



Deposición de recubrimientos de fosfatos de calcio mediante el método químico sobre andamios de ácido poliláctico

Deposition of calcium phosphate coatings by the chemical method on polylactic acid scaffolds

Jesús E. González-Ruiz^{1,*}, Elizabeth F. Santiesteban-del Toro^{II}, Marcelino Rivas-Santana^{III},
Rosario Nancy Bada-Rivero^{IV}, Lauren M. García-Torres^V, Patricia del Carmen Zambrano-Robledo^{VI},
Ramón Quiza-Sardiñas^{VII}

I. Universidad de La Habana, Departamento de Biomateriales Cerámicos y Metálicos, Centro de Biomateriales, La Habana, Cuba.

II. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Bioingeniería, La Habana, Cuba.

III. Universidad de Matanzas, Centro de Fabricación Avanzada. Matanzas, Cuba.

IV. Universidad de La Habana, Departamento de Biomateriales Poliméricos, Centro de Biomateriales. La Habana, Cuba.

V. Centro de Inmunología Molecular, Departamento de Ingeniería. La Habana, Cuba.

VI. Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México.

VII. Universidad de Matanzas, Centro de fabricación Avanzada. Matanzas, Cuba

*Autor de correspondencia: jgonzalezr1961@gmail.com

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](#)



Recibido:20 de julio de 2023

Aceptado: 12 de diciembre de 2023

Resumen

El uso de andamios de ácido poli láctico ha venido ganando espacio en la regeneración ósea debido a su capacidad de biodegradarse. No obstante, su empleo en la práctica clínica se encuentra limitado, entre otros aspectos, por su escasa bioactividad. El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar dos esquemas de deposición de recubrimientos de fosfato de calcio sobre andamios de ácido poliláctico elaborados mediante el método de Modelado por Deposición Fundida. Las superficies de los andamios fueron activadas mediante un tratamiento alcalino en una disolución acuosa al 0,1M de NaOH durante 24 h a temperatura ambiente. En la deposición de los recubrimientos se utilizó una disolución sobresaturada en iones calcio. Los dos esquemas de

deposición se diferenciaron por el valor del pH presentado por la disolución después de la etapa de precipitación. Se obtuvieron depósitos de fosfatos de calcio nanoestructurados del tipo brushita (esquema 1) y apatita (esquema 2). El esquema de deposición 2 generó en la superficie de los andamios mayor área recubierta, superiores contenidos de calcio y fósforo y una relación Ca/P de 1,71 en sus aglomerados.

Palabras claves: recubrimientos fosfatos de calcio; andamios de ácido poliláctico; método químico, manufactura aditiva.

Abstract

The use of polylactic acid scaffolds has been gaining ground in bone regeneration due to its ability to biodegrade. However, its use in clinical practice is limited, among other aspects, by its low bioactivity. The objective of this work is to evaluate two schemes for the deposition of calcium phosphate coatings on polylactic acid scaffolds made by the Fused Deposition Modeling method. The scaffold surfaces were activated by alkaline treatment in a 0.1M aqueous NaOH solution for 24 h at room temperature. In the deposition of the coatings, a solution supersaturated in calcium ions was used. The two deposition schemes were differentiated by the

pH value presented by the solution after the precipitation stage. Nanostructured calcium phosphate deposits of the brushite (scheme 1) and apatite (scheme 2) type were obtained. Deposition scheme 2 generated a greater covered area on the surface of the scaffolds, higher calcium and phosphorus contents and a Ca/P ratio of 1.71 in their agglomerates.

Key words: calcium phosphate coatings; polylactic acid scaffolds; chemical method, additive manufacturing..

Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

González Ruíz JE, Santiesteban del Toro EF, Rivas Santana M, Bada Rivero RN, García Torres LM, Zambrano Robledo PC, et al. Deposición de recubrimientos de fosfatos de calcio mediante el método químico sobre andamios de ácido poliláctico. Ingeniería Mecánica. 2024;27(1):e688.

1. Introducción

En periodos recientes numerosas investigaciones se han centrado en la obtención y el desarrollo de nuevos biomateriales que permitan acelerar la regeneración ósea, así como incrementar la tasa de éxito clínico de dispositivos endoóseos [1-3]. Ello ha permitido mejorar la calidad de vida de pacientes que requieren de la reparación de defectos óseos resultantes de infecciones, tumores o de diferentes traumas. Estas afecciones resultan cada vez más comunes en la sociedad contemporánea, comportamiento relacionado con el incremento de la expectativa de vida de la población, enfermedades osteomusculares y accidentes de diferente índole.

El hueso natural es un material compuesto formado por colágeno y cristales de apatita. En la actualidad, como alternativas para su reemplazo se utilizan diferentes biomateriales, entre los que se incluyen metales, polímeros, cerámicas y materiales compuestos [3, 4, 5, 6]. No obstante, dichos materiales pueden diferir por sus propiedades y composición elemental del hueso natural [7]. En las últimas décadas la utilización del ácido poliláctico PLA (material biodegradable) se ha convertido en un candidato atractivo como sustituto óseo en zonas no cargadas. El PLA ha sido aprobado por diferentes entes reguladores, en aplicaciones tales como tornillos, pines y placas con fines ortopédicos y en la ingeniería tisular como andamio para la regeneración ósea [8-10]. Entre sus propiedades se destacan su biocompatibilidad, biodegradabilidad y bioactividad. No obstante, presenta una bioactividad limitada, relativamente bajas propiedades mecánicas y en algunas aplicaciones es recomendable retardar su biodegradación. Como solución a estas problemáticas han emergido los recubrimientos de hidroxiapatita (HA) [11, 12].

Los andamios tienen una importante función en la ingeniería de tejidos ya que sirven de soporte celular, actúan como sustituto de la matriz extracelular y pueden controlar los estímulos mecánicos que reciben las células [13, 14]. Además, facilitan la adhesión, diferenciación y proliferación celular. En años recientes se ha incrementado su elaboración mediante el método de manufactura aditiva, al posibilitar dicho método elaborar dispositivos personalizados [15-17]. Estos dispositivos se ajustan a las características y necesidades del paciente. Entre los métodos de manufactura aditiva empleados en la obtención de andamios de PLA se destaca el de Modelado por Deposición Fundida (FDM por sus siglas en idioma inglés) por su flexibilidad, posibilitar la fabricación personalizada con alta resolución y de manera reproducible [18, 19].

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar dos esquemas de deposición de recubrimientos de fosfato de calcio sobre andamios de ácido poliláctico elaborados mediante el método Modelado por Deposición Fundida.

2. Métodos y Materiales

2.1. Diseño de los andamios y su proceso de manufactura

Se diseñaron andamios con dimensiones de 12,7 x 12,7 x 6,25 mm con la ayuda del software CAS Wolfram Mathematica versión 11.2. Los andamios presentaban una porosidad de 60 %, una estructura de poros tipo Gyroide (TPMS). Posteriormente se obtuvieron file con una extensión STL, luego estos fueron transferidos a una impresora FDM WANHAO Duplicator 6, la que presentaba una extrusora MK11 con una boquilla diámetro 0,2 mm. Durante el proceso de impresión se utilizó el software CURA y los parámetros siguientes: altura de capa = 0,1 mm, temperatura de impresión = 210 °C, velocidad de impresión = 20 mm/s, sin soporte, plataforma de adhesión raft, densidad de relleno = 100 % y temperatura de la mesa = 50 °C. Se utilizó un filamento de PLA con un diámetro de 1,75 mm, de la marca Smartfil de la compañía Esun.

2.2 Tratamientos de superficie

Para activar las superficies de los andamios estos fueron sometidos a un tratamiento alcalino en una disolución acuosa al 0,1 M de NaOH durante 24 h a temperatura ambiente. Transcurrido este tiempo se extrajeron los andamios de la disolución de NaOH, se enjuagaron con abundante agua destilada y se secaron a temperatura ambiente.

Los andamios previamente activados se utilizaron como sustrato para la deposición de los recubrimientos de fosfatos de calcio. En la deposición de los recubrimientos se utilizó una disolución sobresaturada en calcio (DSC) con una concentración de iones de dicho elemento similar a la presentada por un SBF x 7. En la preparación de la disolución se usaron sales de grado reactivo (BDH Chemicals Ltd) CaCl_2 (0,971 g), NaH_2PO_4 (0,262 g) y NaHCO_3 (0,127 g). Se utilizó un agitador mecánico, con una agitación de 200 rev./min para disolver las sales portadoras de iones calcio y fósforo. Luego, se redujo la agitación a 80 rev./min y se introdujeron en la disolución las probetas de PLA atadas con un hilo de algodón. Al transcurrir 30 min, se adicionó el hidrógeno carbonato de sodio, lo que produjo un proceso de precipitación de fosfatos de calcio y una disminución de los valores de pH hasta alrededor de valores 5,4. Las probetas se mantuvieron en la disolución hasta completar el proceso (4 h) a 37 °C. En la etapa de deposición de los recubrimientos se utilizaron dos esquemas de tratamiento diferenciadas por la regulación de los valores de su pH. En el primer esquema se mantuvieron niveles de pH de 5,40; mientras que en el segundo se reguló el pH de la disolución a valores de 7,3 mediante el goteo de NaOH 10M.

2.3. Caracterización

En la determinación del pH de las disoluciones se utilizó pH-metro marca Basic 20 de la firma Crison Instruments (España). Las morfologías de las superficies tratadas fueron determinadas usando microscopia

electrónica de barrido (MEB), mientras que la composición y el mapeo elemental de dichas superficies se obtuvo mediante espectroscopia de energía dispersiva de rayos X (EDS). En las superficies evaluadas se determinaron las fases por difracción de rayos X (DRX), usando una radiación de $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 0,1542 \text{ nm}$) y un intervalo del ángulo de difracción (2θ) comprendido entre 15° y 60° .

3. Resultados y Discusión

3.1 Modificación superficial

En las micrografías (MEB) correspondientes a la figura 1A se muestran imágenes con diferentes magnificaciones de la superficie de andamios de PLA después del tratamiento alcalino. Es apreciable que la superficie modificada presenta una morfología no homogénea, caracterizada por la presencia aglomerados formados por pequeñas estructuras con una configuración globular.

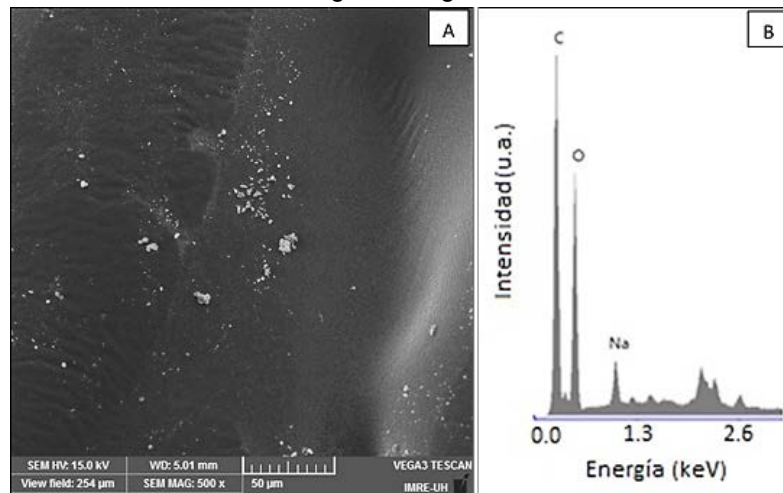


Fig. 1. Morfología y composición elemental de la superficie de andamio de PLA activado mediante tratamiento alcalino A- Micrografía (MEB), B- Espectro (EDS). Fuente: autores

El espectro (EDS) mostró que la superficie activada de los andamios de PLA se encuentra compuesta por C, O y Na, figura 1B. En el caso del carbono, debe proceder del PLA, mientras que el O debe provenir tanto del polímero como de la microestructura resultante del tratamiento alcalino. Por otro lado, el pico correspondiente al Na confirma la efectividad del tratamiento de activación utilizado. En la figura 2 se puede apreciar la distribución que de forma general presentaron estos elementos en las superficies activadas. Es de notar que en todos los casos no se distribuyen de forma homogénea y que por su contenido predomina el carbono, elemento que como anteriormente se expuso, forma parte del material polimérico del sustrato.

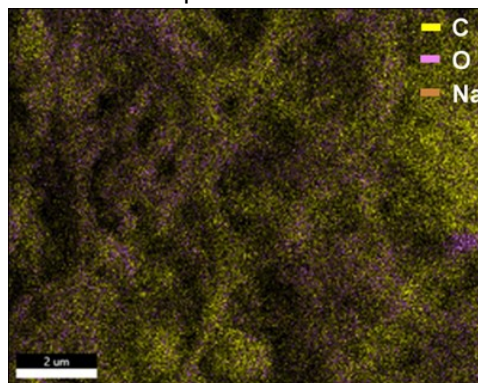


Fig. 2. Mapeo elemental (EDS) de la superficie de andamio de PLA activado mediante el tratamiento alcalino. Fuente: autores

3.2. Deposición de Ca-P sobre las superficies de PLA activadas

3.2.1 Morfología y topografía de las superficies

En la figura 3 se muestra la morfología de las superficies de los andamios después de su tratamiento mediante los dos esquemas destinados a la deposición de fosfatos de calcio. Tanto a bajas como a altas magnificaciones se observaron significativos cambios en la morfología generada por ambos esquemas en comparación con la superficie activada. En las imágenes con mayor magnificación, ver recuadros en la figura 3. Se apreció la presencia de aglomerados formados por estructuras que presentan nano-placas en sus superficies, comportamiento observado en recubrimientos de fosfatos de calcio depositados sobre sustratos metálicos en trabajos previos [20, 21]. Además, ese comportamiento ha sido reportado para este tipo de recubrimientos por

diferentes autores [22]. Por otro lado, en dichas imágenes se corroboró que los aglomerados cubren parcialmente las superficies tratadas. Los aglomerados observados deben ser total o parcialmente el resultado de la precipitación de fosfatos de calcio que ocurrió durante el proceso de deposición. Como consecuencia de la precipitación se produjo una disminución del pH desde valores de aproximadamente 6 hasta valores de alrededor de 5,4. No obstante, como se expuso en los materiales y métodos, en la disolución correspondiente al esquema de deposición número 2 se incrementó el pH hasta un valor de 7,3. Es conocido que los fosfatos de calcio son pH dependientes y que en específico las apatitas resultan más estables que el resto de dichos compuestos a valores de pH más elevados [22, 23].

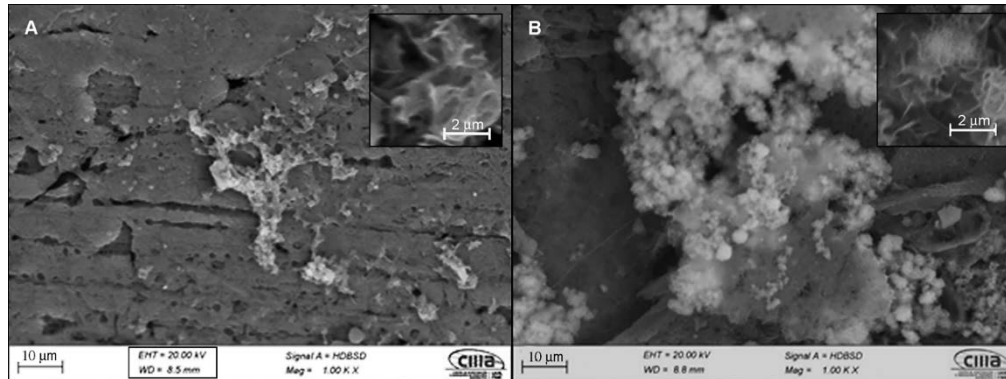


Fig. 3. Micrográficas (MEB) de superficies de andamios de PLA tratados en DSC. A- superficie obtenida mediante el esquema de deposición 1, B- superficie obtenida mediante el esquema de deposición 2. Fuente: autores

3.2.2. Composición elemental a nivel superficial

En la figura 4 se muestran espectros (EDS) puntuales de zonas ocupadas por los agregados observados en la figura 3. Los picos del calcio y del fósforo en las superficies resultantes del esquema de deposición 2 fueron significativamente más intensos que los obtenidos con el esquema de deposición 1, figura 4. Además, el análisis semi-cuantitativo (MEB-EDS) corroboró que el esquema de deposición 2 generó contenidos significativamente superiores de calcio y fósforo en la superficie activada del PLA. Por otro lado, el pico del carbono resultó significativamente menos intenso en el espectro correspondiente al esquema de tratamiento 2. Estos resultados indican que el segundo esquema de tratamiento posibilita obtener un mayor espesor de capa y(o) una mayor homogeneidad del recubrimiento que el primer esquema.

Los espectros de EDS y el mapeo elemental, figura 5, corroboraron que, en las superficies de los andamios de PLA, tratados mediante los esquemas de deposición evaluados, se encuentran presentes elementos constituyentes de los fosfatos de calcio (O, Ca y P), no obstante, los aglomerados presentaron contenidos significativamente superiores de estos elementos.

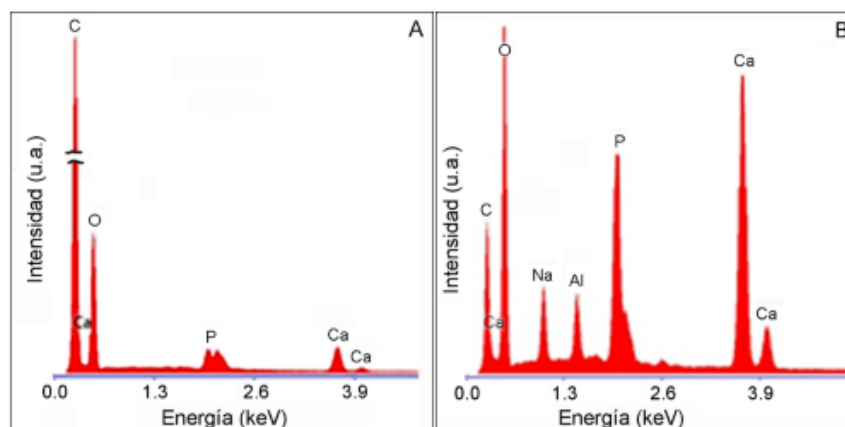


Fig. 4. Espectros (MEB-EDS) de la superficie de andamios de PLA. A- tratado mediante el esquema de deposición 1, B- tratado mediante el esquema de deposición 2. Fuente: autores

En la figura 5 se muestra la distribución de los elementos que componen la superficie de los andamios de PLA después de ser sometidos a los dos esquemas de deposición de los recubrimientos de fosfatos de calcio. Los componentes principales, en ambas superficies, son el carbono y el oxígeno. No obstante, los contenidos de ambos elementos resultaron significativamente inferiores a los mostrados por la superficie del PLA activada. También el contenido de sodio mostró un comportamiento similar, al disminuir de 8 % a 2-4 %. En general, esto se encuentra relacionado con la incorporación de calcio y fósforo a las superficies tratadas. No obstante, es necesario precisar que el oxígeno es uno de los constituyentes de los fosfatos de calcio y que además, tanto el

sodio como el carbono pueden dopar las apatitas [25]. Adicionalmente, se observó una distribución no uniforme de los elementos que forman ambas superficies.

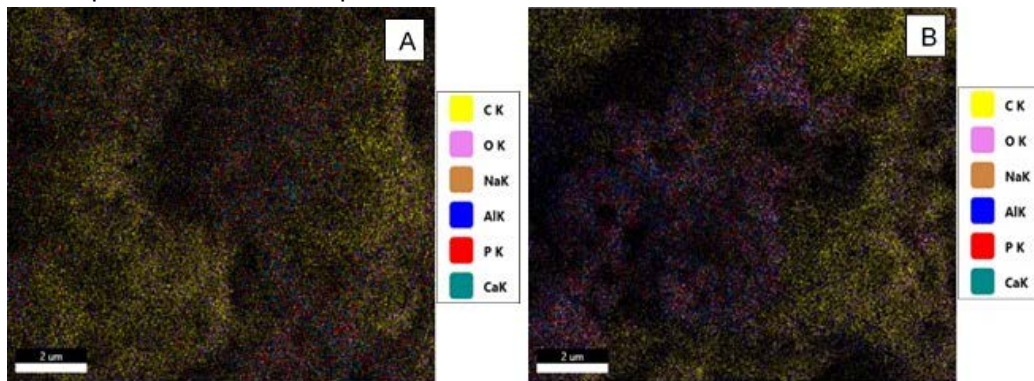


Fig. 5. Mapeo elemental (MEB-EDS) en la superficie de andamios de PLA tratados en DSC. A- superficie obtenida mediante el esquema 1, B- superficie obtenida mediante el esquema 2. Fuente: autores

El contenido de calcio y de fósforo presente en las superficies, así como la relación Ca/P, se puede apreciar en la tabla 1. La superficie resultante del tratamiento mediante el esquema 2 mostró como promedio una relación Ca/P de 1,71 (próxima a la presentada por la hidroxiapatita), mientras que la generada por el esquema 1 presentó como promedio una relación Ca/P de 1,03; cercana a la reportada para los fosfatos de calcio brushita y monetita [24].

Tabla 1. Contenido puntual de calcio y fósforo y relación Ca/P obtenidos en la superficie de andamios de PLA. Fuente: autores

Elemento	Contenido (%)	Ca/P
Esquema de deposición 1		
Ca	1,07	
P	1,03	
		1,03
Esquema de deposición 2		
Ca	5,18	
P	3,02	
		1,71

3.2.3. Composición de fases en las superficies tratadas

En la figura 6 se muestran los patrones de difracción (DRX) de muestras de PLA antes y después del tratamiento para la deposición de recubrimientos de fosfatos de calcio. El difractograma de rayos X de las superficies activadas mediante el tratamiento alcalino (C en la figura 6)] no mostró el pico a ~16° reportado para le PLA por Mondal y colaboradores, el que se origina predominantemente al encontrarse ordenadas las cadenas poliméricas en la forma intermedia entre las estructuras amorfa y cristalina [26]. Ello pudiera estar relacionado con la presencia de una estructura amorfa en las probetas de PLA. El pico presente en 2Theta = 19° fue asignado a los cristales del PLA, el mismo también fue observado por Deplaine y colaboradores en superficies de PLA con recubrimientos apatíticos [11]. Además, el pico presente en 2Theta = 22° también fue asignado a dicha fase.

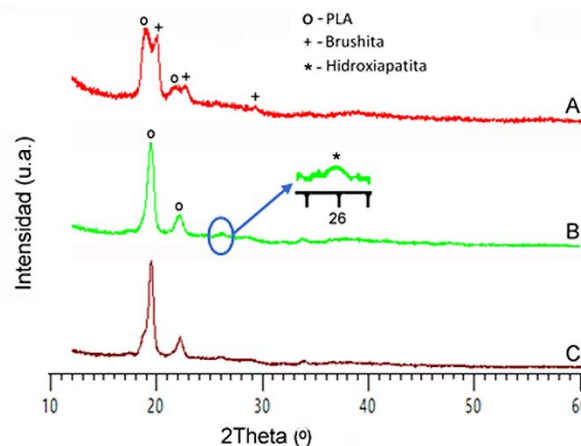


Fig. 6. Difractograma (DRX) de superficies del PLA antes y después de tratadas en una disolución sobresaturada en calcio. A- Deposición mediante el esquema 1, B- Deposición mediante el esquema 2 y C- Activada mediante tratamiento alcalino. Fuente: autores

El difractograma de las probetas correspondientes al esquema de deposición 1, A en la figura 6, mostró las mayores variaciones en comparación con el PLA activado mediante el tratamiento alcalino. Nuevos picos se observaron en $2\theta \approx 20^\circ$, 23° y $29,2^\circ$, los que fueron asignados a la brushita. La presencia de esa fase se corresponde con los resultados de los ensayos puntuales de EDS realizados sobre los aglomerados, en los que se obtuvo una relación Ca/P próxima a 1. La superficie del PLA generada por el esquema de deposición 2 solamente mostró un nuevo pico con una intensidad muy baja en $2\theta \approx 25,8^\circ$, B en la figura 6. El mismo coincide con el pico de mayor intensidad generado en recubrimientos de hidroxiapatita cuando estos se encuentran orientados en la dirección 002, comportamiento reportado en recubrimientos de HA depositados mediante el método químico [27, 28]. Adicionalmente, la presencia de dicha fase se corresponde con la relación Ca/P determinada mediante EDS en los aglomerados.

Conclusiones

Se modificó la superficie del PLA mediante un tratamiento en una disolución de 0,1M de NaOH. Como resultado se obtuvo una superficie con una morfología no homogénea, caracterizada por la presencia de pequeñas estructuras, en las que predominan los elementos O y Na.

Fueron obtenidos depósitos de fosfatos de calcio nanoestructurados a partir de los dos esquemas de deposición evaluados, caracterizados por no resultar homogéneos, quedando zonas de la superficie del PLA sin recubrir o con un espesor de capa pequeño.

El esquema de deposición 2 generó en la superficie de los andamios mayor área recubierta, superiores contenidos de calcio y fósforo y una relación Ca/P de 1,71 en sus aglomerados.

Se demostró que el esquema de deposición 1 produjo depósitos de brushita, mientras que el esquema 2 generó un recubrimiento de nano-apatitas en la superficie de los andamios de PLA.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Centro de Investigación en Ingeniería Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León por su colaboración en la realización de ensayos de MEB, EDS y DRX, así como, al Laboratorio Luces del Instituto de Ciencia y Tecnología de los Materiales de la Universidad de La Habana por su contribución en la realización de ensayos de MEB.

Referencias

- Anene F, Aiza J, Zainol I, Hanim A, Suraya MT. Additively manufactured titanium alloys and effect of hydroxyapatite coating for biomedical applications: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2020;234(11):1450-60. DOI 10.1177/1464420720942560.
- Liu Y, Rath B, Tingart M, Eschweiler J. Role of implants surface modification in osseointegration: A systematic review. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2020;108(3):470-84. DOI: 10.1002/jbm.a.36829.
- Kamboj N, Ressler A, Hussainova I. Bioactive ceramic scaffolds for bone tissue engineering by powder bed selective laser processing: A review. *Materials*. 2021;14(18):5338. <https://doi.org/10.3390/ma14185338>
- Kehoe S. Optimisation of hydroxyapatite (HAp) for orthopaedic application via the chemical precipitation technique [PhD thesis] Dublin, Ireland, School of Mechanical and Manufacturing Engineering Dublin City University; 2008. [Citado 20 de mayo de 2023] Disponible en: https://doras.dcu.ie/583/1/Sharon_Kehoe_PhD_Thesis_Sept.08.pdf
- Asri RIM, Harun WSW, Samykano M, Lah NAC, Ghani SAC, Tarlochan F, et al. Corrosion and surface modification on biocompatible metals: A review. *Materials Science and Engineering C*. 2017(77):1261-74. DOI.10.1016/j.msec.2017.04.102.
- Grémare A, Guduric V, Bareille R, Heroguez V, Latour S, L'heureux N, et al. Characterization of printed PLA scaffolds for bone tissue engineering. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*. 2018;106(4):887-94. DOI: 10.1002/jbm.a.36289.
- Wang WT, Sheng RN, Jhuang ZL, editors. Design, Test and FEM Analysis of Customized Titanium Alloy Implant with Scaffold Based on Additive Manufacturing. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering; 2021; 1063: 012007. IOP Publishing. <https://doi:10.1088/1757-899X/1063/1/012007>
- Singh D, Babbar A, Jain V, Gupta D, Saxena S, Dwibedi V. Synthesis, characterization, and bioactivity investigation of biomimetic biodegradable PLA scaffold fabricated by fused filament fabrication process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2019;41:121. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1625-y>
- Hamad K, Kaseem M, Yang H, Deri F, Ko Y. Properties and medical applications of polylactic acid: A review. *Express polymer letters*. 2015;9(5):435-55. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2015.42.
- Raquez J-M, Habibi Y, Murariu M, Dubois P. Poly lactide (PLA)-based nanocomposites. *Progress in Polymer Science*. 2013;38(10-11):1504-42. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.014>
- Deplaine H, Lebourg M, Ripalda P, Vidaurre A, Sanz-Ramos P, Mora G, et al. Biomimetic hydroxyapatite coating on pore walls improves osteointegration of poly (L-lactic acid) scaffolds. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. 2013;101(1):173-86. DOI: 10.1002/jbm.b.32831.
- Safi IN, Hussein BMA, Aljudy HJ, Tukmachi MS. Effects of Long Durations of RF-Magnetron Sputtering Deposition of Hydroxyapatite on Titanium Dental Implants. *European Journal of Dentistry*. 2021; 15(03): 440-447. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1721314>
- Jucht D, Rujano R, Romero M. Utilización de células madre en el ámbito odontológico. Revisión de la literatura. *Acta Bioclínica*. 2014;Suplemento2014:101-123.
- Sandino C, Planell J, Lacroix D. A finite element study of mechanical stimuli in scaffolds for bone tissue engineering. *Journal of biomechanics*. 2008;41(5):1005-14. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2007.12.011>
- Oliveira TT, Reis AC. Fabrication of dental implants by the additive manufacturing method: A systematic review. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2019;122(3):270-4. DOI: 10.1016/j.prosdent.2019.01.018

16. Nouri A, Shirvan AR, Li Y, Wen C. Additive manufacturing of metallic and polymeric load-bearing biomaterials using laser powder bed fusion: A review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021;94:196-215. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2021.03.058>
17. Yadroitsava I, du Plessis A, Yadroitsev I. Chapter 12 Bone regeneration on implants of titanium alloys produced by laser powder bed fusion: A review. *Titanium for Consumer Applications*. Pages 197-133. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815820-3.00016-2>
18. Im SH, Jung Y, Jang Y, Kim SH. Poly (L-lactic acid) scaffold with oriented micro-valley surface and superior properties fabricated by solid-state drawing for blood-contact biomaterials. *Biofabrication*. 2016;8(4):045010. <https://doi.org/10.1088/1758-5090/8/4/045010>
19. Abdul Hamid Z, Tham C, Ahmad Z. Preparation and optimization of surface-engineered poly (lactic acid) microspheres as a drug delivery device. *Journal of materials science*. 2018;53(7):4745-58. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1840-9>
20. Hernandez L, González JE, Barranco V, Veranes-Pantoja Y, Galván J, Gattorno GR. Biomimetic hydroxyapatite (HAp) coatings on pure Mg and their physiological corrosion behavior. *Ceramics International*. 2022;48(1):1208-22. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111173>
21. Morejón-Alonso L, Bussulo MA, Debone R, González-Martínez E, González JE. Apatite coatings on chemically modified titanium using a new accelerated biomimetic route. *Materials Letters*. 2020;280:128576. <https://doi.org/10.1557/s43578-022-00786-w>
22. Feng QL, Cui FZ, Wang H, Kim TN, Kim JO. Influence of solution conditions on deposition of calcium phosphate on titanium by NaOH-treatment. *Journal of Crystal Growth*. 2000;210(4):735-40. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(99\)00502-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(99)00502-3)
23. Lu X, Leng Y. Theoretical analysis of calcium phosphate precipitation in simulated body fluid. *Biomaterials*. 2005;26(10):1097-108. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2004.05.034>
24. Ratner BD, Hofman A, Schoen FJ, Lemons JE. *Biomaterials Science. An Introduction to Materials in Medicine*. United Kindong: Elsevier; 2013.
25. Ratnayake JT, Mucalo M, Dias GJ. Substituted hydroxyapatites for bone regeneration: A review of current trends. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*. 2017;105(5):1285-99. DOI: 10.1002/jbm.b.33651.
26. Mondal S, Nguyen TP, Hoang G, Manivasagan P, Kim MH, Nam SY, et al. Hydroxyapatite nano bioceramics optimized 3D printed poly lactic acid scaffold for bone tissue engineering application. *Ceramics International*. 2020;46(3):3443-55. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.201910.057>
27. Li F, Feng QL, Cui FZ, Li HD, Schubert H. A simple biomimetic method for calcium phosphate coating. *Surface and Coatings Technology*. 2002;154:88-93. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01710-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01710-8)
28. Lindberg F, Heinrichs J, Ericson F, Thomsen P, Engqvist H. Hydroxylapatite growth on single-crystal rutile substrates. *Biomaterials*. 2008;29(23):3317-23. DOI:10.1016/j.biomaterials.2008.04.034.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores

Jesús Eduardo González Ruíz. <http://orcid.org/0000-0002-3032-7819>

Participó en la revisión bibliográfica, procesó resultados de la revisión bibliográfica, desarrolló la tecnología de deposición de los recubrimientos, contribuyó a la elaboración del diseño de la experimentación, aportó a la evaluación de los ensayos de caracterización de las superficies de los andamios de PLA activadas y con recubrimientos de fosfatos de calcio, valoró los resultados experimentales y participó en la redacción, revisión y aprobación del informe final.

Elizabeth Faustina Santiesteban del Toro. <http://orcid.org/0009-0007-0864-7668>

Trabajó en la revisión bibliográfica, procesó resultados de la revisión bibliográfica, realizó experimentos para la activación de superficies en andamios de PLA, realizó experimentos para la deposición de recubrimientos de fosfatos de calcio en superficies de andamios de PLA, procesó resultados experimentales y en la redacción, revisión y aprobación del informe final.

Marcelino Rivas Santana. <http://orcid.org/0000-0002-0305-515X>

Colaboró en la concepción de la investigación, intervino en la elaboración de la tecnología para la obtención de los andamios de PLA mediante Manufactura Aditiva, participó en el diseño y en la fabricación de los andamios, realizó la gerencia el proyecto y en la redacción, revisión y aprobación del informe final.

Rosario Nancy Bada Rivero. <http://orcid.org/0009-0002-4231-6233>

Contribuyó en el diseño de la investigación, en el ordenamiento de datos, en la obtención y preparación tanto teórica como práctica de la pre-aleación como la aleación, así como en la validación en la práctica de las variantes propuestas y en la metodología de solucionar el problema técnico, también en el proceso de fabricación y obtención de los productos finales y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Lauren Melisa García Torres. <http://orcid.org/0009-0007-1407-2442>

Participó en la revisión bibliográfica sobre tratamientos de superficie en andamios de PLA, realizó experimentos de modificación superficial en andamios de PLA, ejecutó experimentos para recubrir con fosfatos de calcio andamios de PLA con el objetivo de evaluar la influencia de la tecnología de deposición, participó en experimentos para regular el pH de la disolución sobresaturada en iones calcio y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Patricia del Carmen Zambrano Robledo. <http://orcid.org/0000-0002-9491-0069>

Trabajó en la realización de los ensayos de Microscopia Electrónica de Barrido, Energía Dispersiva de Rayos X, Mapeo elemental y de Difracción de Rayos X a las superficies evaluadas, intervino en la procesamiento de los resultados de los ensayos Microscopia Electrónica de Barrido, Energía Dispersiva de Rayos X, Mapeo elemental y de Difracción de Rayos X, participó en la revisión y aprobación del informe final en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.

Ramón Quiza Sardiñas. <http://orcid.org/0000-0003-1293-6044>

Contribuyó en la concepción de la investigación, intervino en el proceso de diseño de los andamios de PLA, aportó a la tecnología de obtención de los andamios mediante Manufactura Aditiva, contribuyó al proceso de manufactura de los andamios empleados en la investigación y en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del trabajo final.