

Impresión 3D de materiales de carbono y materiales compuestos para su uso en ingeniería de tejidos

R. Llamas-Unzueta, A. Reguera-García, M.A. Montes-Morán, J.A. Menéndez

Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR-CSIC) c/ Francisco Pintado Fe, 26, 33011 Oviedo

r.llamas@incar.csic.es

Palabras clave: andamios óseos, impresión 3D, lactosuero, materiales compuestos, carbón poroso.

Introducción

Uno de los desafíos principales de la ingeniería de tejidos es el desarrollo de materiales que superen las limitaciones de los materiales tradicionales. En concreto, en el desarrollo de andamios óseos, tradicionalmente se han utilizado fosfatos cálcicos como la hidroxiapatita (HA) o el fosfato tricálcico (TCP), dada su similitud con el hueso natural. En los últimos años el uso de nuevos precursores de carbono naturales combinados con tecnologías de fabricación como la impresión 3D ha abierto nuevas oportunidades para los carbones porosos en este campo [1]. En el presente trabajo se describe cómo, a partir de lactosuero en polvo, un subproducto de la industria láctea, y HA, se pueden obtener materiales compuestos en 3D con propiedades adecuadas para su uso como andamios óseos: porosidad adecuada, elevada permeabilidad, comportamiento no citotóxico, excelente resistencia mecánica y propiedades bioactivas. Este enfoque es una forma más sencilla y económica de fabricar andamios óseos con propiedades optimizadas, en comparación con las técnicas y materiales tradicionales.

Experimental

Se prepararon pastas con diferentes concentraciones de polvos de lactosuero e hidroxiapatita cuyas propiedades reológicas fueron evaluadas por medio de ensayos oscilatorios SAOS en un reómetro Haake MARS II (ThermoScientific). Las pastas fueron impresas mediante la técnica de impresión directa de tinta (DIW) con diferentes geometrías usando una impresora 3D de filamento fundido PRUSA i3 MK3s+ modificada. Las piezas impresas se secaron y posteriormente se sometieron a un tratamiento térmico a 900 °C en atmósfera inerte de N₂. A continuación se lavaron con agua destilada en un baño de ultrasonidos. Se realizaron ensayos de citotoxicidad, degradación y bioactividad a los andamios para evaluar sus propiedades biológicas. La resistencia mecánica se evaluó a partir de ensayos de compresión con piezas de dimensiones controladas. La estructura porosa se observó por medio de imágenes de SEM y se cuantificó mediante porosimetría de Hg.

Resultados y discusión

Las pruebas reológicas muestran que todas las pastas obtenidas a partir de lactosuero + HA presentan un correcto comportamiento viscoelástico para ser impresas mediante DIW. Se observa que, a medida que aumenta la cantidad de HA en la mezcla, la tensión de cedencia y el punto de cruce disminuyen. Las pastas con relaciones de 1/3 (C2), 1/9 (C3) y 0/1 (W) tienen condiciones óptimas para la impresión. Después del tratamiento térmico, debido al rendimiento de carbono del suero (aproximadamente 22.5% en peso), los andamios obtenidos tienen contenidos de HA del 81.6% en peso (SCF1), 59.7% en peso (SCF2), 33.1% en peso (SCF3) y 0% en peso (SCFw). La geometría elegida para los andamios consiste en un patrón de rejilla, con diámetros de filamento, una vez carbonizados, de alrededor de 400 μm, y espacios entre los filamentos de 175 μm (Figuras 1a, 1b). Estas medidas están dentro del rango ideal para promover la respuesta osteogénica. Por otro lado, la fase de carbono de los compuestos proporciona microporosidad (tamaño de poro <10 μm) (Figura 1c), lo cual es positivo ya que promueve el intercambio iónico y la adsorción de proteínas óseas.

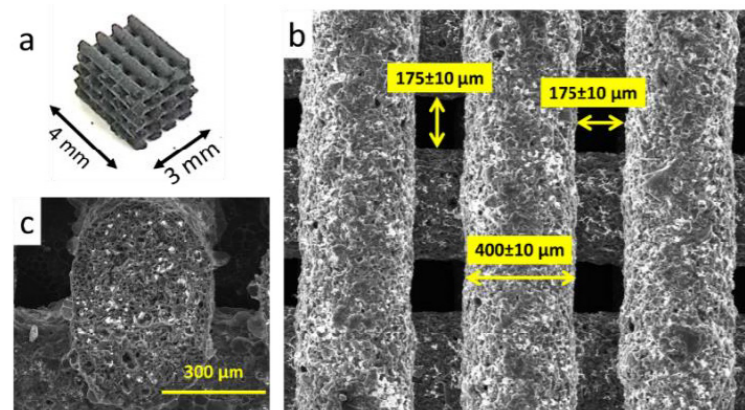


Figura 1. (a) Probeta tipo utilizada en los ensayos biológicos; (b) apariencia y medidas de la rejilla de SCF3 vista al SEM y (c) vista al SEM de un corte seccional de un filamento correspondiente a SCFw.

Los andamios compuestos de HA-carbono presentan excelentes propiedades mecánicas. La resistencia a la compresión (S_u) está vinculada al contenido de carbono, siendo muy alta para los andamios de carbono puro (14 MPa) y para aquellos con mayor contenido de carbono, como SCF3 (13.4 MPa) y SFC2 (10.2 MPa). Con fines comparativos, se prepararon andamios de HA bajo las mismas condiciones de impresión y sinterizados a 1300°C, y el valor de S_u fue de 10.7 MPa. Todas las muestras presentan un nivel de viabilidad celular cercano al 100% (no citotóxico). Tanto los andamios de HA pura como los de carbono muestran una baja tasa de degradabilidad. En cuanto a la bioactividad, los resultados exponen un comportamiento muy bioactivo de los materiales compuestos de HA-carbono, superior incluso que los andamios obtenidos a partir de HA pura.

Conclusiones

A partir de pastas de lactosuero y HA es posible obtener piezas para impresión 3D mediante DIW. Tras un tratamiento térmico a 900 °C se obtienen andamios de HA-carbono con una resistencia a la compresión equivalente o incluso superior a la de los andamios tradicionales de HA sinterizada. Este proceso supone una ventaja al reducir la temperatura de síntesis en comparación con el método tradicional de sinterización de HA (1300°C). Además, la fase de carbono contiene poros por debajo de 10 μm en los filamentos del andamio, lo que es otra ventaja potencial, ya que aumenta la eficiencia del material para adsorber proteínas óseas. Los andamios de HA-carbono son no citotóxicos, presentan una baja degradabilidad y una bioactividad mayor que los andamios tradicionales de HA sinterizada.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero recibido del Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) (Proyecto PID2020-115334GB-I00) y del Principado de Asturias (FICYT) – Unión Europea (FEDER) (Proyecto PCTI-Asturias IDI/2021/000015). J.A.M. y M.A.M.-M. son miembros de la Plataforma Temática Interdisciplinar (PTI+) de Plásticos Sostenibles hacia una Economía Circular (PTI-SusPlast+).

Referencias

^[1] Llamas-Unzueta, R., Menéndez, J. A., Suárez, M., Fernández, A., and Montes-Morán, M. A. (2022). From whey robocasting to custom 3D porous carbons. *Additive Manufacturing*, 59, 103083. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103083>