

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN 3D POR FDM (MODELO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA) EN LAS PROPIEDADES DEL PLA (ÁCIDO POLILÁCTICO).

Trabajo Fin de Grado de Farmacia

Facultad de Farmacia

Autora: Carmen Pilar Díaz Martín

Tutor: Dr. David Díaz Díaz

Universidad de La Laguna
Curso Académico 2021-2022

INDICE:

Resumen.....	3
Abstract.....	3
Introducción.....	4-5
Objetivos.....	5
Materiales y métodos.....	6
Resultados.....	7-13
Discusión de resultados.....	14
Conclusiones.....	15
Bibliografía.....	16-18

Resumen:

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la influencia de los parámetros de impresión 3D en las propiedades del ácido poliláctico (PLA). Para ello, se realizó una revisión sistemática de la literatura durante el período 2012-2022. La búsqueda realizada mostró que el PLA es uno de los polímeros de mayor uso en impresiones 3D por modelado por deposición fundida (FDM) al tratarse de un material biodegradable, de bajo costo y actualmente, bajo modificaciones químicas más resistente. Se encontraron también los parámetros de impresión 3D que mejoran notablemente las propiedades mecánicas como la resistencia térmica y de impacto de materiales impresos con PLA, siendo éstos influenciados en gran medida, por el grado de cristalinidad del PLA. La temperatura y ángulo de extrusión también son algunos de los parámetros que influyen directamente en la calidad de impresión 3D por FDM.

Palabras clave: Impresión 3D, modelado por deposición fundida (FDM), ácido poliláctico (PLA), propiedades mecánicas.

Abstract:

The present work aims to evaluate the influence of 3D printing parameters on the properties of polylactic acid (PLA). For this, a systematic review of the literature was carried out during the period 2012-2022. The search carried out showed that PLA is one of the most widely used polymers in 3D printing by fused deposition modeling (FDM) as it is a biodegradable material, low cost and currently more resistant under chemical modifications. 3D printing parameters were also found that decisively improved the mechanical properties such as thermal and impact resistance of materials printed with PLA, these being greatly influenced by the degree of crystallinity of the PLA. The temperature and the extrusion angle are some of the parameters that directly influence the quality of 3D printing by FDM.

Keywords: 3D printing, fused deposition modeling (FDM), polylactic acid (PLA), mechanical properties.

1. Introducción:

El campo de la impresión 3D es una aplicación relativamente joven, hoy en día de amplio uso en la industria automotriz, aeronáutica y construcción. Sus principales desarrollos se produjeron a principios de la década de 1980, por Kodama, quien desarrolló un método de fabricación con polímeros endurecidos con luz ultravioleta, y en paralelo por Hull quien desarrolló el primer dispositivo de estereolitografía (SLA) (1,2). En ambos trabajos, el principio es la generación de un objeto tridimensional a partir de la deposición capa sobre capa de un fluido. Los trabajos de Kodama y Hull fueron reconocidos en el año 1995 cuando compartieron el Rank Prize, un premio británico de financiación privada para inventores destacados.

La historia y el desarrollo de la creación de prototipos impresos en 3D se originan a partir de dos técnicas precedentes principales: la topografía y la fotoescultura. Inicialmente, estos dos procesos eran de alto costo y elaboración compleja. Posteriormente, fueron evolucionando a técnicas más modernas y de bajo costo, donde el desarrollo de la impresión 3D ha sido acompañado con los avances en tecnología computarizada, software de diseño y nuevos materiales.

Actualmente, se conocen diversas técnicas de impresión 3D con patrones de fundición creados a partir de modelos de diseño asistido por ordenador (CAD), por ejemplo: sinterización selectiva por láser (SLS), que consiste en derretir partículas de polvo para formar la pieza con un láser o haces de electrones (3); fabricación de filamentos fusionados (FFF) y modelado por deposición fundida (FDM), cuyo principio es bastante similar en ambas, porque son métodos de extrusión de filamentos, donde la construcción del material se lleva a cabo por la deposición de múltiples capas de un material fundido capaz de solidificarse rápidamente (4,5).

La impresión 3D permite realizar representaciones de objetos físicos tridimensionales con el uso de una impresora, lo que ha propiciado la creación de prototipos y encontrado aplicaciones que van desde robótica, aplicaciones médicas y microfluidos. También se ha mejorado cada una de las técnicas de impresión 3D referente a la velocidad de impresión, adición de accesorios y la ampliación de materiales de impresión que incluyen: polímeros termoplásticos, semiconductores, hidrogeles, materiales cerámicos, nanomateriales y la combinación de ellos, destinados a la fabricación de tejido corporal, materiales conductores e incluso piezas metálicas utilizadas en la industria automotriz y aeronáutica (6).

En medicina, la tecnología de impresiones 3D a través del método FDM (modelado por deposición fundida) es una de las técnicas más utilizadas. El método FDM se ha empleado no solo a la impresión de modelos anatómicos para fines académicos, también se ha usado en el campo clínico en la impresión de implantes y prótesis dentales, así como en la construcción de modelos biomédicos y ayudas quirúrgicas personalizadas para el paciente, o en la bioimpresión de tejidos para la medicina regenerativa. Todo esto ha sido acompañado con el descubrimiento de nuevos materiales biocompatibles, tales como: acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), nailon y ácido poliláctico (PLA), siendo este último además, biodegradable, lo que ofrece grandes ventajas en el campo de biomedicina (5,7).

En este trabajo se propone una revisión de la literatura sobre el uso del ácido poliláctico (PLA) en impresiones 3D y cómo influyen los parámetros de impresión en las propiedades de este material. Para ello, se realiza una revisión en las principales bases de datos de la Universidad de La Laguna, Dialnet, Google Académico, SciELO, entre otras, de investigaciones realizadas durante los últimos 10 años con el objeto de recopilar información sobre las técnicas de caracterización del PLA, métodos de impresión 3D con enfoque en el modelado por deposición fundida (FDM), parámetros utilizados, ventajas y limitaciones tanto de la técnica como del material. Se muestran los resultados y conclusiones más importantes.

2. Objetivos

En este trabajo se propone como objetivo general:

- Evaluar la influencia de los parámetros de impresión 3D con FDM en las propiedades del ácido poliláctico (PLA).

En función de esto, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar una revisión sistemática de la literatura durante el período 2012-2022 sobre investigaciones relacionadas con impresiones 3D por modelado de deposición fundida (FDM) y el ácido poliláctico (PLA).
- Relacionar las propiedades del ácido poliláctico (PLA) con los parámetros de impresión 3D por el método FDM.
- Indagar en las aplicaciones médicas de los modelos impresos por FDM a base de ácido poliláctico.

3. Materiales y Métodos:

Se realizó una revisión sistemática de la literatura relacionada con el uso de ácido poliláctico (PLA) en impresiones 3D, con interés en la técnica de modelado por deposición fundida (FDM) y aplicaciones biomédicas. Para ello, se realizó una búsqueda de artículos de investigación publicados en el período 2012-2022 en las siguientes bases de datos:

- Biblioteca virtual ULL
- SciELO
- Dialnet plus
- Google Académico

Se tomaron en cuenta las siguientes palabras clave tanto en español como en inglés:

- Ácido poliláctico, PLA (en inglés *Polylactic acid PLA*)
- Impresiones 3D (en inglés *3D printer*)
- Modelado por deposición fundida, FDM (en inglés *Funded Deposition Model FDM*)
- Aplicaciones médicas (en inglés *medical applications*)
- Propiedades de PLA (en inglés *PLA properties*)
- Parámetros de impresión (en inglés *printer parameters*)

Se encontraron aproximadamente 10200 resultados, de estos se tuvieron en cuenta los artículos de investigación publicados, reviews, y trabajos conducentes a grado (tesis) y se excluyeron resúmenes de congresos, patentes, simposios, capítulos de libros y blogs.

4. Resultados:

4.1 Técnicas de impresión 3D

En la tabla 1, se clasifican las diferentes técnicas de impresión 3D, estas varían en función de los materiales a utilizar:

Tabla 1. Clasificación de técnicas de impresión 3D (7).

Tipo	Tecnologías	Materiales
Extrusión	Modelado por deposición fundida (FDM /FFF)	Termoplásticos, por ejemplo PLA, ABS, HDPE, PA, PETG, PP, PC, poliuretano termoplástico (TPU), metales eutécticos, materiales comestibles
Hilado	Fabricación por haz de electrones (EBF)	Casi cualquier aleación
Granulado	Sintetizado directo de metal por láser (DMLS)	Casi cualquier aleación
	Fusión por haz de electrones (EBM)	Aleaciones de titanio
	Sintetizado selectivo por calor (SHS)	Polvo termoplástico
	Sintetizado selectivo por láser (SLS)	Termoplásticos, polvos metálicos, polvos cerámicos
	Proyección aglutinante (DSPC)	Yeso
Laminado	Laminado de capas (LOM)	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
Fotoquímicos	Estereolitografía (SLA / DLP)	Fotopolímero
	Fotopolimerización por luz ultravioleta (SGC)	Fotopolímero

De todos los métodos impresión 3D expuestos, el más usado y económico, con tecnología de fabricación aditiva para la impresión de nuevos productos con aplicaciones médicas es el modelado por deposición fundida (FDM). Esta técnica se subdivide en dos segmentos: industrial y de escritorio. Los de este último grupo ha tenido un crecimiento notable en los últimos años.

4.2 Modelado por deposición fundida (FDM)

La técnica de FDM consiste en la construcción capa por capa de un objeto a partir del paso de un filamento termoplástico a través de un cabezal de impresión calentado y soportado sobre la plataforma de construcción (7), utilizando un troquel de extrusión en

miniatura de $\sim 0,5$ a 2 mm de diámetro. La impresora está controlada por un ordenador de prototipo rápido (PR) donde se procesa archivos de extensión “.gcode” que contiene el diseño virtual de la pieza a imprimir en un lenguaje específico, además de otras instrucciones específicas necesarias para poder imprimir la pieza como son: la velocidad de impresión, el tamaño del hilo de impresión, la temperatura de fundido, altura de las capas, etc. (8) Dependiendo del tipo de pieza a fabricar y el acabado de la superficie que se requiere (baja o alta resolución) estos parámetros pueden variar y se rigen por la norma ISO/ASTM 52901: 2017–Additive Manufacturing–General Principles.

La técnica FDM tiene algunas desventajas, entre ellas, es un proceso de impresión lenta, que se limita a materiales con bajo punto de fusión. Además, las dimensiones de impresión están restringidas y le da un acabado superficial rugoso a la parte impresa. Sin embargo, posee grandes ventajas tales como: una alta confiabilidad, una amplia gama de disponibilidad de material de filamento de bajo costo y bajo costo de mantenimiento e inversión inicial (9).

En la figura 1, se representa esquemáticamente las partes de una impresora 3D de modelado por deposición fundida (FDM). En general, la impresión 3D tiene lugar cuando el filamento del material polimérico contenido en el extrusor se funde generando una capa de dimensiones definidas, el extrusor se mueve en las dimensiones indicadas por el ordenador para generar una capa sobre otra hasta completar la pieza diseñada (8). El extrusor dispone de un sistema de seguridad a través del tubo de Fibonacci que impide la ruptura del material polimérico, además de un sistema de regulación de temperatura para mantener constante la temperatura de fusión del material.

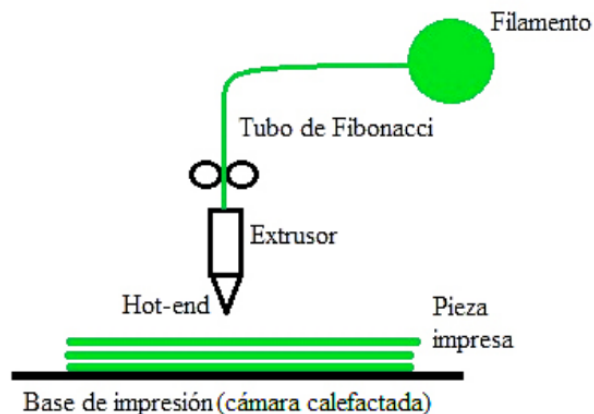


Figura 1. Esquema de una impresora 3D de modelado por deposición fundida (8)

Teniendo en cuenta que el material usado como filamento requiere bajos puntos de fusión, se pueden emplear polímeros como: ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), PLA (ácido poliláctico), Nylon/poliamida, ASA (acrilato de acrilonitrilo estireno), PET (tereftalato de polietileno), PETG (tereftalato de polietileno modificado con glicol) y PC (policarbonato). También se pueden usar compuestos de matriz polimérica (PMC), biocompuestos o compuestos cerámicos poliméricos (PCC), nanocompuestos y compuestos reforzados con fibra (FRC), así como también polímeros de alto rendimiento como PEEK (poliéter éter cetona), PEKK (poliéter cetona cetona) y ULTEM (polieterimida), y TPE (elastómeros termoplásticos) siendo este el material polimérico flexible mas nuevo utilizado en FDM (9).

4.3 Tipos de filamentos usados en FDM

A continuación se describen las propiedades de algunos de los filamentos utilizados con mayor frecuencia en impresión 3D por la técnica de extrusión FDM.

- **Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS):** el ABS es un derivado del petróleo que se compone de un copolímero de estireno y acrilinitrilo que conforma un copolímero vítreo lineal (SAN) que se desempeña como matriz y aporta en la resistencia química y superficial cuando se somete a cambios de temperatura y la combinación de polibutadieno y estireno que actúan como relleno, aportando en dureza, resistencia al impacto y rigidez (10). Se caracteriza por ser un material altamente resistente, se puede reciclar y de bajo coste, sin embargo, requiere de alta temperatura y base de impresión caliente para el proceso, tiene poca resistencia química y resistencia media al agua. Este material se utiliza en la fabricación de microdispositivos, microfluidos y en la fabricación de piezas biomédicas (8).
- **Polivinil alcohol (PVA):** es un polímero termoplástico derivado de la hidroxilación de acetato de polivinilo. Es uno de los más usados en aplicaciones biomédicas en la fabricación de lentes, de contacto blandos, adhesión de tejidos y cartílago debido a sus características de baja adsorción de proteínas, biocompatibilidad, alta solubilidad en agua y resistencia química (11).
- **Elastómero termoplástico (TPE):** es un material flexible y con resistencia intermedia al agua. Se caracteriza por su alta resistencia a cambios de temperatura. Está compuesto por estireno, que proporcionan al polímeros

propiedades de termoplástico, y butadieno, que proporciona las propiedades de elastómero. Para impresión 3D por el método de FDM se debe realizar a velocidad lenta con el objetivo de evitar cualquier carga que deforme el filamento y su uso principal en medicina es la fabricación de plantillas ortopédicas (8,12).

- **Policarbonato (PC):** es un material transparente que resiste muy altas temperaturas y al impacto. A pesar de las grandes ventajas que ofrece en cuanto a resistencia y rigidez, se requiere de altas temperaturas para impresión, además de un ambiente libre de humedad, pues es altamente higroscópico, las condiciones inadecuadas de impresión 3D con PC ocasiona la separación del objeto por capas (13). En medicina se utiliza para aplicaciones ortopédicas, dentales y lentes correctivos.
- **Ácido poliláctico (PLA):** es un plástico de origen vegetal, poco resistente, sin embargo, es un material biodegradable a través de reacciones de hidrólisis simples, biocompatible y con propiedades mecánicas óptimas para impresión 3D, pues es de bajo costo, se imprime a una temperatura de 220°C y no necesita cama calefactora. Dentro de sus aplicaciones en la ciencia biomédica se utiliza como suturas e implantes dentales, además de materiales ortopédicos y de administración de fármacos, con potencial interés en el área de la ingeniería de tejidos (14,15).

En la tabla 2 se establece una comparativa de algunas propiedades físicas de los diversos filamentos utilizados en impresión 3D por el método FDM.

Tabla 2. Propiedades de filamentos de impresión 3D en FDM (14).

Propiedades	ABS	PVA	TPE	PC	PLA
Resistencia a la tensión (MPa)	45	36	27	65,5	28-50
Módulo de elasticidad (MPa)	2345	225	880	2,38	1,20-3,00
Densidad (kg/cm ³)	1,04	1,33	0,91-1,33	1,2	1,25-1,29
Conductividad térmica x10 ⁻⁵ (W/m°C)	4,9	5,46	1,3	1,92	No reportado
Temperatura de impresión (°C)	230-250	210	230	280	220
Temperatura de cama calefactora (°C)	80-110	No requiere	Mayor a 60	80-120	No requiere
Biodegradabilidad	No	Si	No	No	Si
Reciclable	Si	Si	Si	Si	No

4.4 Materiales a base de PLA

Se han preparado materiales biodegradables que tienen como base PLA. Esta modificación de la cadena polimérica aumentan la resistencia mecánica, disminuyen la temperatura de fusión, mejoran la cristalinidad y son menos solubles en agua. Éstos materiales son muy atractivos para impresiones 3D.

Desde el punto de vista estructural, este polímero es amorfo o semicristalino según la pureza de la composición de su estereoisómero. El trabajo realizado por Soares y colaboradores (16) encontraron que al usar 100% L-PLA, se obtiene un material con una un alto punto de fusión y una alta cristalinidad. Pero si se hace una mezcla de D-PLA y L-PLA, se obtiene un polímero amorfo con una transición vítrea temperatura de 60°C. Además, obtuvieron una película de polímero hecha de almidón termoplástico (TPS)/PLA y determinaron que cuanto más lento se enfría la película, estas alcanzan mayor grado de cristalinidad, son menos permeables y menos soluble en agua.

Por su parte, Shi y colaboradores (17) prepararon filamentos compuestos de ácido poliláctico (PLA) enriquecidos con nanotubos de carbono (CNT), que se utilizaron para fabricar las piezas impresas en 3D conductoras mediante la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM). Los resultados obtenidos y cotejados con simulaciones de computadora mostraron que los nanotubos de carbono (CNT) se mantuvieron y apoyaron con éxito en la superficie de los filamentos después de la impresión 3D. Así, las piezas impresas en 3D preparadas mostraron una conductividad eléctrica notablemente mejorada, con potenciales aplicaciones en la fabricación de dispositivos eléctricamente conductores a través de la impresión 3D.

Por otra parte, en el trabajo realizado por Stoof y colaboradores (15) evaluaron la resistencia y tracción de filamentos de PLA con contenido variable de fibras naturales de cáñamo y harakeke (*Phormium tenax*) para ser utilizados en modelado por deposición fundida. Los resultados de las pruebas de tracción respaldaron que el harakeke es una fibra útil en términos de propiedades mecánicas porque superaron el módulo de Young y la resistencia a la tracción de las muestras de PLA simple en un 42,3 % y un 5,4 %, respectivamente.

4.6 Técnicas de caracterización de PLA

Desde el punto de vista de morfología e interacciones del PLA, se utilizan comúnmente las técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía de fuerza

atómica (AFM). En cuanto a identificación y composición de filamentos de PLA se pueden utilizar las siguientes técnicas:

- **Caracterización por espectroscopia infrarroja (FTIR):** un espectro infrarrojo característico del polímero PLA en cloroformo muestra las siguientes bandas de absorción: en el rango $3700\text{-}3450\text{ cm}^{-1}$ corresponde a la tensión del enlace O—H del grupo ácido carboxílico, en el rango $1750\text{-}1735\text{ cm}^{-1}$ una banda de tensión intensa correspondiente al enlace C=O del grupo ácido carboxílico, en el rango $1200\text{-}1000\text{ cm}^{-1}$ correspondiente a la tensión del enlace C—O del grupo ácido carboxílico y finalmente en el rango $950\text{-}700\text{ cm}^{-1}$ que corresponde a la deformación del enlace C—H del monómero (14).
- **Caracterización por resonancia magnética nuclear ^1H y ^{13}C :** los espectros RMN tomados en CDCl_3 muestran las siguientes señales características para PLA (14):
RMN- ^1H (δ , ppm): 7,30 (s) OH; 5,20 (m) CH y 1,55 (d) CH_3 .
RMN- ^{13}C (ppm): 169,3 C=O; 69,0 C—O y 16,7 CH_3 .
- **Caracterización por espectroscopia Raman:** esta técnica permite evaluar el grado de orientación de la cadena en función de la tasa de estiramiento de la fibra a través de la banda de tensión del enlace C=O. Para el PLA una de las bandas características en Raman es en 1044 cm^{-1} correspondiente al estiramiento $\text{C}_\alpha\text{—C}$, es decir al carbono adyacente al grupo ácido y la banda en 1128 cm^{-1} corresponde al balanceo del enlace $\text{C}_\alpha\text{—H}$ (18).
- **Cromatografía de Permeación en Gel (GPC) y viscosimetría:** ambas técnicas permiten determinar la estructura molecular y la masa molar del PLA lo que permite elucidar sus propiedades mecánicas, modo de procesamiento y degradabilidad. El análisis se realiza en solución cloroformo y el tetrahidrofurano (THF) (19).
- **Análisis termogravimétrico y Calorimetría Diferencial de Barrido (TGA y DSC):** ambas técnicas permiten conocer la temperatura de fusión (T_m), temperatura de cristalización (T_c) y la temperatura de transición vítrea (T_g) fundamentales para los procesos de impresión 3D y otros procesos de moldeo, estos valores se relacionan directamente con el grado de pureza óptica y cristalinidad del PLA. El análisis de DSC también arroja el punto de fusión de equilibrio (T_m°) del PLA siendo este de 207°C , sin embargo, el PLA de alto

peso molecular suele ser más baja (170-180°C) debido a la presencia de impurezas enantioméricas y de otro tipo dan lugar a cristales imperfectos (18).

4.7 Parámetros de impresión 3D con PLA

En general, los parámetros de impresión 3D usando la tecnología FDM son los siguientes (20):

- Ensayos de tensión siguiendo norma ASTM D38.
- Ensayos de compresión realizados siguiendo norma ASTM D695.
- Velocidad de extrusión: 30-150 mm/s
- Altura de capa: <0,44mm
- Orientación del filamento: x, 2y
- Temperatura impresión 180°C-230°C
- Temperatura de la cama impresión 20°C - 60°C

Dependiendo del tipo de material y las aplicaciones que se quiera obtener con la impresión 3D con PLA los parámetros pueden variar. La adición de otros componentes, el grado de cristalinidad y el tiempo de impresión pueden mejorar significativamente las propiedades mecánicas y la precisión de las piezas de PLA impresas en 3D por la técnica FDM (20).

Wang y colaboradores (21) evaluaron los efectos de los parámetros de impresión 3D por modelado por deposición fundida en las propiedades mecánicas dinámicas y de tracción de los materiales de ácido poliláctico. Los resultados indican que el ángulo de impresión por debajo de 45° tiende a la fractura entre capas de los materiales impresos con PLA. Por otra parte, el grosor de la capa afecta principalmente a la fuerza de unión entre capas de los materiales impresos, mientras más pequeño es el espesor más fuerte es la unión entre capas. También encontraron que el aumento de la velocidad de llenado disminuye los espacios de aire dentro del material impreso aumentando así la resistencia de la cadena polimérica. Con respecto a la temperatura de la boquilla, esta juega un papel crucial en la fluidez del material extruido pues, si muy baja disminuye la de unión entre capas, si por el contrario es muy alta el PLA extruido es casi líquido e incluso se producirá una degradación térmica parcial (21), siendo en ambos casos desfavorables para la impresión 3D.

5. Discusión de resultados:

A partir de la revisión bibliográfica realizada se encontró una amplia variedad de información sobre las técnicas de impresión 3D, una de estas técnicas de manufactura aditiva (AM) es la impresión por extrusión, siendo el modelado por deposición fundida (FDM) la técnica de mayor uso, no solo por su versatilidad, también porque es de bajo coste, alta velocidad de procesamiento y de manipulación sencilla, donde el diseño se lleva a cabo de manera computarizada a través de programas de diseño del tipo CAD.

Al estudiar las características, condiciones, ventajas y desventajas de la técnica FDM se identificaron los filamentos mayormente usados siendo éstos en su mayoría polímeros y termoplásticos tales como: Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno (ABS), Polivinil alcohol (PVA), policarbonato (PC), algunos poliestireno termoplásticos (TPE) y ácido poliláctico (PLA). A pesar de que todos estos materiales se utilizan en aplicaciones médicas impresas en 3D, para la fabricación de implantes dentales, plantillas ortopédicas, e inclusive, tejidos y cartílago, el ácido poliláctico (PLA) ofrece mayores ventajas por ser biodegradable, biocompatible, de bajo punto de fusión y bajo costo.

Cabe destacar que el PLA es un material poco resistente, sin embargo, la adición de nanotubos de carbono (NTC), fibras naturales y otras modificaciones a la cadena polimérica ha mejorado significativamente las propiedades mecánicas y cristalinidad de este material, lo que lo hace atractivo para el diseño y fabricación de aplicaciones médicas impresas en 3D por la técnica de extrusión FDM. Dentro de estas aplicaciones se puede mencionar: fabricación de material poroso biocompatible para la liberación celular in vitro con osteoblastos fetales (22), ingeniería de tejidos relacionado con implantes de tejido, cartílago y piezas dentales, en todos los casos los implantes fabricados con PLA no mostraron toxicidad celular.

Los resultados de los trabajos revisados establecen una relación directa entre el grado de cristalinidad del PLA, las propiedades mecánicas del material impreso en 3D y el incremento de la temperatura de extrusión, que aumenta el grado de cristalinidad. Finalmente se incrementa la resistencia térmica y al impacto. Esta temperatura debe superar la temperatura de transición vítrea (T_g aproximadamente 60°C) para maximizar la fuerza de unión entre las capas depositadas, lo que da como resultado una impresión bastante fácil, incluso sin una plataforma de cama calefactora (23). Sin embargo, esta no debe ser muy alta debido a una posible degradación térmica parcial, lo que no favorece la impresión 3D (21).

6. Conclusiones:

Se realizó una revisión sistemática de la literatura sobre la influencia de los parámetros de impresión 3D por modelado de deposición fundida (FDM) en las propiedades del ácido poliláctico (PLA), durante el período 2012-2022. Los resultados de la búsqueda indican el aumento en investigaciones, con especial interés en el estudio de las propiedades mecánicas del ácido poliláctico y derivados de éste; con el objetivo de la impresión de materiales más resistentes, biocompatibles y biodegradables.

Las investigaciones muestran una estrecha relación entre el grado de cristalinidad con la resistencia térmica y de impacto de los materiales hechos a base de PLA, alcanzándose el nivel óptimo con temperaturas ligeramente mayor a la temperatura de transición vítrea (T_g) y a la disposición del ángulo de impresión cercano a 45° .

Teniendo en cuenta las propiedades del PLA es uno de los polímeros biodegradables con mayor aplicación en medicina, como transportador de fármacos, y amplio potencial en reemplazo de tejidos como cartílago y piezas dentales.

Bibliografía:

1. Lengua CAG. History of Rapid Prototyping BT - Rapid Prototyping in Cardiac Disease: 3D Printing the Heart. En: Farooqi KM, editor. Cham: Springer International Publishing; 2017. p. 3-7. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-319-53523-4_1
2. Kodama H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photohardening polymer. Rev Sci Instrum. 1981;52:1770-3.
3. Deckard CR. Method and apparatus for producing parts by selective sintering. United States; US Patent 4,863,538, 1989. p. 1-12.
4. Crump SS. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. United States; US Patent 5,121,329, 1992. p. 1-15.
5. Roopavath UK, Kalaskar DM. 1 - Introduction to 3D printing in medicine. En: Kalaskar DMBT-3D P in M, editor. 3D Printing in Medicine [Internet]. Londres: Woodhead Publishing; 2017. p. 1-20. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081007174000016>
6. Karakurt I, Lin L. 3D printing technologies: techniques, materials, and post-processing. Curr Opin Chem Eng [Internet]. 2020;28:134-43. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211339820300265>
7. Tappa K, Jammalamadaka U. Novel Biomaterials Used in Medical 3D Printing Techniques. J Funct Biomater. 2018;9(1):17.
8. Alba Cano V, Serrano Aroca Á. Impresión 3D por modelado por deposición fundida: Manejo, funcionamiento y aplicaciones biomédicas. NEREIS. 2021;13:227-38.
9. Wickramasinghe S, Do T, Tran P. FDM-Based 3D Printing of Polymer and Associated Composite: A Review on Mechanical Properties, Defects and Treatments. Vol. 12, Polymers . 2020.
10. Vargas L, Rodríguez A, Ramírez RA. Optimización experimental de los parámetros de fabricación sobre las propiedades mecánicas de piezas de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) impresas en 3D. Rev Espac. 2020;41(41):9-22.
11. Baker MI, Walsh SP, Schwartz Z, Boyan BD. A review of polyvinyl alcohol and its uses in cartilage and orthopedic applications. J Biomed Mater Res Part B Appl Biomater [Internet]. 1 de julio de 2012;100B(5):1451-7. Disponible en:

<https://doi.org/10.1002/jbm.b.32694>

12. León-Calero M, Reyburn Valés SC, Marcos-Fernández Á, Rodríguez-Hernandez J. 3D Printing of Thermoplastic Elastomers: Role of the Chemical Composition and Printing Parameters in the Production of Parts with Controlled Energy Absorption and Damping Capacity. *Polymers (Basel)*. octubre de 2021;13(20).
13. Bahar A, Belhabib S, Guessasma S, Benmahiddine F, Hamami AE, Belarbi R. Mechanical and Thermal Properties of 3D Printed Polycarbonate. Vol. 15, *Energies* . 2022.
14. Mark JE. *Polymer Data Handbook*. Primera. New York: Oxford University Press, Inc.; 1999. 1102 p.
15. Stoof D, Pickering K, Zhang Y. Fused Deposition Modelling of Natural Fibre/Poly(lactic acid) Composites. Vol. 1, *Journal of Composites Science* . 2017.
16. Soares FC, Yamashita F, Müller CMO, Pires ATN. Effect of cooling and coating on thermoplastic starch/poly(lactic acid) blend sheets. *Polym Test [Internet]*. 2014;33:34-9. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941813002201>
17. Shi S, Chen Y, Jing J, Yang L. Preparation and 3D-printing of highly conductive poly(lactic acid)/carbon nanotube nanocomposites via local enrichment strategy. *RSC Adv [Internet]*. 2019;9(51):29980-6. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1039/C9RA05684J>
18. Inkinen S, Hakkarainen M, Albertsson A-C, Södergård A. From Lactic Acid to Poly(lactic acid) (PLA): Characterization and Analysis of PLA and Its Precursors. *Biomacromolecules [Internet]*. 14 de marzo de 2011;12(3):523-32. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/bm101302t>
19. Takizawa K, Nulwala H, Hu J, Yoshinaga K, Hawker CJ. Molecularly defined (L)-lactic acid oligomers and polymers: Synthesis and characterization. *J Polym Sci Part A Polym Chem [Internet]*. 2008;46(18):5977-90. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/pola.22944>
20. Liu Z, Wang Y, Wu B, Cui C, Guo Y, Yan C. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing poly(lactic acid) parts. *Int J Adv Manuf Technol [Internet]*. 2019;102(9):2877-89. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03332-x>
21. Wang S, Ma Y, Deng Z, Zhang S, Cai J. Effects of fused deposition modeling process parameters on tensile, dynamic mechanical properties of 3D printed

- polylactic acid materials. *Polym Test* [Internet]. 2020;86:106483. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941820301793>
22. Wurm MC, Möst T, Bergauer B, Rietzel D, Neukam FW, Cifuentes SC, et al. In-vitro evaluation of Polylactic acid (PLA) manufactured by fused deposition modeling. *J Biol Eng* [Internet]. 2017;11(1):29. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s13036-017-0073-4>
 23. Benwood C, Anstey A, Andrzejewski J, Misra M, Mohanty AK. Improving the Impact Strength and Heat Resistance of 3D Printed Models: Structure, Property, and Processing Correlationships during Fused Deposition Modeling (FDM) of Poly(Lactic Acid). *ACS Omega* [Internet]. 30 de abril de 2018;3(4):4400-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00129>