




Estudio de la influencia del tiempo y temperatura de calcinación en la resistencia a la compresión y cristalinidad de la hidroxiapatita obtenida de cáscara de huevo aviar

Assessment of the influence of calcination time and temperature on the compressive strength and crystallinity of hydroxyapatite obtained from avian eggshell

Alex Díaz^{1*} ; Corali Palomino¹ ; Hebert Vizconde¹ ; Saulo Romero¹ ; Luis Alva² 

¹ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

² Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Trujillo; Av. Panamericana Norte Km. 555, Moche, Perú.

* Autor correspondiente: adiazd@unitru.edu.pe (A. Díaz)

DOI: [10.17268/rev.cyt.2025.01.01](https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2025.01.01)

RESUMEN

Los problemas de osteoporosis que afecta nuestra sociedad han motivado a los investigadores a realizar estudios en ingeniería tisular y así desarrollar materiales biocompatibles que tengan características muy similares a la hidroxiapatita del hueso. En este estudio se extrajo hidroxiapatita a partir de cáscaras de huevo de gallina, dicho material fue sometido a ensayos para determinar su grado de cristalinidad y resistencia a la compresión. Para obtener la hidroxiapatita se consiguieron cáscaras de huevo aviar, las cuales fueron limpiadas, secadas, pulverizadas y tamizadas, para luego ser calcinadas a diferentes temperaturas (1000°C, 1100°C y 1200°C) y tiempos (3, 3,5 y 4 horas). El índice de cristalinidad se analizó mediante difracción de rayos X, y la resistencia a la compresión se midió tras sinterizar los discos de hidroxiapatita a 150°C. Los resultados muestran que conforme aumenta la temperatura y tiempo de calcinación, la resistencia a la compresión también aumenta, pero sucede lo contrario con la cristalinidad. Se concluyó que la mejor combinación de propiedades se encontró a 1000°C y 4 horas de calcinación, obteniéndose valores 55.19% de cristalinidad y de 0.843 MPa de resistencia a la compresión.

Palabras clave: hidroxiapatita; tejido óseo; cáscara de huevo; ingeniería biomédica

ABSTRACT

The osteoporosis problems affecting our society have motivated researchers to conduct studies in tissue engineering and thus develop biocompatible materials that have characteristics very similar to bone hydroxyapatite. In this study, hydroxyapatite was extracted from chicken eggshells. This material was subjected to tests to determine its degree of crystallinity and compressive strength. To obtain hydroxyapatite, avian eggshells were obtained, which were cleaned, dried, pulverized and sifted, and then calcined at different temperatures (1000°C, 1100°C and 1200°C) and times (3, 3.5 and 4 hours). The crystallinity index was analyzed by X-ray diffraction, and the compressive strength was measured after sintering the hydroxyapatite discs at 150°C. The results show that as the temperature and calcination time increase, the compressive strength also increases, but the opposite occurs with crystallinity. It was concluded that the best combination of properties was found at 1000°C and 4 hours of calcination, obtaining values of 55.19% crystallinity and 0.843 MPa compressive strength.

Keywords: hydroxyapatite; bone tissue; eggshell; biomedical engineering

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha reportado que la osteoporosis es un problema de salud pública global que afecta a 200 millones de personas, con 75 millones en países como Japón, EE. UU. y Europa. En 2000, ocurrieron 9 millones de nuevas fracturas osteoporóticas, mayormente en cadera, antebrazo y vértebras, siendo Estados Unidos y Europa responsables del 51% de estos casos (Clark et al., 2013).

La osteoporosis afecta principalmente a mujeres entre 30 y 59 años y ha sido denominada por la OMS como la epidemia mundial del siglo XXI. En Perú, un estudio encontró que el 36% de la población padece osteopo-



rosis, con mayor prevalencia en mujeres (Barraza, 2017). La regeneración ósea es un área clave de investigación en ingeniería tisular. Se ha avanzado en la creación de materiales biocompatibles como la hidroxiapatita (HA), un componente mineral del hueso que ha sido utilizado en prótesis orales y de cadera. Desde la primera prótesis recubierta de HA en 1986, su uso ha demostrado facilitar la osteointegración en seres humanos y animales (Opris et. al., 2020).

En varios estudios sobre la HA como material biomédico, se han investigado diversos métodos para su obtención y optimización. Lozoya (2016) utilizó polvos de hidroxiapatita sintetizados a partir de hueso bovino y dopados con nanopartículas de plata (HA-nAg) mediante proyección térmica. El estudio concluyó que el tiempo de calcinación óptimo fue de 6 horas a 800°C, preservando las propiedades naturales de la HA. Camacho Díaz et al. (2018) trabajaron con cáscara de huevo para sintetizar HA mediante precipitación húmeda, encontrando que la calcinación a 700°C ofreció resultados similares a la HA sintética comercial. Sin embargo, la HA sintética presenta baja resistencia mecánica, limitando su uso en implantes dentales.

Orozco et al. (2014) sintetizaron HA a partir de hueso de cerdo mediante desproteínización con ácido oxálico, concluyendo que a temperaturas de 800°C y 1000°C se preserva la estructura cristalina de la HA, pero esta se desestabiliza a 1200°C. Gálvez (2016) investigó la HA dopada con nanopartículas de ZnO, encontrando que la calcinación a 800°C es óptima para eliminar compuestos orgánicos del hueso y que el dopaje mejora las propiedades antimicrobianas contra bacterias como *Staphylococcus aureus* y *Pseudomonas aeruginosa*.

Alkaron et al. (2024) abordaron la síntesis, propiedades y aplicaciones de la HA, destacando métodos de fabricación como sol-gel, hidrotermal y procesos húmedos. Utilizaron fuentes naturales ricas en calcio, como cáscaras de huevo y conchas marinas, promoviendo sostenibilidad. Los compuestos de HA, combinados con biopolímeros como quitosano y gelatina, ofrecieron resistencia y biocompatibilidad para implantes, ingeniería de tejidos y regeneración ósea. Además, los andamios metálicos y biopoliméricos mejoraron la estabilidad y mimetizaron el tejido óseo.

Dadas las similitudes entre esta sustancia y los tejidos duros de los seres vivos (como huesos y dientes), la hidroxiapatita, es una cerámica de $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ muy apreciada en aplicaciones biomédicas (Torres, 2010). Su síntesis ha avanzado gracias a diversas técnicas, destacando el proceso Sol-Gel por su simplicidad, bajo costo y uso de bajas temperaturas. Este estudio busca analizar cómo el tiempo y la temperatura de calcinación influyen en las propiedades mecánicas y la cristalinidad de este biocemento, utilizando cáscaras de huevo aviar comúnmente desechadas, lo que las convierte en una fuente ecológica. El uso de estos materiales es una propuesta de gran interés en el campo biomédico, ya que busca mejorar los productos que actualmente se encuentran en el mercado. Se sabe que muchos de los productos usados en implantes óseos no soportan grandes cargas, por tal motivo también se investiga la adición de dopantes y nanoestructuras que mejoran la resistencia mecánica de dichos materiales. Esta investigación analizará la obtención de HA a partir de cáscaras de huevo aviar, y evaluará si este material tiene potencial como biomaterial para bioimpresiones 3D, aplicaciones en la regeneración ósea, la recuperación ortopédica y periodontal; a partir del estudio de sus propiedades.

2. METODOLOGÍA

2.1 Obtención de hidroxiapatita a partir de cáscaras de huevo de gallina

El procedimiento comenzó con la limpieza de las cáscaras de huevo de gallina, que generalmente son productos de desecho doméstico. La limpieza se realizó usando un cepillo humedecido en una solución de agua destilada y detergente en polvo casero a base de carbonato de sodio y alquilbenceno sulfonato de sodio para eliminar la capa exterior y las membranas, asegurando una superficie lisa y limpia. Luego, las cáscaras se enjuagaron una vez más con agua destilada y se dejaron secar al aire.

En el secado, las cáscaras se colocaron en bandejas metálicas y se introdujeron en una estufa a 120 °C durante 24 horas. Posteriormente, se trituraron manualmente con un mortero hasta reducir las al tamaño más pequeño posible. Un kilogramo de esta muestra fue llevado al Laboratorio de Procesamientos de Minerales, donde se pulverizó usando un disco de pulverizado. Luego, el polvo de cáscara de huevo fue tamizado con una malla N° 200.

A continuación, se pesaron 50 gramos del material tamizado y se introdujeron en un horno mufla a 800 °C durante 6 horas para su calcinación, obteniendo CaO. El material se dejó enfriar dentro del horno durante 24 horas para evitar el choque térmico.

En el proceso de fosfatado, se mezclaron 15 gramos de CaO con 100 ml de agua destilada en un vaso de precipitados. Se añadió H₃PO₄ (15 ml) y usando un agitador magnético se agitó a 150 rpm y 300 °C en una placa caliente hasta evaporarse el líquido.

Para obtener hidroxiapatita, se mezclaron 1 g de CaO y 8,31 g de Ca₃(PO₄)₂ en 100 ml de agua. La mezcla se agitó a 150 rpm y 300 °C hasta evaporarse el líquido. Luego, se secó en un horno a 120 °C durante 24 horas. Posteriormente, se calcinó en un horno mufla a 1000 °C, 1100 °C y 1200 °C por 3 horas, 3,5 horas y 4 horas (Figura 1), respectivamente, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

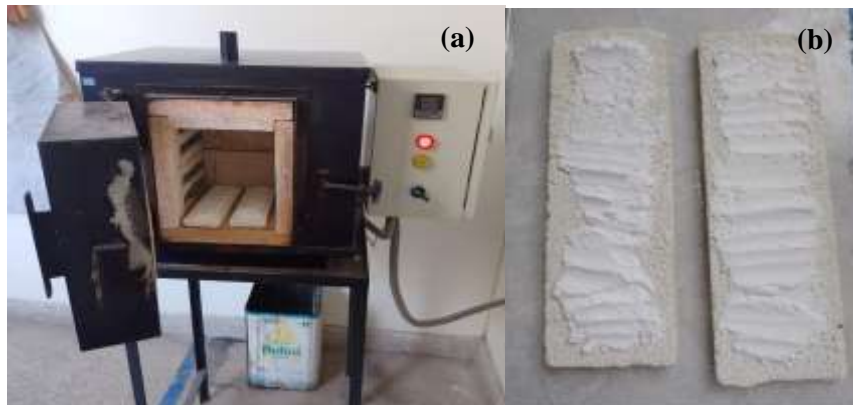


Figura 1. (a) Horno mufla para calcinación de las muestras (b) Hidroxiapatita en polvo obtenida después del proceso de calcinación.

2.2 Caracterización de las muestras

El polvo de hidroxiapatita se caracterizó mediante difracción de rayos X (XRD) con un difractómetro Rigaku Miniflex 600, puesto a un voltaje de 40 kV y la intensidad de corriente de 15 mA. La velocidad de barrido fue de 2°/min, y el rango de difracción, de 10° a 80°.

En el ensayo de resistencia a la compresión diametral, se prensaron discos de hidroxiapatita de 20 mm de diámetro y 5 mm de espesor, sometidos a una carga de 8 TN. Luego, se sinterizaron a 200 °C durante 30 minutos en un horno mufla. Tras dejar enfriar las muestras por 24 h dentro del mismo horno, se realizó el ensayo de compresión diametral en un Texturómetro Stable Micro Systems- TA.HD plus texture analyzer bajo el Software Exponent Cake bajo los parámetros: velocidad del test : 0.142 mm/sec, distancia de compresión: 6 mm y celda de Carga: 750 kg-f .



Figura 2. Probeta de hidroxiapatita (HA) sinterizada a 200°C

Finalmente, se recolectaron y analizaron los datos obtenidos de los ensayos XRD y de compresión para calcular el grado de cristalinidad y la resistencia a la compresión diametral. Los resultados se compararon con la patente N° 969003550 para validar los datos experimentales mediante el software estadístico OriginPro 8.0.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de XRD de Hidroxiapatita Experimental

Se realizó el análisis XRD de hidroxiapatita (HA) calcinada a 1000°C, 1100°C y 1200°C por 3, 3.5 y 4 horas, basados en la patente N°96-900-3550. Se observaron desde 32 a 49 picos de difracción entre 10° y 80°, confirmando la presencia de HA con sus respectivos índices de Miller. También se identificaron picos de carbonato-apatito. El tamaño de grano fue de entre 36.8 nm y 41 nm para una temperatura de 1000°C, de 46.8 nm a 50.6 nm para una temperatura de 1100°C y 46.9 nm a 66.9 nm para la temperatura de 1200°C. La estructura cristalina obtenida fue hexagonal con parámetros $a = 9.4470 \text{ \AA}$, $b = 9.4470 \text{ \AA}$, $c = 6.8810 \text{ \AA}$.

En la Figura 3 se observan patrones XRD de hidroxiapatita calcinada a 1000°C durante 3, 3.5 y 4 horas, los cuales muestran un aumento en la intensidad de los picos de difracción de hidroxiapatita con el tiempo. Los picos principales se observan en los ángulos 25.311°, 25.875°, 28.847°, 31.699°, 32.159°, 32.815°, 34.019° y 35.374°, con índices de Miller como (020), (021), (002), (120), entre otros. El crecimiento de los picos se relaciona con el aumento del tamaño de grano, que es proporcional al tiempo de calcinación (Estrada, 2023).

Sin embargo, también se presentan ruidos en los espectrogramas, causados por la presencia de impurezas como el carbonato-apatito, debido a una proporción incorrecta de ácido fosfórico que no eliminó los carbonatos del sustrato de cáscara de huevo (*Gallus gallus*), la fuente de hidroxiapatita. La cáscara contiene un 95% de CaCO_3 (Torres, 2010), lo que puede haber causado una calcinación incompleta y la presencia de carbonatos. Otros factores que contribuyen a las impurezas incluyen la falta de medición del pH de la disolución, un secado insuficiente, y el uso de una cantidad excesiva de cáscara triturada que no permitió una calcinación completa, afectando la conversión a CaO (Agbeboh et al., 2020).

La Figura 4 presenta los patrones XRD de hidroxiapatita experimental calcinada a 1100°C durante los tiempos antes mencionados. Se observan picos cristalográficos en los ángulos de difracción 16.821° (011), 21.707° (020), 31.699° (121), 32.815° (030), 40.829° (013) y 53.202° (004). A medida que el tiempo de calcinación aumenta de 3 a 3.5 horas, se incrementan los picos cristalográficos de hidroxiapatita, pero entre 3.5 y 4 horas hay una leve disminución, lo que indica que los granos cristalinos se han agrandado, mostrando una relación directa entre el tamaño de los granos y el tiempo de calcinación (Estrada, 2023).

También se detectan ruidos en los espectrogramas debido a, como se mencionó anteriormente, impurezas como el carbonato-apatita. Por otro lado, estudios previos como los de Janus et. al, (2008) indican que la hidroxiapatita biogénica tiende a formar apatito carbonatado a temperaturas superiores a 1050°C, como en este experimento, y que la hidroxiapatita se descompone en otros fosfatos cálcicos cuando se expone a temperaturas mayores de 1200°C (Forero, 2017).

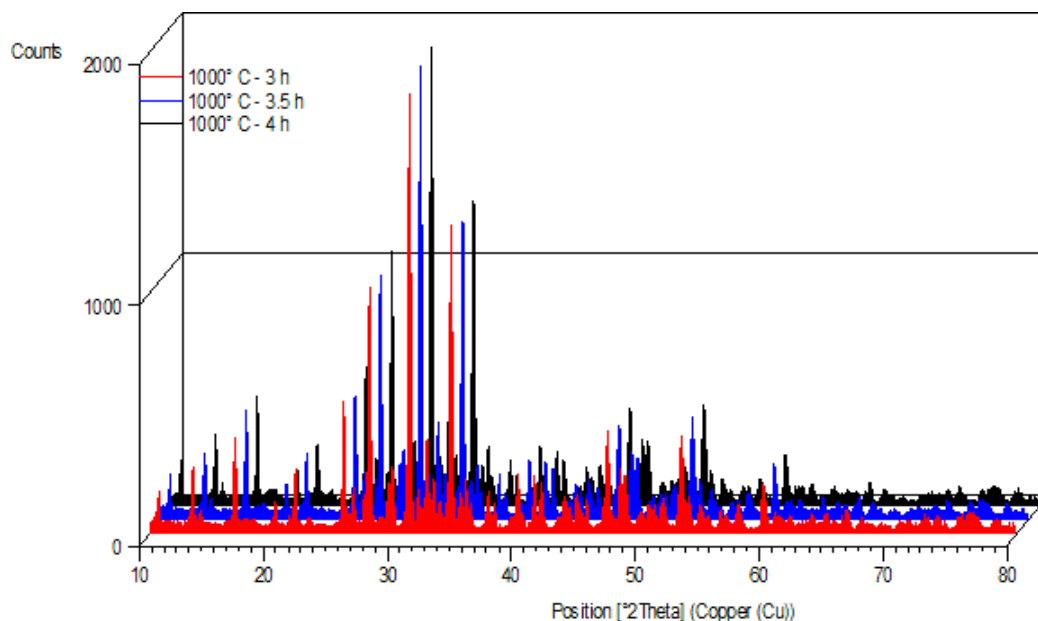


Figura 3. Patrones de XRD de hidroxiapatita experimental a 1000°C a 3h; 3.5h y 4 horas de calcinación

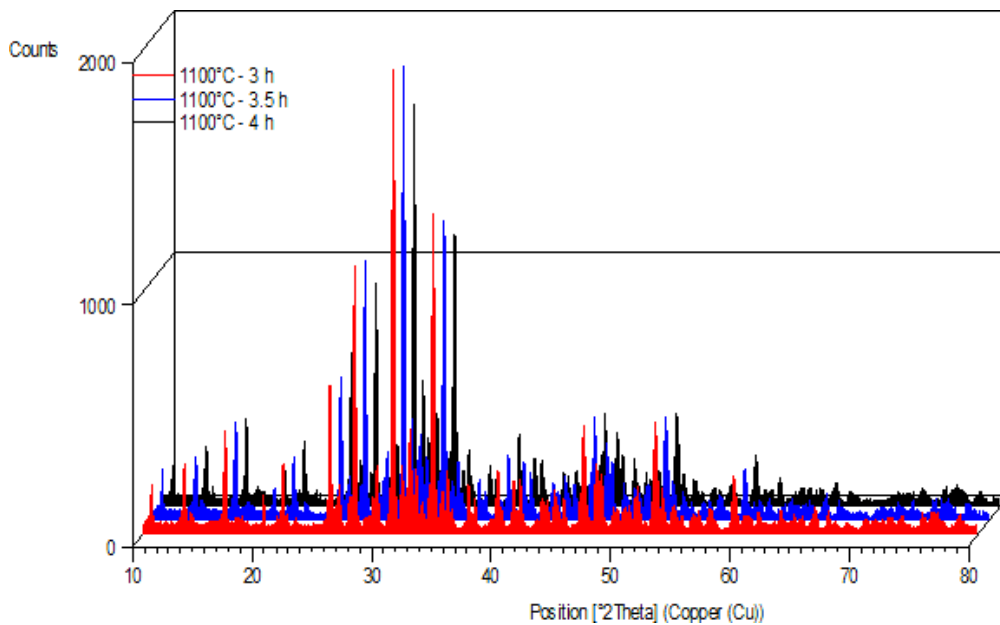


Figura 4. Patrones de XRD de hidroxiapatita experimental a 1100°C a 3h; 3.5h y 4 horas de calcinación

Los patrones XRD de hidroxiapatita calcinada a 1200°C durante 3, 3.5 y 4 horas se muestran en la Figura 5. Los picos principales de difracción se observan en los ángulos 25.875° (002), 31.699° (121), 32.815° (030), 46.605° (222), entre otros. A medida que aumenta el tiempo de calcinación, los picos cristalográficos de hidroxiapatita también aumentan. Sin embargo, se observan ruidos en los espectrogramas causados por impurezas. A temperaturas superiores a 1200°C, la hidroxiapatita se descompone en fosfatos de calcio (Forero, 2017).

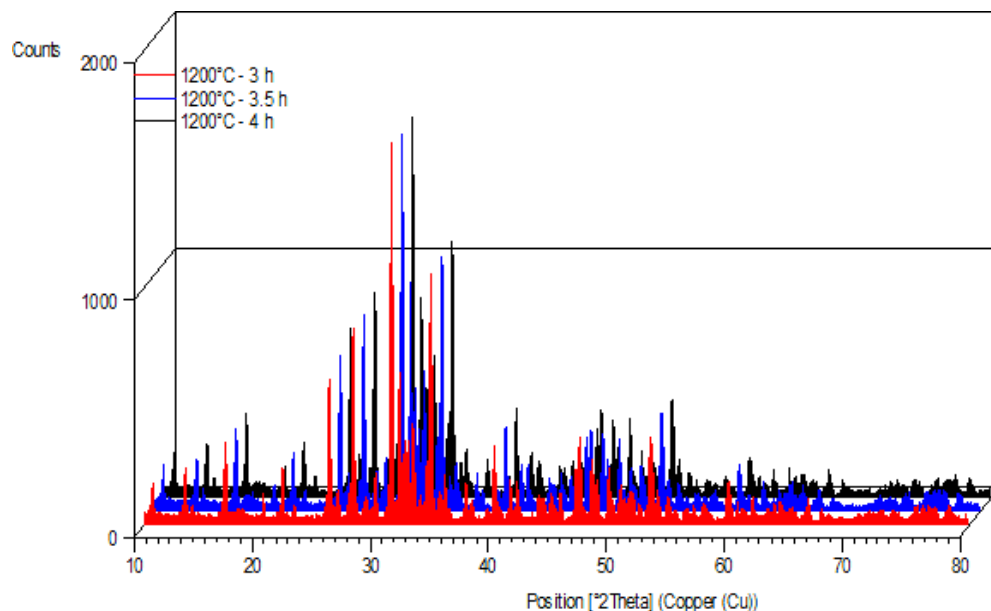


Figura 5. Patrones de XRD de hidroxiapatita experimental a 1200°C a 3h; 3.5h y 4 horas de calcinación

La Figura 6a muestra que el índice de cristalinidad de la hidroxiapatita aumenta con el tiempo de calcinación, alcanzando un máximo de 56.927% a las 4 horas y un mínimo de 55.387% a las 3 horas. Esta variación se debe al origen amorfo de la calcita utilizada como materia prima, que al aumentar el tiempo de calcinación,

forma cristales y aumenta la cristalinidad (Fernández & Arias, 2000). Las impurezas, como el carbonato-apatita, también contribuyen a la baja cristalinidad. La Figura 6b muestra una relación directamente proporcional entre el índice de cristalinidad (%) y la temperatura de calcinación (°C) en la obtención de hidroxiapatita. A 1200°C se alcanza la cristalinidad máxima (57.783%) y la mínima a 1000°C (55.043%). El aumento de temperatura incrementa el tamaño de los cristales, reduciendo la porosidad de la estructura. También se observan impurezas como carbonato-apatita, que está formada por brucita (hidróxido de magnesio), causada por un exceso de magnesio, y portlandita (hidróxido de calcio), causada por un exceso de calcio.

En la Figura 6c se observa una relación inversamente proporcional entre la resistencia a la compresión diametral y la temperatura de calcinación. A 1000°C, se alcanza una resistencia máxima de 0.618 MPa, mientras que a 1200°C es mínima (0.307 MPa). Esto se explica porque a mayor temperatura aumenta la porosidad, mientras que a menor temperatura la hidroxiapatita es más densa, debido al crecimiento del tamaño de grano. Las impurezas de carbonato-apatita, presentes a menor temperatura, también influyen en el aumento de la resistencia a la compresión. Aunque estos valores son bajos en comparación con el hueso esponjoso humano (4 MPa), son similares a los de la hidroxiapatita porosa natural (2 MPa), según Prakasam et al. (2015). Sin embargo, la hidroxiapatita sintética, más resistente, es costosa y menos ecológica (Valin et al., 2017).

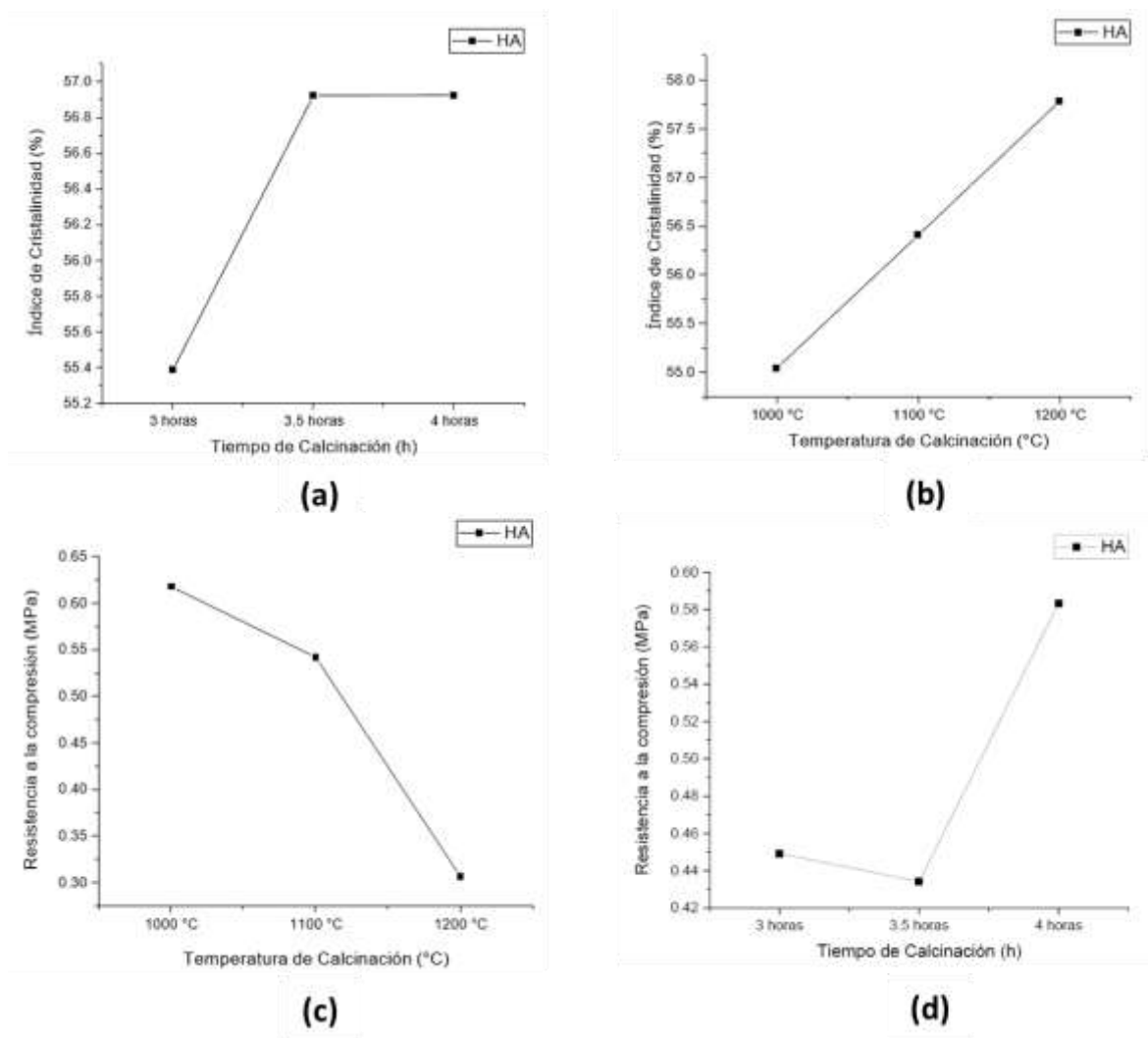


Figura 6. (a) Índice de cristalinidad (%) vs tiempo de calcinación (h), (b) Índice de cristalinidad (%) vs Temperatura de Calcinación (°C), (c) Resistencia a la Compresión Diametral (MPa) vs Temperatura de Calcinación (°C), (d) Resistencia a la Compresión Diametral (MPa) vs Tiempo de Calcinación (h)

Otro factor que afecta la resistencia es la temperatura de sinterización, que en este estudio fue de 200°C, pues que es sabido que al aumento de temperatura de sinterización aumenta la coalescencia y unión de los granos aumentando así la resistencia a la compresión. Las impurezas, también influyen negativamente al generar combustión a altas temperaturas. La presión en los moldes y la carga aplicada en el equipo de ensayo para obtener los discos de HÁ son otros elementos que afectan los resultados.

Para mejorar las propiedades mecánicas y biocompatibles de la hidroxiapatita, se sugiere doparla con metales o biopolímeros como Ag, TiO₂, o Mg, lo que permitiría obtener un material más adecuado para aplicaciones en huesos corticales.

Y, en la Figura 6d se observa una relación directamente proporcional entre el tiempo de calcinación y la resistencia a la compresión diametral de la hidroxiapatita. La resistencia máxima (0.583 MPa) se obtiene tras 4 horas de calcinación, y la mínima (0.434 MPa) con menor tiempo. La HÁ es frágil debido a sus fuertes enlaces iónicos, lo que provoca fracturas sin deformación plástica (Botero, 2016). A menor tiempo de calcinación, la mayor porosidad y tamaño de grano facilitan la propagación de fracturas, además de la presencia de impurezas como el carbonato-apatita que son originados por la ausencia de la evaluación del pH, siendo este originariamente ácido (Ruiz et al., 2022).

4. CONCLUSIONES

Se determinó que la hidroxiapatita producida a partir de cáscara de huevo alcanzó un índice de cristalinidad máximo de 58.71% a 1200°C y 3.5 horas de calcinación, con una relación directa entre estas variables.

La resistencia a la compresión diametral máxima de la HÁ obtenida de cáscara de huevo fue de 0.843 MPa a 1000°C y 4 horas, siendo el tiempo y temperatura inversamente proporcionales con la resistencia a la compresión diametral.

La mejor combinación de propiedades se obtuvo a 1000°C y 4 horas, con un índice de cristalinidad de 55.19% y una resistencia a la compresión de 0.843 MPa, similar a la óptima previamente observada.

Se sugiere dopar la hidroxiapatita con metales o biopolímeros como Ag, TiO₂, Mg, regular el pH, realizar ensayos FTIR, SEM y efectuar más pruebas de compresión con distintas temperaturas de sinterización.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Juan Vega y al Ing. Alfredo Villanueva por su apoyo en la pulverización de muestras en el Laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica; al Dr. Segundo Jáuregui Rosas por el ensayo de Difracción XRD en el Laboratorio Multidisciplinario de Investigación en Nanociencia y Nanotecnología - Departamento de Física; al Dr. Víctor Alcántara y al Ing. Luis Flores por su ayuda con la prensa hidráulica en el Laboratorio Máquinas y Herramientas de Ingeniería Mecánica; y al Dr. Raúl Siche Jara de la Escuela de Ingeniería Agroindustrial - UNT por su ayuda en el ensayo de resistencia a la compresión diametral en su laboratorio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkaron, W., Almansoori, A., Balázs, K., & Balázs, C. (2024). Hydroxyapatite-Based Natural Biopolymer Composite for Tissue Regeneration. *Materials* (Basel, Switzerland), 17(16), 4117. <https://doi.org/10.3390/ma17164117>
- Agbeboh, N. I., Oladele, I. O., Daramola, O. O., Adediran, A. A., Olasukanmi, O. O., & Tanimola, M. O. (2020). Environmentally sustainable processes for the synthesis of hydroxyapatite. *Heliyon*, 6(4), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03765>.
- Botero, Y. L. (2016). Hidroxiapatita carbonatada, una opción como biomaterial para implantes: una revisión del estado del arte. *Revista Colombiana de Materiales*, 8, 79–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.17533/udea.rcm.26893>
- Camacho Díaz, I., Vela Rodríguez, M., Villanueva Aburto, L., Borja Villanueva, A., Montalvo Amanca, F., & Quispe Marcatoma, J. (2018). Hidroxiapatita sintetizada a partir de la cáscara de huevo como potencial sustituto óseo en defectos periodontales y periimplantarios. *Odontología Sanmarquina*, 21(4), 296–301. <https://doi.org/10.15381/os.v21i4.15557>
- Estrada, D. A. (2023). Influencia del tiempo de calcinación en hidroxiapatita producida a partir de cáscara de huevo sobre el tamaño de grano y el grado de cristalinidad [Tesis para Título Profesional, Universidad Nacional de Trujillo]. In *Universidad Nacional de Trujillo*. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/16546>

- Forero, P. (2017). *Influencia de la temperatura en hidroxiapatita extraída a partir de hueso de cerdo* [Tesis para maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/62812>
- Gálvez, D. (2016). *Obtención y caracterización de hidroxiapatita dopada con nanopartículas de ZnO con potenciales aplicaciones biomédicas* [Tesis para maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58101>
- Janus, A. M., Faryna, M., Haberkowicz, K., Rakowska, A., Panz, T. (2008). Caracterización química y microestructural de la hidroxiapatita natural derivada de huesos de cerdo. *Microchimica Acta*, 161, p. 349-353
- Lozoya, D. (2016). *Desarrollo de recubrimiento mediante proyección térmica por plasma en base a polvos de HA-nAg sintetizados mediante métodos verdes*. [Tesis de maestría, CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSGRADO]. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/2257>
- Opris, H., Bran, S., Dinu, C., Baciut, M., Prodan, D. A., Mester, A., & Baciut, G. (2020). Clinical applications of avian eggshell-derived hydroxyapatite. *Bosnian journal of basic medical sciences*, 20(4), 430–437. <https://doi.org/10.17305/bjbms.2020.4888>
- Orozco, J., Marino, I., Forero, P., Arango, P., & Restrepo, E. (2014). SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE LA HIDROXIAPATITA NATURAL OBTENIDA DEL HUESO DE CERDO. *Revista Colombiana de Materiales*, 5, 165–171. <https://doi.org/https://doi.org/10.17533/udea.rcm.19382>
- Pérez, D. (2011). *Proceso tecnológico en fabricación de aleaciones biocompatibles (Ni-Cr)*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. <https://www.monografias.com/trabajos87/proceso-tecnologico-fabricacion-aleaciones-biocompatibles-ni-cr/proceso-tecnologico-fabricacion-aleaciones-biocompatibles-ni-cr>
- Prakasam, M., Locs, J., Salma-Ancane, K., Loca, D., Largeteau, A., & Berzina-Cimdina, L. (2015). Fabrication, Properties and Applications of Dense Hydroxyapatite: A Review. *Journal of Functional Biomaterials*, 6(4), 1099–1140. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jfb6041099>
- Ruiz, J., Moreno, D., Copete, H., Vargas, F., & López, M. E. (2022). Calcium phosphate cements improved by addition of carbonated Hydroxyapatite type B. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.BSECV.2022.05.002>
- Torres, J. L. (2010). *Obtención y caracterización de hidroxiapatita porosa a partir de cáscara de huevo y tunicina* [Tesis para Título Profesional, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/131392>
- Valin, M., Fernández, M., Valin, J., Lopez, H., Figueroa, C., & González, J. (2017). Caracterización mecánica de discos de hidroxiapatita nanoporosos obtenidos por sinterización. *Ingeniería Mecánica*, 20(3), 144–151. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442017000300006&lng=es&nrm=iso&tlng=pt