2018).

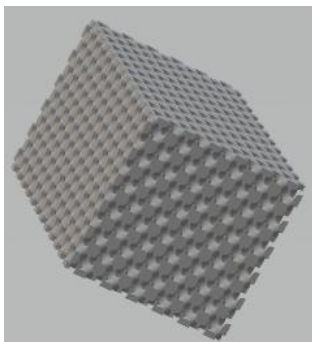
É por meio dos materiais que percebemos o mundo, seja pela aparência, pelo toque e até pela forma, segundo Ashby e Johnson (2010), é imprescindível dar a atenção devida à este aspecto pois desta maneira é possível ter um maior controle sobre a percepção do usuário em relação ao produto, além de possibilitar novas maneiras de controlar o custo do produto seja economizando em quantidade por conhecer melhor as propriedades mecânicas, ou utilizando materiais melhores selecionados, o que possibilita determinar as condições de operação que será submetido o referido material e levantar as propriedades requeridas para tal aplicação, ter ciência de como esses valores foram determinados e o levantamento sobre o tipo de degradação que o material sofrerá em serviço, permite desenvolver e/ou aplicar materiais adequados para aquela aplicação, aprimorando a eficiência de suas propriedades físicas.

Dentre estes materiais, vale destacar o Acido Polialítico (PLA) que Segundo Razzaq et al., (2025), consiste de um biopolímero sintético que, a partir da produção via manufatura aditiva, pode assumir uma extensa gama de complexidade morfológica, e seu emprego aliado à hidroxiapatita, um material cerâmico à base de fosfato de cálcio capaz de promover a proliferação celular e a regeneração de tecidos ósseos, permite o desenvolvimento de implantes ósseos personalizados e acessíveis, unindo as propriedades biocompatíveis, biodegradáveis, bioabsorvíveis, e ósseoindutivas desses materiais, que são capazes de provocar a regeneração e reconstrução do tecido ósseo, da zona lesionada (Fernández-Cervantes, et-al., 2019).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O processo experimental compreende desde o desenvolvimento dos modelos tridimensionais (Figura 1) até a realização dos ensaios destrutivos, distribuindo e categorizando as tarefas em etapas, planejadas de forma sistemática segundo o Design of Experiments (DOE), possibilitando o controle de variáveis independentes que podem interferir na realização e resultados dos experimentos.

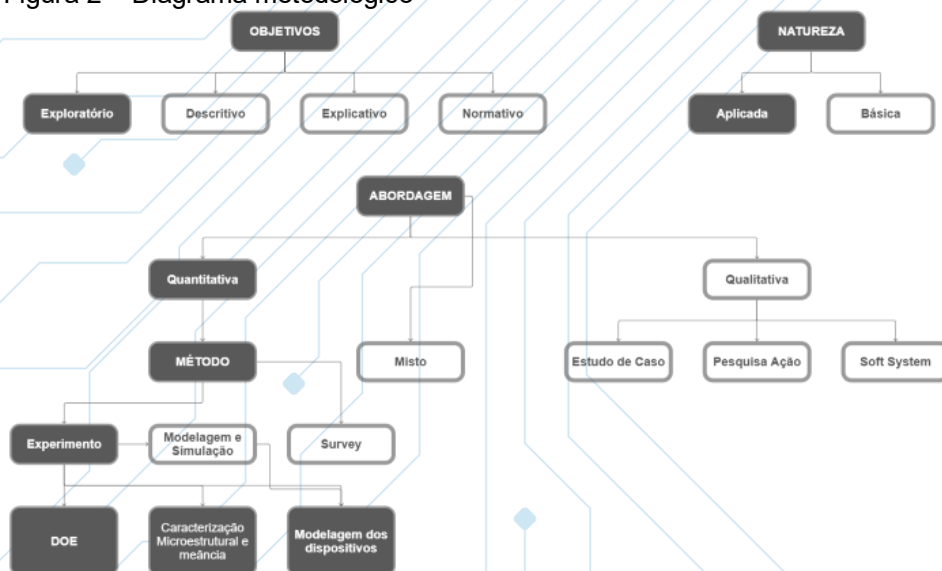
Figura 1 – Modelo 3D experimental no projeto de pesquisa



Fonte: Autores (2025).

A Figura 2 apresenta um diagrama metodológico que sintetiza as etapas principais do estudo, categorizando-o como método experimental, aplicadom quantitativo e interdisciplinar, envolvendo engenharia de materiais, design de produto e saúde.

Figura 2 – Diagrama metodológico

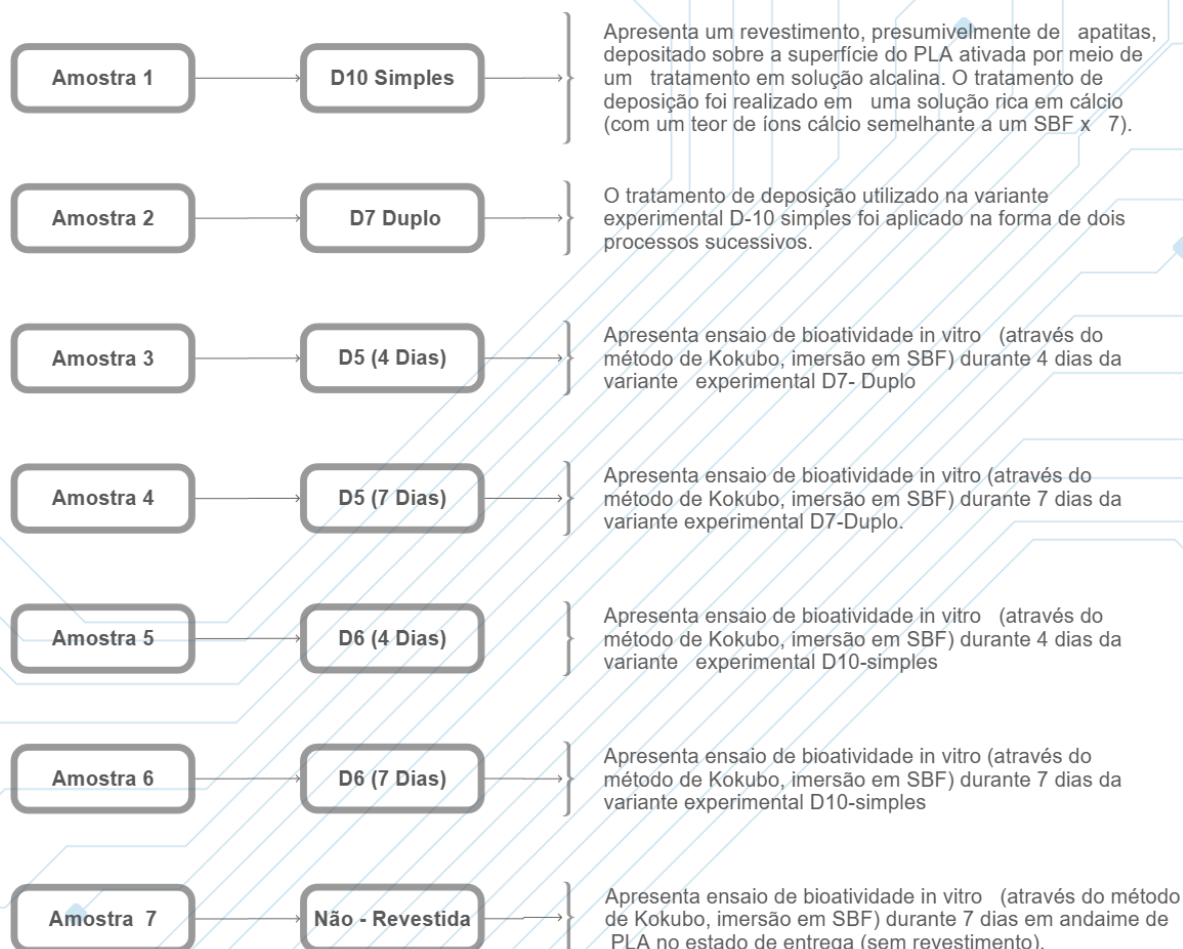


Fonte: Autores (2025).

3.1. Categorização das amostras

Esta configuração (Figura 3) permitiu acesso a tecnologias complementares e otimização dos recursos disponíveis em cada centro de pesquisa.

Figura 3 - Categorização das amostras

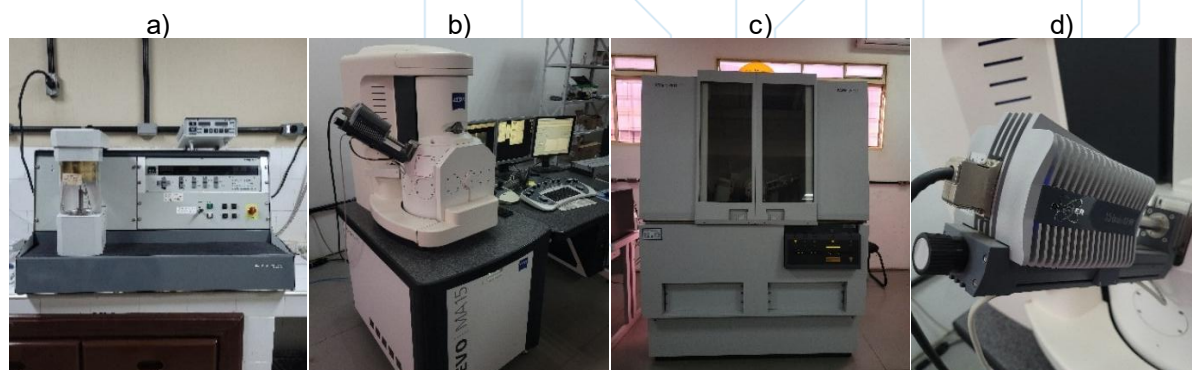


Fonte: Autores (2025).

3.2. Equipamentos e técnicas de caracterização

A distribuição estratégica entre as instituições participantes foi fundamental para o sucesso do projeto, através do emprego de equipamentos utilizados para a caracterização microestrutural, tais como: MEV, EDS e DRX (Figura 4).

Figura 4 – Equipamentos especializados utilizados para as caracterizações. A) | Metalizadora Baltec MED 020; B) MEV Zeiss EVO MA15; c) PANalytical X'Pert Pro MPD, d) BRUKER XFlash 6-10 detector



Fonte: Autores (2025).

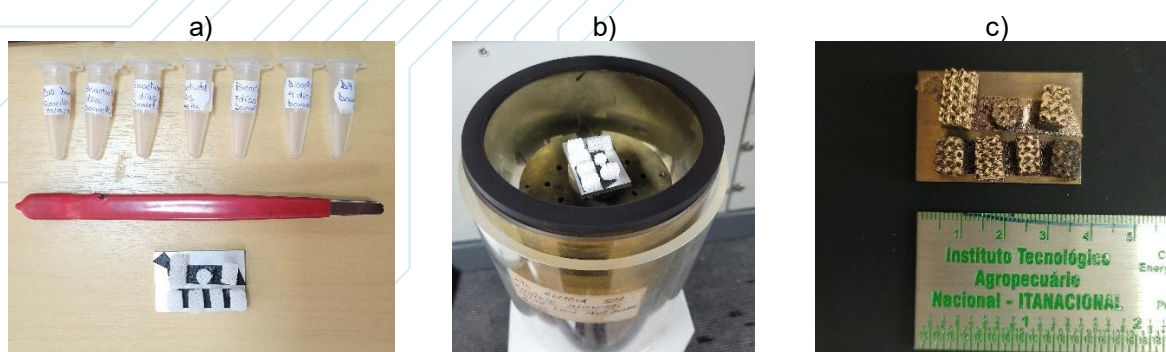
3.2.1. Detalhes dos ensaios

- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV):
 - Ampliações: 50x, 100x, 500x, 5000x, e 10000x.
- Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS):
 - Utilizada para análise de composição elementar das superfícies.
 - Magnificação: 5000x.
- Difração de Raios X (DRX):
 - Parâmetros: Radiação CuK α com ângulo de 2θ entre 5° e 70° , com um passo de $0,02^\circ$ e tempo de contagem de 1min por grau.

3.3. Preparação das amostras

Devido ao fato de não serem naturalmente condutoras, as amostras foram submetidas ao processo de metalização (Figura 5), em que foram recobertas com uma camada de 20 nm de Ouro (Au).

Figura 5 – Metalização das sete amostras: a) preparação das amostras; b) carregamento das amostras na câmara de metalização; c) amostras metalizadas.



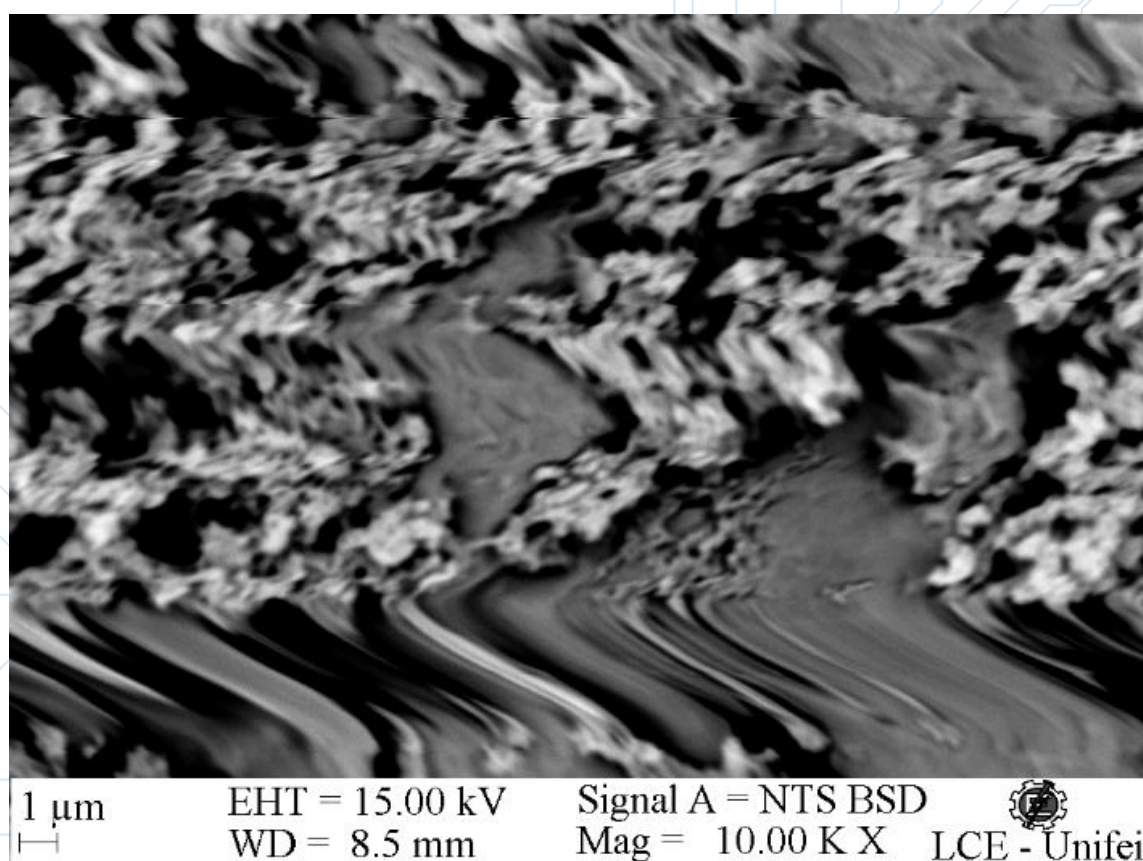
Fonte: Autores (2025).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Microscopia Eletrônica De Varredura (MEV) e Espectroscopia de Dispersão de Energia (EDS)

Para caracterizar a morfologia superficial das amostras, foram obtidas microestruturas de MEV com ampliações variando entre 50x e 10.000x. Porém, algumas microestruturas apresentaram artefatos de carregamento eletrônico e perda de foco, comprometendo sua qualidade e confiabilidade, exemplificado pela Figura 6.

Figura 6 – Exemplo de microestrutura

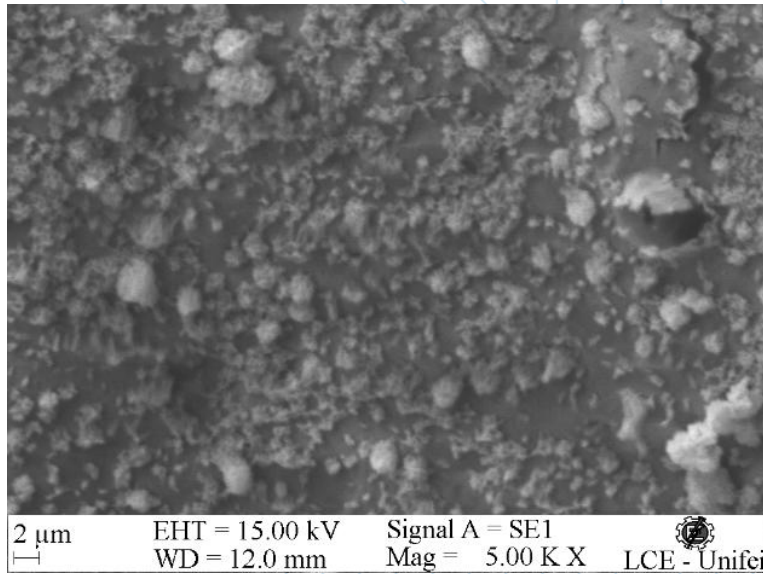


Fonte: Autores (2025).

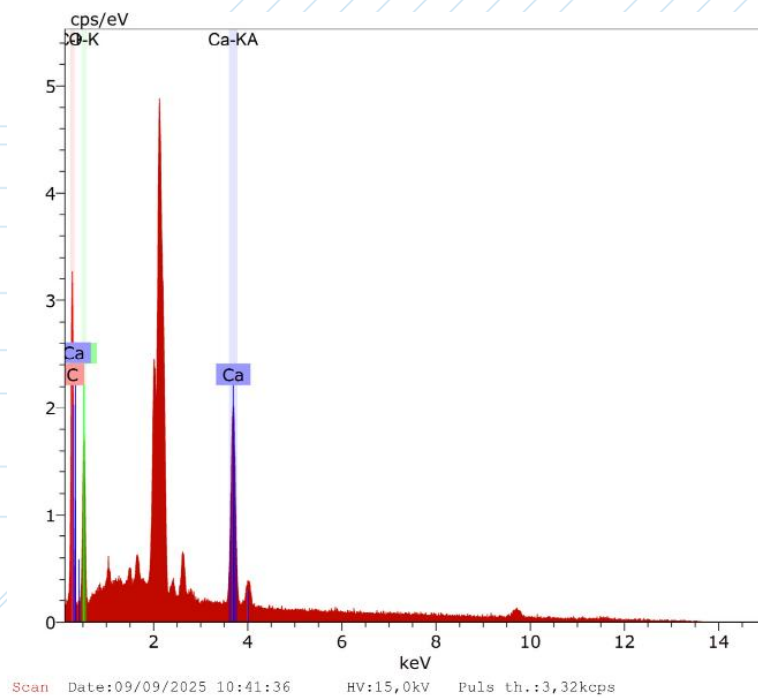
Diante disso, as microestruturas apresentadas neste trabalho (Figura 7) apresentam a microestruturas e EDS das amostras 1,6 e 7, selecionadas por representarem a variante experimental básica, a variante com maior variação microestrutural, e a amostra sem recobrimento.

Figura 7 – Resultados do MEV e EDS: A) Amostra 1: a1) MEV 5000x, a2) EDS; B) Amostra 6: b1) MEV 5000x, b2) EDS; C) Amostra 7: c1) MEV 10000x, c2) EDS.

a1)



a2)

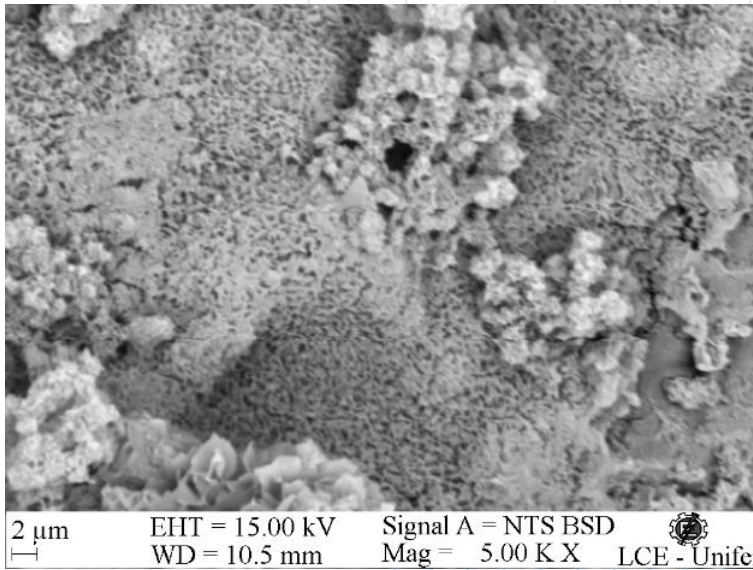




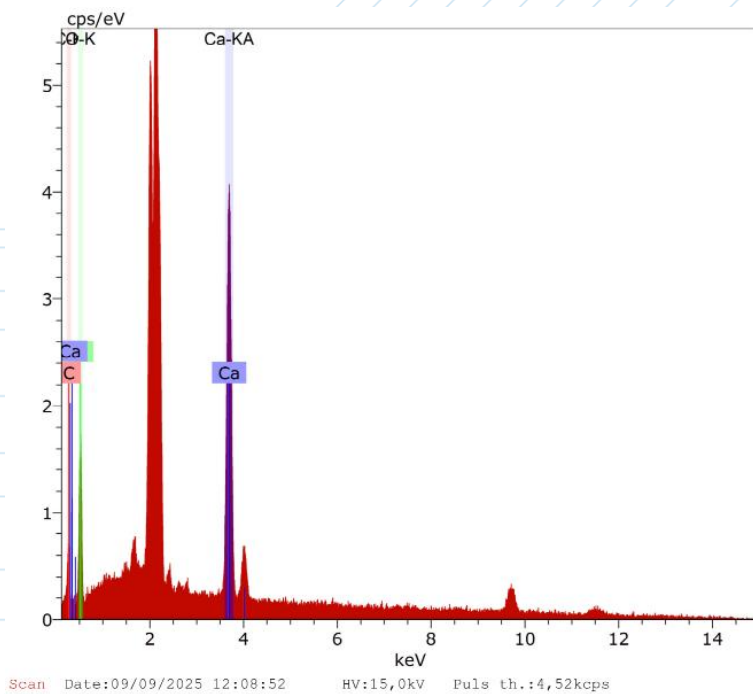
IEPG SUMMIT'25

Pensando o futuro com *inteligência*
artificial e consciência social

b1)



b2)

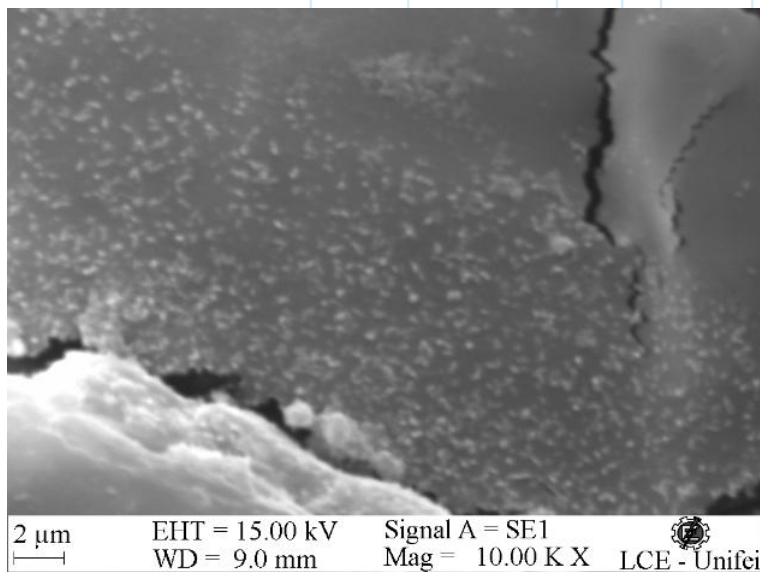




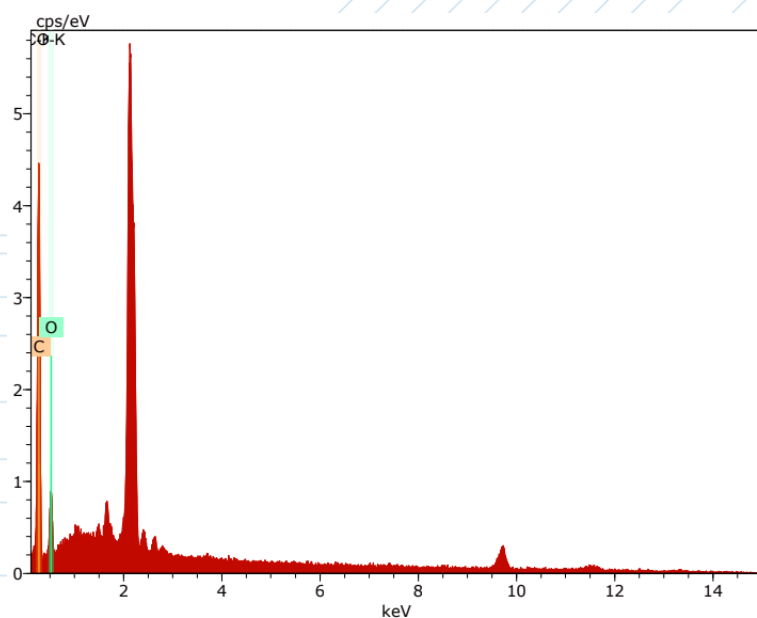
IEPG SUMMIT'25

Pensando o futuro com *inteligência*
artificial e *consciência social*

c1)



c2)



Spectrum: Map

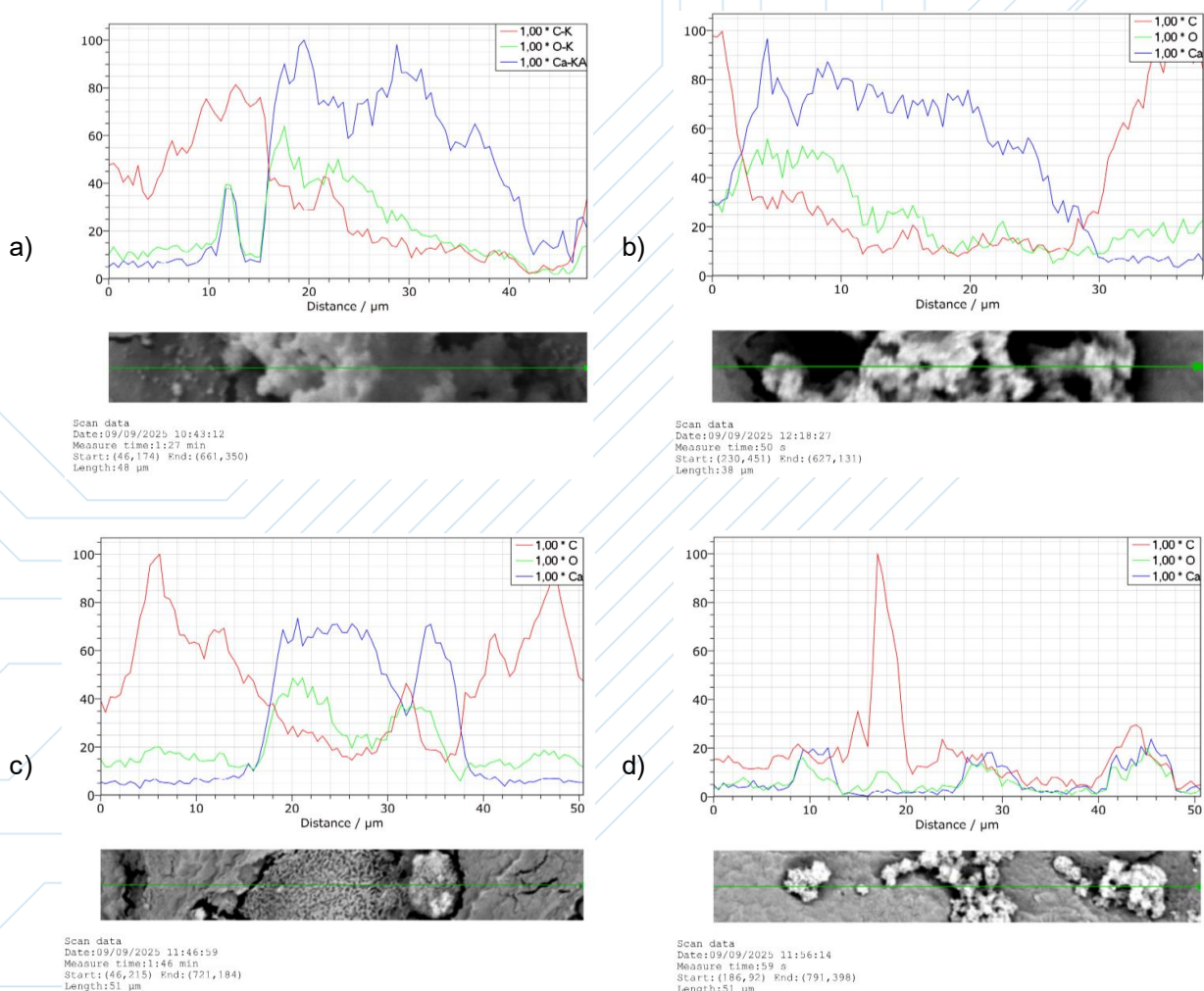
Element	Series	unn. C	norm. C	Atom. C	Error (3 Sigma)
		[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
Carbon	K-series	68,08	68,08	73,97	27,00
Oxygen	K-series	31,92	31,92	26,03	16,28
Total:		100,00	100,00	100,00	

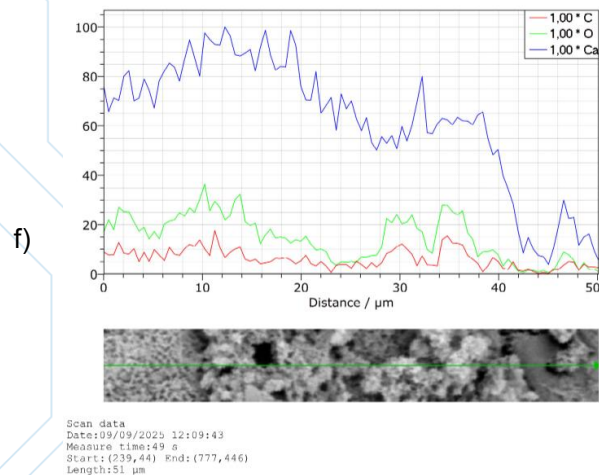
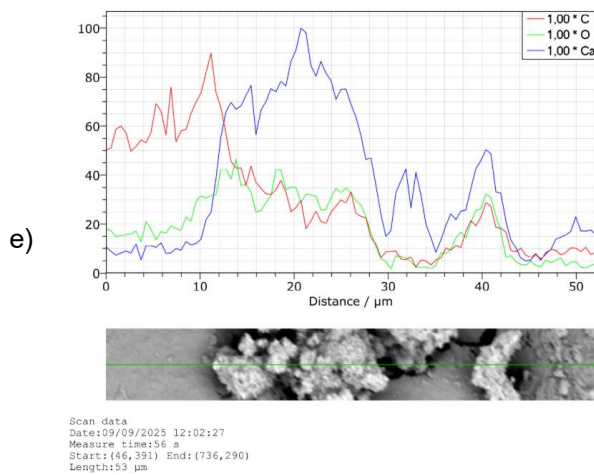
Fonte: Autores (2025).

4.2. Mapas de varredura da composição química e eficiência do revestimento CaO

Mapas foram gerados por meio de varredura no EDS (Figura 8), com ênfase em regiões representativas observadas no MEV, onde foi possível identificar áreas de aglomeração de Hidroxiapatita sobre o PLA.

Figura 8 - Mapeamento pela técnica de EDS para caracterizar a eficiência do revestimento da Hidroxiapatita na extensão do PLA: a) Amostra 1; b) Amostra 2; c) Amostra 3; d) Amostra 4; e) Amostra 5; f) Amostra 6.

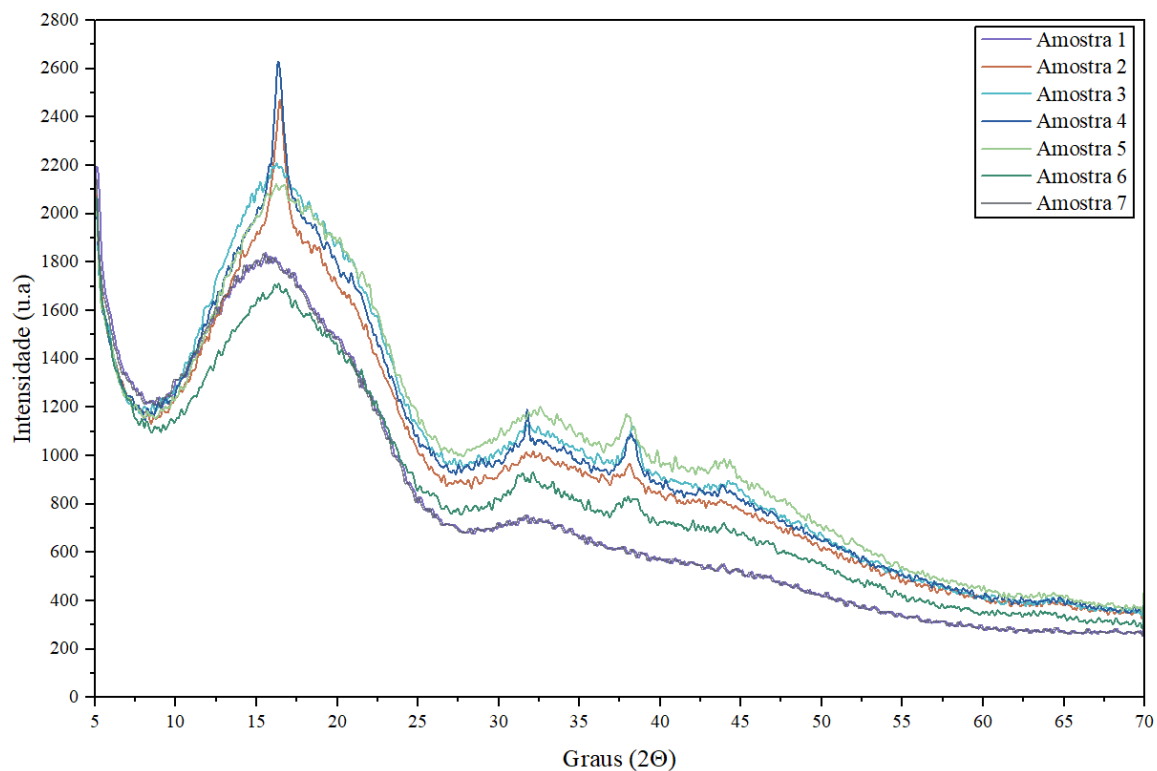




Fonte: Autores (2025).

4.3. Difração de Raios X (DRX)

Figura 9 – Resultados da Difração de Raios X: Comparação das amostras 1 a 7.



Fonte: Autores (2025).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo tem o objetivo de desenvolver e caracterizar dispositivos médicos a partir de PLA e Hidroxiapatita, explorando suas propriedades microestruturais guiado pelo DOE, que promove uma abordagem sistemática e controlada. Os dados comparativos obtidos entre as amostras, que comparam o revestimento depositado sobre a superfície do PLA ativada por meio de tratamento em solução alcalina rica em cálcio com as variantes experimentais, onde foi identificado que as amostras 6 e 7 são mais representativas na eficiência do depósito com os aglomerados, recobrindo significativamente a superfície do PLA, com aglomerados que apresentam morfologia irregular e tamanho uniforme da partícula de CaO.

Espera-se que, por meio desta colaboração internacional, interinstitucional e interdisciplinar, este trabalho contribua para o desenvolvimento de soluções eficazes no tratamento de lesões ósseas traumáticas, avançando na continuidade da pesquisa e alcançando a viabilidade dos dispositivos para implementação clínica, beneficiando não apenas o avanço científico, mas também a acessibilidade de tratamentos em contextos com recursos limitados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES - Programa Demanda Social pela concessão da bolsa de mestrado, às universidades participantes e aos laboratórios colaboradores, em especial ao técnico do Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE).

REFERENCIAS

Einhorn, T., Gerstenfeld, L. **Fracture healing: mechanisms and interventions.** *Nat Rev Rheumatol* 11,p. 45–54, 2015.

González-González, A. et al. **Caracterización de la permeabilidad de andamios porosos de ácido poli-láctico fabricados con impresoras 3D comerciales.** *IM Ingeniería Mecánica*, La Habana, v. 26, n. 2, p. 669, 2023.

Fernández-Cervantes, I. & Morales Sánchez, Marco & Agustín-Serrano, Ricardo & Cardenas-Garcia, Maura & Pérez Luna, Vianey & Arroyo-Reyes, B. & Maldonado-García, A. **Polylactic acid/sodium alginate/hydroxyapatite composite scaffolds with trabecular tissue morphology designed by a bone remodeling model using 3D printing.** Journal of Materials Science, 2019.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials science and engineering:** an introduction. New York: Wiley, 2018.

ASHBY, M.; JOHNSON, K. **Materiais e design: a arte e ciência da seleção de materiais no projeto do produto.** Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2013.

Razzaq, M. H., Zaheer, M. U., Asghar, H., Aktas, O. C., Aycan, M. F., & Mishra, Y. K. **Additive manufacturing for biomedical bone implants: Shaping the future of bones.** *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2025.