



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INDUSTRIA CONECTADA (MIC)

TRABAJO FIN DE MÁSTER
ANEXO B

ESTUDIO DE TECNOLOGÍAS DE DIGITAL MANUFACTURING PARA EL DISEÑO, IMPRESIÓN 3D Y ENSAYO DE GEOMETRÍAS LATTICE PARA APLICACIONES BIOMÉDICAS

Autor: Jaime Aja Albero

Director: Eva Paz

Director: Xavier Soldani

Firma del alumno

Firma del director

Madrid

1. Introducción

La fabricación aditiva, uno de los pilares de la Industria 4.0, está revolucionando el campo de la medicina regenerativa, particularmente en el diseño de *scaffolds* para el tratamiento de fracturas óseas severas. Estas estructuras no solo cumplen la función de estabilizar la zona afectada, sino que actúan como un andamio para la regeneración celular, proporcionando el soporte mecánico necesario para resistir los esfuerzos y movimientos del paciente. Este proyecto aprovecha las capacidades avanzadas de la impresión 3D y el diseño 3D (SolidEdge) para desarrollar y evaluar geometrías Lattice, con el objetivo de optimizar la sinergia entre resistencia mecánica y porosidad para aplicaciones biomédicas.

El desafío fundamental en la ingeniería de estos *scaffolds* reside en alcanzar un equilibrio óptimo entre la porosidad y la resistencia mecánica. Una porosidad elevada es indispensable para facilitar la infiltración celular, la vascularización y la integración del implante con el tejido óseo circundante. No obstante, un exceso de porosidad puede comprometer la integridad estructural del *scaffold*, mermando su capacidad para soportar las cargas fisiológicas diarias. Este proyecto aborda directamente este problema, buscando crear diseños Lattice innovadores que superen las limitaciones actuales. En la ilustración 1 se muestra un *scaffold* real, instalado en un hueso gravemente fracturado.

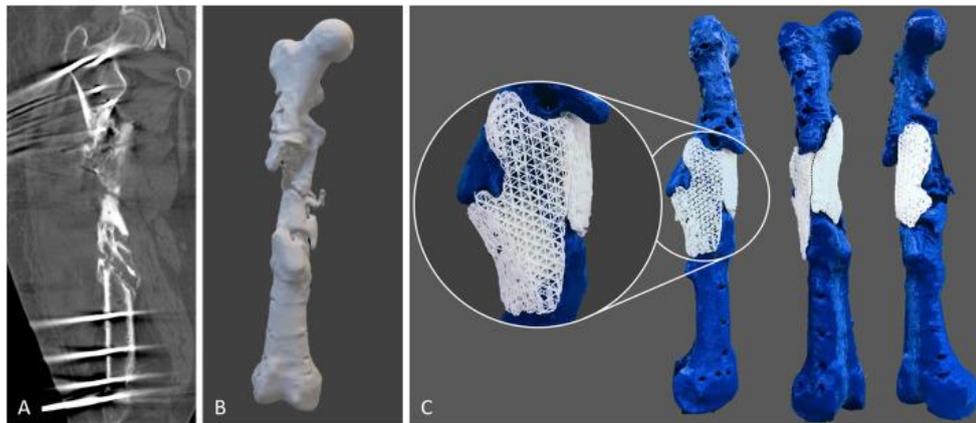


Ilustración 1: *Scaffold* real en hueso fracturado

Aunque ya se emplean diversas geometrías de *scaffolds* en la práctica clínica, muchas no explotan todo el potencial que ofrecen las nuevas tecnologías de fabricación. Aquí es donde la impresión 3D, como tecnología habilitadora de la Industria 4.0, se convierte en una herramienta transformadora. Su capacidad para materializar estructuras de una complejidad geométrica sin precedentes, con una altísima precisión y un potencial de personalización masiva, abre la puerta a diseños que antes eran irrealizables. Este proyecto se propone, por tanto, diseñar y validar experimentalmente nuevas geometrías, generando datos que permitan una comparación rigurosa de su rendimiento y que demuestren cómo la fabricación aditiva puede optimizar los implantes médicos del futuro.

2. Estado de la cuestión

La tecnología de impresión 3D ha supuesto una revolución en diversas industrias, destacando su impacto en la biomedicina, donde ha facilitado la creación de estructuras personalizadas de gran complejidad. Este avance ha sido un catalizador para la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa, permitiendo fabricar *scaffolds* con geometrías diseñadas para optimizar el equilibrio entre porosidad y resistencia mecánica, dos factores cruciales para la regeneración celular y la correcta integración con el tejido óseo. La capacidad de producir *scaffolds* a medida, adaptados a la anatomía de cada paciente, ha elevado la eficacia de los tratamientos, sobre todo en el abordaje de fracturas óseas de gravedad.

El progreso en este campo ha estado intrínsecamente ligado al desarrollo de biomateriales como el ácido poliláctico (PLA), el ácido poliglicólico (PGA) y diversas cerámicas biocompatibles. Gracias a ellos, es posible crear *scaffolds* que no solo actúan como un soporte estructural pasivo, sino que también promueven activamente la regeneración celular. Asimismo, la aparición de técnicas avanzadas, como la fotopolimerización y la impresión con biotintas que incorporan células vivas, ha expandido notablemente el horizonte clínico. Estas metodologías posibilitan la fabricación de implantes y prótesis personalizadas con una precisión excepcional, lo que se traduce en mejores resultados quirúrgicos.

En lo que respecta a la arquitectura de los *scaffolds*, geometrías como las de tipo Lattice, gyroid y trabeculares son preeminentes por su habilidad para optimizar la porosidad y la resistencia mecánica. Las estructuras Lattice sobresalen por su capacidad para distribuir las cargas de manera eficaz. Las geometrías gyroid ofrecen una excelente combinación de porosidad y solidez, lo que las hace idóneas para aplicaciones que demandan una alta vascularización. Las estructuras trabeculares, por su parte, emulan la microestructura del hueso natural, lo que favorece una mejor integración con el tejido circundante. La investigación actual sigue centrada en perfeccionar estas geometrías para potenciar su rendimiento clínico.

Desde el punto de vista de los materiales, los polímeros biodegradables como el PLA y el PGA son de uso extendido, ya que el organismo los reabsorbe una vez han cumplido su función de soporte. Las cerámicas biocompatibles, como la hidroxiapatita, son fundamentales en la regeneración ósea debido a su composición análoga a la del hueso, lo que estimula la osteointegración. Por otro lado, las biotintas formuladas a base de hidrogeles, que replican el entorno celular, son indispensables para la impresión de *scaffolds* destinados a tejidos blandos, abriendo la puerta a la creación de tejidos funcionales a medida. La investigación se orienta ahora hacia el desarrollo de materiales híbridos que aúnen las ventajas de polímeros y cerámicas, así como a la formulación de nuevas biotintas para optimizar la regeneración tisular.

El diseño tridimensional constituye una herramienta indispensable en este proceso. Programas de software como Solid Edge, SolidWorks y AutoCAD son cruciales para modelar geometrías complejas y realizar simulaciones preliminares de su comportamiento. Para análisis más profundos, se emplean herramientas de simulación multifísica como

ANSYS y Abaqus, que permiten predecir con gran exactitud la respuesta de los *scaffolds* bajo distintas condiciones de carga. Adicionalmente, plataformas avanzadas como Rhinoceros con Grasshopper o Fusion 360 mediante scripts de Python facilitan la creación de geometrías paramétricas y altamente personalizadas, optimizando el diseño para las necesidades específicas de cada paciente.

Como pilar de la fabricación aditiva, la impresión 3D ha transformado la producción de dispositivos biomédicos, posibilitando la manufactura de estructuras complejas y personalizadas con una elevada precisión. Tecnologías como la estereolitografía (SLA), la sinterización selectiva por láser (SLS) y la deposición de material fundido (FDM) son de uso común en el sector biomédico, cada una con sus propias fortalezas. La SLA es valorada por su alta resolución, ideal para modelos anatómicos detallados; la SLS permite fabricar piezas intrincadas sin necesidad de soportes; y la FDM destaca por su accesibilidad y bajo coste, aunque su precisión es menor. La bioimpresión, como tecnología emergente, promete llevar la ingeniería de tejidos y la medicina regenerativa a un nuevo nivel, con la posibilidad de imprimir tejidos y órganos personalizados.

En conjunto, estos progresos no solo incrementan la eficiencia de los tratamientos médicos, sino que también inauguran nuevas vías de aplicación en la medicina regenerativa. Fomentan una regeneración ósea más segura y eficaz, lo que resulta en una mejora sustancial de la calidad de vida de los pacientes.

3. Motivación del proyecto

El uso de la impresión 3D permite explorar una amplia variedad de geometrías y materiales que pueden ser difíciles de fabricar mediante métodos tradicionales. La flexibilidad en el diseño y la capacidad de producir estructuras personalizadas hacen de esta tecnología una opción prometedora para la fabricación de *scaffolds*. Este proyecto investigará diferentes métodos de impresión y materiales, buscando aquellos que proporcionen las mejores propiedades mecánicas y biológicas. Además, se evaluarán las condiciones de contorno necesarias para la inserción de estos *scaffolds* en el cuerpo, considerando factores como las cargas, fuerzas, tamaños y frecuencias a las que estarán sometidos.



Ilustración 2: Impresión 3D de *scaffolds*

En la Ilustración 2 se muestran ejemplos de *scaffolds* impresos en 3D mediante métodos similares a los analizados en este proyecto.

Finalmente, la motivación de este proyecto radica en su potencial para mejorar significativamente los tratamientos de fracturas óseas graves, reduciendo los tiempos de recuperación y mejorando la calidad de vida de los pacientes. Al desarrollar *scaffolds* con mejores propiedades mecánicas y biológicas, se espera contribuir a la creación de implantes más eficientes y seguros. Los resultados de este estudio no solo tendrán un impacto inmediato en el campo de la medicina regenerativa, sino que también proporcionarán una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el diseño y fabricación de *scaffolds* mediante impresión 3D.

4. Objetivos del proyecto

El objetivo general de este proyecto es analizar y optimizar las propiedades mecánicas de diversas geometrías Lattice fabricadas mediante impresión 3D, centrándose específicamente en su comportamiento bajo compresión y su resistencia a la fatiga. La finalidad es generar un compendio riguroso de datos experimentales que sirva como guía para el diseño y la manufactura de *scaffolds* en aplicaciones biomédicas, particularmente en el ámbito de la regeneración ósea. A través de un diseño innovador y una fase de pruebas exhaustiva, se busca perfeccionar estas geometrías para alcanzar un rendimiento mecánico superior, sin sacrificar la porosidad esencial para el proceso de regeneración celular.

Para alcanzar este fin, los objetivos específicos incluyen el diseño de múltiples arquitecturas Lattice mediante el uso de software avanzado como Solid Edge y la programación en Python, explorando un rango de diferentes niveles de porosidad. La materialización de estos diseños se realizará empleando técnicas de fabricación aditiva, para lo cual se seleccionarán los materiales más adecuados y se optimizarán los parámetros de impresión con el fin de garantizar la precisión dimensional y la integridad estructural de las probetas. Posteriormente, se llevarán a cabo ensayos mecánicos para evaluar de forma cuantitativa la resistencia a la compresión y a la fatiga, lo que proporcionará datos cruciales sobre el rendimiento de cada geometría bajo condiciones de carga realistas.

Finalmente, el proyecto culminará con la caracterización y el análisis comparativo de los resultados experimentales frente a las predicciones obtenidas de simulaciones por elementos finitos en software como ANSYS. Esta etapa es fundamental para validar la precisión de los modelos digitales y para establecer un ciclo de retroalimentación que permita refinar los parámetros de diseño, mejorando así las propiedades mecánicas de los *scaffolds*. Los hallazgos de esta comparación no solo servirán para formular directrices y recomendaciones claras para el diseño futuro, sino que también contribuirán a la creación de soluciones médicas más eficaces, seguras y personalizadas para los pacientes. Este enfoque, que integra el mundo físico y el digital, es un claro ejemplo de la metodología de la Industria 4.0, sentando las bases para acelerar la innovación y el desarrollo de implantes de nueva generación.

5. Metodología

A continuación, se adjunta la tabla de contenidos prevista del estudio. Se destaca que pueden surgir cambios a lo largo de la realización del estudio, por lo que es una primera aproximación para abordar la estructura del proyecto.

1. Introducción	
1.1 Motivación del proyecto	
1.2 Descripción del problema	
1.3 Objetivos	
2. Estado del arte	
2.1 Panorama	
2.2 Geometrías y materiales	
2.3 Tecnologías de diseño e impresión 3D	
3. Metodología propuesta	
3.1 Diseño de piezas	
3.2 Impresión 3D	
3.3 Medida de porosidad	
3.4 Ensayos	
3.6 Caracterización del material	
4. Resultados	
4.1 Resultado de ensayo estático	
4.2 Resultado de ensayo de fatiga	
4.3 Resultado de caracterización del material	
4.4 Resultado de simulación ANSYS de estático	
5. Conclusiones	

6. Bibliografía

- [1] Gorgolis, G., & Giali, G. (2022). Additive manufacturing in aerospace: Examples, recent trends, and future perspectives. *Results in Engineering*, 13, 100311. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214031X22000377>
- [2] 3DPrinting.com. (2023). *BellaSeno Unveils 3D Printed Scaffolds for Bone Reconstruction*. Obtenido de <https://3dprinting.com/news/bellasenos-unveils-3d-printed-scaffolds-for-bone-reconstruction/>
- [3] Gong, T., Xie, J., Liao, J., Zhang, T., Lin, S., & Lin, Y. (2015). 3D porous scaffolds for bone tissue regeneration: Some examples of strut-based and TPMS-based scaffolds [Figura 6]. ResearchGate. Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/3D-porous-scaffolds-for-bone-tissue-regeneration-a-Some-examples-of-strut-based_fig6_338191882
- [4] Zadpoor, A. A. (2015). Bone tissue regeneration: the role of scaffold geometry. *Biomaterials Science*, 3(2), 231-245. <https://doi.org/10.1039/C4BM00291A>
- [5] Senghun S. Lee, Xiaoyu Du, Inseon Kim, Stephen J. Fergusin (2022) Scaffolds for bone-tissue engineering - ScienceDirect. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590238522002983>
- [6] Zeng Zhou, Wei Feng, B Kamyab Moghadas, N Baneshi, B Noshadi, Sh Baghaei, D Abasi Dehkordi. (2024) Review of recent advances in bone scaffold fabrication methods - ScienceDirect. Obtenido de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38663113/>
- [7] Formlabs. (2021). Clear Resin V4 Material Data Sheet. Formlabs Inc. Obtenido de <https://formlabs.com/materials/clear/>