

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/335973217>

Caracterización mecánica a tensión de impresiones 3D de PLA y ABS modeladas por deposición fundida

Chapter · August 2019

CITATIONS

0

READS

621

6 authors, including:



Daniel Agudelo

San Buenaventura University

11 PUBLICATIONS 32 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Camilo Hernandez

Escuela Colombiana de Ingeniería

27 PUBLICATIONS 95 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Bio-inspired optimization algorithms implementation in system identification of FAR-23 category aircraft [View project](#)



Validación de rendimiento de aeronaves no tripuladas de corto alcance [View project](#)



**Editorial
IAI**

Prof. Edgar Serna M. (Ed.)

DESARROLLO E INNOVACIÓN EN INGENIERÍA

Cuarta Edición

**Medellín - Antioquia
2019**

Desarrollo e innovación en ingeniería [recurso electrónico] / Edgar Serna M., ed. -- 4a. ed. --
Medellín: Instituto Antioqueño de Investigación, 2019.
p. 568 -- (Ingeniería y ciencia)

Archivo en formato pdf (15 Mb). -- Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-958-52333-0-0

1. Ingeniería - Innovaciones tecnológicas - Investigaciones
2. Investigación industrial I. Serna M., Edgar, ed. II. Serie

CDD: 620 ed. 23

CO-BoBN- a1047651

Investigación Científica ISBN: 978-958-52333-0-0
DOI: <http://doi.org/10.5281/zenodo.3387679>

Desarrollo e Innovación en Ingeniería
Serie: Ingeniería y Ciencia
© Editorial Instituto Antioqueño de Investigación

Cuarta Edición: agosto 2019
ISBN: 978-958-52333-0-0
Publicación electrónica gratuita

Copyright © 2019 Instituto Antioqueño de Investigación IAI™. Salvo que se indique lo contrario, el contenido y distribución de esta publicación está autorizado bajo [Creative Commons Licence CC BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Edición general: Instituto Antioqueño de Investigación IAI
Diseño: IAI, Medellín, Antioquia.
Editorial Instituto Antioqueño de Investigación es Marca Registrada del *Instituto Antioqueño de Investigación*. El resto de marcas registradas pertenecen a sus respectivos propietarios.

La información, hallazgos, puntos de vista y opiniones contenidos en esta publicación son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista del Instituto Antioqueño de Investigación IAI, y no se garantiza la exactitud de la información proporcionada en este documento.

Diseño, edición y publicación: Editorial Instituto Antioqueño de Investigación
Instituto Antioqueño de Investigación IAI
<http://fundacioniai.org>
contacto(AT)fundacioniai.org

Caracterización mecánica a tensión de impresiones 3D de PLA y ABS modeladas por deposición fundida

Daniel Agudelo¹

David Díaz²

Andrés Ibarra³

Carlos Cruel⁴

Miguel Montoya⁵

Camilo Hernández⁶

¹⁻⁴ Universidad de San Buenaventura

^{5,6} Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito
Colombia

El modelo productivo actual y el desarrollo de nuevos productos de forma rápida y óptima han impulsado cada vez más el uso de técnicas de prototipado rápido. Dentro de las técnicas de prototipado rápido, la impresión 3D mediante el modelamiento por deposición de hilo fundido se ha posicionado debido a su versatilidad, facilidad y economía [1]. Por esta razón, muchos prototipos e inclusive piezas funcionales cada vez son más usadas en diferentes aplicaciones de la ingeniería. Sin embargo, las propiedades mecánicas de los modelos impresos en 3D mediante esta técnica en muchas ocasiones no son conocidas. En este trabajo se caracterizaron las propiedades mecánicas de dos de los materiales más comúnmente usados para realizar modelos impresos 3D por deposición de hilo fundido: el ácido poliláctico (PLA) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). La caracterización mecánica se realizó mediante pruebas de tensión en dos direcciones; dirección axial a la dirección de impresión y dirección transversal a la dirección de impresión. Se determinaron para ambos materiales los módulos de elasticidad en ambas direcciones, los esfuerzos de fluencia en ambas direcciones, las resistencias a tensión y las deformaciones de fractura en ambas direcciones. Los resultados de las pruebas a tensión permitieron concluir que tanto el PLA como el ABS presentan un comportamiento mecánico isotrópico en su parte elástica, es decir, no se presentaron diferencias significativas en los módulos de elasticidad en ambas direcciones. En cambio, las propiedades plásticas determinadas, esfuerzo de fluencia, resistencia a la tensión y deformación de fractura, mostraron un comportamiento ortotrópico. En otras palabras, las propiedades mecánicas en dirección axial a la impresión fueron más altas que las mostradas en dirección transversal. Esta diferencia en las propiedades se explicó debido a que la falla en ambas direcciones mostró diferentes modos. Mientras que en la dirección axial a la impresión se observó una falla dúctil del polímero termoplástico, en la dirección transversal a la dirección de impresión se observó delaminación y separación de los hilos de extrusión remanentes de la impresión. Por último, se compararon las propiedades mecánicas de ambos materiales, mostrando que el PLA tiene mejores propiedades mecánicas que el ABS.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el constante crecimiento comercial y tecnológico ha creado la necesidad de diseñar y manufacturar piezas y componentes mecánicos con mucha rapidez y a bajos costos. Esto ha hecho que nuevas técnicas de producción rápida como la manufactura aditiva surjan como una alternativa para disminuir tiempos y costos del proceso de desarrollo de nuevos productos [2].

Dentro de las técnicas de manufactura aditiva se destaca la impresión 3D por su capacidad de fabricar estructuras con geometrías complejas a partir de modelos computacionales tridimensionales [3]. Este proceso consiste en depositar controladamente sobre una superficie capas sucesivas de material para formar una estructura previamente diseñada. Dentro de este tipo de métodos, se encuentra el modelado por deposición fundida o FDM por sus siglas en inglés, la cual utiliza un material termoplástico para ser extruido en pequeños hilos que forman las capas sucesivas que finalmente dan forma a partes y componentes [4]. Dentro de las ventajas de este proceso se encuentra la baja necesidad de realizar procesos posteriores a la manufactura, tiempo corto de máquina y la ausencia de tiempos de espera por curado de resina. Dentro de las desventajas del proceso se puede observar la baja resolución en el eje vertical en comparación con otros procesos, aunque nuevas tecnologías y equipos de impresión modernos han disminuido estas desventajas [5], [6].

Estas ventajas considerables sobre otros tipos de manufactura han permitido que esta técnica se extienda rápidamente a diferentes campos de aplicación. Por ejemplo, las aplicaciones biomédicas han impulsado el uso de la impresión 3D de forma exponencial debido a su capacidad de producir elementos de alta complejidad que se ajustan al cuerpo humano y la capacidad de producir piezas personalizadas a las formas particulares de cada individuo sin necesidad de tener que producir grandes cantidades. Partes y estructuras como implantes, órtesis y prótesis son algunos ejemplos de las aplicaciones en este medio [7] – [9]. Otro campo de aplicación que ha impulsado el uso de la tecnología de impresión 3D es el aeroespacial. Dado los requerimientos de geometría compleja, disminución de peso

¹ dagudelo@usbbog.edu.co

² drdiaz@academia.usbbog.edu.co

³ aibarra@academia.usbbog.edu.co

⁴ ccruel@academia.usbbog.edu.co

⁵ miguel.montoyav@escuelaing.edu.co

⁶ camilo.hernandez@escuelaing.edu.co

y partes especializadas de baja producción en masa de los componentes usados en este campo facilitan su producción mediante técnicas de manufactura aditiva. Componentes como alabes, partes de aeronaves no tripuladas, perfiles aerodinámicos, etc., hacen parte de los componentes de la industria aeronáutica que son producidos mediante impresión 3D [10], [11]. Otros campos que también se podrían mencionar que hacen uso de las ventajas de esta tecnología son la construcción, arquitectura, partes de consumo e inclusive la educación [12], [13].

Este gran número de posibles aplicaciones de la manufactura aditiva en diferentes ramas de la ingeniería ha impulsado el uso de un gran número de tipos materiales que pueden ser procesados mediante esta técnica, pasando por materiales compuestos de matriz polimérica [14], [15], metales y aleaciones de gran resistencia [16], [17] y llegando hasta concreto [18], [19] y cerámicos de ingeniería [20] – [22]. Sin embargo, el mayor porcentaje de materiales usados para la manufactura aditiva y en especial para la impresión 3D por deposición de hilo fundido son los polímeros termoplásticos [23]. Así mismo dentro de los polímeros termoplásticos, se destaca el uso de polímeros con un relativo bajo punto de fusión como el ácido poliláctico (PLA), el polietileno (PE) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) [24], [25].

Como se puede observar en el gran número de aplicaciones y materiales que se pueden procesar mediante la manufactura aditiva y en particular usando la técnica de impresión 3D por deposición de hilo fundido, es de gran importancia en la mayoría de casos conocer la respuesta de las estructuras y componentes cuando son sometidos a diferentes tipos de cargas. Sin embargo, el comportamiento mecánico de estas estructuras aún no se ha explorado completamente. Si bien se han realizado investigaciones para determinar las propiedades mecánicas de componentes impresos en 3D [26] – [28], debido al gran número de materiales disponibles y a las infinitas configuraciones posibles de imprimir, este es aún un campo abierto de investigación.

Por lo tanto, en este trabajo se caracterizaron las propiedades mecánicas ortotrópicas de dos materiales termoplásticos impresos en 3D mediante la técnica de deposición fundida de hilo. Los materiales caracterizados son el ácido poliláctico (PLA) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), dos de los materiales más usados en la manufactura aditiva de polímeros debido a sus propiedades físicas y mecánicas que facilitan el uso en un sinnúmero de aplicaciones. La caracterización mecánica se realizó asumiendo un comportamiento ortotrópico de las estructuras impresas en 3D. Es decir, se asumió que la respuesta mecánica es dependiente de la dirección de aplicación de la carga relativa a la dirección de impresión del material. En consecuencia, se realizó un estudio experimental sometiendo probetas impresas con diferentes configuraciones en ambos materiales a tensión bajo el estándar ASTM D3039. Se manufacturaron y ensayaron probetas con dirección de impresión axial a la dirección de carga y probetas con dirección de impresión transversal a la dirección de carga para determinar las propiedades elásticas y plásticas en ambas direcciones. Mediante un análisis estadístico se determinaron los módulos de elasticidad, los esfuerzos de fluencia, las resistencias a tensión y las deformaciones de fractura en ambas direcciones para el PLA y el ABS.

2. MÉTODO

Se realizó la caracterización mecánica cuasiestática para determinar el comportamiento mecánico a través de la estimación de las propiedades elásticas y plásticas a tensión de estructuras impresas en 3D de dos materiales termoplásticos, el PLA y el ABS. Se asumió un comportamiento ortotrópico de las estructuras manufacturadas bajo la técnica de modelamiento por deposición fundida de hilo, en consecuencia, se implementó un procedimiento experimental, que se describe a continuación, para determinar las propiedades mecánicas en dos direcciones de carga.

2.1 Características de los especímenes

Con el fin de determinar el comportamiento mecánico de estructuras impresas en polímeros termoplásticos de PLA y ABS, se diseñó un procedimiento experimental con ensayos a tensión que permite encontrar las propiedades mecánicas ortotrópicas del material impreso en 3D. Debido a que el proceso de manufactura por deposición fundida se realiza aplicando delgados filamentos de material fundido y extruido en direcciones específicas capa por capa, la estructura final posee propiedades mecánicas direccionadas de acuerdo a la dirección de deposición del material. Por este motivo, en este trabajo se determinaron las propiedades elásticas y plásticas en dos direcciones como se muestra en la Figura 1: 1 dirección axial de aplicación del material y 2 dirección transversal a la aplicación del material.

Se realizaron ensayos a tensión de acuerdo al estándar ASTM D3039 [30] para determinar las propiedades mecánicas de ambos materiales impresos en 3D. Este estándar fue seleccionado debido a que se desean determinar las propiedades ortotrópicas del material impreso debido a que las direcciones de impresión afectan la direccionalidad de las propiedades mecánicas finales. Especímenes rectangulares rectos con sección transversal constante y dimensiones de 250 mm x 20 mm y espesor de 2,0 mm fueron manufacturados de acuerdo al estándar seleccionado.

Dos tipos diferentes de probetas para cada tipo de material fueron manufacturadas en capas depositadas a diferentes ángulos, emulando la configuración de un laminado de materiales compuestos de matriz polimérica con propiedades unidireccionales. Probetas simétricas y balanceadas se probaron a tensión para cada una de las configuraciones. La

primera configuración probada consiste en una impresión con configuración $[0^\circ/0^\circ]$ para determinar las propiedades mecánicas en dirección axial. Esta configuración significa que se imprimieron dos capas de material polimérico con dirección de deposición del hilo fundido en dirección longitudinal a la dirección a la dirección de carga. También se probaron probetas con configuración $[90^\circ/90^\circ]$ para determinar las propiedades en dirección transversal del material. Estas probetas se manufacturaron con dirección de impresión transversal a la dirección de carga. En la Figura 2 se muestran los ejemplos de las probetas para ambas configuraciones, donde las líneas muestran la dirección de deposición del hilo fundido.

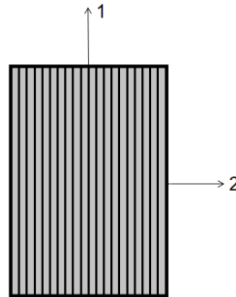


Figura 1. Definición de las direcciones principales de una lámina ortotrópica impresa en 3D [29]: 1 Dirección axial a la dirección de impresión. 2 Dirección transversal a la dirección de impresión.

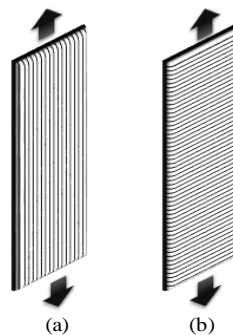


Figura 2. Dirección de impresión de probetas impresas en 3D: (a) Dirección axial $[0^\circ/0^\circ]$. (b) Dirección transversal $[90^\circ/90^\circ]$

Una máquina universal de ensayos Shimadzu AGS-X con celda de carga de 10 kN y aplicando una velocidad de cabezal constante de 2 mm/min fue usada para probar 10 probetas de cada una de las configuraciones establecidas. Mediante un análisis estadístico se determinaron las propiedades mecánicas promedio de los materiales PLA y ABS. Se determinaron para ambos materiales los módulos de elasticidad en ambas direcciones (E_1 , E_2), los esfuerzos de fluencia en ambas direcciones (S_{y1} , S_{y2}), las resistencias a tensión (X_1 , X_2) y las deformaciones de fractura en ambas direcciones (ϵ_1 , ϵ_2).

Durante una etapa de pre-experimentación realizada se encontró que las probetas impresas presentan dos posibles inconformidades durante el ensayo de tensión. Si se aprieta mucho las mordazas de sujeción, estas inducen falla en la región de agarre generando rechazo de la prueba; o, por el contrario, si no se aprieta suficientemente las mordazas para evitar falla en la región de agarre existe deslizamiento entre la mordaza y la probeta, obteniendo resultados incorrectos en la curva esfuerzo-deformación. Por este motivo se implementaron *tabs* en la región de agarre para evitar el deslizamiento y garantizar una transmisión de carga más uniforme y evitar rupturas indeseadas de los especímenes de prueba. Se manufacturaron *tabs* de madera de balsa de acuerdo a la geometría recomendada en estándar ASTM y se fijaron a las probetas usando un adhesivo estructural. La implementación de estos *tabs* permitió un mejor agarre entre las mordazas y los especímenes, eliminando la falla por mordazas y el deslizamiento entre las probetas y las muelas de agarre.

2.2 Fabricación de los especímenes

Probetas de PLA y ABS fueron manufacturadas de acuerdo a las configuraciones descritas anteriormente. Una impresora 3D Flash Forge Creator Pro de deposición de hilo fundido se usó para manufacturar las probetas usando PLA [31] y ABS [32] del fabricante Prusament. El proceso de fabricación de las probetas contempló varias etapas: diseño en computador, donde se digitalizó la geometría para cumplir con los estándares de la norma seleccionada; generación de códigos de impresión, que incluyó la conversión del modelo digital al lenguaje interpretado por la máquina de impresión 3D; configuración de la impresión, etapa en la cual se definieron los parámetros como la temperatura de la cama de impresión y del extrusor, el tipo de material y la velocidad de deposición de material; manufactura, proceso mediante el cual el material termoplástico fue fundido en el extrusor y depositado en una orientación específica; remoción y post procesamiento, proceso en el cual se verificó el conformado de la parte, así como sus dimensiones

exteriores con el fin de comprobar si resultó apta para ser sometida a pruebas. Para tal fin, se aplicó un protocolo de inspección visual, con el fin de determinar si cumple o no con los parámetros establecidos de control de calidad.

A partir de las pruebas realizadas previamente y teniendo en cuenta la conformación y acabado de las probetas obtenidas, se determinaron las temperaturas en el extrusor para la impresión del PLA de 220°C y 250°C para el ABS. Temperaturas que se encuentran dentro de los rangos sugeridos por el fabricante, permitiendo la fundición completa del material y presentando una adecuada adherencia entre cada una de las capas de material y entre el material y la plataforma de impresión. Igualmente, se determinó la temperatura más adecuada de la plataforma de impresión para garantizar la adherencia de los materiales a la cama. Para el PLA se determinó una temperatura de 70°C de temperatura de la plataforma mientras que para el ABS se determinó una temperatura de 110°C. Además, para el ABS, debido a sus propiedades durante la impresión, fue necesario usar cama magnética flexible desmontable con el fin de facilitar el posterior retiro de las piezas debido a la fuerte adherencia de la probeta a la cama de impresión durante el proceso de manufactura. También se configuró para la impresión de ambos materiales la altura de capa. Esta se fijó en 0,27 mm para asegurar la adhesión adecuada entre capas sucesivas.

2.3 Determinación de las propiedades mecánicas

- **Módulo de elasticidad.** El módulo de elasticidad (E) o módulo de Young, es uno de las propiedades mecánicas más importantes para el diseño de estructuras pues este determina la rigidez del material cuando es sometido a cargas. Este parámetro se determina mediante el cálculo de la pendiente de la recta que une dos puntos seleccionados en la región elástica lineal del material como se muestra en la Figura 3.

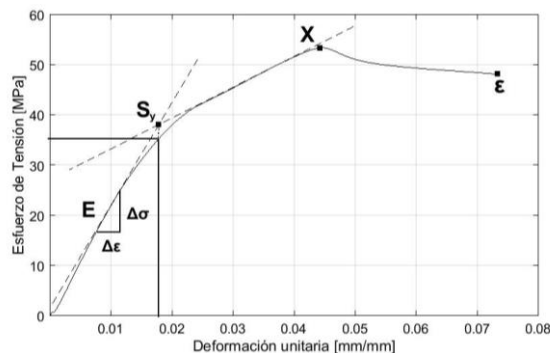


Figura 3. Determinación de las propiedades mecánicas en la curva esfuerzo deformación

- **Esfuerzo de fluencia.** El esfuerzo de fluencia (S_y) o punto de transición es un parámetro importante de los materiales termoplásticos pues indica el esfuerzo en el cual el material pasa de una fase elástica a una plástica. El esfuerzo de fluencia se calculó de forma gráfica siguiendo el procedimiento mostrado en la Figura 3. Se dibuja una línea tangente a la recta que describe la zona elástica del material, así mismo, se traza una línea tangente a la zona plástica del material; el punto de intersección de ambas líneas tangentes marca el punto de transición de la zona elástica a la zona plástica.
- **Resistencia a la tensión.** La resistencia a la tensión (X) o esfuerzo máximo, describe la máxima capacidad de soportar carga del material. Este se identifica en la curva esfuerzo-deformación, como se muestra en la Figura 3, en el punto de esfuerzo máximo de la curva.
- **Deformación de fractura.** La deformación de fractura (ϵ) o deformación última describe el punto de deformación máxima de capacidad de carga del material. Este punto se identifica en la curva esfuerzo-deformación, como se muestra en la Figura 3, como el punto máximo de deformación donde el material se rompe y no tiene capacidad estructural.

3. RESULTADOS

Las propiedades mecánicas ortotrópicas a tensión del PLA y ABS impresos 3D mediante la técnica modelado por deposición fundida, se determinaron mediante ensayos a tensión en diferentes configuraciones. A continuación, se muestran los resultados experimentales de la caracterización mecánica de ambos materiales.

3.1 Propiedades mecánicas del PLA impreso en 3D

A continuación, se presentan los resultados registrados después de someter a pruebas de tensión cada uno de los especímenes de las dos diferentes orientaciones de impresión en material PLA. Las Figuras 4 y 5 muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para el PLA impreso en 3D sometido a cargas de tensión en la dirección axial, configuración $[0^\circ/0^\circ]$, y transversal, configuración $[90^\circ/90^\circ]$, respectivamente.

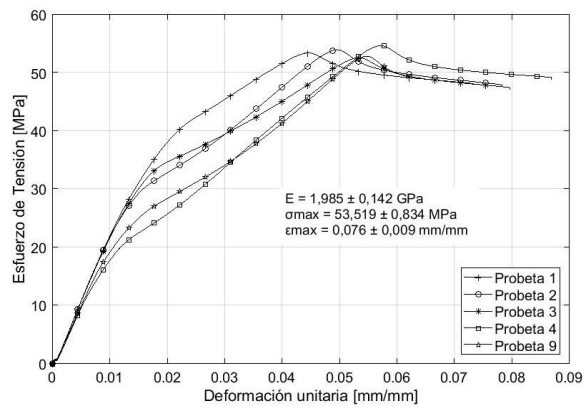


Figura 4. Curvas esfuerzo – deformación en dirección axial. PLA [0°/0°]

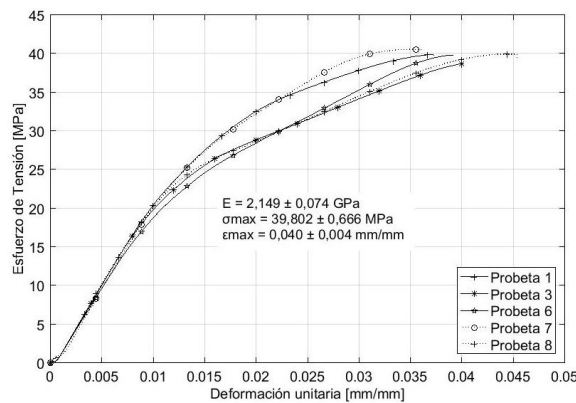


Figura 5. Curvas esfuerzo – deformación en dirección transversal. PLA [90°/90°]

En las gráficas se puede observar una dispersión significativa en las curvas de esfuerzo de tensión. Esta variación es propia de este tipo de manufactura aditiva que depende de muchos factores que las máquinas de impresión pueden variar durante el proceso de impresión, como velocidad de impresión, temperatura de extrusión, entre otras, lo que conlleva a que la consistencia de la estructura pueda presentar algunas variaciones en sus propiedades mecánicas. Para las probetas en dirección axial [0°/0°] se puede observar un comportamiento mecánico inicialmente elástico lineal, seguido de una transición a una región plástica de endurecimiento hasta un esfuerzo máximo a tensión. Por último, se observa un ablandamiento del material hasta su ruptura final. Comportamiento típico de un material termoplástico sometido a cargas de tensión axial.

Similarmente, las probetas en dirección transversal a la dirección de impresión [90°/90°] también muestran un comportamiento elástico lineal inicial y un endurecimiento plástico posterior. Sin embargo, y en contraste con los ensayos en dirección axial, estas curvas esfuerzo-deformación presentan una ruptura súbita aún sin alcanzar el esfuerzo máximo que puede alcanzar el PLA termoplástico. La estructura impresa no presenta un ablandamiento final mostrando una separación de las capas. Esta diferencia en los modos de falla en ambas direcciones se da debido a que en la dirección transversal se presenta una desadhesión de los hilos de impresión remanentes del proceso 3D mientras que en la dirección axial se observa el comportamiento y capacidad de carga de los materiales del PLA.

En la Tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas ortotrópicas de láminas impresas en 3D en PLA mediante la técnica de modelamiento por deposición fundida. Se presentan las propiedades en dirección 1, axial a la dirección de impresión, y 2, transversal a la dirección de impresión. Se muestra el promedio de los módulos de elasticidad en ambas direcciones (E_1 , E_2), los esfuerzos de fluencia en ambas direcciones (S_{y1} , S_{y2}), las resistencias a tensión (X_1 , X_2) y las deformaciones de fractura en ambas direcciones (ϵ_1 , ϵ_2). Adicionalmente, se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación de las muestras analizadas.

Tabla 1. Propiedades mecánicas ortotrópicas de PLA impreso en 3D por deposición fundida

Propiedad	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	S_{y1} [MPa]	S_{y2} [MPa]	X_1 [MPa]	X_2 [MPa]	ϵ_1 [mm/mm]	ϵ_2 [mm/mm]
Promedio	1,98	2,15	26,19	22,90	53,51	39,80	0,076	0,040
Desv. Est.	0,14	0,07	7,78	2,67	0,83	0,67	0,009	0,004
Coef. de var. (%)	7,13	3,43	29,71	11,66	1,56	1,67	12,182	9,064

Un análisis del resultado de las propiedades mecánicas muestra que el comportamiento mecánico de las láminas de PLA impresas en 3D es ortotrópico, es decir, que su comportamiento axial es diferente a su comportamiento transversal. Si bien el comportamiento elástico no es significativamente diferente en ambas direcciones, su

comportamiento plástico si difiere dependiendo de la dirección de medición. Esta diferencia alcanza una reducción de hasta el 74% en la resistencia a la tensión transversal en comparación la resistencia axial. Diferencia que se puede explicar debido al tipo de falla que presenta cada una de las configuraciones. Mientras que en las probetas falladas en dirección axial $[0^\circ/0^\circ]$ la falla predominante es ruptura de fibras poliméricas a tensión, en las probetas falladas en dirección transversal $[90^\circ/90^\circ]$ se observa declamación entre las capas de material depositado.

Cabe resaltar que para el cálculo de las propiedades se descartaron algunas probetas con base al intervalo de confianza. Este intervalo fue calculado con el promedio simple, la desviación estándar de la resistencia a tensión y aplicando un grado de confianza del 98%. En consecuencia, probetas que presentaron propiedades mecánicas fuera de este intervalo de confianza fueron descartadas para el cálculo del promedio. No obstante, en ninguno de los dos casos se descartaron tantas probetas como para no cumplir con el mínimo de probetas exigido por el estándar; en ambos casos se mantuvo un mínimo de cinco probetas analizadas estadísticamente para el cálculo de las propiedades mecánicas. De la configuración $[0^\circ/0^\circ]$ se sometieron a pruebas de tensión 10 especímenes. De estos, tres fueron descartados ya que presentaron deslizamiento en las mordazas, aún bajo la implementación de *tabs* de madera en la sujeción; dos se descartaron debido a que sus propiedades mecánicas se encuentran fuera del intervalo de confianza. La norma ASTM implementada requiere de al menos 5 pruebas exitosas para considerar los resultados obtenidos como válidos, cumpliendo satisfactoriamente con este requisito. Para la configuración $[90^\circ/90^\circ]$, también se sometieron a prueba 10 especímenes. Todos los ensayos fueron catalogados como válidos debido a que no presentaron fallas en las mordazas y las probetas fallaron a lo largo de la zona comprendida entre ambos soportes. Del lote sometido a pruebas, se descartaron 5 probetas debido a que no se encontraban dentro del intervalo de confianza identificado en los ensayos.

3.2 Propiedades mecánicas del ABS impreso en 3D

A continuación, se presentan los resultados registrados después de someter a pruebas de tensión cada uno de los especímenes de las dos diferentes orientaciones de impresión en material ABS. Las Figuras 6 y 7 muestran las curvas esfuerzo-deformación obtenidas para el ABS impreso en 3D sometido a cargas de tensión en la dirección axial $[0^\circ/0^\circ]$ y transversal $[90^\circ/90^\circ]$ respectivamente. A diferencia del PLA impreso, en este caso se observan curvas esfuerzo deformación agrupadas y siguiendo la misma tendencia. Esto quiere decir que el ABS impreso presenta menos variación en sus propiedades mecánicas atribuidas a que su manufactura es un poco más estable que la del PLA. Para las probetas en dirección axial $[0^\circ/0^\circ]$ se puede observar un comportamiento mecánico inicialmente elástico lineal, seguido de una transición a una región plástica de endurecimiento hasta un esfuerzo máximo a tensión. Por último, se observa un ablandamiento del material hasta su ruptura final. Sin embargo, la deformación final de fractura si mostró una variación significativa. Similarmente, las probetas en dirección transversal $[90^\circ/90^\circ]$ también muestran un comportamiento elástico lineal inicial y un endurecimiento plástico posterior muy corto sin ablandamiento final y una ruptura súbita después de alcanzar su resistencia máxima a la tensión. Esta diferencia en los modos de falla en ambas direcciones se da debido a que en la dirección trasversal se presenta una desadhesión de los hilos de impresión remanentes del proceso 3D.

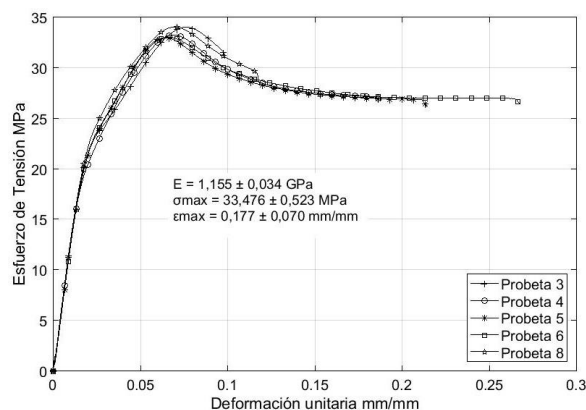


Figura 6. Curvas esfuerzo – deformación en dirección axial. ABS $[0^\circ/0^\circ]$

En la Tabla 2 se muestran las propiedades mecánicas ortotrópicas de láminas impresas en 3D en ABS mediante la técnica de modelamiento por deposición fundida. Se presentan las propiedades en dirección 1, axial a la dirección de impresión, y 2, transversal a la dirección de impresión. Se muestra el promedio de los módulos de elasticidad en ambas direcciones (E_1 , E_2), los esfuerzos de fluencia en ambas direcciones (S_{y1} , S_{y2}), las resistencias a tensión (X_1 , X_2) y las deformaciones de fractura en ambas direcciones (ϵ_1 , ϵ_2). Adicionalmente, se muestra la desviación estándar y el coeficiente de variación de las muestras analizadas.

Un análisis del resultado de las propiedades mecánicas muestra que el comportamiento mecánico de las láminas de ABS impresas en 3D es ortotrópico, es decir, que su comportamiento axial es diferente a su comportamiento

transversal. Si bien el comportamiento elástico no es significativamente diferente en ambas direcciones, su comportamiento plástico si difiere dependiendo de la dirección de medición. Esta diferencia alcanza una reducción de hasta el 42% en la resistencia a la tensión transversal en comparación la resistencia axial. Diferencia que se puede explicar debido al tipo de falla que presenta cada una de las configuraciones. Mientras que en las probetas falladas en dirección axial [0°/0°] la falla predominante es ruptura de fibras poliméricas a tensión, en las probetas falladas en dirección transversal [90°/90°] se observa declamación entre las capas de material depositado.

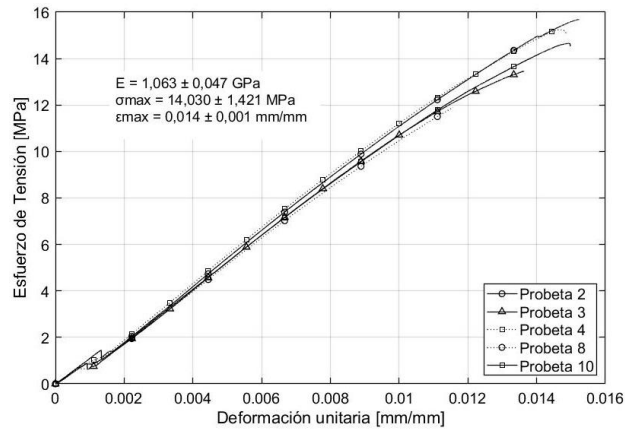


Figura 7. Curvas esfuerzo – deformación en dirección axial. ABS [90°/90°]

Tabla 2. Propiedades mecánicas ortotrópicas de ABS impreso en 3D por deposición fundida

Propiedad	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	S_{y1} [MPa]	S_{y2} [MPa]	X_1 [MPa]	X_2 [MPa]	ϵ_1 [mm/mm]	ϵ_2 [mm/mm]
Promedio	1,16	1,06	23,20	13,38	33,48	14,03	0,177	0,014
Desv. Est.	0,03	0,05	0,69	1,33	0,52	1,42	0,070	0,001
Coef. de var. (%)	2,98	4,41	2,98	9,97	1,56	10,79	39,309	10,815

Para la configuración ABS [0°/0°] se fabricaron y sometieron a pruebas de tensión 10 probetas. Del total de especímenes ensayados, tres presentaron falla por deslizamiento en la mordaza y dos más fueron descartadas debido a que se encontraban por fuera del intervalo de confianza determinado. Por otra parte, para la configuración [90°/90°], se sometieron a pruebas de tensión un total de 10 probetas de la configuración. No existió falla alguna durante el ensayo mecánico para la totalidad de las muestras. Aplicando el intervalo de confianza, se descartaron 5 probetas debido a que los valores de esfuerzo máximo se encuentran por fuera del rango establecido.

4. DISCUSIÓN

A partir de los resultados experimentales de las pruebas a tensión de probetas impresas en 3D mediante la técnica de deposición por hilo fundido y usando dos direcciones de impresiones diferentes, axiales y transversales, se encontraron los siguientes aspectos.

4.1 Comparación de métodos para calcular el módulo de elasticidad

En la literatura, y especialmente en los estándares se encuentran varios métodos para calcular el módulo de elasticidad de diferentes materiales sin existir un método preferido para materiales impresos 3D mediante la técnica de deposición de hilo fundido. Por esta razón, en esta sección se realiza una comparación de los métodos propuestos en la normativa ASTM. Como línea base se toma el método sugerido por el estándar ASTM D 3039 [30] usado en este trabajo y se compara con los dos métodos propuestos por el estándar ASTM E111 [33]. En este estándar se sugiere aplicar un método de regresión por mínimos cuadrados (Método A) a la nube de puntos adquirida sobre la región elástica y un segundo método aritmético para calcular la pendiente de la recta tomado dos puntos sobre la región elástica del material (Método B).

En la Tabla 3 se muestran los resultados de los módulos de elasticidad axial (E_1) y transversal (E_2) para el PLA y el ABS calculados usando los tres métodos sugeridos por las normas ASTM. Así mismo, se muestra el porcentaje de error para cada método tomando como línea base los resultados obtenidos al aplicar el método del estándar ASTM D3039. Al comparar los resultados obtenidos por los tres métodos se observa que el error del módulo de elasticidad del Método B del estándar ASTM E111 en comparación con el estándar ASTM D3039 es cero. Es decir, los resultados de ambos métodos son iguales sin encontrar diferencias entre los mismos. Sin embargo, al aplicar el método A del estándar ASTM E111 se encontraron errores significativos que pueden llegar hasta 14,7%. Este porcentaje de error se evidencia especialmente en el cálculo de los módulos de elasticidad del ABS debido a que la zona de transición elástica-plástica de este material no se marca claramente, en consecuencia, la cantidad de puntos seleccionados para

realizar la regresión lineal puede afectar los resultados de forma significativa. Mientras que para los dos otros métodos la selección de puntos que claramente se identifiquen en la zona elástica del material facilita el proceso de cálculo.

Tabla 3. Comparación de métodos de cálculo para el módulo de elasticidad

	ASTM D3039 [GPa]	ASTM E111 Método A [GPa]	Error (%)	ASTM E111 Método B [GPa]	Error (%)
PLA E_1	1,98	1,98	0,0	1,99	0,5
PLA E_2	2,15	2,28	6,0	2,15	0,0
ABS E_1	1,16	1,33	14,7	1,16	0,0
ABS E_2	1,06	1,18	11,3	1,06	0,0

4.2 Comparación de materiales PLA y ABS

Se realizó una comparación de las propiedades mecánicas de ambos materiales probados. En la Figura 8 se muestra una comparación entre las propiedades elásticas de los dos materiales ensayados en este trabajo, PLA y ABS impresos en 3D mediante deposición de hilo fundido. En la figura se puede observar la comparación de los módulos elásticos axial (E_1) y transversal (E_2) para ambos materiales. Se puede observar que ambos materiales en términos de sus propiedades elásticas son isotrópicos, es decir no existe diferencia significativa entre el módulo de elasticidad en dirección 1 axial a la dirección de impresión y el módulo de elasticidad en dirección 2 transversal a la dirección de impresión. En cuanto a la comparación entre ambos materiales, se puede observar que el PLA es un material más rígido que el ABS. Este presenta un módulo de elasticidad 1,7 veces mayor en la dirección axial y 2,0 veces mayor en la dirección transversal.

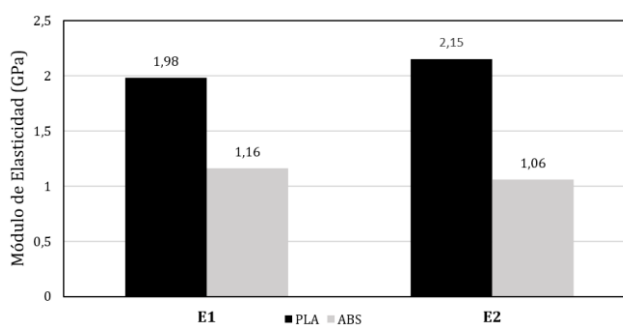


Figura 8. Comparación de módulos de elasticidad de materiales impresos en 3D. PLA y ABS

Asimismo, se compararon las propiedades plásticas de ambos materiales obteniendo resultados diferentes contrastados con sus propiedades elásticas. La Figura 9 muestra la comparación de las resistencias a la tensión de ambos materiales en las dos direcciones de prueba, axial y transversal. Al comparar la resistencia a la tensión axial (X_1) con respecto a la resistencia a la tensión transversal (X_2) se puede observar que ambos materiales presentan un comportamiento mecánico ortotrópico, con valores de esfuerzo mayores en la dirección longitudinal a la dirección de impresión. El PLA presenta una resistencia 34% mayor en dirección longitudinal, mientras que el ABS presenta un aumento del 138% de la resistencia a la tensión en dirección longitudinal. La disminución considerable de la resistencia a la tensión en dirección transversal se debe a la baja adhesión que presentan los hilos fundidos uno al lado del otro dominando el modo de falla la delaminación de los hilos extruidos. Por el contrario, en la dirección longitudinal a la dirección de impresión el modo de falla se observa un comportamiento dúctil característico de un polímero termoplástico y dominando esta propiedad la resistencia mecánica del polímero extruido.

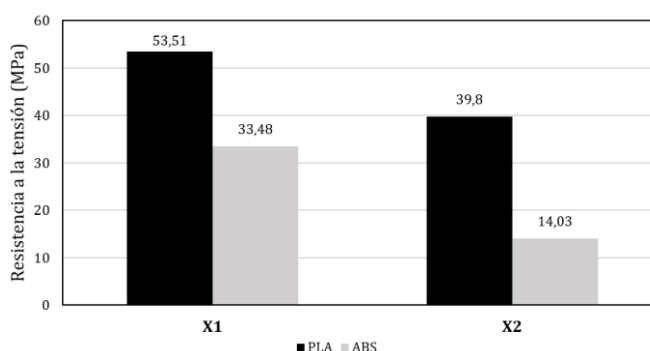


Figura 9. Comparación de resistencias a la tensión de materiales impresos en 3D. PLA y ABS

Por otra parte, también se puede observar que el PLA es un material más resistente a la tensión que el ABS. En dirección longitudinal el PLA es 37% más resistente que ABS y en dirección transversal el PLA es 64% más resistente

a tensión que el ABS. Resultados esperados y consistentes con las propiedades mecánicas de ambos polímeros en su estado extruido. Igualmente, en la Figura 10 se puede observar la comparación del esfuerzo de fluencia del PLA y el ABS impresos en 3D en las dos direcciones probadas, axial y transversal. Para ambos materiales, el esfuerzo de fluencia presenta un valor más elevado en la dirección axial (S_{y1}) con respecto a su dirección transversal (S_{y2}). Sin embargo, esta diferencia es solo del 12,5% para el caso del PLA mientras que para el ABS esta diferencia es del 42,3% mostrando un comportamiento ortotrópico más marcado. Al igual que con las otras dos propiedades mecánicas analizadas anteriormente, módulo de elasticidad y resistencia a la tensión, el esfuerzo de fluencia de ambos materiales es diferente; siendo el esfuerzo de fluencia del PLA mayor que el del ABS. En dirección longitudinal el PLA posee un esfuerzo de fluencia 11% mayor que el ABS y en dirección transversal el PLA posee un esfuerzo de fluencia 41% mayor que el ABS.

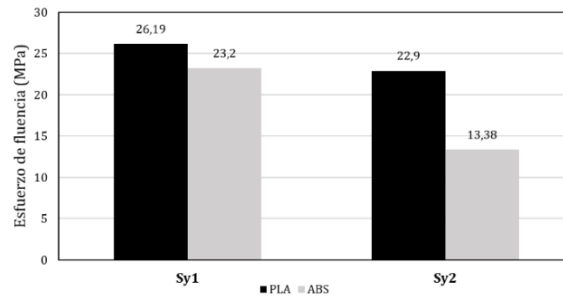


Figura 1037. Comparación del esfuerzo de fluencia de materiales impresos en 3D. PLA y ABS

Por último, se analizó el comportamiento de la deformación de ruptura de ambos materiales impresos en 3D. Para esta propiedad se observó también que ambos materiales poseen un comportamiento ortotrópico, es decir, su comportamiento en la dirección de impresión es significativamente diferente que su comportamiento en la dirección transversal a la dirección de impresión. Por ejemplo, el PLA muestra una deformación de ruptura en dirección axial (ϵ_1) 47% mayor en comparación con la dirección transversal (ϵ_2); y el ABS muestra una deformación de ruptura en dirección axial 92% mayor en comparación con la dirección transversal, como se presenta en la Figura 11.

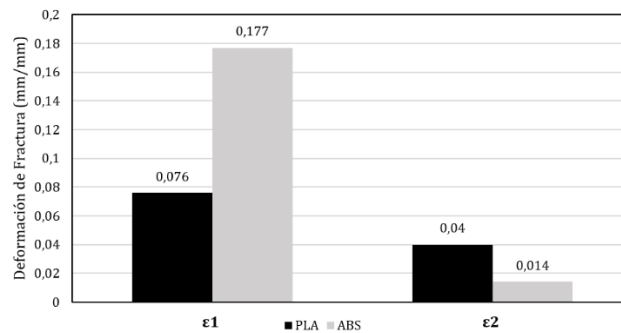


Figura 11. Comparación de la deformación de fractura de materiales impresos en 3D. PLA y ABS

En contraste con las otras propiedades mecánicas, el ABS muestra una deformación de ruptura mayor que el PLA en dirección axial a la impresión de las fibras. Esto se debe a que el polímero termoplástico extruido de ABS presenta una mayor ductilidad que el PLA extruido que usualmente es frágil. No obstante, en la dirección transversal a la dirección de impresión la deformación de ruptura es menor en el ABS que el PLA. Esto se debe a que, para esta dirección de carga, las propiedades del polímero extruido no dominan el modo de falla de la probeta; en esta dirección transversal domina la falla a tensión la adhesión de las capas impresas en 3D.

5. CONCLUSIONES

Se determinaron las propiedades mecánicas ortotrópicas a tensión de dos materiales, ABS y PLA, impresos en 3D mediante la técnica de modelado por deposición fundida. Se usó el estándar ASTM D3039, para caracterización a tensión de materiales compuestos, para caracterizar las probetas impresas debido a que las propiedades del material impreso en 3D se asemejan a un material compuesto polimérico reforzado con propiedades unidireccionales. Se determinaron las propiedades en dirección 1, axial a la dirección de impresión, y las propiedades en dirección 2, transversal a la dirección de impresión. Se encontraron los módulos de elasticidad en ambas direcciones (E_1 , E_2), los esfuerzos de fluencia en ambas direcciones (S_{y1} , S_{y2}), las resistencias a tensión en ambas direcciones (X_1 , X_2) y las deformaciones de fractura en ambas direcciones (ϵ_1 , ϵ_2) para ambos materiales de estudio.

Los resultados experimentales de las pruebas a tensión demostraron que los materiales impresos en 3D mediante deposición de hilo fundido presentan propiedades mecánicas ortotrópicas que dependen de la dirección de impresión de las fibras. Si bien las propiedades elásticas no presentan diferencias significativas en ambas direcciones, las

propiedades plásticas y la resistencia máximas si son significativamente diferentes. Se encontró una reducción de hasta el 74% de la resistencia a la tensión en la dirección transversal en comparación con la dirección axial a la dirección de impresión para el PLA y una reducción del 42% para el ABS. Esta diferencia en la resistencia máxima a tensión se debe a la diferencia en el modo de falla en ambas direcciones. Mientras que en la dirección axial se observó una falla típica dúctil y posterior de fractura a tensión de polímeros termoplásticos, en la dirección transversal por el contrario se observó una delaminación entre capas impresas del material.

En comparación de los dos materiales impresos en 3D caracterizados mecánicamente, el PLA presentó propiedades superiores sobre el ABS. El módulo de elasticidad en dirección axial para el PLA es de 1,98 GPa mientras que para el ABS es de 1,16 GPa; y la resistencia a la tensión en dirección axial para el PLA es de 53,51 MPa y 33,48 MPa para el ABS.

La caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales impresos en 3D es fundamental para poder obtener diseños de estructuras confiables y poder realizar simulaciones bajo diferentes condiciones de carga. Los resultados de este trabajo aportan una porción considerable en el camino de implementar modelos completos del comportamiento de este tipo de materiales, sin embargo, es necesario caracterizar las propiedades mecánicas en otras condiciones de carga como cortante, delaminación entre capas, compresión, entre otros, con el fin de implementar modelos constitutivos completos de los materiales impresos en 3D.

REFERENCIAS

- [1] Sood, R. Ohdar y S. Mahapatra, «Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement,» *Journal of Advance Research*, vol. 3, n° 1, pp. 81-90, 2 Junio 2011.
- [2] K. V. Wong y A. Hernandez, «A Review of Additive Manufacturing,» *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, p. 10, 2012.
- [3] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. Nguyen y D. Hui, «Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 172-196, 2018.
- [4] G. Cicala, A. Latteri, B. Del Curto, A. Lo Russo, G. Recca and S. Fare, "Engineering thermoplastics for additive manufacturing: a critical perspective with experimental evidence to support functional applications," *JABFM*, p. 9, 2017.
- [5] K. Chua, K. F. Leong y C. S. Lim, *Rapid prototyping: principles and applications*, World Scientific Publishing Company, 2010.
- [6] K. Cooper, *Rapid prototyping technology: selection and application*, CRC Press, 2001.
- [7] L. Ventola, «Medical applications for 3D printing: current and projected uses,» *Pharmacy and Therapeutics*, vol. 39, n° 10, p. 704, 2014.
- [8] «Rengier, Fabian; Mehndiratta, Amit; Von Tengg-Koblighk, Hendrik; Zechmann, Christian M; Unterhinninghofen, Roland; Kauczor, H-U; Giesel, Frederik L,» *International journal of computer assisted radiology and surgery*, vol. 5, n° 4, pp. 335-341, 2010.
- [9] H. Dodziuk, «Applications of 3D printing in healthcare,» *Polish journal of cardio-thoracic surgery*, vol. 13, n° 3, p. 283, 2016.
- [10] B. Lu, D. Li y X. Tian, «Development trends in additive manufacturing and 3D printing,» *Engineering*, vol. 1, n° 1, pp. 85-89, 2015.
- [11] S. C. Joshi y A. A. Sheikh, «3D printing in aerospace and its long-term sustainability,» *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 10, n° 4, pp. 175-185, 2015.
- [12] B. Berman, «3-D printing: The new industrial revolution,» *Business horizons*, vol. 55, n° 2, pp. 155-162, 2012.
- [13] Canessa, C. Fonda, M. Zennaro y N. Deadline, «Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development,» *Low-Cost 3D Printing*, vol. 11, 2013.
- [14] B. G. Compton y J. A. Lewis, «3D-printing of lightweight cellular composites,» *Advanced materials*, vol. 26, n° 34, pp. 5930-5935, 2014.
- [15] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou y D. Hui, «3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 110, pp. 442-458, 2017.
- [16] J. H. Martin, B. D. Yahata, J. M. Hundley, J. A. Mayer, T. A. Schaedler y T. M. Pollock, «3D printing of high-strength aluminium alloys,» *Nature*, vol. 549, n° 7672, p. 365, 2017.
- [17] C. W. Visser, R. Pohl, C. Sun, G.-W. Romer, B. Huis in 't Veld y D. Lohse, «Toward 3D printing of pure metals by laser-induced forward transfer,» *Advanced materials*, vol. 27, n° 27, pp. 4087-4092, 2015.
- [18] C. Gosselin, R. Duballet, P. Roux, N. Gaudilliere, J. Dirrenberger y P. Morel, «Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete--a new processing route for architects and builders,» *Materials & Design*, vol. 100, pp. 102-109, 2016.
- [19] Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed y T. Salet, «Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing,» *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, n° 3, pp. 209-225, 2016.
- [20] R. Trombetta, J. A. Inzana, E. M. Schwarz, S. L. Kates y H. A. Awad, «3D printing of calcium phosphate ceramics for bone tissue engineering and drug delivery,» *Annals of biomedical engineering*, vol. 45, n° 1, pp. 23-44, 2017.
- [21] Vorndran, M. Klärner, U. Klammert, L. M. Grover, S. Patel, J. E. Barralet y U. Gbureck, «3D powder printing of beta-tricalcium phosphate ceramics using different strategies,» *Advanced Engineering Materials*, vol. 10, n° 12, pp. B67-B71, 2008.
- [22] C. Minas, D. Carnelli, E. Tervoort y R. Studart, «3D printing of emulsions and foams into hierarchical porous ceramics,» *Advanced Materials*, vol. 28, n° 45, pp. 9993-9999, 2016.
- [23] T. T. Wohlers, *3D Printing and Additive Manufacturing, State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates Incorporated, 2014.
- [24] B. Redwood, F. Schffer y B. Garret, *The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications*, 3D Hubs, 2017.
- [25] N. G. Tanikella, B. Wittbrodt y J. M. Pearce, «Tensile strength of commercial polymer materials for fused filament fabrication 3D printing,» *Additive Manufacturing*, vol. 15, pp. 40-47, 2017.
- [26] B. Tymrak, M. Kreiger y J. M. Pearce, «Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions,» *Materials & Design*, vol. 58, pp. 242-246, 2014.

- [27] J. R. C. Dizon, A. H. Espera Jr, Q. Chen y R. C. Advincula, «Mechanical characterization of 3D-printed polymers,» *Additive Manufacturing*, vol. 20, pp. 44-67, 2018.
- [28] J. T. Cantrell, S. Rohde, D. Damiani, R. Gurnani, L. DiSandro, J. Anton, Young, ie, A. Jerez, D. Steinbach, C. Kroese y others, «Experimental characterization of the mechanical properties of 3D-printed ABS and polycarbonate parts,» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 23, nº 4, pp. 811-824, 2017.
- [29] D. F. Adams, L. A. Carlsson y R. B. Pipes, *Experimental characterization of advanced composite materials*, CRC Press, 2002.
- [30] ASTM International, *ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, ASTM, 2002.
- [31] Prusament, «Green PLA Filament for 3D printing,» [En línea]. Available: <https://shop.prusa3d.com/en/filament/40-green-pla-filament-1kg.html>. [Último acceso: 15 Marzo 2018].
- [32] Prusament, «Blue EasyABS filament for 3D printing,» [En línea]. Available: <https://shop.prusa3d.com/en/filament/57-blue-easyabs-filament-1kg.html>. [Último acceso: 15 Marzo 2018].
- [33] ASTM Internacional, *ASTM E111 Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent modulus, and Chord Modulus*, ASTM, 1997.