

IMPORTANCIA DE LA IMPRESIÓN 3D EN LA FORMACIÓN MÉDICA EN ENFERMEDADES CARDIOVASCULARES EN MÉXICO

D. Melchor Flores ^a, R. Agustín-Serrano ^a, A. Gonzalez ^a E. Lozano ^a, X. Maceda ^a,
Marco A. Morales ^b

^aFacultad de Ciencias Físico Matemáticas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
diana.melchorfl@alumno.buap.mx, ricardo.agustin@correo.buap.mx,
aide.gonzalezs@alumno.buap.mx, elio.lozano@alumno.buap.mx,
xanat.maceda@alumno.buap.mx

^bFacultad de Ingeniería Química, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,
spinor70@yahoo.com.mx

RESUMEN

En este trabajo se evaluaron materiales para la creación e impresión de modelos 3D del corazón con el propósito de comprender su anatomía y en el futuro simular arritmias cardíacas. Los modelos elaborados con resina elástica demostraron una capacidad superior para replicar la contractilidad y relajación del corazón respecto a los modelos de ácido poliláctico (PLA) y poliuretano termoplástico (TPU). Estos resultados resaltan la importancia de seleccionar materiales adecuados para mejorar la representación de las funciones cardíacas en modelos anatómicos, lo que tiene implicaciones significativas en la formación médica y práctica clínica.

Palabras claves: Corazón 3D, Formación médica, Patologías cardiovasculares

ABSTRACT

In this work, materials were evaluated for the creation and printing of 3D models of the heart with the purpose of understanding its anatomy and in the future simulating cardiac arrhythmias. The models made with elastic resin demonstrated a superior capacity to replicate the contractility and relaxation of the heart compared to the polylactic acid (PLA) and thermoplastic polyurethane (TPU) models. These results highlight the importance of selecting appropriate materials to improve the representation of cardiac functions in anatomical models, which has significant implications in medical training and clinical practice.

Key words: 3D heart, Medical training, Cardiovascular pathologies

1. INTRODUCCIÓN

En México las enfermedades cardiovasculares representan una de las 10 principales causas de muerte, con 97,187 defunciones registradas en 2023 por el INEGI [1]. Por lo tanto, el

dominio de estas patologías desde la formación médica es indispensable. Actualmente, el uso de modelos biológicos en la formación médica en México presenta desventajas como la descomposición rápida y dificultad de manejo. La impresión 3D inicialmente utilizada para la creación rápida de prototipos en industrias como automotriz y aeroespacial, no tardo mucho antes de que el campo médico reconociera su potencial [2]. La capacidad de transformar modelos 3D digitales en objetos tangibles y específicos del paciente ha abierto nuevos horizontes en la medicina personalizada [3]. Se propone la creación de modelos de corazón impresos en 3D como una alternativa, ya que han demostrado ser una herramienta educativa confiable comparable o mejor que las herramientas de capacitación tradicionales cuando se aprenden procedimientos y anatomía para estudiantes de medicina y residentes [4]. Además, con los modelos impresos en 3D, los pacientes y sus familias pueden adquirir una comprensión más completa de la enfermedad subyacente y la intervención quirúrgica correspondiente [5].

La tecnología de impresión 3D surgió a mediados de la década de 1980 y originalmente se conocía como fabricación aditiva [6]. Abarca procesos que utilizan diferentes tecnologías para crear objetos tridimensionales capa por capa basándose en datos del modelo. A lo largo de los años, la impresión 3D ha revolucionado diversos campos, como la ingeniería, la fabricación y la medicina. En el contexto médico, la impresión 3D se conoce comúnmente como biofabricación, que implica la fabricación de productos, modelos o sistemas biológicos en relación con la medicina [7].

Durante los últimos años, la impresión tridimensional (3D) ha dado el salto al campo de la cardiología gracias a su potencial para mejorar la comprensión de las cardiopatías congénitas, la planificación de la cirugía y la simulación del intervencionismo en cardiopatía estructural [8]. Los modelos cardíacos impresos en 3D se utilizan cada vez más para la educación médica y la comunicación médico-paciente. El corazón es una estructura tridimensional compleja, que puede ser difícil de apreciar debido a las limitaciones de las representaciones bidimensionales (2D). Por lo tanto, la impresión 3D es muy adecuada para ayudar en la enseñanza de la anatomía cardíaca y puede ser especialmente beneficiosa para proporcionar a los estudiantes una comprensión más sólida de las relaciones y orientaciones anatómicas espaciales complejas [9]. Los ejemplos incluyen modelos instructivos que representan defectos cardíacos congénitos, estenosis de la válvula y procedimientos de implantación o reparación de válvulas basados en catéter [10]. Cada vez más, estos modelos 3D se pueden construir con colores particulares, dureza, material variable e incluso textura en capas si es necesario para transmitir una patología cardiovascular sofisticada o inusual [10].

En cuanto a los materiales, actualmente, los polímeros son los tipos más comunes de biomateriales utilizados en las tecnologías de impresión 3D. El PLA es el polímero líder utilizado debido a su bajo costo, biocompatibilidad, biodegradabilidad y fácil procesabilidad. Además, se fabrica utilizando materias primas renovables como el almidón de maíz, y se puede extruir fácilmente entre 190 y 230 °C (temperatura de fusión 175 °C). Por otro lado, el TPU es un termoplástico flexible y resistente a la abrasión. Sin embargo, no se adapta bien a ambientes cálidos; este factor es destacable porque a pesar de tener un amplio rango de trabajo (210–350 °C), no soporta altas temperaturas. El TPU muestra

propiedades mecánicas ajustables con un módulo de Young que va de 5 a 100 MPa y un alargamiento a la rotura del 300% [11]. Finalmente, las propiedades mecánicas de la resina elástica muestran un módulo de Young de 5.5 MPa, un módulo secante de 32 MPa y un alargamiento de rotura de 80% [12].

2. OBJETIVO

Evaluar materiales para la creación e impresión de modelos 3D del corazón con el propósito de comprender su anatomía y en el futuro simular arritmias cardíacas.

3. METODOLOGÍA

Para evaluar la efectividad de diferentes materiales en la impresión 3D de modelos cardíacos, se diseñaron y fabricaron corazones utilizando tres tipos de materiales donde los primeros 2 son en forma de filamento de 1.75 mm y el último en fase líquida: TPU, PLA y resina elástica. Inicialmente, se buscaron modelos 3D anatómicos de corazón en sitios web de acceso libre y se modificaron para simular patologías cardiovasculares (estenosis aórtica y defectos en el tabique auricular) utilizando los softwares de diseño en 3D: Meshmixer 3.5.474 y Blender 4.2 LTS. Posteriormente, utilizando los softwares de laminado BambuLab Studio 1.9.1.67 y CHITUBOX V1.9.5 los modelos fueron preparados para su impresión según los parámetros de la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de impresión 3D según el tipo de impresión y material

Tipo de impresión 3D	Material	Altura de capa (mm)	Velocidad de impresión (mm/s)	Temperatura (0C)	Tiempo de impresión (s)
Inyección Aditiva	PLA	0.2	300	250	12600
Inyección Aditiva	TPU	0.2	50	230	12600
Asistida por UV (DLP)	Resina elástica	0.05	---	21	2.5

Los modelos de PLA y TPU se imprimieron en una impresora A1 Mini Bambu. Para los modelos de resina elástica se utilizó la impresora Creality LD-002H. Las impresiones se evaluaron por su resolución al modelo original (calidad de la impresión) y por la visibilidad de las estructuras anatómicas clave. Los modelos fueron sometidos a pruebas mecánicas para evaluar su flexibilidad y resistencia a la deformación. Además, se llenaron con agua para evaluar su capacidad de retención de líquidos, un aspecto esencial para simular la fisiología cardíaca.

4. RESULTADOS

Los modelos 3D impresos en PLA, Fig. 1-I, presentaron alta precisión y detalles anatómicos con alta resolución, pero carecieron de flexibilidad, limitando su utilidad en simulaciones de patologías cardíacas. Los modelos impresos en TPU, Fig. 1-II, ofrecieron buena flexibilidad y resistencia, replicando mejor las propiedades mecánicas del tejido cardíaco. Sin embargo, tuvieron una pobre retención de líquidos. A diferencia de las

limitaciones de los modelos de PLA y TPU los modelos impresos en resina elástica Fig. 1-III, mostraron una excelente combinación de precisión, elasticidad y retención de líquidos siendo los más adecuados para simular otras patologías cardíacas como arritmias y valvulopatías. En la Fig. 1-IV, se observa una gráfica de esfuerzo-deformación resultado del ensayo mecánico de extensión a partir del cual se calculó el módulo de Young de la resina elástica ($12.4159 \pm 0.0425 \text{ N/m}^2$) y resina rígida ($50.8745 \pm 0.5120 \text{ N/m}^2$), demostrando la propiedad de la resina utilizada. La impresión 3D es prometedora para estos tópicos y modelos 3D personalizados a diferencia de otras técnicas de moldeado por silicona. El tiempo de preparado en la técnica de moldeado por silicón es al menos en 3 fases diferentes: el tiempo de diseño del molde, la obtención del molde y la obtención del modelo 3D por silicón. En cambio, nuestro método por impresión 3D solo requiere de una fase de manufactura.

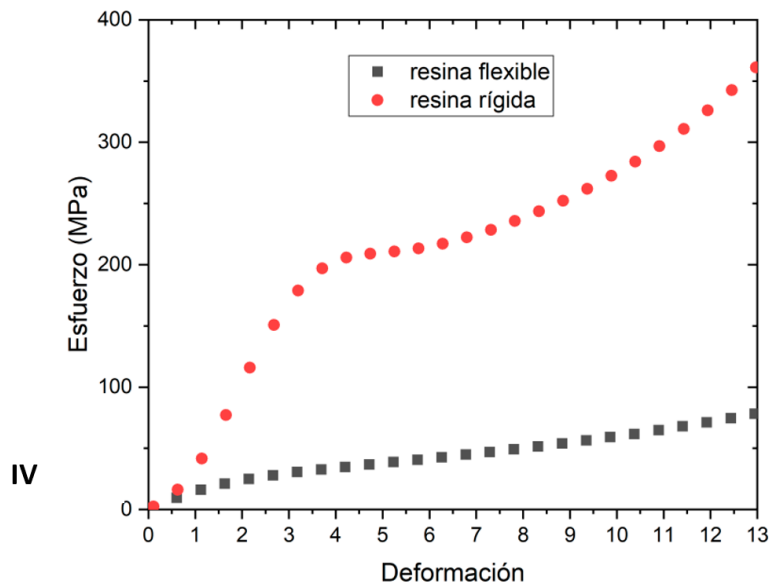


Figura 1: (I) Prototipo de corazón resina elástica, (II) Prototipo de corazón PLA, (III) Prototipo de corazón de TPU, (IV) Gráfica de esfuerzo de deformación de la resina elástica (flexible) utilizada en el modelo 3D impreso con módulo de Young de 5.52 ± 0.0182 .

5. CONCLUSIONES

La elección del material de impresión 3D tiene un impacto significativo en la utilidad de los modelos cardíacos para la educación, la simulación de patologías cardíacas y auxiliar en la

planeación quirúrgica, además los modelos impresos en 3D permiten a los médicos explicar la enfermedad subyacente y su intervención quirúrgica al paciente y sus familiares. Mientras que el PLA ofrece una excelente precisión, la flexibilidad y resistencia del TPU y la resina elástica los hacen más adecuados para aplicaciones prácticas en la formación médica. Estos hallazgos destacan la importancia de seleccionar el material adecuado según el uso previsto de los modelos impresos, y sugieren que la resina elástica es particularmente prometedora para la simulación de valvulopatías y arritmias y no solo de patologías estructurales. Finalmente se propone un método alternativo para la manufactura de modelos biomédicos 3D a cambio de método de moldeado por silicón.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Impresión 3D perteneciente a la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, por el apoyo y la asistencia técnica brindada.

7. REFERENCIAS

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)., “ESTADÍSTICAS DE DEFUNCIONES REGISTRADAS (EDR),” (2024)
- [2] Tsai, A.T. and Greene, A.C., “3D printing in pediatric surgery,” *Seminars in Pediatric Surgery. Papers* 33 (1), (2024)
- [3] Francoisse, C.A., Sescleifer, A.M., King, W.T. and Lin A.Y., “Three-dimensional printing in medicine: a systematic review of pediatric applications,” *Pediatric Research. Papers* 89, 415-425 (2021)
- [4] Pollizzi, A., Patel, P. and Johnson, C., “Insights into Three-Dimensional Printing and Its Uses in Medicine,” *Journal of Radiology Nursing. Papers* 41 (4), 320-325 (2022)
- [5] Shabbak, A., Masoumkhani, F., et al. “3D Printing for Cardiovascular Surgery and Intervention: A Review Article,” *Current Problems in Cardiology. Papers* 49 (1), (2024)
- [6] Madani, M., Mueller, C.L. and Fried, G.M., “Emerging Technology in Surgery: Informatics, Electronics,” *Sabiston Textbook of Surgery, Chapter 15, 349-361* (2022)
- [7] Dong, C., Petrovic, M. and Davies, I. J., "Applications of 3D printing in medicine: A review," *Annals of 3D Printed Medicine. Papers* 14(100149), (2024)
- [8] Valverde, I., “Three-dimensional Printed Cardiac Models: Applications in the Field of Medical Education, Cardiovascular Surgery, and Structural Heart Interventions”, *Spanish Journal of Cardiology. Papers* 70(4), 282-291 (2017)
- [9] Tarca, A., Ngai, W., et al. “3D Printed Cardiac Models as an Adjunct to Traditional Teaching of Anatomy in Congenital Heart Disease – A Randomised Controlled Study,” *Heart, Lung and Circulation* 32, 1443-1450 (2023)
- [10] Vukicevic, M., Mosadegh, B., Min, J.K. and Little, S.H., “Cardiac 3D Printing and its Future Directions”, *JACC: Cardiovascular Imaging. Papers* 10(2), 171-84 (2017)

- [11] Pugliese, R., Beltrami, B., Regondi, S. and Lunetta., C., “Polymeric biomaterials for 3D printing in medicine: An overview”, Annals of 3D Printed Medicine. Papers 2(100011), (2021).
- [12] 3D Materials Engineering ENRG Series., “Safety Data Sheet”, 3D Materials <https://www.3dmaterials.com/sub/resins.php?ptype=view&page=1&&prdco20de=2109150009> (2024).