

CARACTERIZACIÓN Y PREDICCIÓN DE LAS PROPIEDADES A TENSIÓN DE  
COMPONENTES IMPRESOS EN 3D CON REFUERZO DE FIBRAS

SERGIO BELTRÁN GUARÍN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2017

CARACTERIZACIÓN Y PREDICCIÓN DE LAS PROPIEDADES A TENSIÓN DE  
COMPONENTES IMPRESOS EN 3D CON REFUERZO DE FIBRAS

SERGIO BELTRÁN GUARÍN

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

DIRECTOR

Octavio Andrés González Estrada  
Ingeniero Mecánico, PhD

CODIRECTOR

Alberto David Pertuz Comas  
Ingeniero Mecánico, PhD

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2017

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	10
1. MÉTODOS.....	13
1.1 ENSAYOS MECÁNICOS.....	13
1.1.1 Parámetros del ensayo .....	18
1.1.2 Estructura interna.....	18
1.2 METODOLOGÍA PARA PREDICCIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS.....	20
2. RESULTADOS .....	23
2.1 MEDICIÓN DIMENSIONAL .....	23
2.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS .....	25
2.3 PREDICCIÓN DE LAS CONSTANTES ELÁSTICAS PARA PIEZAS REFORZADAS CON CAPAS ISÓTROPAS DE FIBRA DE VIDRIO .....	32
3. CONCLUSIONES .....	34
REFERENCIAS .....	36
BIBLIOGRAFÍA.....	40

## LISTA DE FIGURAS

pág.

Figura 1. Geometría de la probeta para ensayo a tracción de partes impresas en 3D según ASTM D638 tipo IV. ....	14
Figura 2. Densidad del patrón de relleno. ....	15
Figura 3. Patrones de relleno (a) triangular, (b) rectangular y (c) hexagonal. ....	15
Figura 4. Orientación de las fibras en las capas isótropas.....	16
Figura 5. Disposición de la fibra: (a) 4 capas, 2 anillos y (b) 2 capas, 4 anillos .....	17
Figura 6. Probetas reforzadas con fibra de Kevlar®, vidrio y carbono .....	17
Figura 7. Montaje de probeta ASTM D638 tipo IV en máquina MTS 370 para ensayo a tracción .....	18
Figura 8. Esquemas de las estructuras internas de las probetas.....	19
Figura 9. Ensayo al 20% de densidad para diferentes patrones de relleno .....	26
Figura 10. Ensayo al 50% de densidad para diferentes patrones de relleno .....	27
Figura 11. Ensayo para capas isótropas de fibra de vidrio orientadas a 0°, 45° y 90° .....	28
Figura 12. Comparación de la disposición de anillos concéntricos y capas paralelas .....	30
Figura 13. Comparación de esfuerzo a tensión para diferentes tipos de fibra orientada a 0°.....	31

## LISTA DE TABLAS

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Parámetros de impresión para probetas de nailon. ....	14
Tabla 2. Parámetros de impresión para probetas con capas isótropas. ....	15
Tabla 3. Parámetros de impresión para probetas con anillos concéntricos .....	16
Tabla 4. Parámetros de impresión para probetas con diferentes fibras de refuerzo .....	17
Tabla 5. Propiedades asumidas para el filamento de nailon.....	22
Tabla 6. Propiedades asumidas para la fibra de vidrio .....	23
Tabla 7. Medidas de la sección angosta ( $W_c$ ) .....	24
Tabla 8. Medida en la lengüeta 1 (WO1) .....	24
Tabla 9. Medida en la lengüeta 2 (WO2) .....	24
Tabla 10. Medida del espesor (T) .....	25
Tabla 11. Propiedades mecánicas experimentales al 20% de densidad para diferentes patrones de relleno.....	26
Tabla 12. Propiedades mecánicas experimentales al 50% de densidad para diferentes patrones de relleno.....	27
Tabla 13. Diferencia porcentual en las propiedades mecánicas debido al aumento de la densidad del patrón de relleno .....	27
Tabla 14. Propiedades mecánicas experimentales para refuerzos mediante capas isótropas orientadas.....	28
Tabla 15. Diferencia porcentual en las propiedades mecánicas al adicionar capas isótropas de fibra .....	29
Tabla 16. Comparación de propiedades mecánicas para distintas disposiciones de fibra.....	30
Tabla 17. Comparación de propiedades mecánicas para distintos tipos de fibra ..	31
Tabla 18. Comparación de la medición y la predicción del módulo de elasticidad para probetas reforzadas con capas isótropas de fibra de vidrio.....	32

## RESUMEN

**TÍTULO** CARACTERIZACIÓN Y PREDICCIÓN DE LAS PROPIEDADES A TENSIÓN DE COMPONENTES IMPRESOS EN 3D CON REFUERZO DE FIBRAS.<sup>1</sup>

**AUTORES:** Sergio Beltrán Guarín<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** Impresión 3D, Propiedades elásticas, Impresión 3D con refuerzo de fibra, Propiedades mecánicas, Norma ASTM D638.

### DESCRIPCIÓN:

La impresión tridimensional (3D) es un proceso de manufactura usado para producir elementos sólidos, modelados en CAD, mediante la adición de material. Debido a las bajas propiedades mecánicas que caracterizan a los materiales termoplásticos, esta tecnología estaba dedicada principalmente a la manufactura de prototipos. Sin embargo, actualmente es posible fabricar componentes funcionales mediante el refuerzo con fibras continuas de vidrio, Kevlar® y carbono utilizando un proceso denominado Fused Deposition Modeling (FDM). El objetivo de este trabajo es caracterizar las propiedades elásticas tanto de las probetas hechas en solo plástico, como de las que están reforzadas con fibra, y predecir las propiedades elásticas usando el método analítico de la rigidez volumétrica promedio. Las probetas caracterizadas en este estudio fueron producidas variando la geometría del patrón de relleno y su densidad, la orientación de la fibra de las capas de refuerzo a 0°, 45° y 90°. Los ensayos de tracción se realizaron siguiendo la norma ASTM D638. El modelo de predicción presentado permitirá estimar las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D, y así establecer si pueden ser utilizadas como componentes funcionales de acuerdo las propiedades mecánicas requeridas. En los resultados el patrón de relleno triangular presenta la rigidez más alta, el módulo de elasticidad de las probetas con capas isotropas de fibra de vidrio aumenta un 85, 56 y 30% para las direcciones de 0, 45 y 90°, respectivamente.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Dr. Octavio Andrés González Estrada, PhD, Ingeniero Mecánico.

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION AND PREDICTION OF THE TENSILE PROPERTIES OF FIBER-REINFORCED 3D PRINTING ELEMENTS.<sup>3</sup>

**AUTHORS:** Sergio Beltrán Guarín.<sup>4</sup>

**KEYWORDS:** 3D printing, elastic properties, fiber reinforced 3D printing, Mechanical properties, Standard ASTM D638.

### DESCRIPTION:

Three-dimensional (3D) printing is a manufacturing process used to produce solid elements, modeled in CAD, by adding material. Due to the low mechanical properties that characterize thermoplastic materials, this technology was mainly focus to manufacture prototypes. However, nowadays it is possible to manufacture functional components by reinforcing with continuous glass, Kevlar® and carbon fibers using a process called Fused Deposition Modeling (FDM). The aim of this work is to characterize the elastic properties of both plastic and fiber reinforced specimens and to predict elastic properties using the Average Stiffness Analytical Method. The specimens characterized in this study were produced by varying the geometry of the fill pattern and its density, the orientation of the fiber in the reinforced layers at 0°, 45° and 90°. Tensile tests were performed according to ASTM D638. The prediction model presented allows estimating the mechanical properties of the 3D printed parts and, thus, to establish if they can be used as functional components according to the mechanical properties required. In the results the triangular filler pattern shows the highest stiffness, the modulus of elasticity of the glass fiber isotropic layers increases by 85, 56 and 30% for the 0, 45 and 90 ° directions, respectively.

---

<sup>3</sup> Bachelor thesis.

<sup>4</sup> Faculty of Physico-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Advisor: Dr. Octavio Andrés González Estrada, PhD, Mechanical Engineer.

## INTRODUCCIÓN

La impresión tridimensional (3D) es un proceso de manufactura que, mediante la adición de material, da como resultado elementos sólidos modelados en un software CAD. Esta tecnología cuenta con la ventaja de que al ser de código abierto, las impresoras de bajo costo han permitido su proliferación [1]. Este proceso ha llegado a ser altamente popular entre los usuarios e investigadores porque permite el prototipado rápido y la manufactura de geometrías complejas. En consecuencia, se minimizan los errores de manufactura, los costos de desarrollo del producto y plazos de entrega se reducen sustancialmente. Se ha afirmado que puede reducir los costos de nuevos productos en hasta un 70% y el tiempo de comercialización en un 90% [2].

La impresión 3D está dividida principalmente en 3 categorías: Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Melting (SLM), Stereolithography (STL), Laminated Object Manufacturing (LOM) [3]. La mayoría de las impresoras de bajo costo utilizan FDM como proceso de manufactura. El FDM forma geometrías en 3D ensamblando capas individuales de un filamento termoplástico extruido. El plástico extruido se enfría y se endurece en el plato de la impresora [4]. El FDM es útil para producir prototipos rápidamente y en algunos casos puede ser utilizado para fabricar componentes funcionales. Entre las aplicaciones potenciales se incluye la ingeniería biomédica, que requiere personalización, bajo volumen de producción o geometrías difíciles de obtener con los métodos sustractivos tradicionales [3,5,6]. Por ejemplo, ha sido utilizado para la fabricación de estructuras de soporte bioreabsorbibles para tejido óseo [7-9]. La impresión 3D también ha sido integrada en reconstrucciones ortopédicas, oral y maxilofacial [10,11]. Sin embargo, el acabado superficial de las piezas es inferior al producido utilizando SLM, ya que la resolución del proceso está dictada por el espesor del filamento [12]. La separación de las capas resultaría en una falla prematura. Adicionalmente, se ha determinado que las piezas impresas en

acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) mediante FDM tienen propiedades elásticas hasta un 40% inferiores que las hechas mediante moldeo por inyección [1]. Todavía no se ha demostrado si la extrusión del material puede detenerse con la suficiente rapidez como para producir pequeños orificios en secciones verticales [13].

Varios autores han tratado de evaluar la precisión dimensional y las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas mediante FDM, tanto en impresoras industriales como en las de escritorio [3-5]. Es usual encontrar que las impresoras de escritorio utilicen ABS o el ácido poliláctico (PLA) como materias primas termoplásticas [17,18]. Nuevos materiales termoplásticos se encuentran disponibles, entre ellos es posible encontrar termoplásticos con partículas metálicas incrustadas o reforzados con fibras cortas de carbono [6,7].

En el 2014, se presentó la primera impresora que imprime usando fibras de refuerzo [21], caracterizada por reforzar las piezas impresas con fibras de vidrio, Kevlar® o carbono. Los refuerzos pueden ser realizados en dos configuraciones: anillos concéntricos o capas isótropas. Los anillos concéntricos siguen la geometría de la pieza y las capas isótropas permiten orientar las fibras en la dirección deseada. La adición de fibras aumenta significativamente la resistencia de las piezas, en comparación con las fabricadas en materiales convencionales [22]. Por lo tanto, esta nueva generación de impresoras 3D está diseñada para producir partes funcionales. En la actualidad, las piezas impresas en 3D con refuerzo de fibras continuas no han sido extensivamente investigadas en la literatura, debido en parte a que las patentes aún se encuentran en proceso de expiración [23]. El uso de refuerzo de fibras de carbono fue estudiado por Mori et al. [24] usando un RepRap basado en una impresora 3D. Sin embargo, este estudio no evaluó las propiedades elásticas en los componentes reforzados. Recientemente, Melenka et al. [25] estudiaron el efecto de la adición de anillos concéntricos en matriz de nailon. Se verificó que el módulo de elasticidad y la resistencia última a la tracción aumentan con el porcentaje de fibra. Adicionalmente, se desarrolló un modelo de predicción de las constantes elásticas usando el método de la rigidez promedio. Es necesario comprender las

propiedades mecánicas a tracción de los componentes impresos en 3D reforzados con fibra, a fin de asegurar que estos cumplirán con las especificaciones de diseño requeridas [3].

En este trabajo se caracteriza el comportamiento bajo ensayos a tensión de elementos impresos en 3D fabricados en matriz de nailon únicamente y reforzados con fibras continuas de vidrio, Kevlar® y carbono. Para este estudio se usó la impresora Mark Two, la nueva generación de la impresora 3D creada por Markforged [22]. En la primera sección se presentan los parámetros del ensayo a tracción según la norma ASTM D638 y las configuraciones elegidas para fabricar las probetas, se describe el equipo que será utilizado y se establece la metodología para realizar el cálculo analítico de las constantes elásticas según el método de la rigidez volumétrica promedio. En la siguiente sección se presenta un análisis de la exactitud dimensional de la impresora, los resultados obtenidos de los ensayos a tracción, determinando el módulo de elasticidad, resistencia última y coeficiente de Poisson, para cada configuración y una comparación entre los valores teóricos y experimentales obtenidos para el módulo de elasticidad de las probetas reforzadas con capas isótropas de fibra de vidrio. Por último, se exponen las conclusiones más relevantes, reconociendo las ventajas y desventajas de la tecnología aditiva, características principales, así como recomendaciones para trabajos futuros.

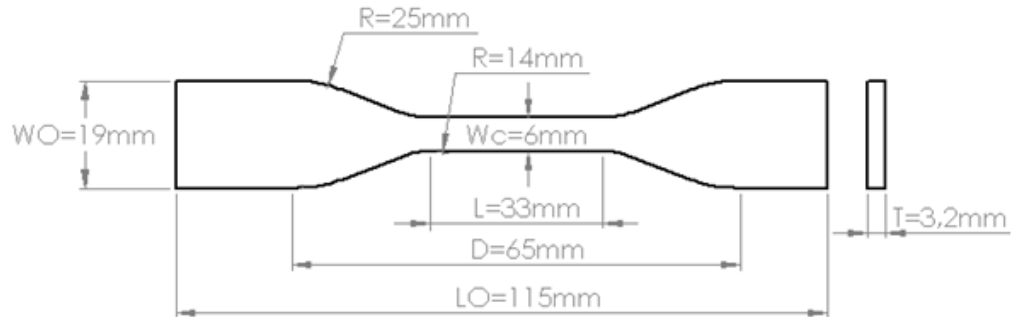
## 1. MÉTODOS

### 1.1 ENSAYOS MECÁNICOS

Las probetas usadas para los ensayos mecánicos fueron fabricadas usando la impresora 3D de escritorio Mark Two de la compañía Mark Forged. La geometría de las probetas fue creada de acuerdo con la norma *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics* ASTM D638-14 usando la geometría tipo IV [27]. La geometría usada en este estudio y sus dimensiones son mostradas en la Figura 1. La geometría de las probetas fue creada usando software de diseño asistido por computador (CAD) y exportada como un archivo de estereolitografía (STL) al software Eiger de la impresora. Las probetas para analizar el comportamiento de acuerdo al patrón de relleno y su densidad fueron impresas con filamento de nailon. En las probetas con capas isótropas o anillos concéntricos de fibra se usó nailon como matriz y fibra de vidrio, Kevlar® o carbono como material de refuerzo.

Los parámetros de impresión utilizados para la manufactura de las probetas utilizadas en el ensayo se encuentran resumidos en las Tabla 1-Tabla 4. Antes de realizar los ensayos, las probetas fueron medidas para evaluar la precisión dimensional de la impresora.

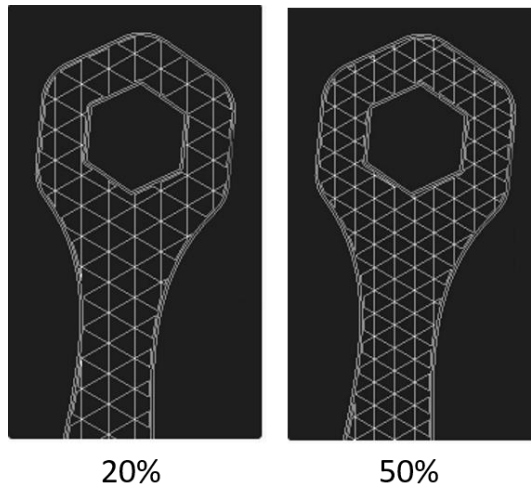
**Figura 1.** Geometría de la probeta para ensayo a tracción de partes impresas en 3D según ASTM D638 tipo IV.



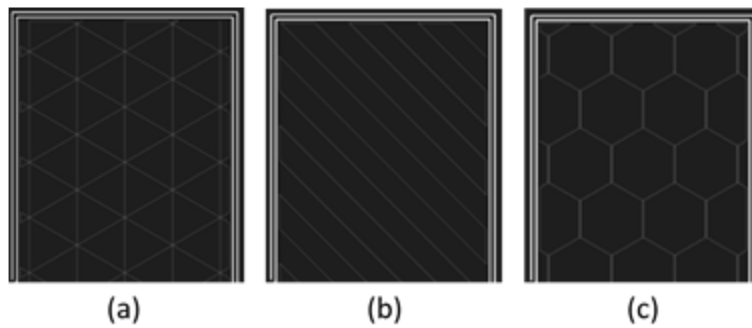
**Tabla 1.** Parámetros de impresión para probetas de nailon.

Altura de la capa (mm)	0.1
Porcentaje de relleno (%)	20, 50
Patrón de relleno	Triangular, Rectangular, Hexagonal
Número de capas de relleno	24
Número de paredes	2
Número de capas inferiores	4
Número de capas superiores	4
Total de capas	32

**Figura 2.** Densidad del patrón de relleno.



**Figura 3.** Patrones de relleno (a) triangular, (b) rectangular y (c) hexagonal.

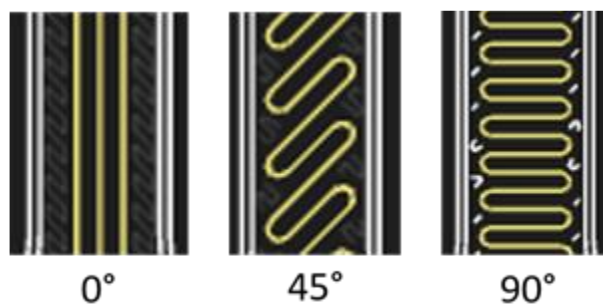


**Tabla 2.** Parámetros de impresión para probetas con capas isótropas.

Altura de la capa (mm)	0.1
Porcentaje de relleno (%)	20
Patrón de relleno	Triangular
Número de capas de fibra	6
Tipo de relleno con fibra	Isótropo
Ángulo de las fibras	0°, 45°, 90°

Número de capas de relleno	18
Número de paredes	2
Número de capas inferiores	4
Número de capas superiores	4
Total de capas	32

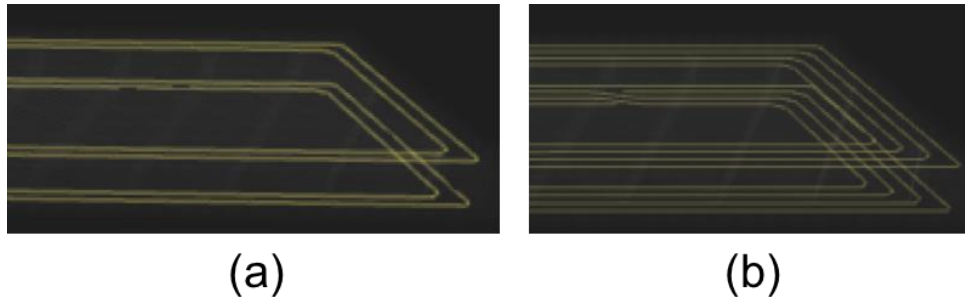
**Figura 4.** Orientación de las fibras en las capas isótropas



**Tabla 3.** Parámetros de impresión para probetas con anillos concéntricos

Altura de la capa (mm)	0.1
Porcentaje de relleno (%)	20
Patrón de relleno	Triangular
Número de capas de fibra	4, 2
Tipo de relleno con fibra	anillos concéntricos
Anillos concéntricos	2, 4
Número de capas de relleno	24
Número de paredes	2
Número de capas inferiores	4
Número de capas superiores	4
Total de capas	32

**Figura 5.** Disposición de la fibra: (a) 4 capas, 2 anillos y (b) 2 capas, 4 anillos



**Tabla 4.** Parámetros de impresión para probetas con diferentes fibras de refuerzo

Altura de la capa (mm)	0.1
Porcentaje de relleno (%)	20
Patrón de relleno	Triangular
Tipo de fibra	vidrio, Kevlar® y carbono
Número de capas de fibra	6
Tipo de relleno con fibra	Isótropo
Angulo de las fibras	0°
Numero de capas de relleno	18
Numero de paredes	2
Numero de capas inferiores	4
Numero de capas superiores	4
Total de capas	32

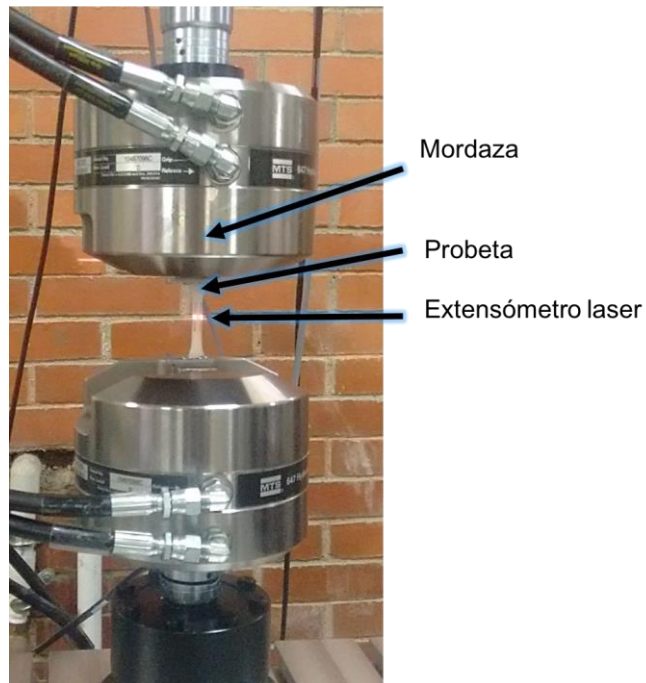
**Figura 6.** Probetas reforzadas con fibra de Kevlar®, vidrio y carbono



### 1.1.1 Parámetros del ensayo

Las probetas impresas 3D fueron evaluadas realizando ensayos de tracción. Se utilizó un banco de pruebas de tracción Material Test System MTS 370, con una celda de carga de 25 KN. La deformación longitudinal y la contracción de la sección transversal de las probetas de ensayo se midieron usando el LVDT de la máquina y el extensómetro laser LX500, respectivamente. Las probetas se ensayaron a una velocidad de 5 mm / min. Los equipos utilizados para evaluar las muestras impresas se muestran en la Figura 7.

**Figura 7.** Montaje de probeta ASTM D638 tipo IV en máquina MTS 370 para ensayo a tracción

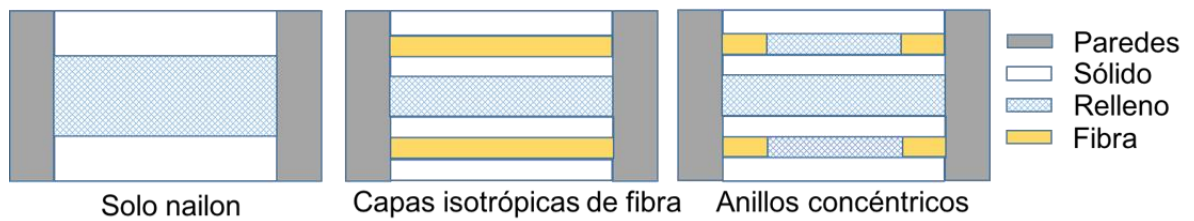


### 1.1.2 Estructura interna

Los esquemas de la estructura interna de la probeta impresa en 3D con refuerzo de fibra de vidrio se muestran en la Figura 8. Se pueden apreciar las distintas regiones que existen dentro de las probetas: las capas de las paredes forman la estructura

externa en donde el nailon extruido es orientado a lo largo del eje longitudinal, las capas sólidas son de nailon y orientadas alternativamente a  $\pm 45^\circ$  respecto al eje longitudinal, las capas de relleno son de nailon y están orientadas según el patrón seleccionado. De la misma manera que las capas sólidas, las capas de fibra de vidrio están dispuestas en ángulos de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ , o en anillos concéntricos.

**Figura 8.** Esquemas de las estructuras internas de las probetas



La fracción volumétrica de cada componente de la probeta fue determinada a partir de los datos proporcionados por Eiger, el software que controla la impresora. La fracción volumétrica de cada sección de la probeta es calculada usando las Ecuaciones (1) – (4). Donde las fracciones volumétricas están dadas por:

$$F_{V_{paredes}} = \frac{V_{paredes}}{V_{probeta}} \quad (1)$$

$$F_{V_{sólido}} = \frac{V_{sólido}}{V_{probeta}} \quad (2)$$

$$F_{V_{relleno}} = \frac{V_{relleno}}{V_{probeta}} \quad (3)$$

$$F_{V_{fibra}} = \frac{V_{fibra}}{V_{probeta}} \quad (4)$$

## 1.2 METODOLOGÍA PARA PREDICCIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS

Las constantes elásticas efectivas de las probetas impresas en 3D y reforzadas con fibra serán determinadas usando el método de la rigidez volumétrica promedio [16]. Este método se compone de tres pasos principales. Primero, el modelo micromecánico usado para determinar las propiedades efectivas de los componentes impresos mediante FDM. Segundo, un sistema de coordenadas de transformación es aplicado a las capas sólidas, de relleno. Tercero, se construye la matriz de rigidez volumétrica promedio de cada sección transversal.

Para determinar las propiedades micromecánicas de las diferentes capas es necesario usar el modelo de constantes unidireccionales para componentes impresos en FDM desarrollado por Rodríguez et al. [14]. Este modelo trata a los componentes como un material compuesto de plásticos y espacio vacío. Las propiedades elásticas del nailon mostradas en las Tabla 5 y Tabla 6 fueron utilizadas para determinar las propiedades micromecánicas de las capas sólidas, las paredes y el relleno.

Las Ecuaciones (5)-(9) fueron usadas para determinar las propiedades de los componentes impresos mediante FDM. En donde  $\rho_1$  representa la densidad del espacio vacío en cada sección. Se asumió una densidad del 10% para espacio vacío en las capas sólidas, mientras que para la región del relleno se asumió un valor del 80%. Las Ecuaciones (5)-(9) demuestran que las secciones de la probeta tendrán un comportamiento transversalmente isótropo.

$$E_{11} = (1 - \rho_1)E \quad (5)$$

$$E_{22} = \left(1 - \rho_1^{\frac{1}{2}}\right)E \quad (6)$$

$$G_{12} = G \frac{\left((1 - \rho_1) \left(1 - \rho_1^{\frac{1}{2}}\right)\right)}{(1 - \rho_1) + \left(1 - \rho_1^{\frac{1}{2}}\right)} \quad (7)$$

$$v_{12} = (1 - \rho_1)v \quad (8)$$

$$v_{21} = \left(1 - \rho_1^{\frac{1}{2}}\right)v \quad (9)$$

Una vez que las propiedades micromecánicas para las capas sólidas, de las paredes y relleno han sido determinadas, se procede a llenar la matriz de elasticidad. La matriz de elasticidad para materiales transversalmente isótropos se escribe como:

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{v_{21}}{E_2} & -\frac{v_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{v_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{13}}{E_1} & -\frac{v_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Las regiones sólidas y de relleno de las probetas son transformadas usando la matriz de rotación, [T], mostrada en (11). En esta ecuación c representa la función coseno y s a la función seno y el ángulo  $\theta$  es el ángulo de las capas sólidas y de relleno. La nueva matriz de rigidez [Sxyz] pertinente al sistemas de coordenadas globales es determinada para todas las capas sólidas y de relleno.

$$S_{XYZ} = [T]^T [S'_{xyz}] [T],$$

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 0 & 0 & 0 & 2cs \\ s^2 & c^2 & 0 & 0 & 0 & -2cs \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -s & c & 0 \\ -cs & cs & 0 & 0 & 0 & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

El comportamiento de la rigidez promedio está relacionado con la fracción volumétrica de cada sección con el objetivo de determinar la contribución de cada sección a las propiedades mecánicas del conjunto.

$$[C^G] = V_{fparedes} [C_{paredes}] + V_{frelleno-\theta} [C_{relleno-\theta}] + V_{relleno+\theta} [C_{relleno+\theta}] + V_{fsólido-\theta} [C_{fsólido-\theta}] + V_{fsólido+\theta} [C_{fsólido+\theta}] + V_{fibra} [C_{fibra}] \quad (12)$$

Las propiedades mecánicas efectivas de los componentes impresos en 3D y reforzados con fibra se obtienen a partir de la inversa de la matriz de rigidez, cuyos términos están relacionados con las constantes elásticas efectivas:

$$S^G = [C^G]^{-1} \quad (21)$$

$$E_x = \frac{1}{S_{11}^g}, \quad E_y = \frac{1}{S_{22}^g}, \quad E_z = \frac{1}{S_{33}^g}$$

$$G_{xy} = \frac{1}{S_{66}^g}, \quad G_{yz} = \frac{1}{S_{44}^g}, \quad G_z = \frac{1}{S_{55}^g} \quad (22)$$

$$v_{xy} = \frac{-S_{12}^g}{S_{11}^g}, \quad v_{zx} = \frac{-S_{13}^g}{S_{33}^g}, \quad v_{yz} = \frac{-S_{23}^g}{S_{22}^g}$$

**Tabla 5.** Propiedades asumidas para el filamento de nailon

Propiedad del material	Valor
Módulo de elasticidad - E (GPa)	0.94
Módulo de rigidez - G (GPa)	0.37
Coefficiente de Poisson - ν	0.35

**Tabla 6.** Propiedades asumidas para la fibra de vidrio

Propiedad del material	Valor
Módulo de elasticidad - E (GPa)	21
Módulo de rigidez - G (GPa)	8.5
Coefficiente de Poisson - $\nu$	0.23

## 2. RESULTADOS

### 2.1 MEDICIÓN DIMENSIONAL

La medición de la geometría de las probetas fue realizada para evaluar la uniformidad de la impresora 3D Mark Two. Las medias también fueron necesarias para determinar el área de la sección transversal de las probetas. Las medidas geométricas fueron comparadas con las dimensiones nominales según la norma ASTM D638 TIPO IV mostradas en la Figura 1. El ancho de la sección estrecha ( $W_c$ ), el ancho al final de las pestañas finales ( $WO_1$  y  $WO_2$ ) y el espesor de la probeta ( $T$ ) fueron comparados para todas las probetas con refuerzo de fibra de vidrio. Una prueba t-Student fue utilizada para comparar las dimensiones nominales con las mediciones realizadas. Una prueba de significancia valor  $p$  de  $<0.05$  fue aplicada para determinar estadísticamente la diferencia existente entre el valor nominal y el medido. Los resultados de la comparación se encuentran resumidos en las Tablas 7-10

**Tabla 7.** Medidas de la sección angosta (Wc)

Dimensiones nominales (mm)	6.00	Diferencia (%)	p-valor
Probeta promedio con Fibras a 0° (Desviación estándar)	6.09 (0.10)	0.72	<0.001
Probeta promedio con Fibras a 45° (Desviación estándar)	6.11 (0.11)	0.86	<0.001
Probeta promedio con Fibras a 90° (Desviación estándar)	6.05 (0.06)	0.39	<0.001

**Tabla 8.** Medida en la lengüeta 1 (WO1)

Dimensiones nominales (mm)	19.00	Diferencia (%)	p-valor
Probeta promedio con Fibras a 0° (Desviación estándar)	19.08 (0.071)	0.66	<0.001
Probeta promedio con Fibras a 45° (Desviación estándar)	19.13 (0.09)	1.02	<0.001
Probeta promedio con Fibras a 90° (Desviación estándar)	19.05 (0.09)	0.71	<0.001

**Tabla 9.** Medida en la lengüeta 2 (WO2)

Dimensiones nominales (mm)	19.00	Diferencia (%)	p-valor
Probeta promedio con Fibras a 0° (Desviación estándar)	19.06 (0.06)	0.72	<0.001
Probeta promedio con Fibras a 45° (Desviación estándar)	19.14 (0.09)	0.86	<0.001
Probeta promedio con Fibras a 90° (Desviación estándar)	19.05 (0.09)	0.39	<0.001

**Tabla 10.** Medida del espesor (T)

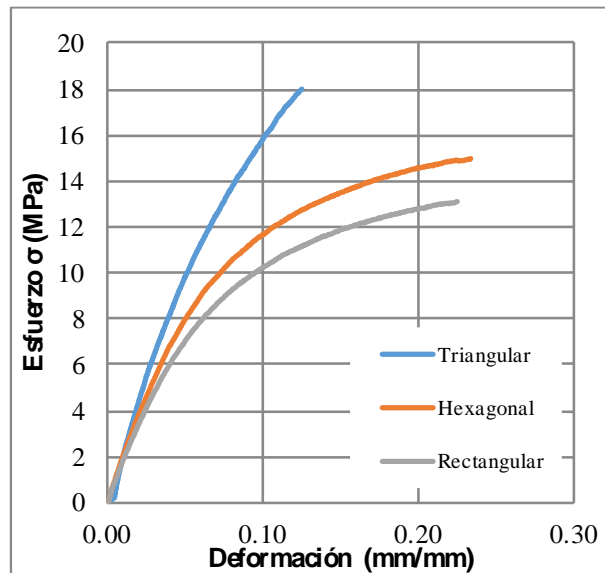
Dimensiones nominales (mm)	3.20	Diferencia (%)	p-valor
Probeta promedio con Fibras a 0° (Desviación estándar)	3.30 (0.03)	3.15	<0.001
Probeta promedio con Fibras a 45° (Desviación estándar)	3.28 (0.03)	2.76	<0.001
Probeta promedio con Fibras a 90° (Desviación estándar)	3.32 (0.07)	3.81	<0.001

Las Tabla 7 y Tabla 10 muestran que las dimensiones de las probetas difieren de las dimensiones nominales del CAD. Los resultados son consistentes con otros estudios que han evaluado la exactitud dimensional de las piezas impresas en 3D [1]. Se observa una variación en las medidas de las probetas de  $\pm 0.1$  mm de la dimensión nominal. Comprender la exactitud dimensional de las impresoras 3D es necesario ya que permite seleccionar las tolerancias apropiadas para producir componentes funcionales usando este método de manufactura. El estudio de la exactitud geométrica ayuda a predecir y compensar el error a causa de las limitaciones inherentes de la impresora 3D.

## 2.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS MECÁNICOS

Se muestra el efecto de la variación del patrón de relleno y su densidad en las propiedades mecánicas. En las Figura 9 y Figura 10 se presentan las curvas de la relación de esfuerzo – deformación longitudinal para el valor promedio de cada configuración ensayada. El módulo de elasticidad, la resistencia última a la tracción y el coeficiente de Poisson de cada configuración fue determinado a partir de los resultados de las Figura 9 y Figura 10. Los valores promedio para cada configuración están registrados en las Tabla 11 y Tabla 12. En las Figura 9 y Figura 10 se observa que el patrón de relleno triangular posee una mayor rigidez. En la Tabla 13 se presenta la diferencia porcentual debida al aumento de la densidad en el patrón de relleno.

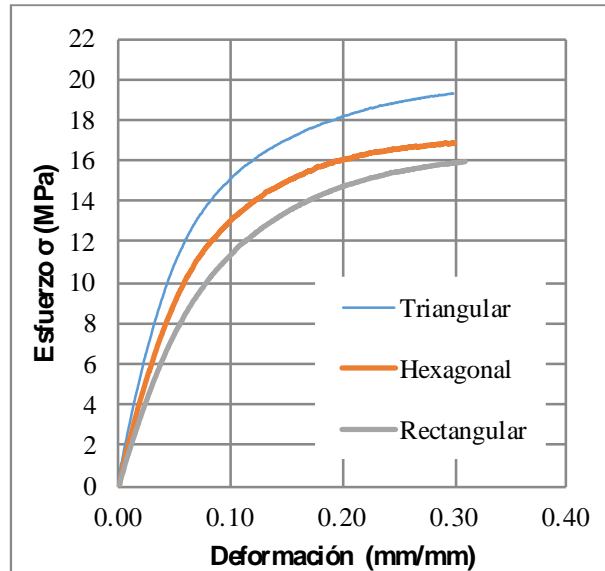
**Figura 9.** Ensayo al 20% de densidad para diferentes patrones de relleno



**Tabla 11.** Propiedades mecánicas experimentales al 20% de densidad para diferentes patrones de relleno

Propiedad del material	Triangular	Rectangular	Hexagonal
Módulo de elasticidad - E (MPa)	244	156	178
Resistencia última a la tracción (MPa)	18	13	15
Coefficiente de Poisson - $\nu_{12}$	0.57	0.18	0.46

**Figura 10.** Ensayo al 50% de densidad para diferentes patrones de relleno



**Tabla 12.** Propiedades mecánicas experimentales al 50% de densidad para diferentes patrones de relleno

Propiedad del material	Triangular	Rectangular	Hexagonal
Módulo de elasticidad - E (MPa)	252	165	200
Resistencia última a la tracción (MPa)	19	16	17
Coefficiente de Poisson – $\nu_{12}$	0.39	0.31	0.12

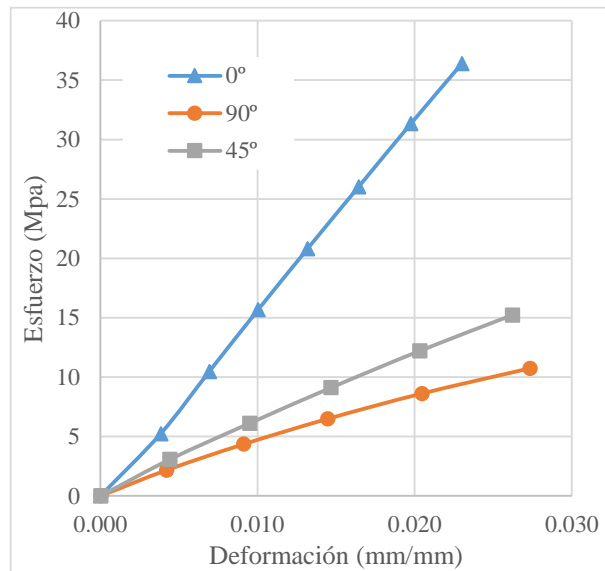
**Tabla 13.** Diferencia porcentual en las propiedades mecánicas debido al aumento de la densidad del patrón de relleno

Propiedad mecánica	Diferencia (%)		
	Triangular	Rectangular	Hexagonal
Módulo de elasticidad - E (MPa)	3.1	5.5	11
Resistencia última a la tracción (MPa)	5.2	18.7	11.7

La segunda parte de este ensayo presenta el efecto de las capas isótropas con fibras orientadas en tres diferentes direcciones, ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ) respecto a eje longitudinal, sobre las propiedades mecánicas. En la Tabla 14 están registrados los

valores promedio para el módulo de elasticidad, la resistencia última a la tracción y el coeficiente de Poisson de cada configuración que fueron determinados a partir de las curvas de esfuerzo – deformación de la Figura 11. Se puede destacar que se obtiene un desempeño superior al orientar las fibras en la dirección de la fuerza. En la Tabla 15 se resume el aumento en las propiedades mecánicas de las probetas luego adicionar capas isotropas de fibra respecto a las probetas hechas únicamente en nylon al 20%.

**Figura 11.** Ensayo para capas isotropas de fibra de vidrio orientadas a 0°, 45° y 90°



**Tabla 14.** Propiedades mecánicas experimentales para refuerzos mediante capas isotropas orientadas

Propiedad del material	0°	45°	90°
Módulo de elasticidad - E (MPa)	1610	558	391
Resistencia última a la tracción (MPa)	83	37	22
Coficiente de Poisson - $\nu_{12}$	0.27	0.25	0.24

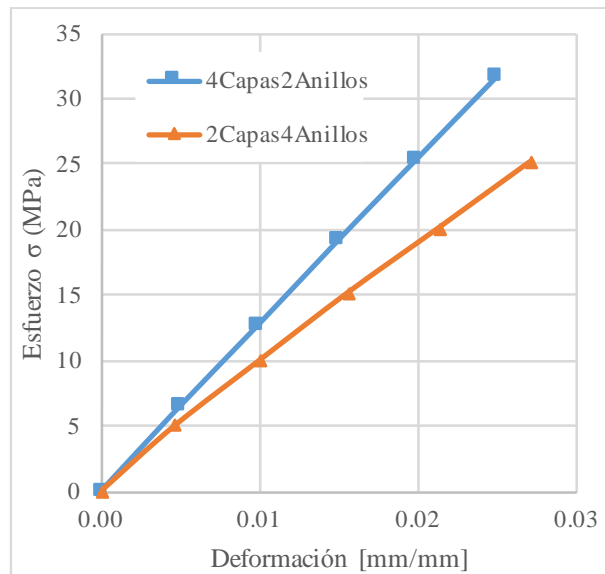
**Tabla 15.** Diferencia porcentual en las propiedades mecánicas al adicionar capas isotropas de fibra

Propiedad mecánica	Dirección de la capa isotropa		
	0°	45°	90°
Módulo de elasticidad – E (MPa)	85	56	30
Resistencia última a la tracción (MPa)	78	51	18

Por lo tanto, se puede concluir que la adición de fibras de refuerzo es una buena alternativa para mejorar las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas en matrices termoplásticas.

La tercera parte de los ensayos mecánicos buscaba realizar una comparación entre dos configuraciones de impresión que permiten colocar el mismo volumen de fibra. La comparación del comportamiento para cada probeta se muestra en la Figura 12. A partir de la gráfica de esfuerzo – deformación se realiza el cálculo del módulo de elasticidad promedio y se determina la resistencia última a la tracción, estos valores son registrados en la Tabla 16. La comparación da como resultado una mejor respuesta a la sollicitación mecánica cuando se dispone la fibra capas paralelas, ya que la sección transversal se puede asumir isotropa. Un estudio realizado sobre el efecto de la variación de los anillos concéntricos fue realizado por Melenka et al. [25].

**Figura 12.** Comparación de la disposición de anillos concéntricos y capas paralelas



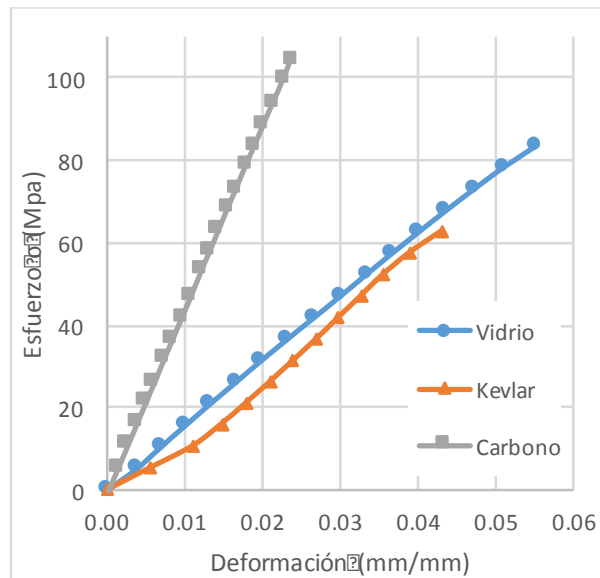
**Tabla 16.** Comparación de propiedades mecánicas para distintas disposiciones de fibra

Propiedad mecánica	4 capas 2 anillos	2 capas 4 anillos	Diferencia (%)
Módulo de elasticidad - E (MPa)	1263	896	41%
Resistencia última a la tracción (MPa)	100	65	54%

Finalmente, luego de haber determinado que se obtiene un mejor desempeño seleccionando un patrón de relleno triangular y añadiendo capas isotrópicas a  $0^\circ$  respecto al eje longitudinal, se realiza una comparación variando el tipo de fibra. El valor promedio del módulo de elasticidad para cada configuración es determinado a partir de la relación de esfuerzo – deformación en la Figura 13. El módulo de elasticidad promedio y la resistencia última a la tracción se registran en las Tablas 17, respectivamente. Por lo tanto, se puede destacar que la mejor respuesta se obtiene para la fibra de carbono. Este es un resultado coherente ya que la fibra de carbono posee el mayor módulo de elasticidad de las tres fibras utilizadas. La fibra

de kevlar tiene un módulo más alto que la del vidrio, sin embargo, de acuerdo a los ensayos tiene una respuesta mecánica menor al ser solicitada estáticamente. Esto último puede estar relacionado con el cuidado al preservar las materias primas de la impresora, siendo estas sensibles a la humedad del ambiente.

**Figura 13.** Comparación de esfuerzo a tensión para diferentes tipos de fibra orientada a 0°



**Tabla 17.** Comparación de propiedades mecánicas para distintos tipos de fibra

Propiedad mecánica	Kevlar®	Vidrio	Carbono
Módulo de elasticidad - E (MPa)	1434	1610	4431
Resistencia ultima a la tracción (MPa)	63	83	104

### 2.3 PREDICCIÓN DE LAS CONSTANTES ELÁSTICAS PARA PIEZAS REFORZADAS CON CAPAS ISÓTROPAS DE FIBRA DE VIDRIO

Las propiedades mecánicas de las probetas impresas en 3D y reforzadas con fibra de vidrio fueron estimadas usando el método de la rigidez volumétrica promedio. Este método permite que las propiedades de los dos materiales sean tenidas en cuenta. Además, permite analizar la contribución de las diferentes estructuras internas.

**Tabla 18.** Comparación de la medición y la predicción del módulo de elasticidad para probetas reforzadas con capas isótropas de fibra de vidrio

	Dirección de la capa isótropa		
	0°	45°	90°
Módulo de elasticidad experimental	1610	558	391
Módulo de elasticidad analítico	1624	582	429
Diferencia (%)	1%	4%	9%
Fracción volumétrica de fibra (%)	14.7	15.2	15.3

El resultado del análisis del módulo de elasticidad experimental y el analítico para las probetas de ensayo son comparados en la Tabla 18. Se observa una buena concordancia entre el cálculo experimental y el analítico. Se aprecia una diferencia mínima para el caso en que las fibras coinciden en orientación con la fuerza aplicada. Por otro lado, ocurre un incremento en el error para los otros dos casos, en que las fibras se encuentran a 45° y 90°. Los errores pueden estar relacionados con el porcentaje de espacio vacío sumido para cada configuración. También se debe tener en cuenta que el método de rigidez volumétrica promedio asume una unión perfecta entre la matriz y la fibra, hipótesis que en la práctica está condicionada a factores como la temperatura del ambiente y de la boquilla extrusora, las condiciones de humedad a las que ha sido expuesta la fibra, entre otras.

La comparación realizada en la Tabla 18 demuestra que el método de la rigidez volumétrica promedio puede ser efectivamente utilizado para predecir las propiedades mecánicas de las piezas impresas en 3D y reforzadas con fibras. Este método también puede ser utilizado para predecir las propiedades mecánicas de otro tipo de fibra de refuerzo.

### 3. CONCLUSIONES

Respecto al proceso de fabricación, el uso de la tecnología aditiva para la fabricación de materiales compuestos permite reducir el número de procesos hasta obtener la pieza final, ya que la tecnología FDM utilizada por la impresora, junto a las características termoplásticas de los materiales usados, permite que el material sea depositado, compactado y curado al mismo tiempo y de forma instantánea.

Las piezas tienen un buen acabado superficial tras la fabricación, no necesitando de procesos posteriores. Sin embargo, se deben evitar el uso de mecanizados que puedan inducir un aumento en la temperatura de la matriz termoplástica, afectando sus características.

Con la impresora se pueden fabricar piezas complejas sin el uso de moldes, lo que supone un importante ahorro de tiempo y coste. En cambio, para grandes volúmenes de producción es mejor usar métodos tradicionales ya que en un mismo ciclo se pueden realizar varios procesos a la vez, que en la impresora tendrían que ser realizados por separado. La manufactura aditiva debe ser utilizada en dónde supone una ventaja su aplicación, no siendo necesaria una fabricación íntegra con tecnología aditiva, pudiendo complementar esta con otros procesos de fabricación.

Respecto a la caracterización del material, las propiedades mecánicas de los materiales utilizados son inferiores a las de los materiales compuestos convencionales. Esto debido a la naturaleza termoplástica de los materiales utilizados por la impresora. Sin embargo, es necesario destacar que las opciones de refuerzo disponibles permiten compensar estas deficiencias, logrando en algunos casos un aumento de hasta el 85% en el módulo de elasticidad luego de adicionar capas isótropas de fibra de vidrio y de un 95% en caso de usar fibra de carbono.

Adicionalmente, se ha implementado el método de la rigidez volumétrica promedio para realizar la predicción de las propiedades mecánicas a tracción para probetas reforzadas con capas isótropas de fibra de vidrio. El modelo presenta un error de 1%, 4% y 9% en la predicción del módulo de elasticidad analítico para las capas isótropas a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ , respectivamente.

Una investigación más profunda es necesaria a fin de caracterizar completamente el comportamiento mecánico de estas estructuras, en particular, ensayos de compresión, flexión y torsión.

## REFERENCIAS

- [1] G. W. Melenka, J. S. Schofield, M. R. Dawson, and J. P. Carey, "Evaluation of dimensional accuracy and material properties of the MakerBot 3D desktop printer," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 21, no. 5, pp. 618–627, 2015.
- [2] N. A. Waterman and P. Dickens, "Rapid Product Development in the USA, Europe and Japan," *World Cl. Des. to Manuf.*, vol. 1, no. 3, pp. 27–36, 1994.
- [3] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, 2nd ed. New York: Springer, 2015.
- [4] Stratasys Inc., "Fused deposition modelling for fast, safe plastic models," *12th Annual Conference on Computer Graphics*. Chicago, pp. 326–332, 1991.
- [5] S. J. Leigh, R. J. Bradley, C. P. Pursell, D. R. Billson, and D. A. Hutchins, "A simple, low-cost conductive composite material for 3D printing of electronic sensors," *PLoS ONE*, vol. 7, 2012.
- [6] L. E. Murr *et al.*, "Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex cellular and functional mesh arrays," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 368, pp. 1999–2032, 2010.
- [7] D. W. Hutmacher, S. H. Teoh, I. Zein, K. W. Ng, J. Schantz, and J. C. Leahy, "Design and fabrication of a 3D scaffold for tissue engineering bone," *ASTM Spec. Tech. Publ.*, pp. 152–167, 2001.
- [8] F. P.W. Melchels, J. Feijen, and D.W. Grijpma, "A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering," *Biomaterials*, vol. 31, no.

6121–6130, 2010.

- [9] A.A.Mäkitie *et al.*, “Novel additive manufactured scaffolds for tissue engineered trachea research,” *Acta Otolaryngoly.*, vol. 133, pp. 412–417, 2013.
- [10] I. Gibson *et al.*, “The use of rapid prototyping to assist medical applications,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 12, pp. 53–58, 2006.
- [11] W. Y. Way, M. Aichouni, M. Z. A. Zulkiflee, and M. S. Ahmad Derifae, “Fabrication and design of customized maxillofacial biomodel for implant using computer aided design and rapid prototyping technique,” *Appl. Mech. Mater.*, 2013.
- [12] R. Bidanda, B. Narayanan, V. Billo, *Handbook of Design, Manufacture and Automation*. New York, 1991.
- [13] P. F. Jacobs, “Stereolithography and Other RP and M Techniques,” *ASME Press*, New York, 1996.
- [14] J. F. Rodriguez, J. P. Thomas, and J. E. Renaud, “Characterization of the mesostructure of fused-deposition acrylonitrile-butadiene-styrene materials,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 6, no. 3, pp. 175–186, 2000.
- [15] S. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 8, no. 4, pp. 248–257, 2002.
- [16] J. F. Rodríguez, J. P. Thomas, and J. E. Renaud, “Mechanical behavior of

- acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 219–230, 2003.
- [17] C. K. Chua, K. F. Leong, and C. S. Lim, “Prototyping: Principles and Applications, World Scientific,” *World Scientific*, 2003.
- [18] D. A. Roberson, D. Espalin, and R. B. Wicker, “3D printer selection: a decision-making evaluation and ranking model,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 8, pp. 201–212, 2013.
- [19] ColorFab, “ColorFab BrassFill 3D Printing Filament,” 2016. [Online]. Available: <http://colorfabb.com/brassfill>.
- [20] 3DXTech, “Carbon Fiber Reinforced PLA Filament,” 2014. .
- [21] Markforged, “Mark One Professional Desktop Printer Technical Specifications.”[Online].Available:<http://www.desktop3dprinter.com/news/create3d-adds-the-mark-one-composite-3d-printer-to-product-range.html/>.  
[Accessed: 20-Jun-2007].
- [22] Markforged, “Mark Two Professional Desktop Printer Technical Specifications.” [Online]. Available: <https://markforged.com/mark-two/>.
- [23] S.Crump, “Apparatus and method for creating three-dimensional object,” *US 5121329 A*, 1989.
- [24] K. Mori, T. Maeno, and Y. Nakagawa, “Dieless Forming of Carbon Fibre Reinforced Plastic Parts Using 3D Printer,” *Procedia Eng.*, vol. 81, no. October, pp. 1595–1600, 2014.
- [25] G. W. Melenka, B. K. O. Cheung, J. S. Schofield, M. R. Dawson, and J. P.

- Carey, "Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures," *Compos. Struct.*, vol. 153, pp. 866–875, 2016.
- [26] J. Martínez, J. L. Diéguez, J. E. Ares, A. Pereira, and J. A. Pérez, "Modelization and structural analysis of FDM parts," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1431, no. 1, pp. 842–848, 2012.
- [27] ASTM D638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–15, 2004.

## BIBLIOGRAFÍA

ASTM. D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. ASTM International. American Society for Testing and Materials. 2004

GIBSON, I.; ROSEN, D. y STUCKER, B. Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing, 2nd ed. New York: Springer, 2015.

MELENKA, Garrett W., *et al.* Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures. En: Composite Structures, 2016, vol. 153, p. 866–875.

RODRÍGUEZ, José F.; THOMAS, James P. y RENAUD, John E. Mechanical behavior of acrylonitrile butadiene styrene fused deposition materials modeling. En: Rapid Prototyping Journal, 2003, vol. 9, no. 4., p. 219–230.