



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

*Análisis, modelado y predicción del desempeño estructural en tensión de piezas producidas por Fabricación por Filamento Fundido considerando diversos materiales y porcentajes de relleno.*

Tesis

para la obtención del grado de

**Doctor en Ingeniería Mecánica**

Presentada por

M.C. Jesús Alberto Díaz Zaragoza

Asesorada por

Dr. Hugo Iván Medellín Castillo

San Luis Potosí, SLP.

Enero del 2026





UASLP  
Universidad Autónoma  
de San Luis Potosí



FACULTAD DE  
INGENIERÍA

19 de junio de 2025

**M.S.c. JESÚS ALBERTO DÍAZ ZARAGOZA  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dr. Hugo Iván Medellín Castillo**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Doctor en Ingeniería Mecánica**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"Análisis, modelado y predicción del desempeño a tensión de piezas producidas por Fabricación por Filamento Fundido considerando diversos materiales y porcentajes de relleno"**

1. Introducción.
  2. Estado del arte del comportamiento estructural de piezas fabricadas por FFF.
  3. Análisis experimental a tensión de probetas FFF.
  4. Modelos de predicción de propiedades a tensión de piezas FFF.
  5. Análisis y discusión de resultados.
  6. Conclusiones
- Referencias.

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**A T E N T A M E N T E**



**DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN**  
**DIRECTOR.**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCION

[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria • CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336

Ccp. Archivo  
-bvlg

"1945-2025: 80 años formando profesionales de la Ingeniería en beneficio de la sociedad"



**UASLP**  
Universidad Autónoma  
de San Luis Potosí



FACULTAD DE  
**INGENIERÍA**



CENTRO DE  
**INVESTIGACIÓN  
Y ESTUDIOS  
DE POSGRADO**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**Área de Investigación y Estudios de Posgrado**

**DECLARACIÓN**

El presente trabajo que lleva por título:

Análisis, modelado y predicción del desempeño estructural en tensión de piezas producidas por  
Fabricación por Filamento Fundido considerando diversos materiales y porcentajes de relleno.

se realizó en el periodo 07 de 2021 a 12 de 2025 bajo la dirección del Dr. Hugo Iván Medellín Castillo.

**Originalidad**

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Jesús Alberto Díaz Zaragoza

*Dedicado a mi Esposa, por ser mi mayor fortaleza,*

*A mi Bebe,*

*A mis Padres,*

*A mis hermanos,*

*A mi Mamo y a mi Pulga.*

*A veces, la vida puede ser como un túnel oscuro. No siempre podrás ver la luz al final del camino, pero si sigues avanzando... llegarás a un lugar mejor.*

*-Tío Iroh*

## Resumen

La necesidad de poder materializar las ideas de diversos productos en prototipos físicos, personalizables y funcionales, además de poder producirlos de forma rápida y económica, fueron los principios base para el desarrollo de las tecnologías de manufactura aditiva (AM, del inglés Additive Manufacturing), también conocida como impresión 3D. En la actualidad, las tecnologías AM han evolucionado a pasos gigantes, yendo más allá de sus ideas y objetivos originales, y abriéndose paso en diferentes sectores de la industria manufacturera, la ciencia, la construcción, la industria alimenticia, la medicina, la industria cinematográfica, e inclusive en el deporte. Sin embargo, aunque su uso sigue siendo de gran importancia para el diseño y desarrollo de productos, he incluso es considerada como uno de los escalones más importantes en la evolución de la industria rumbo a la personalización de productos, la AM no ha podido alcanzar su plenitud en la industria debido a la falta, no de tecnología, si no de información y conocimientos técnicos. En particular, el comportamiento mecánico de las piezas fabricadas usando AM es incierto ya que está altamente influenciado por las condiciones del sistema de fabricación utilizado y por los parámetros de fabricación seleccionados.

El objetivo de la presente tesis es el estudio, entendimiento y predicción del comportamiento mecánico bajo tensión, específicamente, del módulo de elasticidad y la resistencia última a la tensión, de probetas fabricadas mediante la técnica de AM conocida como Fabricación por Filamento Fundido (FFF del inglés Fused Filament Fabrication), también conocida como Modelado por Deposición Fundida (FDM del inglés Fused Deposition Modeling). El estudio considera el uso de diversos materiales y porcentajes de relleno, así como la actualización y desarrollo de modelos analíticos para la predicción de estas propiedades. Lo anterior, con el fin de desarrollar conocimientos y herramientas que puedan ser utilizadas en el Diseño para Manufactura Aditiva (DfAM del inglés Design for Additive Manufacture), en particular para el proceso FFF. Además, con el propósito de comparar los resultados obtenidos durante este estudio con otros estudios sin importar las condiciones tanto de fabricación como de los materiales utilizados, se desarrolló una metodología para la fabricación y caracterización de piezas AM que muestra los resultados de las propiedades mecánicas de forma universal.

## **Abstract**

The need to materialize ideas for various products into physical, customizable, and functional prototypes, while producing them economically, were the basis for the development of additive manufacturing (AM) technologies, also known as 3D printing. Today, the AM technologies have evolved rapidly, far beyond their original concepts and goals, and have found applications in different industrial sectors, including manufacturing, science, construction, food industry, medicine, film industry, and even sports. However, despite their use and relevance in the design and development of products, and even being considered one of the key steps in industry evolution towards product customization, the AM technologies have not yet reached its full potential, not due to the lack of technology, but because of the lack of information and technical knowledge. One of the main challenges is that the mechanical behavior of the parts manufactured using AM remains uncertain because it depends on the conditions of the manufacturing system and the process parameters used in the fabrication of the AM part.

The objective of this thesis is to study the mechanical behavior under tensile stress, specifically the elastic modulus and the ultimate tensile strength, of AM specimens manufactured by the Fused Filament Fabrication (FFF) technique, also known as Fused Deposition Modeling (FDM). The study considers the use of various materials and infill percentage values, and the updating and development of analytical models to predict these properties. The aim is to develop knowledge and tools that can be used in the Design for Additive Manufacturing (DfAM) process, particularly for the FFF process. Furthermore, to compare the results obtained in this study with other research outcomes regardless of the manufacturing conditions and material quality used, a methodology for the fabrication and characterization of AM parts was developed to present the mechanical properties in a universalized way.

## Agradecimientos

Agradezco al Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (CIEP-FI) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) por haberme brindado las facilidades de utilizar sus instalaciones e infraestructura para la realización del presente trabajo.

Agradezco al SECIHTI por el apoyo económico brindado por medio de la beca de doctorado asignada y por los apoyos económicos brindados al CIEP, los cuales fueron requeridos para la realización de este trabajo.

Mi agradecimiento al Dr. Hugo Iván Medellín Castillo por su guía, asesoría y sobre todo por la paciencia brindada a lo largo de estos cuatro años. También, de gran manera, se agradece el consejo y apoyo brindado, fuera de lo académico, en las diferentes situaciones personales que pasé.

Agradezco a los profesores que me dieron cursos y a mis compañeros de laboratorio por su apoyo y paciencia a lo largo de estos años. En especial a Rodrigo y Sharon por escucharme y darme la mano cuando lo requerí.

Mis más sinceros agradecimientos a mis padres, porque sin ellos realmente no hubiera podido estar aquí. Gracias por darme la vida y por apoyar todas mis decisiones. Gracias por educarme y enseñarme a no rendirme nunca. Gracias por su infinita paciencia y por todo el trabajo que realizaron para que a mí y a mis hermanos nunca nos faltara nada.

A mis hermanos les agradezco por siempre estar ahí, por darme consejo y palabras de aliento cuando más lo necesite. Ustedes son y siempre serán un gran soporte en mi vida.

Y, por último, gracias a mi amor hermosa, Alejandra. Gracias por motivarme a extender mis alas más allá de la física, por apoyar mis locuras, por cuidarme, por siempre estar conmigo en las buenas y en las malas, por ser mi motor, y por darme todo tu amor. Gracias por llenar mi vida de color y luz. Gracias por hacer que a mi vida llegaran un par de bolitas de pelo que me alegran el día. Y también, muchísimas gracias porque junto a ti logré cumplir uno de mis sueños más grandes, convertirme en papá. Gracias por todo lo que me has dado, por todo lo que falta y por mucho más.

A todos, desde el fondo de mi alma, muchas gracias.

# Índice general

Dedicatoria .....	III
Resumen .....	IV
Abstract .....	V
Agradecimientos .....	VI
Índice general.....	VII
Índice de figuras .....	X
Índice de tablas .....	XII
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. <b>Manufactura aditiva (AM).....</b>	<b>1</b>
1.2. <b>Diseño para manufactura aditiva (DfAM) .....</b>	<b>2</b>
1.3. <b>Fabricación por filamento fundido (FFF).....</b>	<b>4</b>
1.3.1. <b>Sistema de extrusión .....</b>	<b>5</b>
1.3.2. <b>Plataforma de construcción.....</b>	<b>6</b>
1.3.3. <b>Estructura .....</b>	<b>7</b>
1.3.4. <b>Sistema de movimiento .....</b>	<b>7</b>
1.3.5. <b>Electrónica y placa base.....</b>	<b>8</b>
1.3.6. <b>Software de control: Laminador.....</b>	<b>8</b>
1.3.7. <b>Parámetros del proceso FFF .....</b>	<b>8</b>
1.3.8. <b>Materiales FFF .....</b>	<b>14</b>
1.4. <b>Comportamiento estructural de piezas FFF.....</b>	<b>14</b>
1.5. <b>Justificación .....</b>	<b>16</b>
1.6. <b>Hipótesis.....</b>	<b>16</b>
1.7. <b>Objetivo general.....</b>	<b>17</b>
1.8. <b>Objetivos específicos .....</b>	<b>17</b>
1.9. <b>. Organización de la tesis .....</b>	<b>17</b>
<b>Capítulo 2. Estado del arte del comportamiento estructural de piezas fabricadas por FFF.....</b>	<b>19</b>
2.1. <b>Hallazgos experimentales .....</b>	<b>19</b>
2.1.1. <b>PLA.....</b>	<b>20</b>
2.1.2. <b>ABS .....</b>	<b>21</b>
2.1.3. <b>PETG.....</b>	<b>22</b>
2.1.4. <b>TPU.....</b>	<b>23</b>

2.1.5.	Materiales compuestos.....	23
2.2.	Modelos numéricos .....	25
2.3.	Modelos analíticos y analítico-empíricos .....	28
2.4.	Análisis y discusión .....	30
<b>Capítulo 3.</b>	<b>Análisis experimental a tensión de probetas FFF .....</b>	<b>31</b>
3.1.	Metodología experimental.....	31
3.1.	Selección de materia prima .....	31
3.2.	Caracterización de la materia prima .....	33
3.3.	Diseño y fabricación de probetas.....	36
3.4.	Caracterización del relleno real.....	39
3.5.	Pruebas de tensión .....	40
3.6.	Universalización de los resultados.....	44
3.7.	Resultados.....	44
3.7.1.	Caracterización de la materia prima (filamentos) .....	44
3.7.2.	Caracterización del relleno real .....	45
3.7.3.	Propiedades a tensión de las probetas.....	46
3.7.4.	Universalización de resultados.....	50
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Modelos de predicción de propiedades a tensión de piezas FFF .....</b>	<b>55</b>
4.1.	Modelos de predicción analítico-empíricos .....	55
4.1.1.	Modelo de Gibson y Ashby.....	55
4.1.2.	Modelo Exponencial.....	56
4.1.3.	Modelo de Ley de mezclas .....	56
4.1.4.	Modelo de Eficiencia .....	57
4.1.5.	Modelo de Sprigg y Duchworth .....	58
4.1.6.	Modelo variante de Duckworth .....	58
4.1.7.	Modelo de Rice .....	58
4.1.8.	Modelo de Hasselman .....	59
4.2.	Generación y optimización de coeficientes para cada modelo y material.....	59
4.2.1.	Predicción para el PLA CP .....	63
4.2.2.	Predicción para el PLA FF.....	64
4.2.3.	Predicción para el ABS.....	65
4.2.4.	Predicción para el PETG.....	66
4.2.5.	Predicción para el TPU.....	67
4.2.6.	Predicción para el Al.....	68

4.2.7.	Predicción para el material Wood .....	69
4.2.8.	Predicción para el Brass .....	70
4.2.9.	Predicción para el Copper .....	71
<b>Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados .....</b>		<b>72</b>
5.1.	Resultados experimentales .....	72
5.1.1.	Análisis comparativo entre resultados de un mismo tipo de material.....	72
5.1.2.	Comparación entre resultados de diferentes estudios .....	73
5.1.3.	Comportamiento a tensión de múltiples materiales .....	77
5.2.	Resultados de los modelos de predicción .....	79
<b>Capítulo 6. Conclusiones.....</b>		<b>83</b>
<b>Referencias .....</b>		<b>87</b>
<b>Apéndice A. Fichas técnicas de los materiales .....</b>		<b>98</b>
Ficha técnica del material PLA CC .....		98
Ficha técnica del material PLA FF .....		99
Ficha técnica del material ABS .....		100
Ficha técnica del material PETG .....		101
Ficha técnica del material TPU .....		102
Ficha técnica del material Al.....		103
Ficha técnica del material Wood.....		104
Ficha técnica del material Brass .....		105
Ficha técnica del material Copper .....		106
<b>Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes. ....</b>		<b>107</b>

## Índice de figuras

<b>Figura 1.1.</b> Sistemas de extrusión de las tecnologías FFF.....	5
<b>Figura 1.2.</b> Diagrama de una plataforma de construcción para tecnologías FFF. ....	7
<b>Figura 1.3.</b> Ejemplos de orientaciones de construcción: a) planar, b) sobre el borde, c) vertical, y d) a un ángulo en específico. ....	10
<b>Figura 1.4.</b> Ejemplos de patrones de relleno: a) lineal, b) hexagonal y c) triangular.....	11
<b>Figura 1.5.</b> Ejemplos de ángulos de deposición: a) $0^{\circ}/90^{\circ}$ y b) $\pm 45^{\circ}$ .....	11
<b>Figura 1.6.</b> Ejemplos de porcentajes de relleno: a) 5%, b) 20%, c) 60% y d) 100%. ....	12
<b>Figura 1.7.</b> Diagrama de la composición de una probeta de tensión fabricada con una máquina FFF: a) vista superior y b) vista frontal, ambas respecto a la plataforma de construcción.....	13
<b>Figura 3.1.</b> Metodología experimental utilizada para conocer el comportamiento a la tensión de probetas FFF.....	31
<b>Figura 3.2.</b> Muestras de los filamentos seleccionados. ....	32
<b>Figura 3.3.</b> Ejemplo de la medición de: a) la masa, b) diámetro de una muestra de filamento.....	34
<b>Figura 3.4.</b> Ejemplo de un ensayo de tensión realizado a una muestra de filamento TPU: a) al comenzar el ensayo; y b) a punto de terminar el ensayo. ....	35
<b>Figura 3.5.</b> Curva esfuerzo-deformación de una muestra de filamento Copper.....	36
<b>Figura 3.6.</b> Probetas tipo I y IV utilizadas en la investigación.....	37
<b>Figura 3.7.</b> Fabricación de probetas en las máquinas: a) Flashforge <sup>TM</sup> Creator Pro; y b) Flashforge <sup>TM</sup> Guider IIs.....	38
<b>Figura 3.8.</b> Ejemplos de probetas fabricadas para cada tipo de material estudiado. ....	39
<b>Figura 3.9.</b> Medición de: a) dimensiones; y b) la masa de las probetas fabricadas.....	39
<b>Figura 3.10.</b> Prueba de tensión aplicada a: a) una probeta de TPU, y a b) un filamento de TPU.....	41
<b>Figura 3.11.</b> Tipos de fallas bajo tensión presentes en: a) filamentos, y b) probetas. ....	42
<b>Figura 3.12.</b> Curva esfuerzo-deformación de una probeta de cobre (copper) con 100% de relleno nominal. ....	43
<b>Figura 3.13.</b> Módulo de elasticidad vs.: a) relleno nominal y b) relleno real, para todos los materiales estudiados. ....	49
<b>Figura 3.14.</b> Resistencia última a la tensión vs.: a) relleno nominal y b) relleno real, para todos los materiales estudiados.....	50
<b>Figura 3.15.</b> Módulo elástico universalizado de las probetas FFF.....	53
<b>Figura 3.16.</b> <i>UTS</i> universalizado de las probetas FFF.....	53

<b>Figura 4.1.</b> Diagrama de flujo del algoritmo utilizado para el cálculo y optimización de los modelos analítico-empíricos para la predicción de propiedades de piezas FFF. ....	<b>61</b>
<b>Figura 5.1.</b> Propiedades bajo tensión de los materiales PLA: a) módulo de elasticidad no universalizado, b) módulo de elasticidad universalizado, c) <i>UTS</i> no universalizado, y d) <i>UTS</i> universalizado. ....	<b>73</b>
<b>Figura 5.2.</b> Comparación de las propiedades a tensión con respecto al porcentaje de relleno: a) módulo elástico normalizado de la literatura y el universalizado obtenido en la investigación y b) <i>UTS</i> normalizado de la literatura y el universalizado obtenido en la investigación. ....	<b>74</b>
<b>Figura 5.3.</b> Comparación de las propiedades a tensión normalizadas con respecto al porcentaje de relleno nominal: a) módulo elástico normalizado y b) <i>UTS</i> normalizado. ....	<b>76</b>
<b>Figura 5.4.</b> Comparación de las propiedades elásticas de los nueve materiales estudiados: a) módulo de elasticidad, b) módulo de elasticidad universalizado, c) resistencia última a la tensión, y d) resistencia última a la tensión universalizada. ....	<b>79</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.1.</b> La tabla muestra un resumen de los principios básicos, materiales, ventajas y desventajas de las siete categorías de AM. ....	2
<b>Tabla 3.1.</b> Características de los materiales FFF seleccionados. ....	32
<b>Tabla 3.2.</b> Parámetros de fabricación seleccionados para cada tipo de material. ....	38
<b>Tabla 3.3.</b> Resultados promedios y desviaciones estándar de la caracterización de filamentos. ....	45
<b>Tabla 3.4.</b> Resultados promedio del <i>RI</i> para cada grupo de probetas de material. ....	46
<b>Tabla 3.5.</b> Resultados promedio y desviación estándar del módulo elástico de las probetas. ....	46
<b>Tabla 3.6.</b> Resultados promedio y desviación estándar del <i>UTS</i> de las probetas. ....	47
<b>Tabla 3.7.</b> Valores promedio y desviaciones estándar del módulo elástico universalizado de las probetas FFF. ....	51
<b>Tabla 3.8.</b> Valores promedio y desviaciones estándar del <i>UTS</i> universalizado de las probetas FFF. ....	52
<b>Tabla 4.1.</b> Coeficientes óptimos para cada modelo analítico-empírico estudiado, según el material y la propiedad a predecir. ....	62
<b>Tabla 4.2.</b> Predicción del comportamiento elástico del material PLA CP mediante los ocho modelos analítico-empíricos. ....	63
<b>Tabla 4.3.</b> Predicción del comportamiento elástico del material PLA FF obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos. ....	64
<b>Tabla 4.4.</b> Predicción del comportamiento elástico del material ABS obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos. ....	65
<b>Tabla 4.5.</b> Predicción del comportamiento elástico del material PETG obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos. ....	66
<b>Tabla 4.6.</b> Predicción del comportamiento elástico del material TPU obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos. ....	67
<b>Tabla 4.7.</b> Predicción del comportamiento elástico del material Al obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos. ....	68
<b>Tabla 4.8.</b> Predicción del comportamiento elástico del material Wood obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos. ....	69
<b>Tabla 4.9.</b> Predicción del comportamiento elástico del material Brass obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos. ....	70
<b>Tabla 4.10.</b> Predicción del comportamiento elástico del material Copper obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos. ....	71

**Tabla 5.1.** Coeficientes promedios para cada modelo analítico-empírico estudiado, según el material y la propiedad a predecir. .... **80**

**Tabla 5.2.** Errores generales para cada modelo usando un coeficiente promedio para todos los materiales y usando el coeficiente óptimo de cada material y modelo. .... **80**

**Tabla 5.3.** Ranking de los modelos analítico-empíricos, en función de su error general. ... **81**

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1. Manufactura aditiva (AM)

La manufactura aditiva surgió a mediados de la década de 1980 y desde entonces ha evolucionado, expandido e innovado durante más de 40 años. Actualmente la AM forma parte de los diferentes sectores de la industria aeroespacial, automotriz, energética, la ciencia, la construcción, la industria alimenticia, la medicina, entre muchas otras áreas. Este gran alcance y desarrollo es debido a que, en lugar de remover material como en procesos de manufactura tradicional, los procesos AM forma piezas tridimensionales depositando el material justo y necesario para su fabricación. El proceso de fabricación AM comienza con el diseño digital de piezas tridimensionales a partir de ideas, bosquejos, o imágenes 2D como es el caso de imágenes médicas como las tomografías computacionales. Después, mediante el uso de un software conocido como “laminador”, el diseño original es dividido en un número de capas discretas, de tal forma que durante el proceso de fabricación se añade el material correspondiente a una primera capa base y una vez terminada, empieza a agregar el material correspondiente a la siguiente capa una encima de otra hasta crear la pieza entera. Este proceso ofrece la capacidad de construir piezas con cierta complejidad geométrica, que estén fabricados con diversos materiales y que sean altamente personalizables, es decir con propiedades que no son posibles mediante los procesos de fabricación sustractiva [1]. Algunos otros beneficios incluyen una prácticamente inexistencia de residuos, una alta reducción en los costos de producción debido a que no se requiere herramental [2], y la capacidad de seguir innovándose debido a su ilimitada complejidad geométrica [3].

En la actualidad existen diversos procesos de AM empleados comercialmente. Según la Organización Internacional de Normalización (ISO, del inglés International Organization for Standardization) y la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM, del inglés American Society for Testing and Materials) los procesos AM se clasifican en 7 categorías, como se muestra en la Tabla 1.1 [2], [4]. Estas categorías se separan en función del principio básico de fabricación que utilizan. Algunas de las categorías más reconocidas mundialmente son: Vat polymerization (VP), en donde el material de construcción en forma líquida es expuesto a radiación óptica focalizada para lograr solidificarlo en la forma requerida; y la Material Extrusion (ME), en la que el material de construcción es fundido y extruido.

**Tabla 1.1.** La tabla muestra un resumen de los principios básicos, materiales, ventajas y desventajas de las siete categorías de AM.

Categoría ASTM	Principio básico	Tecnología	Ventajas	Desventajas	Materiales
<b>Binder Jetting (BJ)</b>	Chorro de aglutinante líquido impreso en una fina capa de polvo	Tecnología de inyección de tinta 3D	- Libre de soportes - Libertad de diseño - Grandes volúmenes - Alta velocidad de impresión - Costo relativamente bajo	- Piezas frágiles - Propiedades mecánicas limitadas - Requiere de post procesado	- Polímeros - Cerámicos - Compuestos - Metales - Híbridos
<b>Directed Energy Deposition (DED)</b>	Enfoca energía térmica para fundir material durante la deposición	- Deposición Laser - Rayo de electrones - Fundido por arco de plasma - Ingeniería laser NetShaping (LENS)	- Alto grado de control de estructura de grano - Alta calidad de piezas - Excelente para aplicaciones de reparación	- Se requiere balanceas la calidad y la velocidad - Limitado tipo de materiales	- Metales - Híbridos
<b>Material Extrusion (ME)</b>	El material es selectivamente empujado a través del orificio de una boquilla	- Fabricación por Filamento Fundido	- Altamente extendido - Bajo costo - Escalable - Puede construir piezas completamente funcionales	- Anisotropía Vertical - No muy adecuado para detalles finos	- Polímeros - Compuestos
<b>Material Jetting (MJ)</b>	Deposición de gotas de material	- Tecnología de inyección de tinta 3D - Escritura de tinta directa	- Alta precisión de la deposición de gotas - Bajo desperdicio - Piezas con múltiples materiales - Multicolor	- Material soporte es requerido - Se usa principalmente fotopolímeros y resinas termoestables	- Polímeros - Cerámicos - Compuestos - Híbridos - Biológicos
<b>Powder Bed Fusion (PBF)</b>	Energía térmica funde una pequeña región de una cama de polvo del material de construcción	- Fundido por rayo de electrones - Sinterizado directo por fundido laser - Sinterizado por láser selectivo	- Relativo bajo costo - La cama de polvo actúa como una estructura integral de soporte - Amplio rango de opciones de materiales	- Relativamente lento - Limitaciones de tamaño - Se requiere de mucha potencia	- Metales - Cerámicos - Polímeros - Compuestos - Híbridos
<b>Sheet Lamination (SL)</b>	Hojas de materia son unidas	- Manufactura de objetos laminados - Consolidación por ultrasonido	- Alta velocidad - Bajo costo - Fácil manipulación del material	- Fuerza e integridad dependen del adhesivo usado - Requiere de post procesado	- Polímeros - Metales - Compuestos - Híbridos
<b>Vat Photopolymerization (VP)</b>	Fotopolimerización del polímero líquido dentro de un contenedor	- Estereolitografía - Procesado digital de luz	- Piezas grandes - Gran Precisión - Excelente acabado en superficies	- Limitado a fotopolímeros - Pobres propiedades mecánicas	- Polímeros - Cerámicos

## 1.2. Diseño para manufactura aditiva (DfAM)

Debido a su versatilidad, los procesos AM son utilizados para múltiples propósitos como el prototipado rápido, producción de herramental, la fabricación de productos con geometrías complejas o diseños personalizados en lotes bajos o medianos, como lo son: juguetes, partes automotrices, diversos componentes mecánicos, moldes para implantes, dispositivos médicos, componentes para el diseño de interiores, productos de belleza, drones, cuartos de hospital, viviendas y más [5] – [8]. Dado el éxito de las tecnologías AM en los diversos sectores, a lo largo de los años se ha buscado mejorar la accesibilidad, la facilidad de uso y

la eficiencia en la producción de piezas. Esto último es lo que da lugar a lo que se conoce como el Diseño para Manufactura Aditiva (DfAM).

El DfAM es el conjunto de reglas, metodologías, análisis y enfoques para maximizar el rendimiento del proceso y producto a desarrollar con AM. Lo anterior tomando en cuenta la factibilidad del diseño de geometrías complejas sin afectar el tiempo y costo, el uso de geometrías y piezas personalizadas para producción directa, y la fabricación de piezas para evitar problemas de ensamblaje. A lo largo del tiempo se han desarrollado múltiples reglas, metodologías y estrategias para aproximarse a las diversas situaciones que se pueden dar a la hora de fabricar una pieza con AM. Ejemplo de estas metodologías son los cuatro pasos de Vayre [9], donde se analizan las superficies funcionales, el volumen y comportamientos de la pieza; se proponen los materiales adecuados y formas aproximadas; se optimiza lo anterior considerando las especificaciones y limitantes de la fabricación AM; y por último se valida la manufacturabilidad. También se tiene las dos estrategias de Klahn [10], una donde se usa la AM como tecnología de producción y se puede enfocar en la personalización en masa de un producto; y la otra, donde se explotan las características de la AM para mejorar las funciones de un producto ayudándose de la libertad de diseño que brinda la AM. Ambas estrategias traen beneficios en rendimiento ya sea en costos y tiempos para lotes pequeños, o en términos de masa, eficiencia y cantidad de piezas en el ensamblaje.

Otro ejemplo es la guía de DfAM de Leutenecker-Twelsiek [11], la cual se basa en tres áreas: las características del proceso, los principios de diseño, y las reglas de diseño. La primera describe las características condicionadas por el proceso que tienen impacto en el diseño de las piezas AM. La segunda es un instructivo paso a paso para incrementar la calidad de la pieza o reducir los costos de fabricación, y los cuales se basan en las experiencias de los diseñadores que escribieron los instructivos. Y la tercera son un conjunto de reglas que dependen del proceso de fabricación elegido, el material a usar, la máquina y los parámetros de la máquina, los cuales pueden incluir condiciones como la orientación de la pieza.

Con el pasar de los años las tecnologías AM se han seguido desarrollado y mejorando, permitiendo nuevas aproximaciones para resolver los principales problemas de las técnicas AM. En la actualidad, algunas propuestas de DfAM proponen el uso de ciertas tecnologías AM en específico, dependiendo de las dimensiones de las piezas finales. Si las dimensiones del producto están en la escala de micro o nanómetros se usan técnicas AM avanzadas para fabricar piezas metálicas completamente funcionales, como lo es la fotopolimerización mediante dos fotones [12], [13]. Si las piezas a fabricar son de tamaños más convencionales se tienen dos propuestas, las granjas AM o los sistemas multicolor. El primero busca mejorar los tiempos de producción al diseñar piezas modulares y haciendo que cada parte de la pieza sea fabricada por una o múltiples máquinas dedicadas, una vez que la parte es fabricada un brazo robótico separa el producto de la cama de fabricación y lo lleva a la siguiente etapa del proceso dependiendo de la técnica AM utilizada [14]. El segundo es una modificación del

sistema de extrusión de las máquinas convencionales que les permiten usar materias primas de diversos colores en simultaneo con el fin de reducir el tiempo de postproceso dedicado a la pintura [15]. Por último, si el tamaño de la pieza no modulada es superior a 50 cm y su utilidad final no requiere de tolerancias críticas se utilizan máquinas con volúmenes de trabajo superiores al metro cúbico, las cuales para mejorar los tiempos de producción utilizan la técnica de fabricación granulada fundida (FGF, del inglés Fused granulated fabrication), en donde como materia prima se usan pellets de diferentes materiales [16], permitiendo de esta forma la fabricación de muebles, escaleras, o inclusive edificios.

### 1.3. Fabricación por filamento fundido (FFF)

El proceso AM más extendido y utilizado es la fabricación por filamento fundido (FFF), también conocido como modelado por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés). El proceso FFF es una técnica AM perteneciente a la categoría Material Extruido (ME, del inglés Material Extrusion) de la ASTM, la cual utiliza como materia prima rollos de filamento de materiales principalmente poliméricos. Esta técnica fue desarrollada y patentada en 1989 por S. Scott Crump, y comercializada en 1990 por Stratasys [17]. El proceso FFF puede fabricar modelos tridimensionales a partir de modelos digitales mediante la deposición selectiva del filamento fundido en capas hasta completar la pieza en su totalidad.

Una de las principales ventajas de la técnica FFF, en particular con el resto de las técnicas y procesos AM, es que la fabricación FFF de las piezas no requiere de procesos ópticos o químicos complejos para su uso, simplemente se funde la materia prima, que usualmente requiere de temperaturas por debajo de los 300°C, y mediante un sistema mecánico se deposita el material correspondiente a cada capa de construcción. La simpleza de la técnica FFF permite que las piezas terminadas puedan ser manipuladas para su correcto posprocesamiento o ensamblaje sin requerir de procesos extras a la deposición del material, convirtiendo a esta técnica en una de las más rápidas y seguras de usar. Además, gracias a las mejoras tecnológicas aplicadas a la FFF, actualmente se cuenta con una gran variedad de máquinas o impresoras de filamento que permiten cubrir casi todos los requerimientos técnicos necesarios para la correcta fabricación de las piezas. Entre estos requerimientos se encuentran: presupuesto económico, control de temperatura tanto de cama como de extrusor en función del material, carcasas o fundas térmicas con sistemas de filtración de gases para uso de materiales tóxicos en interiores, altas velocidades de impresión, reducción del posprocesamiento al contar con extrusión multicolor o de múltiples materiales, banda para fabricaciones longitudinales o en masa, modificación del volumen de trabajo para producciones a mayor escala, entre muchas otras. A esto se le suma que, gracias a los avances en la ciencia de materiales, hoy en día la FFF cuenta con uno de los catálogos más grandes de tipos de materias primas o filamentos de entre todos los procesos AM, permitiendo su uso en una gran variedad de disciplinas, sectores industriales y en múltiples áreas de investigación. Incluso, la FFF tuvo un gran impacto durante la pandemia global del nuevo

Coronavirus (Covid-19) al producir en masa todo tipo de piezas y herramientas necesarias para la seguridad tanto del equipo médico como de los pacientes; algunos de estos productos fueron válvulas de oxígeno, piezas de los ventiladores médicos, producción de mascarillas, válvulas respiratorias, entre muchas otras [18].

En la actualidad existen diversos sistemas FFF, los cuales tienen diversas características como la rapidez de fabricación, fabricación en serie, o el uso de filamentos de múltiples colores o materiales. Estas características modifican, mejoran o expanden las funciones de los sistemas elementales que definen a una máquina o sistema FFF. Los sistemas elementales representativos de todas las máquinas FFF son [19]: el sistema de extrusión, la plataforma de construcción, la estructura, el sistema de movimiento y la electrónica, y la placa base.

### 1.3.1 Sistema de extrusión

El sistema de extrusión es la parte primordial de la tecnología FFF, ya que es lo que permite fundir y extruir el filamento que será depositado para realizar la fabricación de piezas. Este sistema se divide en tres partes: el mecanismo de extrusión, el hotend o fusor, y la boquilla. En la Figura 1.1 se muestra un diagrama de la composición del sistema de extrusión.

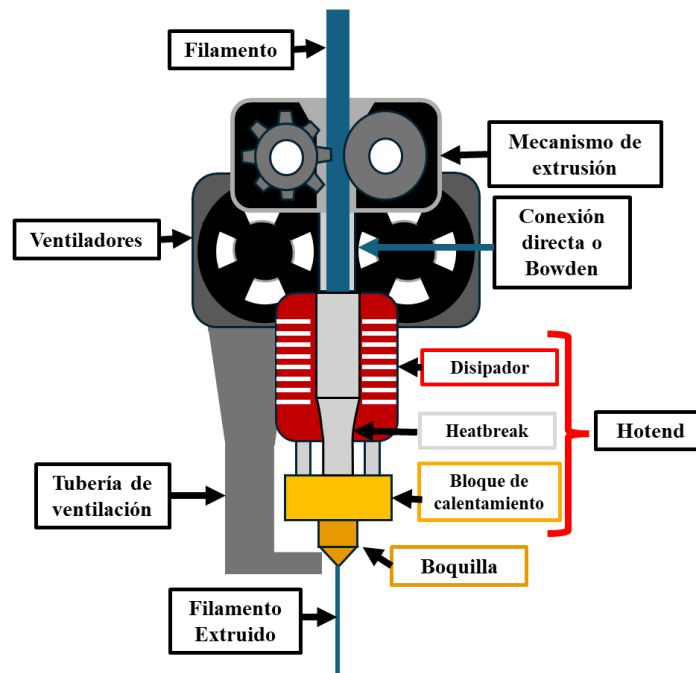


Figura 1.1. Sistemas de extrusión de las tecnologías FFF.

El mecanismo de extrusión se encarga de suministrar el filamento al hotend. Esto se realiza mediante el uso de dos ruedas opuestas, en donde al menos una de ellas presenta una

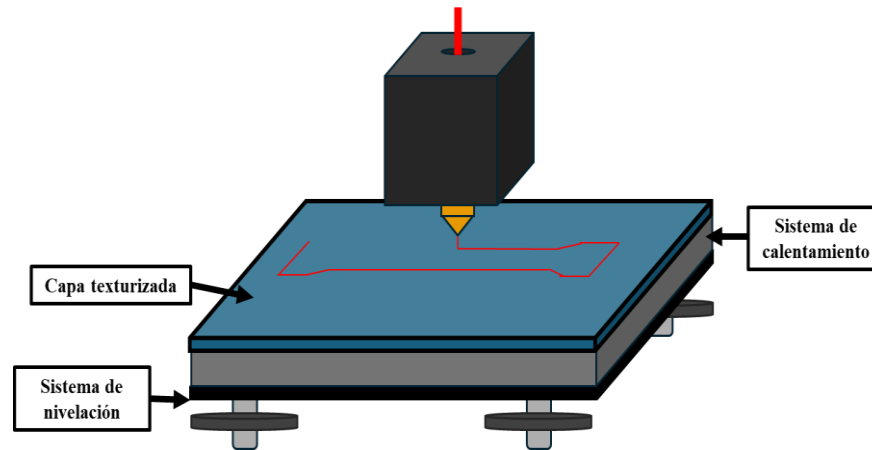
superficie estriada o rugosa, esta rueda rugosa gira sobre su eje por medio de un motor, lo cual permite la tracción del filamento. Este sistema usualmente se puede encontrar en dos configuraciones: de extrusión directa, es decir que el hotend se encuentra en seguida del mecanismo de extrusión; o de tipo bowden, en donde el mecanismo de extrusión y el hotend se encuentran separados a una cierta distancia y conectados mediante un tubo de teflón.

El hotend o fusor, es el sistema que se encarga de calentar, fundir y enfriar el filamento recién extruido. Este sistema se compone por: 1) un disipador y su correspondiente ventilador, el cual protege al mecanismo de extrusión de las altas temperaturas que se llegan a alcanzar, y ayuda a que la transición del filamento a su estado fundido no sea muy abrupta; 2) el heatbreak, que conecta el extremo frío (disipador) con el extremo caliente (bloque de calentamiento); 3) el boque de calentamiento, el cual se compone de una resistencia que alcanza la temperatura de fundición del filamento y un termistor que permite vigilar esta temperatura; y por último, 4) un ventilador de capa, el cual transmite un flujo de aire a temperatura ambiente al material recién extruido para ayudar a su solidificación.

La última parte del sistema de extrusión es la boquilla, la cual es una pieza metálica capaz de soportar la temperatura de fundición del filamento, y que posee una estructura interna con forma cónica, mediante la cual el filamento extruido termina con un tamaño de diámetro menor que el que posee originalmente. Las boquillas se pueden encontrar con diferentes tamaños de diámetro de extrusión que van desde 0.1 mm hasta 1 mm, donde la boquilla estándar tiene un diámetro de extrusión de 0.4 mm. Además de los diferentes diámetros de extrusión, también se pueden encontrar boquillas de diferentes materiales, esto en función del material del filamento, ya que ciertos filamentos requieren de temperaturas más altas, o producen un mayor daño por abrasión. El latón es el material más común para las boquillas FFF.

### **1.3.2 Plataforma de construcción**

La plataforma de construcción es la zona en la cual se depositan las capas de material para fabricar las piezas. Esta plataforma se conforma de tres partes: 1) el sistema de nivelación, el cual se encarga de ajustar de forma homogénea la distancia entre la boquilla y todas las zonas de la plataforma permitiendo una correcta deposición de las capas; 2) el sistema de calentamiento, el cual sube la temperatura de la plataforma para asegurar la adherencia del filamento extruido y evitar posibles problemas generados por efectos térmicos; y 3) la capa texturizada, la cual mediante fricción provee la adherencia del filamento extruido a la plataforma. Esta capa texturizada puede estar fija a la plataforma o puede ser magnética para ser retirada de la máquina y acelerar el enfriamiento de la pieza. En la Figura 1.2 se muestra un ejemplo de una plataforma de construcción.



**Figura 1.2.** Diagrama de una plataforma de construcción para tecnologías FFF.

### 1.3.3 Estructura

La estructura es la base sobre la cual se ensamblan el resto de las componentes de la máquina FFF. En general, la estructura se compone por una carcasa o marco generado a partir de perfiles o varillas, sobre el cual se ensambla una cobertura externa que sella el volumen de construcción del ambiente, permitiendo mantener una temperatura de trabajo cuasi constante, lo cual evita problemas o errores de fabricación que se generan por gradientes de temperatura. También sobre la estructura se colocan los ejes de movimiento que permiten que la deposición se mueva tridimensionalmente dentro de su volumen de trabajo. En función de la configuración de estos ejes, las máquinas se pueden dividir en tres categorías: 1) cartesianas, esto es cuando la plataforma de construcción puede moverse de adelante hacia atrás (eje Y) y el sistema de extrusión se mueve de izquierda a derecha (eje X), y sobre la vertical (eje Z); 2) CoreXY, esto es cuando la plataforma de construcción se mueve a lo largo del eje Z, y el sistema de extrusión a lo largo de los ejes X y Y; y por último, 3) la configuración Delta, en donde la plataforma de fabricación se mantiene quieta y, gracias a una configuración de motores y brazos, el sistema de extrusión se mueve en todo el volumen de trabajo.

### 1.3.4 Sistema de movimiento

El sistema de movimiento se compone por todos los motores a pasos, correas, ruedas, tuercas excéntricas, tornillos sinfín y demás componentes que permiten el movimiento de todos los elementos de la máquina FFF. Todos estos componentes requieren tanto de revisiones rutinarias, como de mantenimientos preventivos para asegurar el correcto funcionamiento de la máquina. Inclusive, en ocasiones es necesario cambiar algunas piezas dependiendo de la temperatura que el filamento requiera.

### 1.3.5 Electrónica y placa base

La electrónica se compone por todos los circuitos, dispositivos y componentes eléctricos que controlan y gestionan todas las funciones de la máquina FFF, desde su alimentación, pasando por el control de los múltiples motores, los sensores, los Arduinos, etc. La placa base, es el cerebro de la máquina, es la que se encarga de recibir la información de la configuración de parámetros y pasos necesarios para la fabricación de la pieza, y se encarga de gestionar la aplicación de esta información.

### 1.3.6 Software de control: Laminador

Debido a la masificación de máquinas FFF que existen en la actualidad, también existen una gran variedad de softwares de control o laminadores; sin embargo, la gran mayoría funciona de forma muy similar. En términos generales, el laminador se puede definir como un software que permite establecer los parámetros de construcción para la fabricación de la pieza. En función de esta configuración de parámetros, el laminador genera las instrucciones para que el sistema de control de la máquina FFF las reciba y ejecute para la fabricación de la pieza.

### 1.3.7 Parámetros del proceso FFF

Los parámetros del proceso o construcción FFF se refiere a todas las funciones y variables que se requieren configurar para fabricar las piezas en el proceso FFF. Los valores de los parámetros de construcción pueden afectar en mayor o menor medida al tiempo de fabricación, la calidad superficial, el consumo de material, la masa y las propiedades mecánicas de la pieza que se esté fabricando. Los parámetros del proceso FFF pueden ser divididos en dos grupos: parámetros dependientes del material del filamento y parámetros geométricos. Actualmente existe una inmensa variedad de parámetros de construcción que pueden ser controlados por el software laminador, pero a continuación solo se presentaran los parámetros de mayor relevancia, y que son necesarios para el entendimiento del presente trabajo de tesis doctoral.

#### **Parámetros dependientes del material del filamento**

Se refiere a los parámetros cuyos valores dependen del material del filamento utilizado en la fabricación de la pieza. Para el proceso FFF estos parámetros son:

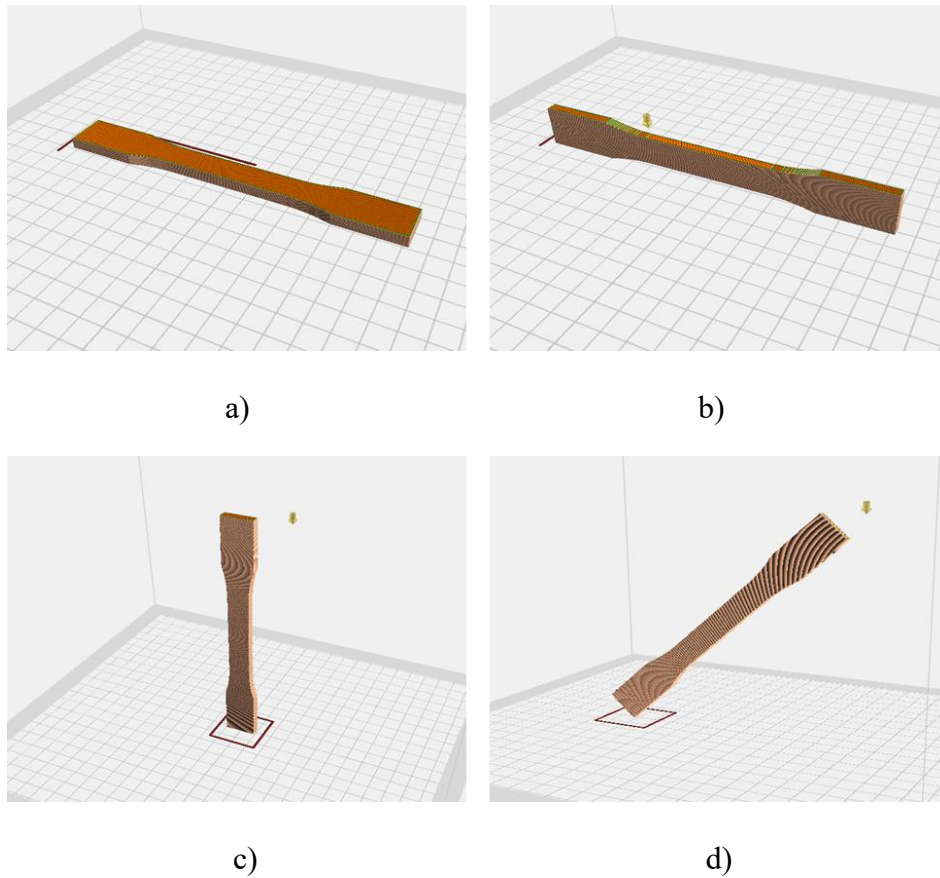
- *Temperatura de extrusión:* Es la temperatura del hotend a la cual el material del filamento debe alcanzar la temperatura de fusión.

- *Temperatura de cama:* Es la temperatura a la cual la plataforma de construcción se calienta para evitar problemas de adherencia entre la plataforma y el filamento extruido.
- *Velocidad de extrusión:* Es la velocidad a la cual se extruye el filamento y a la que se mueve el sistema de extrusión en el volumen de trabajo mientras la extrusión se lleva a cabo. Esta velocidad debe permitir un flujo de material correcto para facilitar la adhesión a la plataforma y entre capas, además de evitar adelgazamientos del grosor de la línea de deposición.
- *Velocidad de desplazamiento:* Es la velocidad a la cual se mueve el sistema de extrusión en el volumen de trabajo cuando no está extruyendo material. Esta velocidad tiene que ser compatible con el enfriamiento y solidificación del material extruido, ya que una velocidad muy rápida produce deformaciones debido a que el material aún no se solidifica lo suficiente, y una velocidad muy lenta produce mala adherencia entre capas ya que el material está demasiado solidificado.
- *Longitud y velocidad de retracción:* La retracción es el proceso mediante el cual el motor de extrusión entra en reversa para evitar que el material salga de la boquilla cuando el sistema de extrusión termina una capa y se reposiciona para comenzar la siguiente capa. Por lo tanto, la longitud de retracción es que tanta longitud de filamento regresa, y la velocidad de retracción es que tan rápido regresa este material. Este parámetro depende del material del filamento ya que una configuración de retracción incorrecta produce atascamientos de material dentro de la boquilla, sub-extrusiones, o super-extrusiones en la pieza. Estos problemas producen mala calidad superficial de la pieza, además de debilitar sus propiedades mecánicas.

### Parámetros geométricos

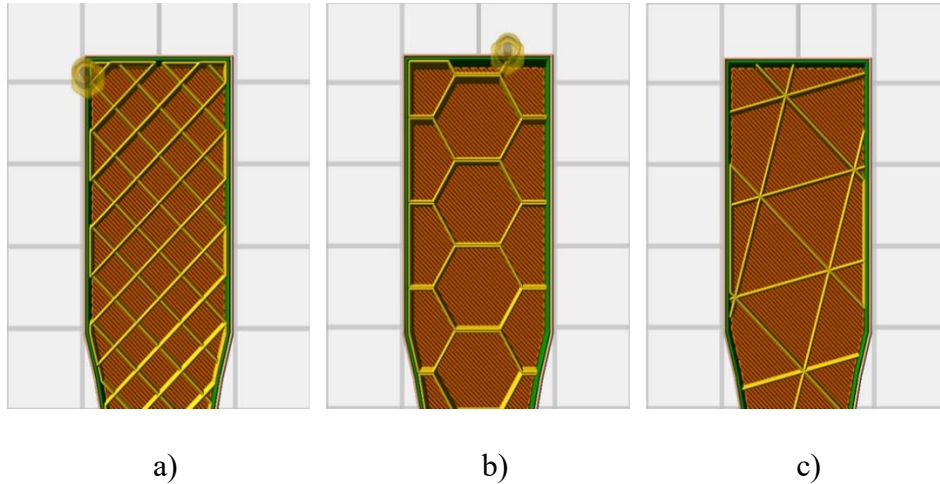
Los parámetros geométricos no dependen del material del filamento, pero pueden ser alterados para modificar el tiempo de fabricación, la cantidad de material utilizado, la solidez de la pieza, el número de capas ascendentes, entre otros motivos. Estos parámetros son:

- *Orientación de construcción:* Es la orientación de la pieza respecto a la plataforma de fabricación en el que se dispone el crecimiento de las capas. La orientación de construcción evita o favorece el uso de soportes durante la construcción, modifica el número de capas y por lo tanto el tiempo de fabricación, y a su vez afecta las propiedades mecánicas. En la Figura 1.3 se presenta un ejemplo de la orientación de construcción planar (X), sobre el borde (Y), vertical (Z), y a un ángulo particular, de una probeta para ensayos a tensión.



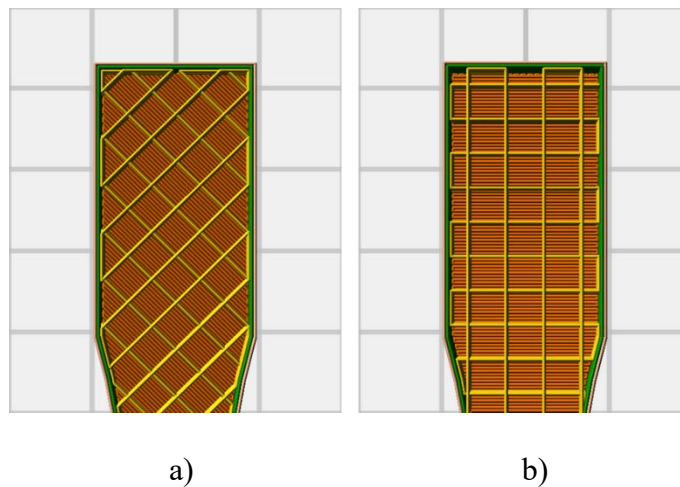
**Figura 1.3.** Ejemplos de orientaciones de construcción: a) planar, b) sobre el borde, c) vertical, y d) a un ángulo en específico.

- *Patrón de relleno:* Es la distribución geométrica que tendrá el interior de la pieza. Existe una gran variedad de patrones de relleno entre los que destacan el lineal, el hexagonal y el triangular, que son los más utilizados. En la Figura 1.4 se muestra un ejemplo de estos tres patrones de relleno.



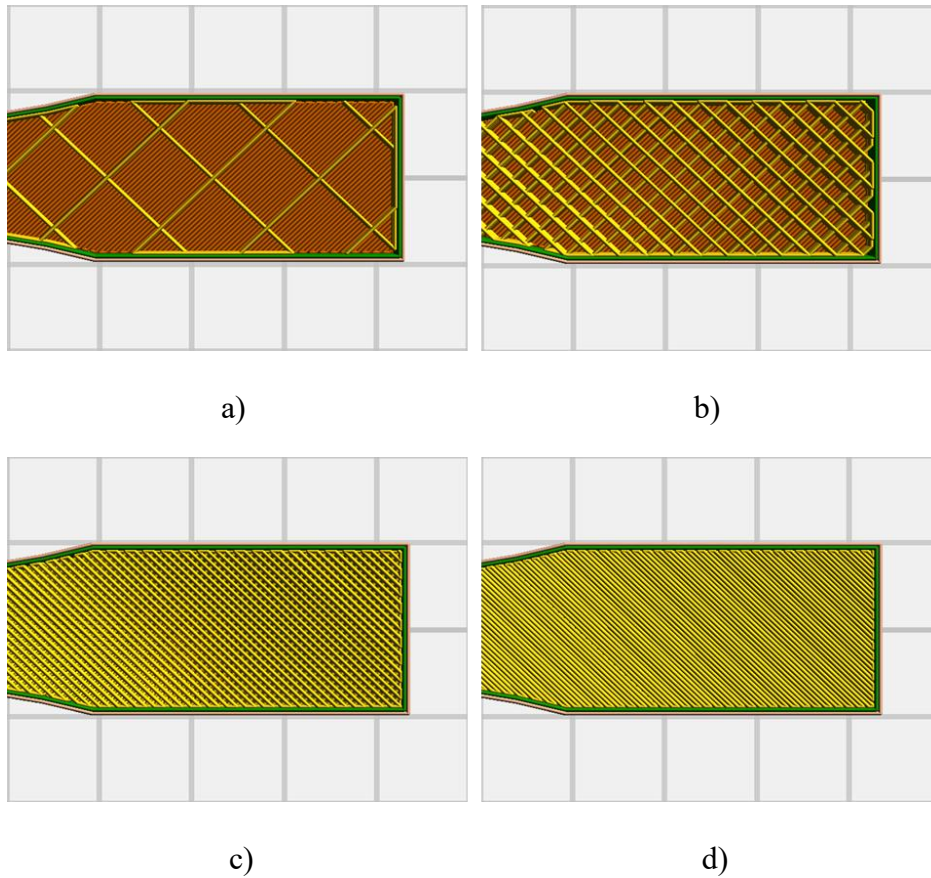
**Figura 1.4.** Ejemplos de patrones de relleno: a) lineal, b) hexagonal y c) triangular.

- *Ángulo de deposición:* Algunos patrones de relleno como el lineal permiten modificar el ángulo de deposición al cual se deposita el material en el interior de la pieza. Los ángulos de deposición más comunes para el patrón de relleno lineal son:  $0^\circ/90^\circ$  y  $\pm 45^\circ$ . En la Figura 1.5 se puede observar un ejemplo de estas dos configuraciones de ángulos de deposición.



**Figura 1.5.** Ejemplos de ángulos de deposición: a)  $0^\circ/90^\circ$  y b)  $\pm 45^\circ$ .

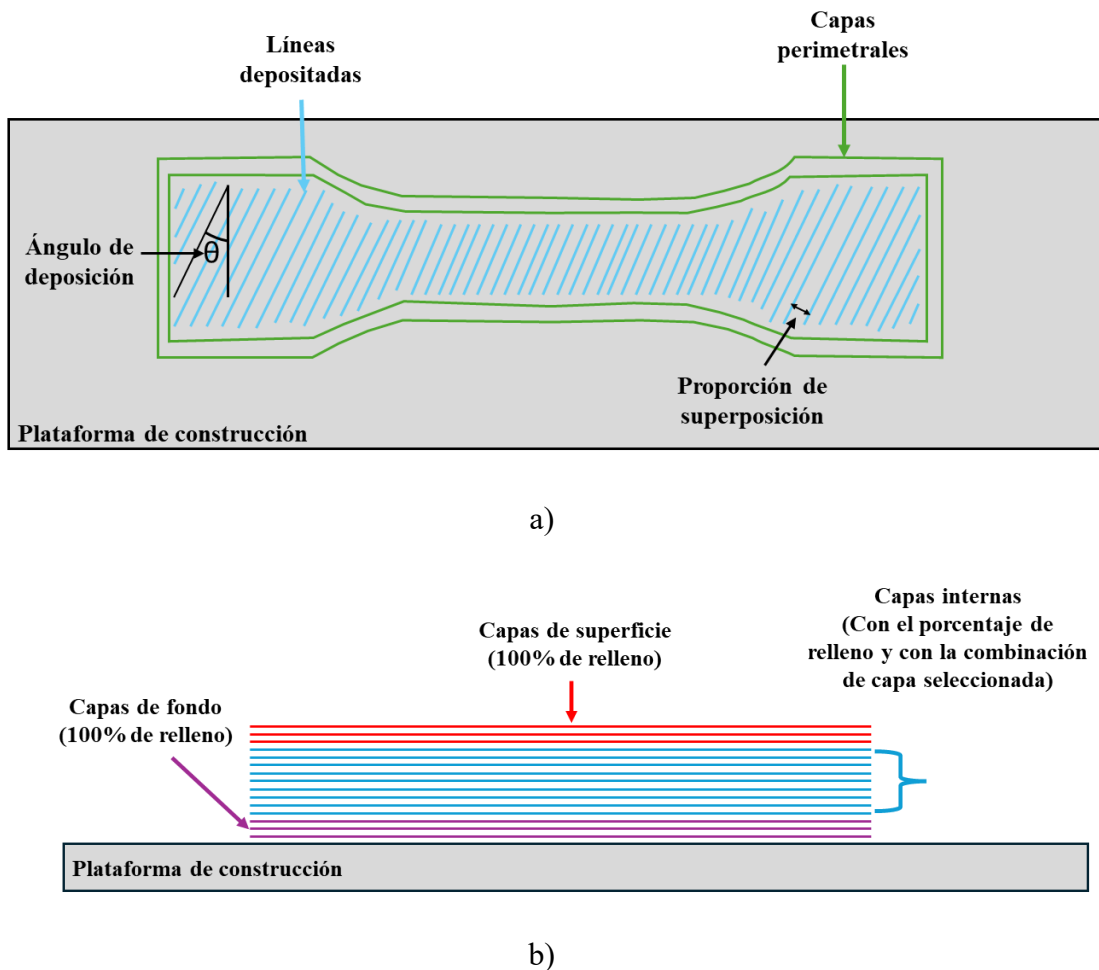
- *Porcentaje de relleno:* Es un valor nominal de que tan denso es el interior de la pieza. Tiene la particularidad de que el relleno del 100% nominal se alcanza solo con el patrón lineal, por lo que al 100% de relleno todos los patrones convergen en el patrón lineal. En la Figura 1.6 se presentan muestran ejemplos de 4 porcentajes de relleno diferentes.



**Figura 1.6.** Ejemplos de porcentajes de relleno: a) 5%, b) 20%, c) 60% y d) 100%.

- *Espesor de capa:* Es la distancia que sube el sistema de extrusión entre la deposición de una capa y la siguiente capa.
- *Capas perimetrales:* Las capas perimetrales marcan el contorno de la pieza en función de la orientación de construcción establecida. Un mayor número de capas perimetrales cohesionan la pieza y permiten un mejor tratamiento de post-fabricación.
- *Proporción de superposición o distancia entre líneas:* Este parámetro hace referencia a la distancia entre los ejes centrales de dos líneas de material depositado.
- *Capas de fondo y superficie:* Se refiere al número de capas que van al inicio (fondo) y final (superficie) de cada sección de volumen de la pieza a fabricar. Estas capas tienen la particularidad de siempre estar construidas con un porcentaje de relleno nominal del 100%.

En la Figura 1.7 se puede apreciar el diagrama de la composición de una probeta de tensión fabricada en una máquina FFF. En esta figura se muestran los parámetros espesor de capa, capas perimetrales, proporción de superposición, capas de relleno y capas de fondo y superficie.



**Figura 1.7.** Diagrama de la composición de una probeta de tensión fabricada con una máquina FFF: a) vista superior y b) vista frontal, ambas respecto a la plataforma de construcción.

- *Relleno combinado*: Es la capacidad de colocar capas de relleno de forma continua, es decir una encima de otra, o usar la configuración por defecto de ahorro de material. En esta configuración se fabrica la pieza depositando una capa de únicamente líneas perimetrales, seguida de una capa con líneas perimetrales y relleno, y así sucesivamente hasta completar las capas internas de la pieza.

### 1.3.8 Materiales FFF

En la actualidad, y gracias a los avances en la ciencia de los materiales, existen una gran variedad de materiales disponibles de filamentos para máquinas FFF. Estos filamentos pueden tener diferentes diámetros, pero actualmente el diámetro más común es 1.75 mm.

La gran diversidad de materiales de filamentos FFF se puede clasificar en 4 grupos:

- 1) Materiales comunes como el Ácido Poliláctico (PLA, del inglés Polylactic acid) y el Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS del inglés Acrylonitrile butadiene styrene).
- 2) Materiales menos comunes como el Tereftalato de polietileno glicol (PETG, del inglés Polyethylene terephthalate glycol), y Polioximetileno (POM);
- 3) Materiales flexibles como el Poliuretano termoplástico (TPU, del inglés Thermoplastic Polyurethane).
- 4) Materiales experimentales como los compuestos. Estos últimos son materiales que cuentan con una matriz base de algún material común como el PLA y son dopados con polvos, fibras o granos de algún otro material con el fin de brindar nuevas propiedades a la matriz o modificar las ya existentes.

El uso de cada uno de estos materiales conlleva el reto de encontrar la configuración de parámetros de fabricación adecuada que permita fabricar las piezas de manera satisfactoria. Sin embargo, esto solo es el primer paso, ya que una vez fabricada la pieza lo que importa es saber si cumplirá con los requerimientos estructurales necesarios para su función en específico.

## 1.4. Comportamiento estructural de piezas FFF

Uno de los principales retos de la AM, y de mayor trascendencia, es eliminar la incertidumbre en relación a las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la fabricación de las piezas y el comportamiento mecánico estructural de las piezas fabricadas. Las propiedades mecánicas de los materiales se pueden caracterizar mediante las diversas pruebas y relaciones esfuerzo-deformación que existen para filamentos, mientras que el comportamiento estructural hace referencia a las mismas relaciones de esfuerzo y deformación, pero aplicadas a una pieza que posee una variedad de geometrías externas e internas específicas. En el caso de las piezas fabricadas mediante FFF estas geometrías hacen referencia, en parte, a los parámetros de fabricación utilizados.

El comportamiento mecánico estructural de las piezas se puede obtener mediante diversos ensayos en los cuales las piezas fabricadas son sometidas a esfuerzos, comúnmente, de tensión, compresión, flexión, torsión, corte, impacto, entre otros, y los resultados obtenidos

de estos ensayos se comparan con las deformaciones obtenidas tras la aplicación de la fuerza. En el caso de la FFF, este comportamiento estructural sufre ajustes debidos a las características del proceso, ya que, a diferencia de la manufactura tradicional, en FFF el material es fundido y parcialmente homogeneizado antes de empezar a extruirse capa por capa, lo cual resulta en piezas dependientes de la temperatura y el tiempo de enfriamiento, además de contar con la presencia de anisotropías y concentraciones de esfuerzos residuales [20]. A esto se le suma que el material es extruido y depositado siguiendo los pasos establecidos por los parámetros de construcción seleccionados, los cuales dependen de la pieza, el material y las preferencias individuales de cada diseñador y operador. De esta manera, cada parámetro de construcción establecido contribuye a la generación de anisotropías, cambios en la densidad y diversas morfologías en la microestructura interna de las piezas [21]. Todo lo anterior termina afectando en mayor o menor medida las propiedades finales de las piezas, las cuales resultan ser menores que las propiedades del filamento [21]. Adicionalmente, también se ha descubierto que las propiedades finales de las piezas se verán afectadas por las condiciones de manufactura, como lo son: las condiciones atmosféricas, la máquina utilizada, la calidad del filamento, el añejamiento del rollo de filamento, o si el rollo de filamento se encuentra recién empezado o ya con una menor cantidad de vueltas [22]. Debido a todos estos factores, la comparación entre los resultados obtenidos a partir de ensayos mecánicos realizados a piezas FFF de diversas fuentes de la literatura científica se reduce a tendencias de comportamiento de las curvas esfuerzo deformación obtenidas para cada material y cada pieza, y no a valores en específico de dichos comportamientos. Al no existir valores de referencia para todos los posibles casos que pueden surgir de la combinación de materiales para FFF, máquinas de fabricación FFF y parámetros de construcción, cada resultado obtenido de realizar ensayos mecánicos a piezas FFF es único, y por lo tanto resulta altamente complicado predecir el valor que obtendrá cada pieza antes de ser fabricada y ensayada.

A lo largo de los años han surgido diversos modelos y métodos que han tratado de explicar y predecir el comportamiento mecánico estructural de las piezas fabricadas con la técnica FFF. En términos generales se pueden agrupar estos modelos o métodos en tres tipos: experimentales, numéricos y analíticos. De estos tres grupos los más usados o desarrollados son los experimentales y los numéricos. Los modelos analíticos, al ser mucho más complicados de desarrollar correctamente, se han dejado de lado aun a pesar de poder ser mucho más eficiente que los otros dos métodos, ya que no requiere la misma magnitud de consumo de recursos económicos y computacionales.

## 1.5. Justificación

En la actualidad existe una gran diversidad de tecnologías FFF, softwares de control de estas y materiales de fabricación. Cada máquina cuenta con volúmenes de trabajo bien delimitados y es capaz de usar solo aquellos materiales cuyos requerimientos de fabricación (diámetro del sistema de extrusión, tipo de boquilla, temperatura de extrusión, temperatura de cama, velocidades de fabricación, configuración de retracción, configuración de ventilación, entre otros) estén dentro del rango de trabajo de la máquina. Además, cada software de control tiene acceso solo a un cierto número específico de parámetros de fabricación y a un rango de control de estos. Todo esto produce que cada sistema FFF (la suma de la tecnología, software de control y material usado), tenga características muy específicas, lo cual impide la creación de una configuración estandarizada de parámetros de fabricación para probetas que sea útil en todos los casos. Asimismo, el casi nulo interés por parte de la comunidad científica de estudiar el comportamiento mecánico del material justo antes de ser utilizado en la fabricación de las piezas, y a la pobre cantidad y variedad de materiales para FFF estudiados bajo un mismo enfoque de trabajo, impide establecer una caracterización completa de cada pieza. A esto se le suma la complejidad y altos costos de los sistemas de computación necesarios para el uso de modelos numéricos de predicción de propiedades y la sobre especialización de estos, que al ser muy eficientes en predecir un caso en particular no genera resultados aplicables a todos los demás casos. Todo lo anterior delata el principal problema de la FFF, el cual no es la falta de nuevas tecnologías o de nuevos materiales, si no la ausencia de conocimientos respecto al comportamiento mecánico estructural de las piezas FFF que utilicen una amplia variedad de materiales con modificaciones en los mismos parámetros de construcción y el comportamiento mecánico de los respectivos filamentos utilizados en la fabricación. Además, la falta de modelos de predicción del comportamiento mecánico de piezas FFF que no requieran de altos costos económicos y computacionales, y que sean de fácil uso, termina manteniendo a la FFF fuera de las metodologías de diseño habituales, y por lo tanto limitando su uso a solo prototipos visuales, y o a piezas muy particulares.

## 1.6. Hipótesis

Se plantea la hipótesis de que es posible entender de manera más completa el comportamiento mecánico estructural a tensión de piezas FFF, mediante la caracterización experimental de piezas FFF fabricadas con diversos materiales y porcentaje de relleno, así como de los filamentos utilizados en la fabricación. De igual manera se plantea que es posible utilizar este comportamiento experimental para predecir el comportamiento bajo tensión de las piezas FFF mediante modelos analíticos de predicción.

## 1.7. Objetivo general

Caracterizar, analizar y predecir el comportamiento mecánico bajo tensión de piezas FFF fabricadas con diversos materiales y porcentaje de relleno.

## 1.8. Objetivos específicos

Los objetivos específicos del proyecto son:

1. Caracterizar y analizar experimentalmente tanto el comportamiento bajo tensión de las piezas producidas mediante la técnica FFF, considerando diversos materiales y porcentajes de relleno, como los filamentos utilizados en la fabricación de dichas piezas justo antes de ser utilizados.
2. Analizar y ajustar diversos modelos analíticos empíricos para predecir las propiedades a la tensión de piezas fabricadas por FFF considerando diferentes materiales y porcentajes de relleno.
3. Evaluar el desempeño y precisión de los modelos analíticos para la predicción de propiedades a la tensión de componentes FFF mediante la comparación con los resultados experimentales.

## 1.9. Organización de la tesis

El resto de la tesis está organizado de la siguiente manera:

- Capítulo 2: este capítulo es una breve, pero completa revisión bibliográfica de múltiples artículos científicos, organizados por año y fecha de publicación, y divididos en tres grandes grupos en función de si su contribución se enfoca en: hallazgos experimentales; modelos numéricos; y modelos analíticos u analítico-empíricos.
- Capítulo 3: en este capítulo se presenta la metodología de universalización de resultados utilizada para caracterizar las piezas FFF fabricadas con una amplia variedad de materiales y con las mismas modificaciones del porcentaje de relleno. Además, se muestran y analizan los resultados experimentales universalizados y sin universalizar de los diversos ensayos a tensión realizados tanto a los materiales como a las piezas FFF.
- Capítulo 4: en este capítulo se presentan los modelos analítico-empíricos seleccionados para la predicción del comportamiento mecánico bajo tensión de las piezas. Se explica el algoritmo utilizado para optimizar las predicciones de todos los modelos analítico-empíricos, y se muestran los resultados de las predicciones de cada modelo aplicado a cada material y porcentaje de relleno.

- Capítulo 5: presenta el análisis y discusión de los resultados obtenidos en los capítulos 3 y 4. Se jerarquizan las piezas FFF en función de si su comportamiento bajo tensión sigue de mejor manera el comportamiento bajo tensión de su materia prima; y se ponderan los modelos de predicción en función del error general que tienen para predecir el comportamiento de todos los materiales estudiados en este proyecto doctoral.

## **Capítulo 2. Estado del arte del comportamiento estructural de piezas fabricadas por FFF**

El estudio del comportamiento estructural de piezas fabricadas por FFF se puede dividir en dos vertientes: 1) hallazgos experimentales, los cuales a través de la fabricación de piezas y su posterior destrucción mediante pruebas de tensión, torsión, impacto, fatiga, etc., buscan entender el comportamiento estructural de las piezas FFF bajo diferentes configuraciones de parámetros de construcción; y 2) modelos matemáticos de predicción, como lo mencionan en [23], los cuales pueden dividirse en tres: analíticos, empíricos y numéricos. Los modelos analíticos son propuestas de ecuaciones diseñadas para predecir el comportamiento de las piezas FFF en específico, las cuales surgen a partir de la consideración de todos los procesos físicos involucrados en la fabricación y procesamiento de las piezas. Los modelos empíricos modifican, a través del uso de resultados experimentales, modelos matemáticos preexistentes, que no necesariamente fueron diseñados para su uso en FFF, pero que a través de ciertas consideraciones se propone que pueden ser extrapolables a estos casos. Por último, los modelos numéricos buscan aproximar el comportamiento estructural de las piezas FFF a través de simulaciones numéricas que toman en consideración algunos de los diversos fenómenos físicos involucrados.

A continuación, se presentan algunos de los estudios y resultados obtenidos mediante hallazgos experimentales, modelos numéricos, modelos analíticos y modelos empíricos del comportamiento estructural de piezas fabricadas por FFF.

### **2.1. Hallazgos experimentales**

Una de las vertientes más usadas debido a su simpleza de uso (fabricar piezas, realizar pruebas mecánicas y ver resultados), es el caso experimental. Esta vertiente consiste en establecer una metodología de fabricación y pruebas, en la que se intenta explorar y documentar los cambios en alguna propiedad específica en función de algún parámetro de construcción, material, o característica de la pieza a estudiar. La gran mayoría de estos trabajos se ha centrado en el estudio de materiales comunes como el PLA y el ABS, otros en materiales menos comunes como el PETG, pocos en el estudio de materiales flexibles como el TPU, y recientemente, en el estudio de materiales experimentales como lo son los compuestos. En esta sección se resume brevemente diversos ejemplos de estudios encontrados en la literatura separados en función del material estudiado.

### 2.1.1. PLA

A lo largo de los años, múltiples estudios se han dedicado a entender el comportamiento del PLA en el proceso FFF. En 2015 se llevaron a cabo estudios como el reportado en [24], donde se investigó el comportamiento tanto de la resistencia última a la tensión (*UTS*) como del alargamiento a la ruptura de piezas FFF fabricadas con PLA bajo variaciones de tres parámetros de fabricación: la altura de capa, el ángulo de deposición y el número de capas perimetrales. La conclusión de este estudio fue que el *UTS* disminuye conforme el ángulo de deposición se aproxima a los 90° con respecto a la fuerza aplicada durante la prueba, y que la *UTS* incrementa conforme el número de capas perimetrales aumenta. Además, el estudio demostró que existe una cierta altura de capa a la cual el *UTS* disminuye debido a que la unión entre capas se debilita.

En 2018, se realizó un estudio del comportamiento bajo tracción de piezas fabricadas con PLA [25]. A estas piezas se les modificó el ángulo de deposición, la altura de capa, y el ancho de deposición. En este estudio se observó que el desempeño de las piezas mejora si la altura de capa disminuye y si el ángulo de deposición es paralelo a la fuerza de tracción aplicada durante las pruebas. Durante el mismo año, otros investigadores repitieron las pruebas de tracción a piezas fabricadas con PLA buscando analizar el comportamiento modificando la altura de capa, el porcentaje de relleno y la orientación de construcción [26]. Los resultados mostraron que el parámetro de fabricación más influyente es el porcentaje de relleno, seguido por la orientación de construcción. En ese mismo año, otro estudio concluyó que la *UTS* está fuertemente relacionada con la unión entre capas por lo que uno de los parámetros con mayor influencia es la altura de capa [27].

Durante el año 2020, se encontró que las piezas fabricadas con PLA presentaban anisotropías en su comportamiento bajo tensión y cortante al variar su orientación de fabricación [28]. Además, se mostró que el efecto generado por el uso de diferentes patrones de relleno es despreciable en comparación con el efecto producido por el porcentaje de relleno, ya que al incrementar este último parámetro de fabricación el módulo de Young incrementa de forma cuadrática. También en 2020 se reportó un estudio en donde se comparó el comportamiento bajo tensión entre piezas fabricadas con PLA y el respectivo filamento usado para su fabricación [21]. De este estudio se concluyó que los valores del módulo de elasticidad y *UTS* de las piezas FFF son siempre menores que las obtenidas por los filamentos. Además, en este mismo estudio se pudo observar un comportamiento anisotrópico en función de la orientación de construcción seleccionada para la fabricación de cada pieza, y un incremento en el módulo de elasticidad y la *UTS* de las piezas FFF conforme el porcentaje de relleno incrementa. En 2021 se presentó un estudio que, tras comparar el comportamiento de múltiples materiales, entre ellos incluido el PLA, confirmó que uno de los parámetros de fabricación con mayor influencia en las propiedades a tensión es el porcentaje de relleno [29].

Recientemente en 2025, se estudió el comportamiento de probetas FFF fabricadas con PLA modificando el flujo de material [30], el cual es un parámetro de fabricación compuesto, ya que es el producto de la combinación de la velocidad de extrusión, la altura de capa y el tamaño de boquilla. Algunos laminadores permiten modificar, a modo de caja negra, este parámetro compuesto al multiplicar el valor predeterminado de la altura de capa o la velocidad de extrusión por un cierto coeficiente. Los resultados reportados en [30] mostraron que las piezas de PLA que incrementan su flujo de material de un 97% a un 105% presentan una considerable disminución en las dimensiones de sus porosidades, pero al incrementar el flujo de un 103% en adelante, las dimensiones generales de las piezas se van alterando y sus propiedades mecánicas bajo tensión muestran un comportamiento decreciente. Por otro lado, en [31] se analizó el comportamiento bajo tensión de piezas FFF de PLA, a las cuales se les modificó el tamaño de boquilla de un 0.05 a un 0.25 mm, y la velocidad de extrusión de 15 mm/s a 80 mm/s. Los resultados mostraron que los mejores resultados se obtuvieron con una boquilla de 0.25 mm y una velocidad de extrusión de 45 mm/s.

### 2.1.2. ABS

Para el caso del material ABS, en 2003 se encontró una cierta dependencia entre las propiedades mecánicas de las piezas FFF fabricadas con ABS y los parámetros de fabricación: orientación de construcción y ángulo de deposición [32]. Mas tarde, en 2006, en se analizaron piezas FFF fabricadas con ABS usando diferentes direcciones de construcción, anchos de espaciados, anchos de deposición, ángulos de deposición y capas de relleno [33]. De este estudio se concluyó que dos de los parámetros con mayor influencia en la definición de las propiedades mecánicas son el ancho de deposición y el ancho de espaciado.

En 2015, los resultados del trabajo de investigación reportado en [34] mostraron que las propiedades mecánicas de piezas fabricadas con ABS son afectadas por la combinación del porcentaje de relleno y el ángulo de deposición. Al año siguiente, un estudio del comportamiento bajo tensión e impacto de piezas fabricadas con ABS y diferentes porcentajes de relleno fue presentado en [22]. De este estudio se concluyeron dos cosas; por una parte, que los mejores resultados bajo tensión e impacto se obtienen con los valores más altos de porcentaje de relleno; y por otra parte, que sin importar que las pruebas se realizaron con exactamente los mismos parámetros de fabricación, las piezas estudiadas tuvieron propiedades diferentes debido a las condiciones atmosféricas de fabricación, a la máquina utilizada, y aún más importante, a la calidad y el estado del rollo de filamento (añejamiento, humedad acumulada, etc.) utilizado para la fabricación de las piezas.

En 2017 se estudió el efecto que tiene la orientación de fabricación en el comportamiento de las piezas fabricadas con ABS. En [35] se mostró que la orientación de fabricación influye en las propiedades reológicas de las piezas, mientras que en [36] se confirmó la presencia de comportamientos anisotrópicos bajo tensión y corte en función de la orientación de fabricación. En un estudio realizado en 2018 [26], y más recientemente en otro estudio

realizado en 2021 [29], se demostró que el porcentaje de relleno es uno de los parámetros más influyentes en el comportamiento bajo tensión de piezas fabricadas con ABS. Recientemente, en 2025, se observó que las piezas FFF fabricadas con ABS muestran un incremento lineal de su *UTS* conforme se incrementa el tamaño del diámetro de su boquilla de 0.5 mm a 0.25 mm [31]. En este mismo año, también se estudió el comportamiento bajo tensión de la carga máxima que soportan las piezas FFF fabricadas con ABS al modificar el número de capas perimetrales, el porcentaje de relleno y el patrón de relleno [37]. De este estudio se observó que las piezas de ABS muestran un incremento prácticamente lineal de su carga máxima conforme se incrementa el número de capas perimetrales de 1 a 5 capas. Además, se observó que el porcentaje de relleno es uno de los parámetros de mayor influencia en la carga máxima, mientras que el patrón de relleno no muestra mucha influencia en la carga máxima, en comparación con el número de capas perimetrales y el porcentaje de relleno.

### 2.1.3. PETG

En relación con el material PETG, en 2017 se presentó una comparación entre piezas fabricadas con PETG y PETG reforzado con fibra de vidrio usando diferentes orientaciones de fabricación [38]. Los resultados mostraron que cada orientación de fabricación conduce a propiedades diferentes. Además, se observó que sin importar que los parámetros de fabricación sean idénticos, cada pieza será diferente debido a las condiciones específicas de fabricación, como lo son el estado y calidad del material, del tipo de máquina, y las condiciones atmosféricas, que se definieron durante la fabricación de cada pieza. En [39] se mostró que es posible conseguir mejores módulos de elasticidad y *UTS* configurando mayores superposiciones de capas y menores alturas de capas, ya que esto incrementa el área de contacto entre fibras y capas vecinas.

En 2022, el estudio reportado en [40] mostró el efecto de los pigmentos usados en diferentes rollos de filamentos PETG. Los resultados demostraron que cada aditivo utilizado modifica el comportamiento reológico y mecánico de las piezas, además de requerir configuraciones de parámetros de fabricación específicas para cada color. En ese mismo año, se realizó una revisión bibliográfica de 14 artículos dedicados al estudio de piezas AM fabricadas de PETG [41], concluyendo que las mejores propiedades a la tensión son alcanzables con altos porcentajes de relleno y altura de capa pequeñas. Además, se observó que tanto el patrón de relleno como el ángulo de deposición influyen en la respuesta a la tensión de las piezas. Otro estudio de ese mismo año comparó la rugosidad de las superficies de piezas fabricadas con PETG usando diferentes temperaturas de extrusión, patrones de relleno, alturas de capas y velocidad de ventilación [42]. Los resultados demostraron que el parámetro que más afecta a la rugosidad superficial de las piezas es la altura de capa. En [43] se observó que las mejores propiedades a tensión se alcanzan usando altos porcentaje de relleno.

Recientemente, en 2023, se demostró una alta similitud entre las propiedades mecánicas de piezas fabricadas usando rollos nuevos de PETG y piezas fabricadas con rollos de PETG reciclado [44]. En 2024, un estudio del comportamiento a flexión de piezas fabricadas con diferentes alturas de capa, velocidad de extrusión y temperatura de extrusión fue presentado en [45]. Los resultados mostraron que la altura de capa es el parámetro más influyente en las propiedades a flexión.

### 2.1.4. TPU

El TPU es uno de los materiales menos estudiados en comparación con el resto de los materiales presentados anteriormente. En 2020 se presentó un estudio del comportamiento a tensión de piezas fabricadas con TPU [46]. Se concluyó que para lograr una buena fabricación es necesario tener una configuración específica y estable del flujo de material y de los parámetros de retracción. Además, se observó que la altura de capa es el parámetro que más influye en la unión entre capas, ya que mejora o empeora el área de contacto entre ellas. En el mismo año, el uso de TPU para tecnologías FFF en aplicaciones del área de llantas no neumáticas fue evaluado en [47]. Este estudio mostró que al incrementar el porcentaje de relleno se obtiene una mejoría gradual del *UTS* de las piezas. También se observó que es necesaria una temperatura de extrusión de por lo menos 195°C para tener una fabricación estable, pero un desempeño óptimo se obtiene con una temperatura de 210°C. Adicionalmente, se observó que el TPU posee una mejor resistencia al desgaste en comparación con el caucho natural, el caucho butadieno y el caucho de estireno butadieno.

En 2023 se reportó un estudio enfocado en evaluar el efecto de usar diferentes ángulos de deposición y capas perimetrales, en el comportamiento a la tensión de piezas FFF fabricadas con TPU [48]. Las pruebas a tensión revelaron un elevado alargamiento a la rotura en todas las piezas estudiadas, a pesar de una considerable deformación residual. Además, se observó que el uso de un ángulo de deposición alternante y la presencia de capas perimetrales son indispensables para mejorar la integridad de las piezas.

### 2.1.5. Materiales compuestos

Actualmente existe un creciente interés en el desarrollo y uso de materiales experimentales en el área de la AM, siendo los materiales compuestos uno de los enfoques más notorios en lo que respecta a tecnologías FFF. En 2016 se presentó una revisión bibliográfica de una gran variedad de materiales compuestos que se habían desarrollado hasta el momento [49]. En esta revisión se mostró la metodología de desarrollo, la calidad de impresión, y las posibles aplicaciones de cada material. En 2017 se reportó el desarrollo de un material compuesto que usaba PLA como matriz y harina de madera como reforzante, comparándolo con PLA puro [50]. Los resultados mostraron que la presencia de este aditivo provocaba cambios en su microestructura, los cuales producían una leve mejoría en su resistencia a la deformación inicial. En el mismo año, se demostró que la presencia de hasta un 10% de madera como

aditivo en el material compuesto de PLA, produce un incremento en la resistencia a la tensión de piezas fabricadas con este compuesto, pero mayores concentraciones producen un decremento de esta propiedad [51].

En 2019, en el estudio reportado en [52] se compararon las propiedades a la tensión y a la flexión de piezas FFF fabricadas con diferentes orientaciones de fabricación, ángulos de deposición y cuatro materiales compuestos. Estos materiales usaban PLA como matriz, y madera, cerámica, acero, o fibra de carbono como aditivos. Se concluyó que, aunque cada material compuesto presenta diferentes propiedades mecánicas, la orientación de fabricación influye en mayor medida que el ángulo de deposición. En [53] se reportó un estudio del comportamiento bajo tensión de piezas fabricadas con un material compuesto basado en PLA y dopado con grafeno. La presencia del grafeno mejoró la respuesta a la tensión del material manteniendo una buena precisión dimensional en comparación con PLA puro. Aun así, se encontró una fuerte dependencia entre las propiedades a tensión y la orientación de fabricación seleccionada. Por otro lado, en [54] se analizó el efecto del porcentaje de relleno en el comportamiento a la tensión de piezas fabricadas con cuatro tipos de filamentos: PLA puro, PLA dopado con polvo de cobre, PLA dopado con polvo de aluminio y PLA dopado con grafeno. Se concluyó que los mejores valores de *UTS* se obtienen con porcentajes de relleno altos.

En 2021, el trabajo [29] mostró que el porcentaje de relleno es uno de los parámetros de fabricación más relevantes en la definición de las propiedades a la tensión de un material compuesto de grado médico, este material se compone de una matriz de PLA reforzada con nano partículas de cobre. En la revisión bibliográfica realizada en [55], se estudiaron las metodologías de fabricación de materiales bio-compuestos usando PLA como matriz y fibras naturales como refuerzo, resaltando la influencia del tipo de fibra en la respuesta mecánica de las piezas fabricadas. En el mismo año, el estudio reportado en [56] mostró el efecto del porcentaje de metal en compuestos de PLA, mostrando que altas concentraciones de bronce, cobre, hierro magnético o acero inoxidable como reforzante del compuesto, disminuye considerablemente la resistencia a la fractura y el *UTS* de las probetas fabricadas.

Un estudio realizado en 2022 mostró que las piezas fabricadas con PLA dopado con acero inoxidable tienen un alto crecimiento celular sobre su superficie sin la necesidad de usar un recubrimiento de biomoléculas [57]. Esto lo convierte en un mejor candidato para su uso como soporte de tejido, óseo en comparación con materiales con PLA dopados con cobre o bronce. En 2023, se reportó que las piezas fabricadas con compuestos de PLA dopados con bronce poseen un comportamiento anisotrópico a la tensión en función de la orientación de fabricación, además de una disminución en la *UTS* conforme el porcentaje de bronce se incrementa. En [59], se desarrolló una metodología para la optimización de los parámetros de fabricación de piezas fabricadas con filamento de PLA dopados con altas concentraciones de cobre. En este estudio se demostró que después de realizar un proceso de desaglomerado

y sinterizado a las piezas fabricadas con estos filamentos, las mismas poseían una alta conductividad eléctrica, permitiendo su uso en diversas aplicaciones eléctricas. Por último, en [60] se realizó otra revisión bibliográfica acerca del desarrollo, retos y aplicaciones de diversos materiales compuestos usados en FFF. De esta revisión bibliográfica se concluyó que es necesario realizar más estudios centrados en el entendimiento del comportamiento de los materiales compuestos.

### 2.2. Modelos numéricos

En lo que respecta a modelos de predicción, la alternativa numérica es la aproximación más utilizada debido a que no es necesario realizar pruebas experimentales para obtener resultados. Aun así, es necesario validar los resultados obtenidos de los modelos numéricos mediante una comparación con datos experimentales recolectados a través de una revisión bibliográfica de la comunidad científica o de los propios investigadores. En la actualidad los modelos numéricos se pueden desarrollar a partir de múltiples aproximaciones numéricas, entre las más usadas se encuentra el análisis por el Método del Elemento Finito (MEF, por sus siglas en español), o mediante el uso de algoritmos de inteligencia artificial.

Algunos modelos numéricos reportados en la literatura se describen a continuación. En 2006 se utilizó MEF para simular la parte mecánica y térmica del proceso FFF [61]. En este estudio se buscó comparar y analizar el esfuerzo residual generado por el sistema de extrusión, existente en las líneas de material que fueron depositadas siguiendo un patrón de relleno lineal cuyo ángulo de deposición permite deposiciones largas o cortas. De estas simulaciones se concluyó que las piezas son susceptibles a cambios en los patrones de relleno seleccionados y a sus respectivos ángulos de deposición. Más tarde en 2008, los mismos autores realizaron un estudio similar al anterior pero esta vez analizando el esfuerzo residual causado por la velocidad de extrusión, el ancho de línea o el tamaño de boquilla seleccionada, y la altura de capa durante la deposición del material [62]. En este estudio se observó que el parámetro que más afecta a la presencia de esfuerzos residuales es la velocidad de extrusión, seguido por la altura de capa, y la combinación del ancho de línea con la altura de capa. En 2013 se presentaron simulaciones de probetas fabricadas en FFF tomando en cuenta dos condiciones diferentes: una probeta se simuló como un sólido y la otra probeta se simuló tomando en cuenta cada capa como un sólido y poniendo fuerzas de unión entre ellas [63]. Los resultados mostraron que el modelo laminado alcanza valores de *UTS* mucho más grandes que el modelo sólido, por lo que el segundo modelo se puede considerar como un modelo más rígido.

En [64] se obtuvo experimentalmente la resistencia a la tensión de piezas FFF fabricadas con ABS, las cuales fueron sometidas a pruebas de tensión y fabricadas considerando cambios en su orientación de fabricación, ángulo de deposición, ancho de línea y el espacio entre líneas. Los resultados obtenidos se usaron para alimentar al método de agrupamiento

para el manejo de datos (GMDH, por sus siglas en inglés), con el fin de poder predecir la resistencia a la tensión de las piezas en función de los parámetros de construcción seleccionados. Mediante el uso del algoritmo de evolución diferencial (DE, por sus siglas en inglés), se buscó la combinación óptima de parámetros, lo cual condujo a resultados favorables para este caso. En [65] se realizó una simulación MEF de la transmisión de calor generada a partir de los diferentes fenómenos térmicos presentes en la fabricación de piezas FFF. Los fenómenos analizados incluyen convección y radiación del entorno, conducción y radiación entre filamentos adyacentes, y convección con el aire atrapado entre filamentos. De este estudio se puede destacar que la convección tanto con el ambiente como entre filamentos, son los fenómenos que tiene un mayor impacto en la transferencia de calor, por lo que la transferencia de calor producida por la radiación entre filamentos y la convección por el aire atrapado pueden ser despreciadas. En ese mismo año, el trabajo reportado en [64] fue complementado por los mismos autores, incluyendo la altura de capa como parámetro de construcción a estudiar [66]. Los nuevos datos experimentales, donde se incluye la modificación de este nuevo parámetro de construcción, fueron introducidos en su GMDH para predecir su comportamiento, y mediante DE se logró optimizar la configuración de parámetros de construcción con el fin de mejorar la resistencia a la tensión de piezas FFF fabricadas con ABS.

En 2017 se desarrolló un procedimiento MEF para encontrar el módulo elástico de piezas FFF fabricadas con ABS basado en la teoría clásica de laminado (CLT, por sus siglas en inglés) [67]. El modelo MEF se realiza considerando dos mesoestructuras, y la influencia de la altura de capa, el patrón de relleno y la distancia entre líneas. En este estudio se pudo observar que la microestructura generada en el interior de las piezas FFF está relacionada con las propiedades elásticas que tendrá la pieza final, ya que una pieza con una mesoestructura más compacta posee un módulo de elasticidad mayor que una mesoestructura regular. En el año 2018 se realizó una optimización topológica a piezas FFF mediante el método de material sólido isotrópico con penalización (SIMP, por sus siglas en inglés) [68]. A través de la definición de diferentes configuraciones de restricciones y penalizaciones se logró generar una composición topológica que cuya reproducción experimental cumple con las condiciones esperadas. En ese mismo año se logró predecir la porosidad de piezas FFF a través de simulaciones computacionales de dinámica de fluidos, en donde se toma en consideración la altura de capa y la distancia entre líneas depositadas [69]. De este trabajo se concluyó que la microestructura que se genera en el interior de las piezas FFF es dependiente de la configuración de los parámetros de construcción.

Durante 2019 se publicaron diferentes aproximaciones a la predicción de propiedades de piezas FFF. Por ejemplo, en [70] se desarrolló un modelo MEF donde se buscó optimizar el tiempo de cómputo de la predicción de propiedades elásticas de piezas FFF fabricadas con PLA, al simular solo un volumen representativo de la microestructura generada al modificar el porcentaje de relleno de las piezas. Dada la cercanía entre los resultados numéricos y

experimentales, se considera que este método de volúmenes representativos es una alternativa válida en casos con poco presupuesto de tiempo y equipo de cómputo. En [71] se realizó una simulación numérica del comportamiento mecánico de probetas FFF a tensión fabricadas de ABS. La simulación reproduce las trayectorias de deposición del filamento y utiliza condiciones ortotrópicas para el material. Los resultados de la simulación muestran un comportamiento elástico que puede ser considerado isotrópico. Por otro lado, en [72] se realizó una comparación entre la caracterización de las propiedades mecánicas de piezas FFF, con patrón de deposición lineal y ángulos de deposición de  $0^\circ$  y  $0^\circ/90^\circ$ , obtenidas mediante CLT y el método de homogeneización asintótica, observándose que la CLT genera una mejor aproximación del módulo de elasticidad.

En 2020 se utilizaron simulaciones MEF con el método de homogeneización asintótica para predecir el comportamiento de piezas FFF fabricadas de PLA considerando diferentes direcciones de construcción [73]. Las predicciones obtenidas muestran una aproximación con un error menor al 10% para las orientaciones de fabricación planar y en el borde, mientras que en la dirección vertical los errores rondan entre 20 % y 60%. En [74] se desarrolló un modelo numérico que incorpora viscosidad no Newtoniana dependiente de la temperatura para simular los efectos de la temperatura en el comportamiento de flujo de material, el área de la sección transversal y la uniformidad de la deposición de material durante el proceso de fabricación FFF. Los resultados de este estudio muestran que el área de la sección transversal se ve afectada por la viscosidad dependiente de la temperatura, y que la temperatura del extrusor afecta la forma de las líneas de material depositadas y su superficie topográfica. También en 2020 se desarrolló una metodología para encontrar la topología óptima de piezas FFF, la cual tiene como base la penalización de material sólido ortotrópico y la aproximación de un doble suavizado y proyección [75]. Este modelo toma en consideración el patrón de trayectoria de deposición híbrida y las propiedades anisotrópicas del material. Usando diferentes casos de estudio, se consiguió corroborar la efectividad de este método. A finales de ese mismo año se desarrolló un modelo computacional basado en la microestructura generada en piezas FFF de ABS, con el fin de investigar las propiedades elásticas ortotrópicas de estas piezas mediante el uso de la micromecánica de un volumen representativo [76]. Además, se tomó en consideración el uso de diferentes ángulos de deposición. Los resultados obtenidos fueron contrastados con resultados experimentales encontrados en la literatura y revisados mediante diferentes técnicas de homogeneización entre las que se incluye el método teórico de Mori-Tanaka.

En 2021, se presentó la simulación numérica de la resistencia a la compresión de dos nuevos diseños de patrón de deposición [77], los cuales son modificaciones del clásico patrón hexagonal. A través de una corroboración experimental se concluyó que este nuevo tipo de patrón es dos veces más resistente que el patrón clásico. En el mismo año 2021, se presentó una aproximación a la predicción de los efectos que se generan en las propiedades mecánicas de piezas FFF al seleccionar la configuración de parámetros de construcción [78]. Esta

aproximación requiere dividir la pieza en 3 partes, las capas de superficie y fondo, el contorno, y el interior. Cada parte de la pieza se simula como si se tratara de un material diferente, y los resultados obtenidos de la simulación se corroboran con caso experimentales. A través de una prueba de tensión se concluyó que las piezas con propiedades más similares a las del filamento son las que se fabrican sobre la cama ya que no son tan dependientes de los efectos de la unión entre capas. Además, mediante una prueba de flexión se corroboró la influencia del porcentaje de relleno en la respuesta mecánica de la pieza.

En 2023 se propuso el uso de machine learning para predecir las propiedades a la tensión de piezas FFF fabricadas con Technomelt PA 6910 [79]. El proceso de active learning utilizado tiene como base un algoritmo de regresión Gaussiana. Los datos utilizados para el entrenamiento son de piezas con cinco configuraciones de tres parámetros de fabricación, la temperatura de extrusión, la altura de capa y el ángulo de deposición. Los resultados alcanzan un error menor al 10% en un 32% de los casos. En el mismo año 2023, se utilizaron múltiples modelos de machine learning para predecir la relación entre las propiedades mecánicas de piezas FFF y la fuerza de extrusión ejercida durante la fabricación [80]. De esta comparación de modelos se concluyó que el modelo de regresión support vector posee el mejor rendimiento utilizando este tipo y volumen de datos, ya que se alcanza un menor error en la predicción.

Mas tarde, en 2024, se publicó un trabajo que utiliza machine learning para predecir el comportamiento de piezas de metal generadas con MA, las cuales tienen diferentes configuraciones de parámetros de fabricación y materiales utilizados [81]. El modelo numérico fue entrenado utilizando los datos de 140 piezas. En este trabajo, los algoritmos utilizados incluyen Random forest, Gradient boosting y Redes neuronales. De manera similar, en 2024 se propuso la predicción de UTS y el módulo de elasticidad de piezas FFF fabricadas de PLA, mediante dos modelos numéricos: uno utiliza la técnica de clasificación de machine learning contra propagación de redes neuronales; y el otro utiliza una regresión general de redes neuronales [82]. En este trabajo se concluyó que la técnica de contra propagación de redes neuronales es capaz de conseguir una predicción muy acertada del comportamiento elástico de las piezas FFF, aunque el gasto computacional requerido para conseguir estos resultados la vuelve menos viable para casos generales. En contraste la técnica de regresión general requiere de un consumo mucho menor de tiempo de cómputo, y los resultados obtenidos con la regresión general pueden llegar a ser inclusive más precisos que los obtenidos con la técnica de contra propagación.

### 2.3. Modelos analíticos y analítico-empíricos

En lo que respecta a los modelos analíticos y analítico-empíricos para la predicción de propiedades de componentes AM, a lo largo de los años se han reportado algunos intentos en la literatura principalmente relacionados con el uso de la micromecánica y teorías de

laminados clásicos, para predecir el comportamiento mecánico de piezas FFF. Todos estos modelos se basan en que las piezas o materiales analizados están compuestos por una disposición de material y poros, o material y refuerzo, ensamblado uno encima de otro formando toda una microestructura interna.

Una de las primeras aproximaciones para el comportamiento mecánico de materiales compuestos fue dada en 1889 [83], donde se dedujo un modelo analítico que requiere de medias ponderadas para predecir las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, este modelo se conoce como la regla de mezclas. En 1988 se presentó que existe una relación entre las propiedades del material poroso y el material sólido la cual está definida a través de la porosidad específica de la pieza [84]. En 2006, se propuso un modelo empírico con el cual se puede estudiar el comportamiento mecánico de materiales compuestos a través de una modificación de la regla de mezclas [85].

Ma tarde, en 2013, se desarrolló un compendio en el cual se describe la evolución y el desarrollo de los modelos más efectivos para predecir el comportamiento del módulo de elasticidad de materiales porosos hasta ese momento [86]. Durante 2014 se presentó una relación entre la resistencia última a la tensión de piezas FFF, la altura de capa y el tamaño final del encuellamiento en la pieza [87]. En 2015 [88] se propuso extender el uso del modelo descrito en [84] de tal forma, que el mismo modelo pueda ser aplicable para múltiples propiedades mecánicas de materiales porosos. En ese mismo año se propuso el uso de la CLT para predecir las propiedades mecánicas ortotrópicas de piezas FFF [89], para lo cual se requieren los valores experimentales del módulo elástico longitudinal y transversal, el módulo de Poisson y el módulo cortante.

En 2016 se extendió el uso de diferentes modelos empíricos para la predicción del comportamiento de la resistencia última a la tensión de materiales compuestos [90]. En el año 2018 se reportó el uso de diversos modelos micromecánicos para determinar el comportamiento de las propiedades elásticas homogeneizadas de materiales compuestos fibrosos [91]. En 2019 se propuso el primer modelo analítico para la predicción de la longitud de contacto de piezas FFF a partir de la presión de contacto generada en la salida del extrusor [92]. A partir de estos resultados se espera poder determinar las resistencias finales de la pieza. Más tarde en 2021 se propuso la modificación de una colección de ocho modelos empíricos, para predecir el comportamiento experimental de piezas FFF fabricadas de PLA utilizando diferentes orientaciones de fabricación y porcentajes de relleno [93]. Estos modelos fueron evaluados y los resultados mostraron errores de predicción menores al 5% en algunos casos. Más recientemente, en 2025, se desarrolló un nuevo modelo analítico para la predicción del *UTS* y el módulo de elasticidad para cualquier orientación de fabricación de la pieza FFF [94]. El modelo propuesto se basa en un elipsoide, el cual requiere de dos ángulos, los cuales definen la orientación de la pieza a lo largo de los ejes de fabricación, el

porcentaje de relleno y las propiedades a tensión a lo largo de los ejes principales de fabricación.

## **2.4. Análisis y discusión**

De esta revisión bibliográfica se derivan las siguientes conclusiones. Por un lado, la caracterización experimental del comportamiento mecánico de las piezas FFF es altamente dependiente de la configuración seleccionada para la fabricación de las piezas. Esta configuración depende de la máquina utilizada, el software laminador, el tipo de material, la calidad y condición de dicho material, y los parámetros de fabricación seleccionados, los cuales dependen del software de control y de la calidad de la máquina seleccionada. Todo esto hace prácticamente imposible la creación de un estándar para la caracterización de piezas y materiales FFF, y a su vez dificulta en gran medida la comparación correcta entre los resultados obtenidos en diferentes trabajos. Por otro lado, este mismo hecho afecta de sobremanera a los modelos de predicción, ya que como se pudo observar en esta revisión bibliográfica, todos los modelos ya sean numéricos o analíticos-empíricos requieren de resultados experimentales para evaluar y validar el modelo. Lo anterior conduce a la generación de modelos de predicción que son buenos reproduciendo casos en específico y no tan buenos en casos en general.

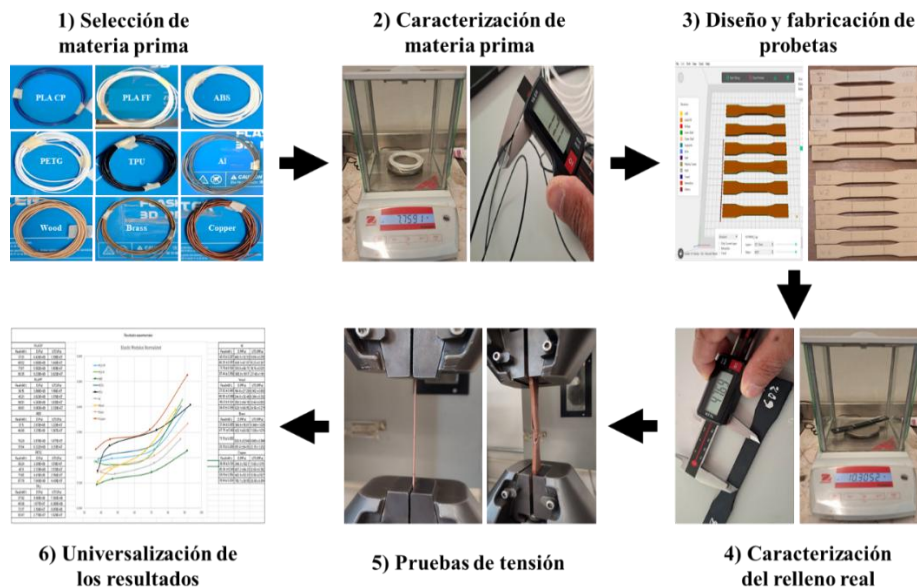
Por lo tanto, en el presente proyecto de doctorado se propone generar una nueva base de datos experimentales que contemple los resultados de la caracterización a tensión tanto de piezas FFF fabricadas con una gran selección de materiales y porcentajes de relleno, como de los filamentos utilizados en la fabricación de cada probeta justo antes de su uso. Esto con el fin de complementar la información correspondiente a cada pieza y lograr independizar los valores de las propiedades tanto de la condición y calidad de los materiales seleccionados, como de la máquina FFF implementada en la fabricación de las piezas. Además, los datos obtenidos serán utilizados para el desarrollo de modelos analítico-empíricos que puedan predecir el comportamiento del módulo de elasticidad y la resistencia última a la tensión de piezas FFF fabricadas utilizando una gran variedad de materiales y múltiples porcentajes de relleno.

# Capítulo 3. Análisis experimental a tensión de probetas

## FFF

### 3.1. Metodología experimental

La metodología experimental propuesta para conocer el comportamiento a la tensión tanto de probetas FFF, como de los materiales utilizados en la fabricación de dichas probetas, se muestra en la Figura 3.1. Esta metodología consta de seis pasos: 1) Selección de materia prima; 2) Caracterización de materia prima; 3) Diseño y fabricación de probetas; 4) Caracterización del relleno real; 5) Pruebas de tensión, y 6) Universalización de los resultados. A lo largo de este capítulo se describirán en detalle cada paso de la metodología.



**Figura 3.1.** Metodología experimental utilizada para conocer el comportamiento a la tensión de probetas FFF.

### 3.1. Selección de materia prima

Para conocer el comportamiento a la tensión de probetas FFF de diferentes materiales, se seleccionaron un total de nueve materiales comerciales diferentes. Estos materiales se dividieron en tres grupos: a) Materiales comunes: PLA y ABS; 2) Materiales poco comunes: PETG y el flexible TPU; y 3) Materiales compuestos. En lo que respecta a materiales

### Capítulo 3. Análisis experimental a tensión de probetas FFF

compuestos se seleccionaron materiales basados en PLA y dopados con: aluminio, madera, latón y cobre. Las características principales de estos materiales se enlistan en la Tabla 3.1, y en la Figura 3.2 se puede apreciar una muestra de cada filamento. Los materiales fueron adquiridos de los proveedores: Flashforge, para un filamento PLA [95]; 3D Market para el filamento ABS [96]; y el resto de los filamentos utilizados fueron adquiridos con el proveedor Color Plus [97]-[103]. Las fichas técnicas correspondientes a cada material utilizado en la investigación están disponibles en el Anexo A del presente documento.

**Tabla 3.1.** Características de los materiales FFF seleccionados.

Grupo	Materiales	Designación	Color	Diámetro del filamento (mm)	Proveedor
Materiales comunes	Ácido Poli láctico	PLA CP	Azul	1.75	Color Plus [97]
	Ácido Poli láctico	PLA FF	Blanco	1.75	Flashforge [95]
	Acrylonitrile butadiene styrene	ABS	Blanco	1.75	3D Market [96]
Materiales poco comunes	Polyethylene terephthalate glycol	PETG	Blanco	1.75	Color Plus [98]
	Thermoplastic polyurethane	TPU	Negro	1.75	Color Plus [99]
Materiales compuestos	PLA-Aluminio	Al	Aluminio	1.75	Color Plus [100]
	PLA-Madera	Wood	Madera	1.75	Color Plus [101]
	PLA-Latón	Brass	Latón	1.75	Color Plus [102]
	PLA-Cobre	Copper	Cobre	1.75	Color Plus [103]



**Figura 3.2.** Muestras de los filamentos seleccionados.

El criterio de selección utilizado en esta etapa consistió en escoger materiales de cada grupo, con características de operación dentro de las capacidades de las máquinas FFF Flashforge™ Creator Pro y Flashforge™ Guider IIs, disponibles en el laboratorio, las cuales

se utilizaron para la fabricación de las probetas. Para los materiales compuestos se escogieron materiales a base de PLA que no requirieran temperaturas muy altas para su procesamiento. Además, se buscó que su porcentaje de material dopante no fuera tan alto, ya que un porcentaje muy alto puede producir diferentes tipos de daños en el sistema de extrusión. Por lo tanto, todos los materiales compuestos seleccionados tienen una composición de 70% de PLA y un 30 % del material dopante. En el caso del material PLA, se seleccionaron dos filamentos de diferente proveedor: el PLA de Color Plus (PLA CP) y el PLA de Flashforge (PLA FF), con el fin de mostrar el efecto que tiene en las propiedades de la pieza FFF el utilizar un mismo material, pero de diferentes proveedores y calidades; y como la metodología de universalización de resultados puede ayudar a disminuir este efecto.

### 3.2. Caracterización de la materia prima

Realizada la selección de materiales, el siguiente paso fue su caracterización. Para ello se determinó la densidad del filamento usando la siguiente ecuación:

$$\rho_f = \frac{W_f}{V_f} \quad (3.1)$$

donde  $\rho_f$ ,  $W_f$  y  $V_f$  son la densidad, la masa y volumen del filamento a caracterizar, respectivamente. Para determinar la densidad de cada material se tomó una muestra de 3 m de largo por cada tipo de filamento. El volumen de la muestra se calcula considerando que cada muestra es representada por un cilindro de 3 m de largo, y con un diámetro promedio específico de cada muestra. Este diámetro promedio se obtiene al promediar 8 mediciones del diámetro a lo largo de la muestra. Las mediciones del diámetro fueron realizadas usando un calibrador Mitutoyo CD-4" CSX. En lo que respecta a la masa, cada muestra fue pesada utilizando una báscula Ohaus Pionner PA224. La Figura 3.3 muestra ejemplos del proceso de medición de la masa y del diámetro de una muestra de filamento.



a)

b)

**Figura 3.3.** Ejemplo de la medición de: a) la masa, b) diámetro de una muestra de filamento.

Por otro lado, para conocer las propiedades a la tensión de cada tipo de filamento, se realizaron ensayos de tensión a 8 muestras de 165 mm de largo por cada tipo de filamento. Las pruebas se realizaron en una máquina de ensayos universales Shimadzu AG-100 kN, a una velocidad de 5 mm/min para los materiales rígidos y de 50 mm/min para el material flexible TPU. La Figura 3.4 muestra un ejemplo de un ensayo de tensión realizado a un filamento.



**Figura 3.4.** Ejemplo de un ensayo de tensión realizado a una muestra de filamento TPU: a) al comenzar el ensayo; y b) a punto de terminar el ensayo.

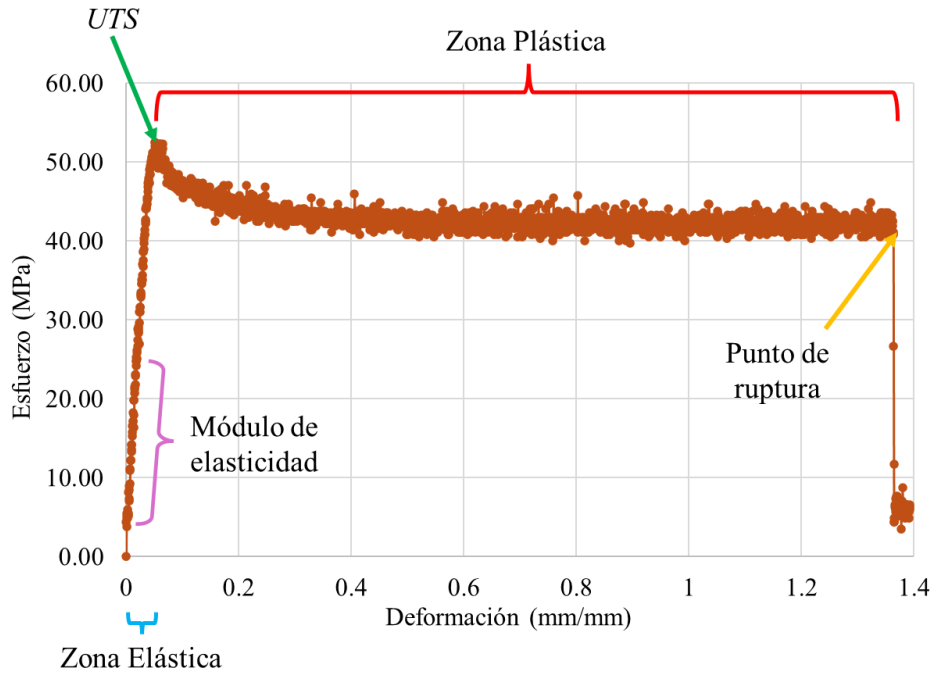
De los resultados de las pruebas a tensión de cada filamento se genera su curva esfuerzo-deformación, como se muestra en la Figura 3.5. Para lograr esto, a partir de la medición de fuerza y desplazamiento durante el ensayo a tensión, se determina el esfuerzo y la deformación del filamento mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_f = \frac{F_f}{A_{f0}} \quad (3.2)$$

donde  $\sigma_f$ ,  $F_f$  y  $A_{f0}$  representan el esfuerzo aplicado al filamento, la fuerza aplicada al filamento y el área transversal original de la muestra de filamento, respectivamente. La deformación del filamento se determina como:

$$\epsilon_f = \frac{Z_{fin} - Z_0}{L_{f0}} \quad (3.3)$$

donde  $\epsilon_f$ ,  $Z_{fin}$ ,  $Z_0$  y  $L_{f0}$  son la deformación de la muestra, el punto final del desplazamiento de la mordaza en cada punto de medición, el punto inicial del desplazamiento de la mordaza y la longitud inicial de la muestra de filamento, respectivamente.



**Figura 3.5.** Curva esfuerzo-deformación de una muestra de filamento Copper.

A partir de la curva esfuerzo-deformación del filamento, se determina el módulo de elasticidad ( $E_f$ ) y la resistencia última a la tensión ( $UTS_f$ ) de éste. El módulo de elasticidad se determina como la pendiente de la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación. Mientras que la  $UTS$  se obtiene buscando el valor de esfuerzo máximo en la curva esfuerzo-deformación.

### 3.3. Diseño y fabricación de probetas

El diseño de las probetas se realizó de acuerdo con la norma ASTM D638 [104]. Esta norma cuenta con cuatro tipos de probetas según las características del material utilizado. En lo que respecta a este trabajo de tesis doctoral se utilizó la probeta tipo I para todos los materiales excepto para el TPU, que por ser muy flexible se utilizó la probeta tipo IV, como se muestra en la Figura 3.6. La diferencia entre estos dos tipos de probetas es el largo de estas. La probeta tipo IV es más pequeña que la tipo I, ya que está diseñada para materiales que exhiben una mayor elongación, como es el caso de los materiales flexibles como el TPU.

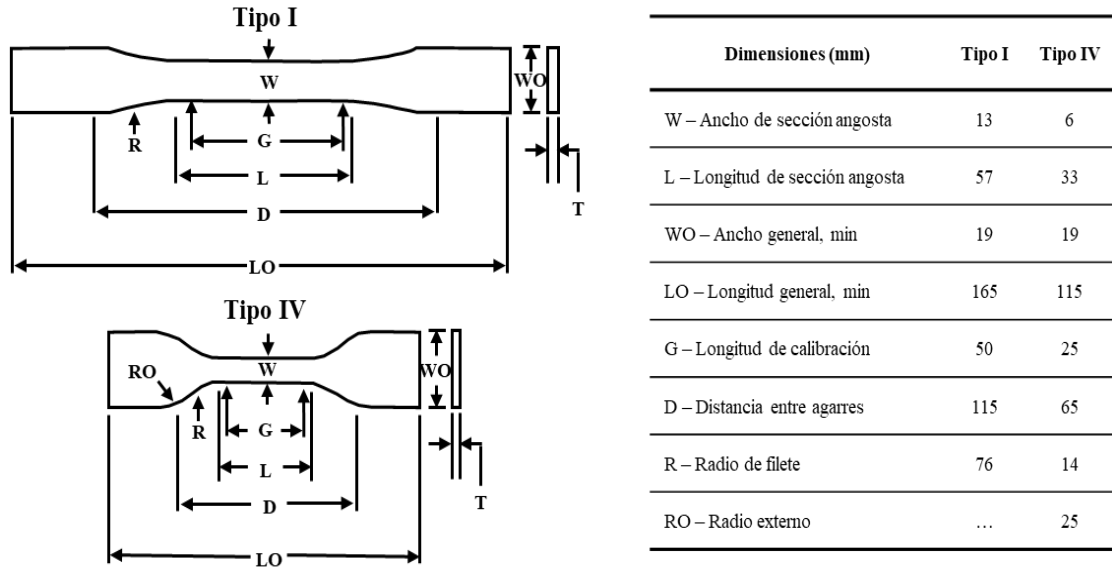


Figura 3.6. Probetas tipo I y IV utilizadas en la investigación.

Las probetas fueron diseñadas utilizando los softwares Blender y SolidWorks, y sus respectivos g-codes fueron generados utilizando el software laminador Flashprint de Flashforge™. En lo que respecta a la fabricación de las probetas, se utilizó la máquina Flashforge™ Creator Pro para la mayoría de los materiales, excepto para los compuestos y el PLA FF, en los que se utilizó la máquina Flashforge™ Guider IIs, ya que cuenta con las capacidades y aditamentos necesarios para trabajar con este tipo de materiales. Con el fin de evaluar el efecto del porcentaje de relleno en las propiedades a tensión de las probetas de los materiales seleccionados, se seleccionaron los siguientes valores nominales de porcentaje de relleno: 5%, 20%, 60% y 100%.

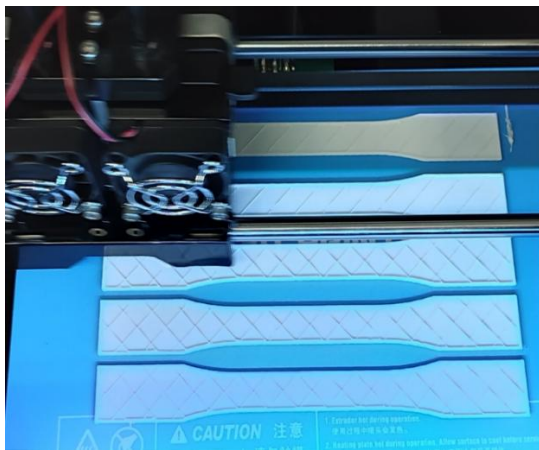
Se fabricaron 6 probetas por cada material y valor de relleno seleccionado. Todas las probetas fueron fabricadas utilizando una orientación de fabricación plana sobre la cama, un relleno combinado por defecto, y los parámetros de fabricación que se muestran en la Tabla 3.2, los cuales fueron seleccionados tras un arduo proceso de ensayo y error. Este proceso de selección de parámetros comenzó utilizando como base las recomendaciones dadas por los proveedores, pero se fueron modificando todos los parámetros dependientes del material hasta lograr fabricar un lote de probetas de buena calidad. En el caso de los materiales Brass y Copper, se utilizó una boquilla de acero endurecido de 4 mm de apertura para evitar el riesgo de daños producidos por la abrasión causada por la presencia de partículas de metal. Para los materiales Al y Wood, se utilizó una boquilla de latón de 8 mm de apertura para evitar atascos en la boquilla ya que estos filamentos cuentan con un tamaño de partícula mayor. Como resultado, fue necesario modificar el número de capas perimetrales y el número de capas de fondo y superficie para compensar el uso de una boquilla de mayor tamaño. La Figura 3.7 muestra ejemplos de fabricación de probetas en cada una de las máquinas

### Capítulo 3. Análisis experimental a tensión de probetas FFF

utilizadas, mientras que la Figura 3.8 muestra un ejemplo de cada probeta según el material utilizado en su fabricación.

**Tabla 3.2.** Parámetros de fabricación seleccionados para cada tipo de material.

Designación	Material y tamaño de boquilla (mm)	Temperatura de extrusión (°C)	Temperatura de cama (°C)	Velocidad de extrusión (mm/s)	Velocidad de desplazamiento (mm/s)	Capas perimetrales	Capas de fondo y superficie	Patrón de relleno	Ángulo de deposición	Longitud de retracción (mm)	Altura de primera capa (mm)	Altura de capa (mm)
PLA CP	Latón / 0.4	210	60	60	80	2	3	Lineal	± 45°	1.3	0.27	0.18
PLA FF	Latón / 0.4	210	60	60	80	2	3	Lineal	± 45°	1.3	0.27	0.18
ABS	Latón / 0.4	230	105	60	60	2	3	Lineal	± 45°	1.3	0.27	0.18
PETG	Latón / 0.4	230	80	30	110	2	3	Lineal	± 45°	1.3	0.27	0.18
TPU	Latón / 0.4	210	80	20	30	2	3	Lineal	± 45°	0	0.27	0.18
Al	Latón / 0.8	210	90	60	80	1	2	Lineal	± 45°	1.3	0.4	0.3
Wood	Latón / 0.8	205	90	60	80	1	2	Lineal	± 45°	1.3	0.4	0.3
Brass	Acero endurecido / 0.4	205	70	30	30	2	3	Lineal	± 45°	1.3	0.27	0.18
Copper	Acero endurecido / 0.4	215	60	30	30	2	3	Lineal	± 45°	1.3	0.27	0.18



a)



b)

**Figura 3.7.** Fabricación de probetas en las máquinas: a) Flashforge™ Creator Pro; y b) Flashforge™ Guider IIs.



Figura 3.8. Ejemplos de probetas fabricadas para cada tipo de material estudiado.

### 3.4. Caracterización del relleno real

Posterior a la fabricación de las probetas, el siguiente paso fue caracterizar su relleno real. Para ello fue necesario medir las dimensiones y la masa de cada una de las probetas utilizando un calibrador Mitutoyo CD-4" CSX y una báscula Ohaus Pioneer PA224, respectivamente, como se muestra en la Figura 3.9.

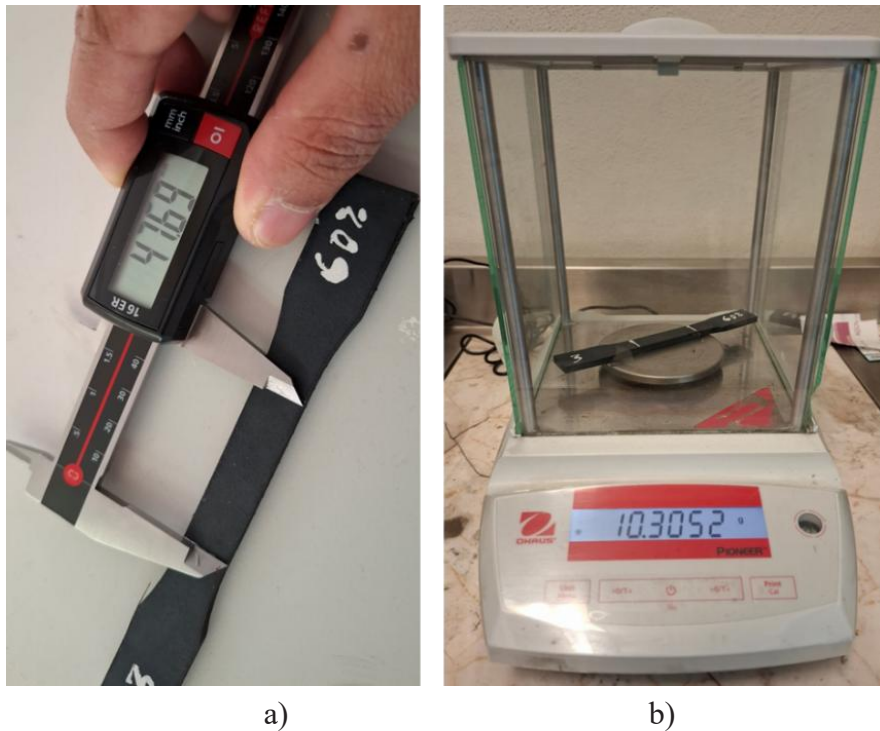


Figura 3.9. Medición de: a) dimensiones; y b) la masa de las probetas fabricadas.

Obtenidas las dimensiones y las masas de las probetas, se procedió a calcular la densidad de cada probeta utilizando la siguiente expresión:

$$\rho_p = \frac{W_p}{V_p} \quad (3.2)$$

donde  $\rho_p$ ,  $W_p$  y  $V_p$  son la densidad, la masa y volumen de la probeta, respectivamente.

Posteriormente, se utilizó esta densidad junto con la densidad del filamento de fabricación correspondiente para determinar el valor de relleno real ( $RI$ , por sus siglas en inglés Real Infill) de cada probeta, de acuerdo a la siguiente expresión:

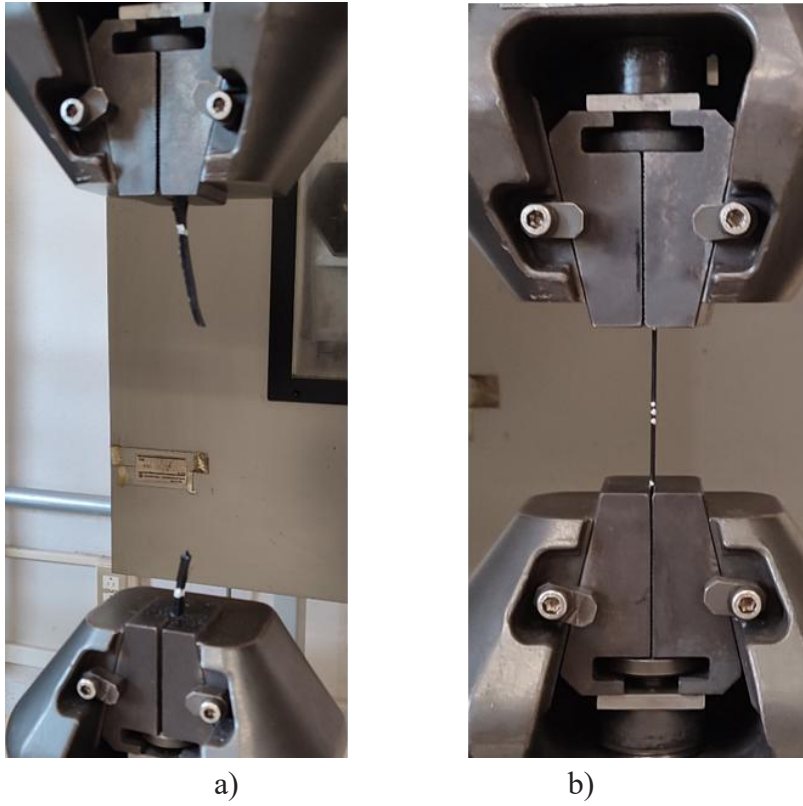
$$RI = \frac{\rho_p}{\rho_f} \times 100\% \quad (3.3)$$

donde  $\rho_f$  es la densidad del filamento utilizado en la fabricación de cada probeta.

El valor del relleno real se considera más representativo que el valor del relleno nominal, ya que representa la densidad global de la probeta y la cantidad de material utilizado en su fabricación tomando en cuenta no solo el relleno interior sino también las capas perimetrales, de fondo y superficie, las cuales son sólidas.

### 3.5. Pruebas de tensión

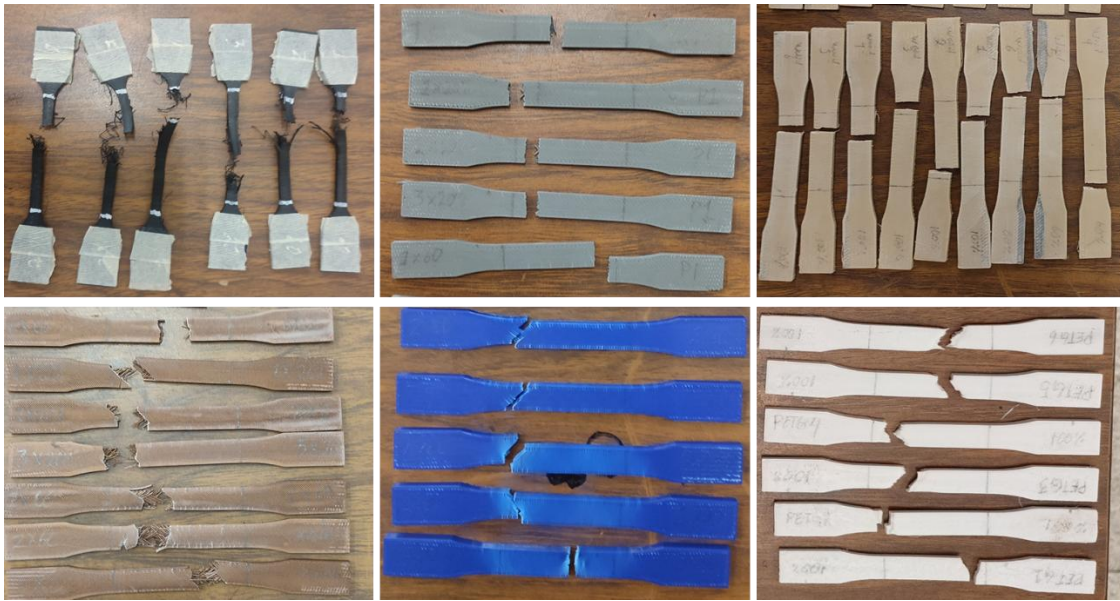
Una vez caracterizadas las probetas, se procedió a realizar los ensayos a tensión de cada una de ellas para determinar sus propiedades a la tensión. Estos ensayos fueron realizados de acuerdo con la norma ASTM D638 [104], utilizando una velocidad de prueba de 5 mm/min para los materiales rígidos, y una velocidad de 50 mm/min para el caso del material flexible TPU. En la Figura 3.10 se muestra una prueba de tensión aplicada a una probeta y a un filamento, y en las Figura 3.11 a) y b) se muestran ejemplos de los tipos de fallas obtenidas en los filamentos y en las probetas respectivamente.



**Figura 3.10.** Prueba de tensión aplicada a: a) una probeta de TPU, y a b) un filamento de TPU.



a)



b)

**Figura 3.11.** Tipos de fallas bajo tensión presentes en: a) filamentos, y b) probetas.

De las pruebas de tensión de cada probeta se determina el esfuerzo y deformación mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{A_{p0}} \quad (3.4)$$

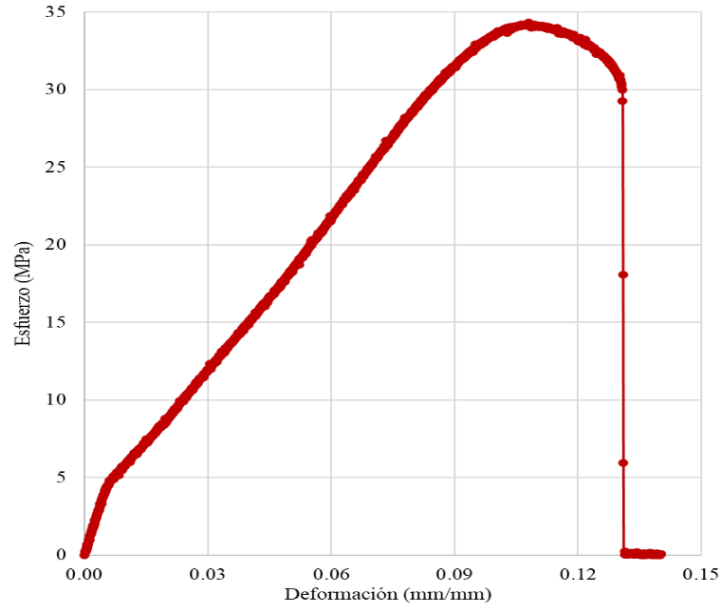
donde  $\sigma_p$ ,  $F_p$  y  $A_{p0}$  representan el esfuerzo aplicado a la probeta, la fuerza aplicada a la probeta y el área transversal inicial de la región calibrada de la probeta, respectivamente. La deformación se determina mediante la siguiente ecuación:

$$\epsilon_p = \frac{Z_{fin} - Z_0}{L_{p0}} \quad (3.5)$$

donde  $\epsilon_p$ ,  $Z_{fin}$ ,  $Z_0$  y  $L_{p0}$  son la deformación de la probeta, el punto final del desplazamiento de la mordaza en cada punto de medición, el punto inicial del desplazamiento de la mordaza, y la longitud inicial de la región calibrada de la probeta, respectivamente.

En la Figura 3.12 se observa un ejemplo de la curva esfuerzo deformación de una probeta de cobre (copper) con un porcentaje de relleno nominal del 100%. En esta curva se observa claramente la región elástica, cuya pendiente es el módulo de elasticidad; el cambio a la

región plástica; el punto con el esfuerzo máximo ( $UTS_p$ ), y el punto de ruptura de la probeta. En contraste con la Figura 3.5 (curva esfuerzo-deformación de una muestra de filamento), la Figura 3.12 muestra un comportamiento más estable. Además, se puede observar que la probeta tarda en alcanzar el valor  $UTS_p$ , y una vez alcanzado la probeta no es capaz de resistir más carga por lo que la ruptura ocurre a pocos mm después de alcanzar este valor. Este comportamiento contrasta con el observado en el filamento, donde el valor  $UTS_p$  es alcanzado muy rápido y enseguida llega a un flat top de carga constante que dura prácticamente cinco séptimos del tiempo total.



**Figura 3.12.** Curva esfuerzo-deformación de una probeta de cobre (copper) con 100% de relleno nominal.

Posteriormente se determina el módulo de elasticidad ( $E_p$ ) y la resistencia última a la tensión ( $UTS_p$ ) de cada probeta. El módulo de elasticidad de la probeta se obtiene al calcular el valor promedio de la pendiente de múltiples pares de puntos pertenecientes a la región elástica de la curva esfuerzo-deformación de cada probeta, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E_p = \frac{\sigma_{pf} - \sigma_{p0}}{\epsilon_{pf} - \epsilon_{p0}} \quad (3.6)$$

donde  $E_p$ ,  $\sigma_{p0}$ ,  $\sigma_{pf}$ ,  $\epsilon_{p0}$  y  $\epsilon_{pf}$  representan el módulo de elasticidad de la probeta, el esfuerzo inicial aplicado a la probeta en un cierto primer punto, el esfuerzo final aplicado a la probeta un cierto segundo punto, la deformación que sufre la probeta en el primer punto, y la deformación que sufre la probeta en un segundo punto, respectivamente.

Por otro lado, la resistencia última a la tensión de la probeta ( $UTS_p$ ) se obtiene al determinar el esfuerzo máximo en la curva esfuerzo-deformación de ésta.

### 3.6 Universalización de los resultados

El último paso de la metodología es la universalización de los resultados. Esta universalización se realiza con el fin de que los resultados finales sean independientes tanto de la máquina FFF, como de la condición y calidad de material utilizados para la fabricación de las piezas. De esta manera los resultados obtenidos serán de mayor utilidad para el desarrollo de modelos matemáticos para la predicción de propiedades a la tensión. La universalización propuesta considera presentar los resultados obtenidos usando: 1) el porcentaje de relleno real, y 2) normalizando las propiedades de las probetas con respecto a las propiedades correspondientes del filamento utilizado en su fabricación.

De esta manera, la normalización de las propiedades de las probetas se realiza de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

$$E_n = \frac{E_p}{E_f} \quad (3.7)$$

$$UTS_n = \frac{UTS_p}{UTS_f} \quad (3.8)$$

donde  $E_n$  y  $UTS_n$  son las propiedades normalizadas del módulo de elasticidad y resistencia última a la tensión, respectivamente;  $E_p$  y  $UTS_p$ , son el módulo de elasticidad y la resistencia última a la tensión de la probeta, respectivamente; y  $E_f$  y  $UTS_f$  son el módulo de elasticidad y resistencia última a la tensión del filamento, respectivamente.

### 3.7 Resultados

Los resultados obtenidos durante la etapa experimental del presente proyecto se presentan a continuación.

#### 3.7.1. Caracterización de la materia prima (filamentos)

Los resultados promedios y sus respectivas desviaciones estándar de la caracterización de cada filamento seleccionado se muestran en la Tabla 3.3. De esta tabla se puede observar que las propiedades de los dos PLA (PLA CP y PLA FF) son bastante similares entre ellas, a excepción de sus valores de  $UTS$ , en donde la diferencia es aproximadamente un 15% entre sí. También se observa que el módulo elástico del filamento Al y Brass poseen una magnitud superior a la del filamento PLA CP, lo cual contrasta con los otros dos materiales compuesto, Wood y Copper, que poseen magnitudes por debajo de los filamentos PLA. Estos resultados evidencian que la presencia de los materiales dopantes puede incrementar o disminuir la rigidez del PLA. Por otro lado, se observa que la resistencia última a la tensión de todos los materiales compuestos analizados es menor que la del filamento PLA CP; por lo tanto, se concluye que la presencia de estas partículas dopantes reduce la resistencia última a la

tensión. Además, se puede observar que el material con el menor módulo elástico es el TPU, mientras que el material con mayor resistencia  $UTS$  es el PETG.

**Tabla 3.3.** Resultados promedios y desviaciones estándar de la caracterización de filamentos.

Designación del filamento	Diámetro del filamento (mm)	Densidad ( $1 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ )	$E_f$ (GPa)	$UTS_f$ (MPa)
PLA CP	$1.760 \pm 0.009$	$1.257 \pm 0.007$	$2.396 \pm 1.571$	$68.93 \pm 3.873$
PLA FF	$1.730 \pm 0.006$	$1.248 \pm 0.039$	$2.117 \pm 0.263$	$58.69 \pm 6.563$
ABS	$1.739 \pm 0.015$	$1.083 \pm 0.015$	$2.790 \pm 0.196$	$59.61 \pm 5.764$
PETG	$1.719 \pm 0.014$	$1.333 \pm 0.022$	$1.755 \pm 0.480$	$72.57 \pm 3.734$
TPU	$1.721 \pm 0.016$	$1.224 \pm 0.026$	$(6.806 \pm 5.272) \times 10^{-2}$	$46.88 \pm 7.012$
Al	$1.725 \pm 0.005$	$1.425 \pm 0.010$	$3.316 \pm 0.288$	$46.81 \pm 3.141$
Wood	$1.746 \pm 0.011$	$1.265 \pm 0.014$	$1.588 \pm 0.188$	$40.23 \pm 2.187$
Brass	$1.750 \pm 0.009$	$1.383 \pm 0.013$	$2.555 \pm 0.347$	$39.42 \pm 2.821$
Copper	$1.712 \pm 0.004$	$1.375 \pm 0.003$	$1.495 \pm 0.264$	$51.72 \pm 2.761$

### 3.7.2. Caracterización del relleno real

La Tabla 3.4 muestra el valor promedio y desviación estándar de los resultados de la medición del relleno real ( $RI$ ) por cada grupo de probetas fabricadas. De estos resultados se puede observar claramente que los valores del  $RI$  son mayores que los valores nominales para todos los casos, salvo para el 100%. Esto se debe a que el relleno nominal solo considera el interior y no las capas perimetrales, de fondo y de superficie de la probeta, lo que explica porque el  $RI$  es mayor que el valor de relleno nominal a excepción del 100% nominal. Para el caso del 100% nominal, siempre se alcanzarán valores por debajo del 100% real ya que la metodología de fabricación deposita líneas de material que al unirse entre ellas siempre generaran una microestructura de huecos o poros entre ellas, lo que impedirá llegar al 100% de relleno real. Por último, también se observa que el tipo de material produce cambios en los valores del  $RI$ .

**Tabla 3.4.** Resultados promedio del *RI* para cada grupo de probetas de material.

Designación del filamento	Valor de relleno real, <i>RI</i> (%)			
	5% nominal	20% nominal	60% nominal	100% nominal
PLA CP	37.01 ± 0.071	46.52 ± 0.024	71.87 ± 0.049	90.35 ± 0.110
PLA FF	36.15 ± 0.027	45.21 ± 0.017	68.51 ± 0.093	88.61 ± 0.109
ABS	37.50 ± 0.346	46.88 ± 0.205	70.29 ± 0.132	91.54 ± 0.528
PETG	38.24 ± 0.316	45.90 ± 0.529	71.65 ± 0.259	87.78 ± 0.299
TPU	37.92 ± 0.773	45.06 ± 0.368	73.17 ± 0.455	93.47 ± 0.507
Al	40.13 ± 0.287	48.39 ± 0.057	71.76 ± 0.108	87.44 ± 2.056
Wood	37.82 ± 0.065	46.00 ± 0.066	66.21 ± 0.124	84.61 ± 0.098
Brass	37.84 ± 0.085	47.75 ± 0.148	71.70 ± 0.055	91.78 ± 0.280
Copper	36.90 ± 0.130	45.34 ± 0.041	69.19 ± 0.054	91.64 ± 0.204

### 3.7.3. Propiedades a tensión de las probetas

Los resultados de las pruebas uniaxiales a tensión de cada grupo de probetas se muestran en las Tablas 3.5 y 3.6. En la Tabla 3.5 se presentan los resultados promedios del *RI* y el módulo de elasticidad de las probetas, junto con sus correspondientes desviaciones estándar; mientras que en la Tabla 3.6 se presentan los resultados del *RI* y la resistencia última a la tensión  $UTS_p$  de las probetas, y sus desviaciones estándar. En general, los resultados muestran que hay una tendencia ascendente en los valores del  $E_p$  como del  $UTS_p$  conforme el *RI* incrementa. También se observa, que al igual que con los filamentos, las probetas correspondientes al material TPU son las que poseen el valor más bajo de  $E_p$ , y las probetas del material PETG son las que tienen el mayor valor  $UTS$ . En lo que respecta a los materiales compuestos, los resultados muestran que, en general, las probetas fabricadas de materiales compuestos poseen propiedades menores que las probetas fabricadas de PLA CP.

**Tabla 3.5.** Resultados promedio y desviación estándar del módulo elástico de las probetas.

Designación del filamento	Propiedad	Resultados			
PLA CP	<i>RI</i> (%)	37.01 ± 0.071	46.52 ± 0.024	71.87 ± 0.049	90.35 ± 0.110
	$E_p$ (MPa)	442.4 ± 38.92	468.0 ± 35.72	558.2 ± 26.24	923.9 ± 71.12
PLA FF	<i>RI</i> (%)	36.15 ± 0.027	45.21 ± 0.017	68.51 ± 0.037	88.61 ± 0.109
	$E_p$ (MPa)	388.6 ± 39.39	362.3 ± 28.36	430.3 ± 21.06	906.3 ± 40.78
ABS	<i>RI</i> (%)	37.50 ± 0.346	46.88 ± 0.205	70.29 ± 0.132	91.54 ± 0.528
	$E_p$ (MPa)	261.3 ± 13.36	323.1 ± 14.13	397.8 ± 17.52	633.2 ± 31.30
PETG	<i>RI</i> (%)	38.24 ± 0.316	45.90 ± 0.529	71.65 ± 0.259	87.78 ± 0.299
	$E_p$ (MPa)	339.1 ± 54.28	372.9 ± 39.21	441.3 ± 39.78	704.3 ± 11.17

### Capítulo 3. Análisis experimental a tensión de probetas FFF

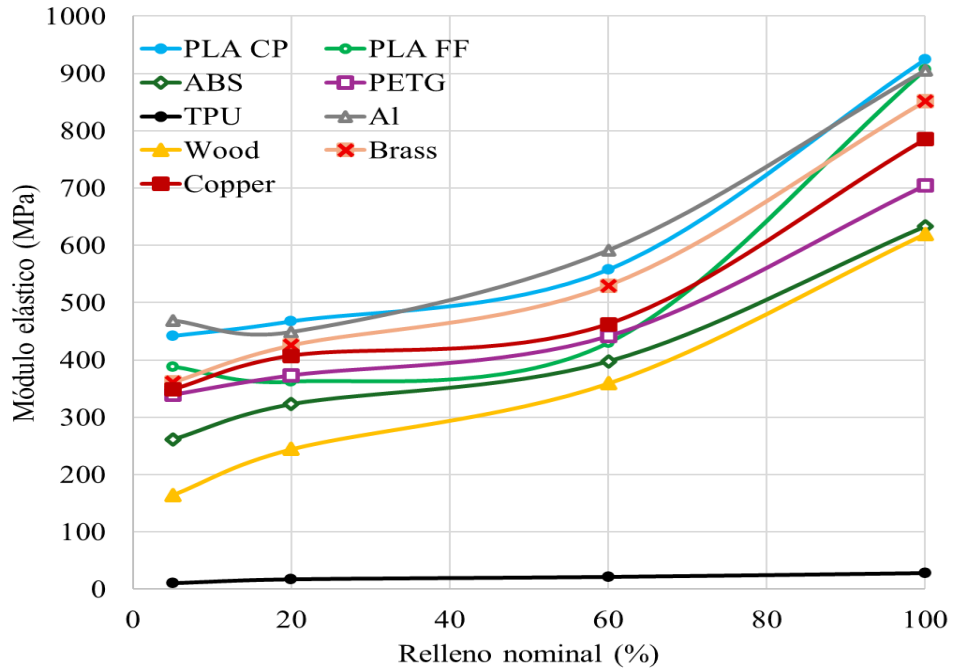
TPU	<i>RI (%)</i>	37.92 ± 0.773	45.06 ± 0.368	73.17 ± 0.455	93.47 ± 0.507
	<i>E<sub>p</sub> (MPa)</i>	9.981 ± 2.799	16.77 ± 1.253	21.04 ± 2.182	27.78 ± 1.552
Al	<i>RI (%)</i>	40.13 ± 0.287	48.39 ± 0.057	71.76 ± 0.108	87.44 ± 2.056
	<i>E<sub>p</sub> (MPa)</i>	468.9 ± 32.53	449.1 ± 47.97	591.8 ± 66.71	905.9 ± 101.7
Wood	<i>RI (%)</i>	37.82 ± 0.065	46.00 ± 0.066	66.21 ± 0.124	84.61 ± 0.098
	<i>E<sub>p</sub> (MPa)</i>	164.6 ± 27.29	244.6 ± 32.46	359.3 ± 64.76	620.1 ± 66.95
Brass	<i>RI (%)</i>	37.84 ± 0.085	47.75 ± 0.148	71.70 ± 0.055	91.78 ± 0.280
	<i>E<sub>p</sub> (MPa)</i>	360.6 ± 18.87	425.1 ± 60.58	529.9 ± 5.548	851.0 ± 64.05
Copper	<i>RI (%)</i>	36.90 ± 0.130	45.34 ± 0.041	69.19 ± 0.054	91.64 ± 0.204
	<i>E<sub>p</sub> (MPa)</i>	348.3 ± 132.7	407.2 ± 64.31	462.9 ± 53.31	785.7 ± 38.55

**Tabla 3.6.** Resultados promedio y desviación estándar del *UTS* de las probetas.

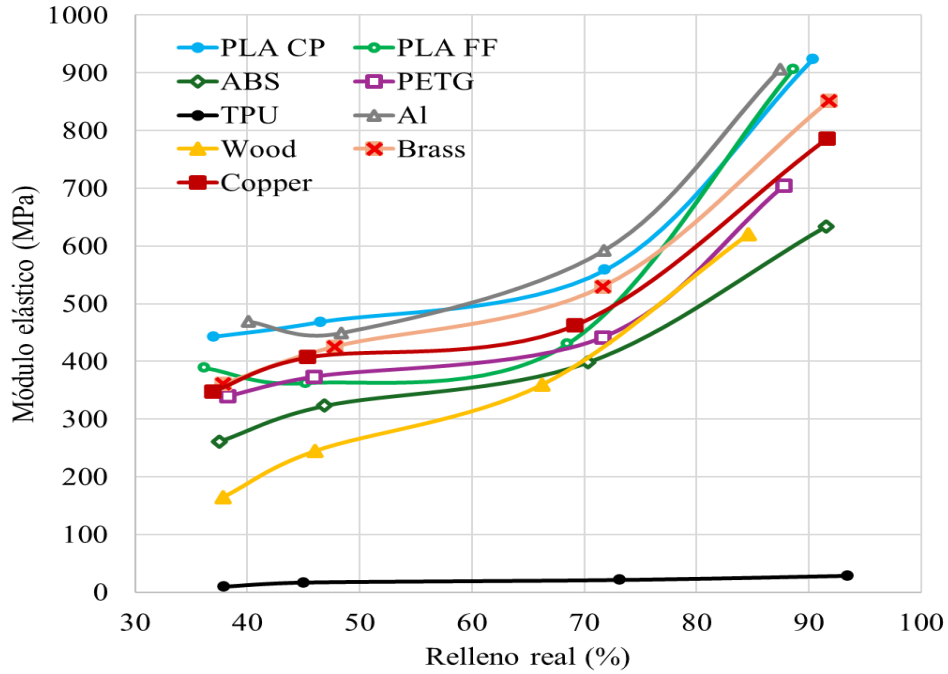
Designación del filamento	Propiedad	Resultados			
PLA CP	<i>RI (%)</i>	37.01 ± 0.071	46.52 ± 0.024	71.87 ± 0.049	90.35 ± 0.110
	<i>UTS<sub>p</sub> (MPa)</i>	13.92 ± 0.252	14.40 ± 0.402	19.09 ± 0.513	36.23 ± 0.755
PLA FF	<i>RI (%)</i>	36.15 ± 0.027	45.21 ± 0.017	68.51 ± 0.037	88.61 ± 0.109
	<i>UTS<sub>p</sub> (MPa)</i>	11.80 ± 0.436	13.70 ± 0.451	16.35 ± 0.456	33.30 ± 1.142
ABS	<i>RI (%)</i>	37.50 ± 0.346	46.88 ± 0.205	70.29 ± 0.132	91.54 ± 0.528
	<i>UTS<sub>p</sub> (MPa)</i>	12.20 ± 0.237	13.67 ± 0.283	16.77 ± 0.315	32.01 ± 0.732
PETG	<i>RI (%)</i>	38.24 ± 0.316	45.90 ± 0.529	71.65 ± 0.259	87.78 ± 0.299
	<i>UTS<sub>p</sub> (MPa)</i>	15.10 ± 1.739	15.70 ± 1.250	21.54 ± 2.133	44.91 ± 1.409
TPU	<i>RI (%)</i>	37.92 ± 0.773	45.06 ± 0.368	73.17 ± 0.455	93.47 ± 0.507
	<i>UTS<sub>p</sub> (MPa)</i>	7.363 ± 0.576	8.365 ± 0.882	8.851 ± 0.685	15.20 ± 0.750
Al	<i>RI (%)</i>	40.13 ± 0.287	48.39 ± 0.057	71.76 ± 0.108	87.44 ± 2.056
	<i>UTS<sub>s</sub> (MPa)</i>	9.618 ± 0.255	10.23 ± 0.307	16.15 ± 0.031	27.46 ± 1.101
Wood	<i>RI (%)</i>	37.82 ± 0.065	46.00 ± 0.066	66.21 ± 0.124	84.61 ± 0.098
	<i>UTS<sub>p</sub> (MPa)</i>	6.902 ± 0.692	8.384 ± 0.332	13.40 ± 0.893	24.56 ± 0.279
Brass	<i>RI (%)</i>	37.84 ± 0.085	47.75 ± 0.148	71.70 ± 0.055	91.78 ± 0.280
	<i>UTS<sub>p</sub> (MPa)</i>	5.948 ± 1.026	7.038 ± 1.079	9.660 ± 0.986	22.35 ± 3.252
Copper	<i>RI (%)</i>	36.90 ± 0.130	45.34 ± 0.041	69.19 ± 0.054	91.64 ± 0.204
	<i>UTS<sub>s</sub> (MPa)</i>	11.00 ± 1.378	12.00 ± 0.382	13.99 ± 0.527	33.00 ± 0.814

Los resultados del módulo de elasticidad y resistencia última a la tensión de las probetas hechas de diferentes materiales y porcentajes de relleno se grafican en las Figuras 3.13 y 3.14, respectivamente. En cada una de estas figuras se muestran los resultados en función del relleno nominal y del relleno real. En la Figura 3.13 a) y b) se observa que todos los materiales rígidos muestran un comportamiento del módulo de elasticidad con una tendencia ascendente y con un crecimiento muy similar entre ellas; es decir, poseen una pendiente de crecimiento similar, pero con un ajuste en la magnitud y en la curvatura específica de cada material.

Contrasta con este comportamiento el TPU, cuya curva destaca entre todas por ser la curva del módulo de elasticidad con los valores más bajos, y también por tener una tendencia de crecimiento prácticamente plana. Por otro lado, en la Figura 3.14 a) y b) se puede observar que las curvas de  $UTS_p$  de cada material están ajustadas en magnitud y curvatura en función de cada material. Además, debido a que la separación entre las magnitudes de las diferentes curvas de  $UTS_p$  no es lo suficientemente grande, y como todos los materiales, incluyendo al TPU, presentan un comportamiento muy similar entre ellos, no es posible diferenciar un material flexible de uno rígido basándose únicamente en la curva de su  $UTS_p$ .

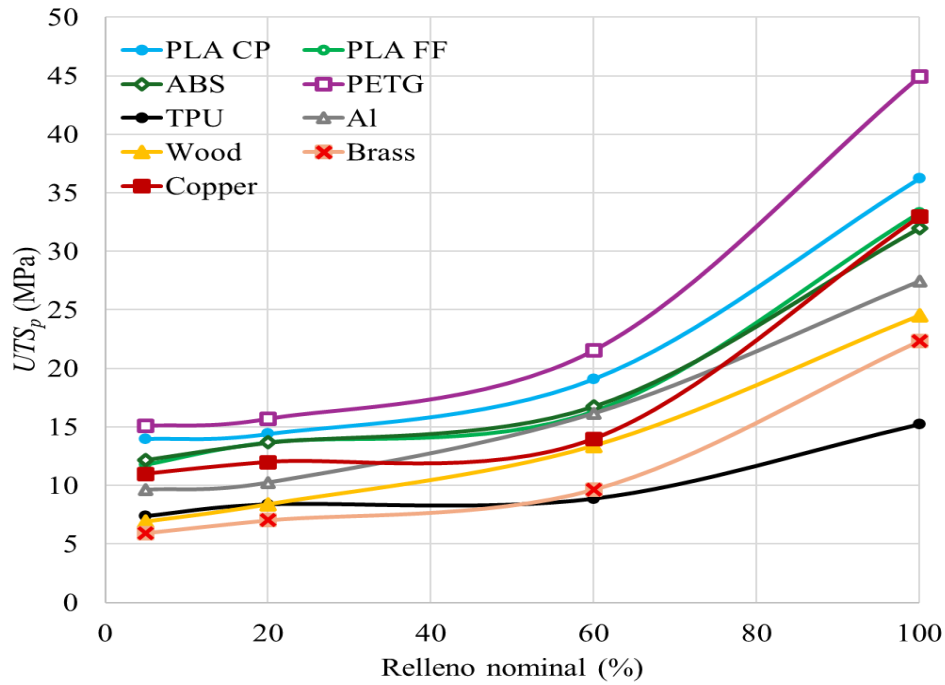


a)

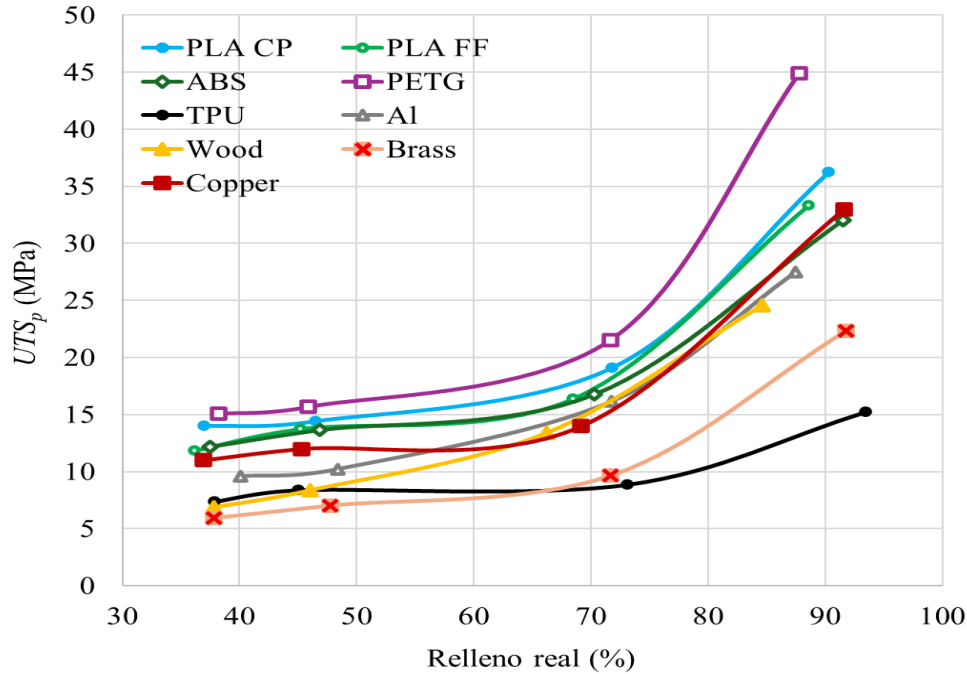


b)

Figura 3.13. Módulo de elasticidad vs.: a) relleno nominal y b) relleno real, para todos los materiales estudiados.



a)



b)

**Figura 3.14.** Resistencia última a la tensión vs.: a) relleno nominal y b) relleno real, para todos los materiales estudiados.

Tanto en la Figura 3.13 como en la Figura 3.14, se observa la comparación entre los resultados tanto del módulo de elasticidad como del  $UTS_p$  en función del relleno nominal y del relleno real. De esta comparación, se puede observar que las curvas de las propiedades de todos los materiales se compactan más entre ellas al utilizar el relleno real. Además, el uso del relleno real muestra que algunos materiales alcanzan sus respectivos valores más altos tanto del módulo de elasticidad como del  $UTS_p$ , con valores de relleno menores al 100% de relleno nominal. Por lo tanto, es posible alcanzar valores inclusive más altos de las propiedades mecánicas estructurales si se modifican los parámetros de fabricación que incrementen la cantidad de material (el relleno real) utilizada en cada probeta. Las modificaciones de parámetros de fabricación que incrementan la cantidad de material de la probeta son: incrementar el número de capas perimetrales; desactivar el relleno combinado; o incrementar el número de capas de fondo y superficie, esta última modificación de parámetro solo es efectiva para los casos con un relleno nominal menor al 100%.

### 3.7.4. Universalización de resultados

En las Tablas 3.7 y 3.8 se muestra la universalización de todos los resultados presentados en las Tablas 3.5 y 3.6, respectivamente. En general, de las Tablas 3.7 y 3.8 se puede observar un claro incremento en el valor de las propiedades a tensión conforme el porcentaje de relleno real incrementa, pero este valor nunca supera ni alcanza el valor obtenido por el filamento utilizado en cada caso. En la Tabla 3.7 se observa que las probetas del material Copper son

### Capítulo 3. Análisis experimental a tensión de probetas FFF

las que tienen los valores más altos del módulo elástico normalizado, mientras que las probetas de ABS presentan los valores normalizados más bajos de esta propiedad. Valores normalizados más altos es indicativo de que las propiedades tanto del módulo de elasticidad como del  $UTS$  son más similares a las del filamento utilizado en su fabricación; por el contrario, valores más bajos implica que las propiedades difieren más con respecto a las del filamento. Por otra parte, los resultados de la Tabla 3.8 muestran que las probetas con los valores de  $UTS_n$  más altos son las probetas hechas de Copper, seguidas por las probetas PETG, Wood y Al, mientras que las probetas con el valor de  $UTS_n$  más bajo son las probetas fabricadas con TPU.

**Tabla 3.7.** Valores promedio y desviaciones estándar del módulo elástico universalizado de las probetas FFF.

Designación del filamento	Propiedad	Resultados			
PLA CP	$RI$ (%)	$37.01 \pm 0.071$	$46.52 \pm 0.024$	$71.87 \pm 0.049$	$90.35 \pm 0.110$
	$E_n$	$0.185 \pm 0.016$	$0.195 \pm 0.015$	$0.233 \pm 0.011$	$0.386 \pm 0.030$
PLA FF	$RI$ (%)	$36.15 \pm 0.027$	$45.21 \pm 0.017$	$68.51 \pm 0.037$	$88.61 \pm 0.109$
	$E_n$	$0.184 \pm 0.019$	$0.171 \pm 0.014$	$0.203 \pm 0.010$	$0.428 \pm 0.019$
ABS	$RI$ (%)	$37.50 \pm 0.346$	$46.88 \pm 0.205$	$70.29 \pm 0.132$	$91.54 \pm 0.528$
	$E_n$	$0.094 \pm 0.005$	$0.116 \pm 0.005$	$0.143 \pm 0.006$	$0.218 \pm 0.024$
PETG	$RI$ (%)	$38.24 \pm 0.316$	$45.90 \pm 0.529$	$71.65 \pm 0.259$	$87.78 \pm 0.299$
	$E_n$	$0.193 \pm 0.031$	$0.212 \pm 0.022$	$0.250 \pm 0.025$	$0.378 \pm 0.030$
TPU	$RI$ (%)	$37.92 \pm 0.773$	$45.06 \pm 0.368$	$73.17 \pm 0.455$	$93.47 \pm 0.507$
	$E_n$	$0.098 \pm 0.082$	$0.205 \pm 0.102$	$0.309 \pm 0.032$	$0.408 \pm 0.023$
Al	$RI$ (%)	$40.13 \pm 0.287$	$48.39 \pm 0.057$	$71.76 \pm 0.108$	$87.44 \pm 2.056$
	$E_n$	$0.135 \pm 0.010$	$0.135 \pm 0.014$	$0.178 \pm 0.020$	$0.273 \pm 0.031$
Wood	$RI$ (%)	$37.82 \pm 0.065$	$46.00 \pm 0.066$	$66.21 \pm 0.124$	$84.61 \pm 0.098$
	$E_n$	$0.104 \pm 0.017$	$0.154 \pm 0.020$	$0.226 \pm 0.041$	$0.390 \pm 0.042$
Brass	$RI$ (%)	$37.84 \pm 0.085$	$47.75 \pm 0.148$	$71.70 \pm 0.055$	$91.78 \pm 0.280$
	$E_n$	$0.141 \pm 0.007$	$0.165 \pm 0.024$	$0.207 \pm 0.018$	$0.333 \pm 0.025$
Copper	$RI$ (%)	$36.90 \pm 0.130$	$45.34 \pm 0.041$	$69.19 \pm 0.054$	$91.64 \pm 0.204$
	$E_n$	$0.214 \pm 0.089$	$0.272 \pm 0.043$	$0.310 \pm 0.036$	$0.526 \pm 0.026$

**Tabla 3.8.** Valores promedio y desviaciones estándar del *UTS* universalizado de las probetas FFF.

Designación del filamento	Propiedad	Resultados			
PLA CP	<i>RI (%)</i>	37.01 ± 0.071	46.52 ± 0.024	71.87 ± 0.049	90.35 ± 0.110
	<i>UTS<sub>n</sub></i>	0.202 ± 0.004	0.209 ± 0.006	0.277 ± 0.007	0.526 ± 0.011
PLA FF	<i>RI (%)</i>	36.15 ± 0.027	45.21 ± 0.017	68.51 ± 0.037	88.61 ± 0.109
	<i>UTS<sub>n</sub></i>	0.201 ± 0.007	0.233 ± 0.008	0.279 ± 0.008	0.567 ± 0.019
ABS	<i>RI (%)</i>	37.50 ± 0.346	46.88 ± 0.205	70.29 ± 0.132	91.54 ± 0.528
	<i>UTS<sub>n</sub></i>	0.205 ± 0.004	0.229 ± 0.005	0.281 ± 0.005	0.539 ± 0.012
PETG	<i>RI (%)</i>	38.24 ± 0.316	45.90 ± 0.529	71.65 ± 0.259	87.78 ± 0.299
	<i>UTS<sub>n</sub></i>	0.208 ± 0.024	0.216 ± 0.017	0.301 ± 0.030	0.617 ± 0.021
TPU	<i>RI (%)</i>	37.92 ± 0.773	45.06 ± 0.368	73.17 ± 0.455	93.47 ± 0.507
	<i>UTS<sub>n</sub></i>	0.105 ± 0.082	0.149 ± 0.075	0.189 ± 0.015	0.324 ± 0.163
Al	<i>RI (%)</i>	40.13 ± 0.287	48.39 ± 0.057	71.76 ± 0.108	87.44 ± 2.056
	<i>UTS<sub>n</sub></i>	0.205 ± 0.005	0.218 ± 0.007	0.345 ± 0.001	0.587 ± 0.024
Wood	<i>RI (%)</i>	37.82 ± 0.065	46.00 ± 0.066	66.21 ± 0.124	84.61 ± 0.098
	<i>UTS<sub>n</sub></i>	0.172 ± 0.017	0.208 ± 0.008	0.333 ± 0.022	0.610 ± 0.007
Brass	<i>RI (%)</i>	37.84 ± 0.085	47.75 ± 0.148	71.70 ± 0.055	91.78 ± 0.280
	<i>UTS<sub>n</sub></i>	0.151 ± 0.026	0.180 ± 0.027	0.245 ± 0.025	0.567 ± 0.083
Copper	<i>RI (%)</i>	36.90 ± 0.130	45.34 ± 0.041	69.19 ± 0.054	91.64 ± 0.204
	<i>UTS<sub>n</sub></i>	0.219 ± 0.025	0.232 ± 0.007	0.271 ± 0.137	0.638 ± 0.016

Los resultados normalizados mostrados en las Tablas 3.7 y 3.8 son graficados en las Figuras 3.15 y 3.16, respectivamente. En la Figura 3.15 se observa que, para casi todos los materiales, a excepción del TPU, Wood y Copper, se tiene una tendencia del módulo elástico normalizado similar a lo largo de todos los porcentajes de relleno real. Sin embargo, a porcentajes menores del 50% de relleno real, las probetas de TPU, Wood y Copper, exhiben pendientes de crecimiento mayores que el resto de los materiales. Dentro del rango del 50 % a 70% de relleno real, las probetas de todos los materiales rígidos muestran una pendiente de crecimiento muy similar entre ellas. Para valores superiores al 70% de relleno, el ritmo de crecimiento crece considerablemente, pero varía según el material. Para el caso del material TPU, este presenta un ritmo de crecimiento casi constante desde el 45% hasta el 90% de relleno real. Este comportamiento único del TPU lo diferencia del resto de los materiales estudiados, ya que se trata del único material no rígido del grupo.

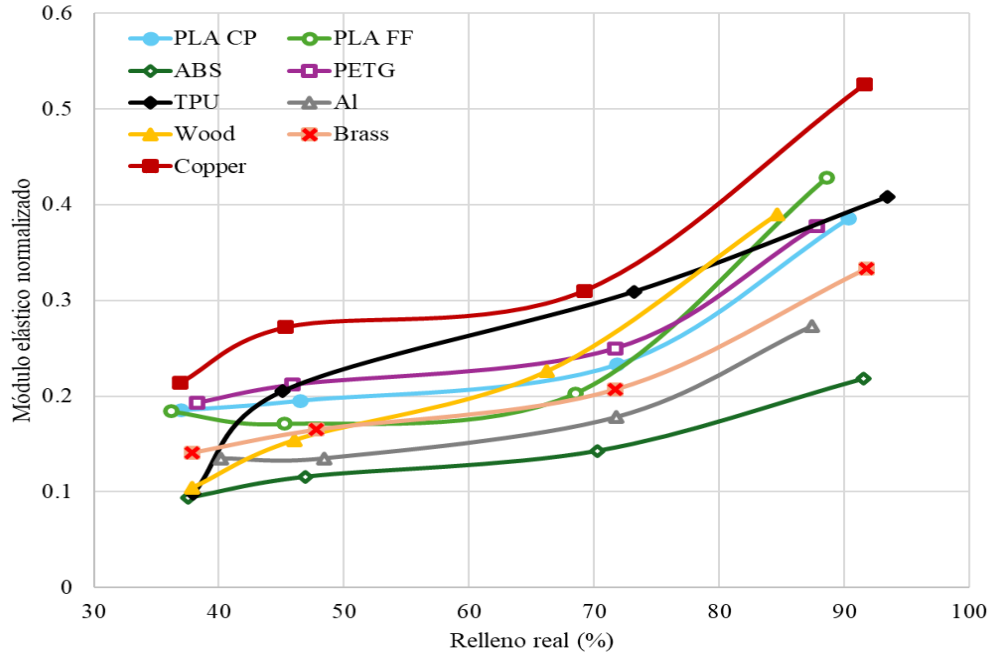


Figura 3.15. Módulo elástico universalizado de las probetas FFF.

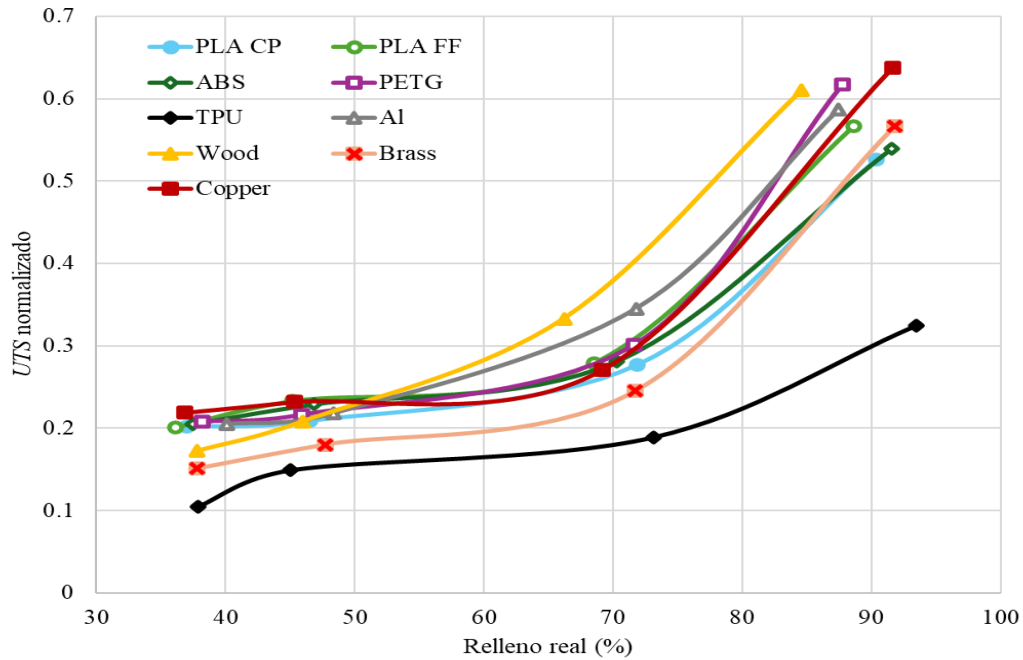


Figura 3.16. UTS universalizado de las probetas FFF.

Por su parte, en la Figura 3.16 se muestra que dentro del rango del 37% al 55% de relleno real, todos los materiales rígidos poseen no solo una tendencia muy similar en el UTS, sino también valores muy parecidos entre ellos. A partir de valores de rellenos reales superiores

al 55% el crecimiento de todos los materiales comienza a diferenciarse en términos de cada material. Este tipo de comportamiento puede atribuirse a que a bajos valores de relleno real el  $UTS_n$  está más influenciado por la deposición del material que por el tipo de material usado, y conforme se incrementa la cantidad de material en la probeta su influencia en la propiedad incrementa. En el caso del material flexible TPU, este presenta una tendencia de crecimiento muy similar al resto de los materiales a lo largo de todos los valores de relleno real, su única diferencia es que estos valores son muy diferentes en magnitud a los que posee su respectivo filamento.

## Capítulo 4. Modelos de predicción de propiedades a tensión de piezas FFF

Existe una gran variedad de modelos matemáticos pensados para predecir el comportamiento experimental de las piezas FFF. Sin embargo, estos modelos tienen dos problemas destacables. Por un lado, estos modelos se alimentan de resultados muy específicos, por lo que las predicciones obtenidas no pueden ser aplicables a casos más generales. Por otro lado, la gran mayoría de estos modelos son numéricos, por lo que requieren un recurso económico elevado, un tiempo considerable para su desarrollo, y un costo computacional considerable. Todas estas limitaciones se pueden reducir si se utilizan modelos analítico-empíricos para la predicción del comportamiento a tensión de las piezas FFF.

### 4.1 Modelos de predicción analítico-empíricos

Se seleccionaron ocho modelos analítico-empíricos, los cuales se describen a continuación.

#### 4.1.1. Modelo de Gibson y Ashby

El modelo de Gibson y Ashby se presentó en [84] y fue utilizado en [93] para predecir el comportamiento de piezas FFF hechas de PLA. Este modelo se define mediante la siguiente expresión:

$$\frac{E_p}{E_f} = E_n = C(1 - P)^n; \quad (4.1)$$

donde,  $E_p$  es el módulo de elasticidad del material poroso, en este caso el módulo elástico de la probeta;  $E_f$  es el módulo de elasticidad del material sólido, en este caso del filamento;  $E_n$  es el módulo elástico normalizado;  $P$  es la porosidad del material la cual puede adquirir valores entre 0.5 y 0.96; y  $C$  y  $n$  son los coeficientes del modelo, los cuales pueden ser obtenidos mediante datos experimentales. La porosidad del material puede determinarse como:

$$P = (1 - RI); \quad (4.2)$$

donde  $RI$  es el porcentaje de relleno real de la probeta o componente FFF.

De acuerdo a lo mencionado en [88], este modelo puede ser extendido al caso de la resistencia última a la tensión, para este caso la expresión es la siguiente:

$$\frac{UTS_p}{UTS_f} = UTS_n = c(1 - P)^N; \quad (4.3)$$

donde,  $UTS_p$  es la resistencia última a la tensión de la probeta;  $UTS_f$  es la resistencia última a la tensión del filamento;  $UTS_n$  es la resistencia última a la tensión normalizada; y  $c$  y  $N$  son los coeficientes del modelo, los cuales pueden ser obtenidos mediante datos experimentales.

#### 4.1.2. Modelo Exponencial

Una modificación del modelo de Gibson y Ashby aplicada a la predicción del comportamiento estructural de piezas FFF de PLA fue presentada en [93]. Este modelo se describe, respectivamente para el módulo elástico y la resistencia última a la tensión, de la siguiente manera:

$$\frac{E_p}{E_f} = E_n = Ce^{n(1-P)}; \quad (4.4)$$

$$\frac{UTS_p}{UTS_f} = UTS_n = ce^{N(1-P)}; \quad (4.5)$$

en la expresión 4.4,  $C$  y  $n$  son los coeficientes del modelo para el módulo elástico, y son determinados mediante datos experimentales, mientras que en la expresión 4.5,  $c$  y  $N$  son los coeficientes del modelo para la resistencia última a la tensión, los cuales también pueden ser determinados a partir por la información experimental.

#### 4.1.3. Modelo de Ley de mezclas

La regla de mezclas presentada en [83] es una aproximación del comportamiento estructural de materiales compuestos, y se describe de la siguiente manera:

$$E_c = E_m V_m + E_R V_R; \quad (4.6)$$

donde,  $E_c$  es el módulo elástico del material compuesto,  $E_m$  es el módulo elástico del material matriz y  $E_R$  es el módulo elástico del material reforzante.  $V_m$  y  $V_R$  hacen referencia a la fracción de volumen que ocupa cada uno de estos materiales en la pieza total.

Para el caso de piezas FFF,  $E_c$  representa el módulo de elasticidad de la probeta, por lo que podemos reemplazarlo por  $E_p$ ; el material de la matriz es el filamento depositado, por lo que  $E_m$  y  $V_m$  pueden ser sustituidos por  $E_f$  y  $V_f$ , respectivamente; el material reforzante es el vacío que se encuentra entre las líneas de material depositado, por lo tanto,  $E_R$  es igual a cero. Además,  $V_f$  hace referencia a la cantidad de material matriz, o en este caso filamento, que posee el volumen total de la pieza, es decir el relleno real de la pieza. Considerando estas condiciones, la expresión 4.6 se describe de la siguiente manera:

$$E_p = E_f RI + (0)V_R; \quad (4.7)$$

lo que es igual a la siguiente expresión:

$$E_p = E_f RI; \quad (4.8)$$

y reescribiéndolo en términos del módulo de elasticidad normalizado ( $E_n$ ):

$$E_n = \frac{E_p}{E_f} = RI \quad (4.9)$$

Siguiendo lo presentado en [88], la regla de mezcla puede extender su uso para la *UTS*, por lo que la expresión de la regla de mezclas aplicado a la *UTS* de piezas FFF es la siguiente:

$$UTS_n = \frac{UTS_p}{UTS_f} = RI \quad (4.10)$$

#### 4.1.4. Modelo de Eficiencia

El modelo de eficiencia es una modificación de la regla de mezclas en la cual se multiplica cada factor por un coeficiente de eficiencia. La expresión de este modelo es la siguiente:

$$E_c = \alpha E_m V_m + \beta E_R V_R; \quad (4.11)$$

donde,  $\alpha$  y  $\beta$  son los coeficientes de eficiencia antes mencionados, los cuales pueden ser obtenidos a través de datos experimentales. Al igual que en la regla de mezclas,  $E_c$  representa el módulo de elasticidad de la probeta, por lo que podemos reemplazarlo por  $E_p$ ; el material matriz es el filamento depositado, por lo que  $E_m$  y  $V_m$  pueden ser sustituidos por  $E_f$  y  $V_f$ , respectivamente; el material reforzante es el vacío que se encuentra entre las líneas de material depositado, por lo tanto,  $E_R$  es igual a cero. Además,  $V_f$  hace referencia a la cantidad de material matriz, o en este caso filamento, que posee el volumen total de la pieza, es decir el relleno real de la pieza. Por lo tanto, la expresión queda de la siguiente manera:

$$E_n = \frac{E_p}{E_f} = \alpha RI \quad (4.12)$$

En el caso de la resistencia última a la tensión, el modelo de eficiencia se describe de la siguiente manera:

$$UTS_n = \frac{UTS_p}{UTS_f} = \alpha' RI \quad (4.13)$$

donde,  $UTS_n$ ,  $UTS_p$  y  $UTS_f$  son las resistencias últimas a la tensión normalizada, de la probeta y del filamento, respectivamente; y  $\alpha'$  es el coeficiente de eficiencia, el cual puede ser obtenido a partir de datos experimentales.

### 4.1.5 Modelo de Sprigg y Duckworth

La expresión del modelo de Sprigg y Duckworth, presentada en [82], [88], es la siguiente:

$$E_n = \frac{E_p}{E_f} = e^{-kP}; \quad (4.14)$$

donde  $E_n$  es el módulo elástico normalizado,  $E_p$  es el módulo de elasticidad de la probeta,  $E_f$  es el módulo de elasticidad del filamento,  $P$  es la porosidad y  $k$  el coeficiente de relación que puede obtenerse de forma experimental.

Para el caso de la resistencia última a la tensión:

$$UTS_n = \frac{UTS_p}{UTS_f} = e^{-KP}; \quad (4.15)$$

donde,  $UTS_n$  es la resistencia última a la tensión normalizada,  $UTS_p$  es la resistencia última de la probeta,  $UTS_f$  es la misma propiedad, pero del filamento, y  $K$  el coeficiente de relación que puede obtenerse de forma experimental.

### 4.1.6 Modelo variante de Duckworth

Existe una modificación del modelo de Sprigg y Duckworth, la cual fue presentada en [93], y se describe para el módulo de elasticidad y la resistencia última a la tensión, respectivamente como:

$$E_n = \frac{E_p}{E_f} = \beta e^{-kP} \quad (4.16)$$

$$UTS_n = \frac{UTS_p}{UTS_f} = \beta' e^{-KP} \quad (4.17)$$

donde,  $\beta$  y  $\beta'$  son los coeficientes de eficiencia, y  $k$  y  $K$  los coeficientes de relación para el módulo elástico y la resistencia última a la tensión, respectivamente. Todos estos coeficientes se pueden determinar a partir de datos experimentales.

### 4.1.7. Modelo de Rice

El modelo de Rice fue presentado en [87], [93]. Este modelo expande el rango de posibles valores para la porosidad del material considerando que el trabajo que realizan tanto la matriz como los poros puede invertirse, lo cual conduce a las siguientes expresiones:

$$E_n = \frac{E_p}{E_f} = [1 - e^{-r(1-P)}]; \quad (4.18)$$

$$UTS_n = \frac{UTS_p}{UTS_f} = \left[ 1 - e^{-r'(1-p)} \right]; \quad (4.19)$$

donde,  $r$  y  $r'$  son los coeficientes de Rice para el módulo elástico y la resistencia última a la tensión, respectivamente. Ambos coeficientes se pueden obtener mediante el uso de datos experimentales.

#### 4.1.8. Modelo de Hasselman

El modelo de Hasselman presentado en [82], [88] establece la siguiente relación entre la porosidad y el módulo de elasticidad, y la porosidad y la resistencia última a la tensión:

$$E_n = \frac{E_p}{E_f} = \left( 1 + \left( \frac{AP}{1-AP-p} \right) \right); \quad (4.20)$$

$$UTS_n = \frac{UTS_p}{UTS_f} = \left( 1 + \left( \frac{A'P}{1-A'P-p} \right) \right); \quad (4.21)$$

donde,  $A$  y  $A'$  son los coeficientes correspondientes a este modelo para el módulo elástico y la resistencia última a la tensión, respectivamente, ambos coeficientes se obtienen de forma experimental.

## 4.2 Generación y optimización de coeficientes para cada modelo y material

El objetivo de usar los modelos anteriormente presentados no es solo predecir el comportamiento de las propiedades, si no hacerlo de forma óptima; es decir, encontrar la combinación de coeficientes que genere la predicción con el menor error para cada material y modelo seleccionados. Para ello, se desarrolló un código en el programa de código abierto GNU Octave, el cual mediante la introducción manual de 12 datos experimentales de cada material (4 porcentajes de relleno, 4 módulos elásticos y 4 resistencias últimas a la tensión) calcula todos los posibles coeficientes para cada modelo matemático y evalúa cada posible combinación de coeficientes. Este código incluye a todos los modelos, salvo a la regla de mezclas, ya que las expresiones 4.9 y 4.10 son ecuaciones lineales a 45°, es decir no cuentan con un coeficiente a optimizar. El código desarrollado utiliza el algoritmo que se muestra en la Figura 4.1. Este algoritmo es lo suficientemente general para poder ser extendido a cualquier material y modelo analítico-empírico, ya que comienza con las pruebas experimentales, los resultados a utilizar como base de datos, el procedimiento de actualización y optimización de los modelos, y termina con la presentación de tablas con la comparación entre las predicciones y los resultados experimentales. En el Anexo B se presenta el código desarrollado.

La evaluación se realiza sumando los 4 errores de la predicción de la propiedad para cada porcentaje de relleno de cada posible combinación de coeficientes, y buscando la

combinación que arroje la menor suma de errores. El error ( $e$ ) de predicción para el caso del módulo elástico se calcula usando la siguiente expresión:

$$e = \left( \left| \frac{E_{cal} - E_{exp}}{E_{exp}} \right| \right) \times 100\%; \quad (4.22)$$

donde,  $E_{cal}$  es el módulo de elasticidad calculado y  $E_{exp}$  es el módulo de elasticidad experimental. Para el caso del  $UTS$  el error de predicción se determina mediante la siguiente expresión:

$$e = \left( \left| \frac{UTS_{cal} - UTS_{exp}}{UTS_{exp}} \right| \right) \times 100\%; \quad (4.23)$$

donde,  $UTS_{cal}$  y  $UTS_{exp}$  son la resistencia última a la tensión calculada y experimental, respectivamente.

Para validar que el programa generaba correctamente los coeficientes y las predicciones, en paralelo se generaron los coeficientes de todos los materiales en Excel y se comprobaron las combinaciones de coeficientes evaluadas por el programa. Ya con el código del programa terminado y validado, se procedió a utilizarlo con todos los materiales.

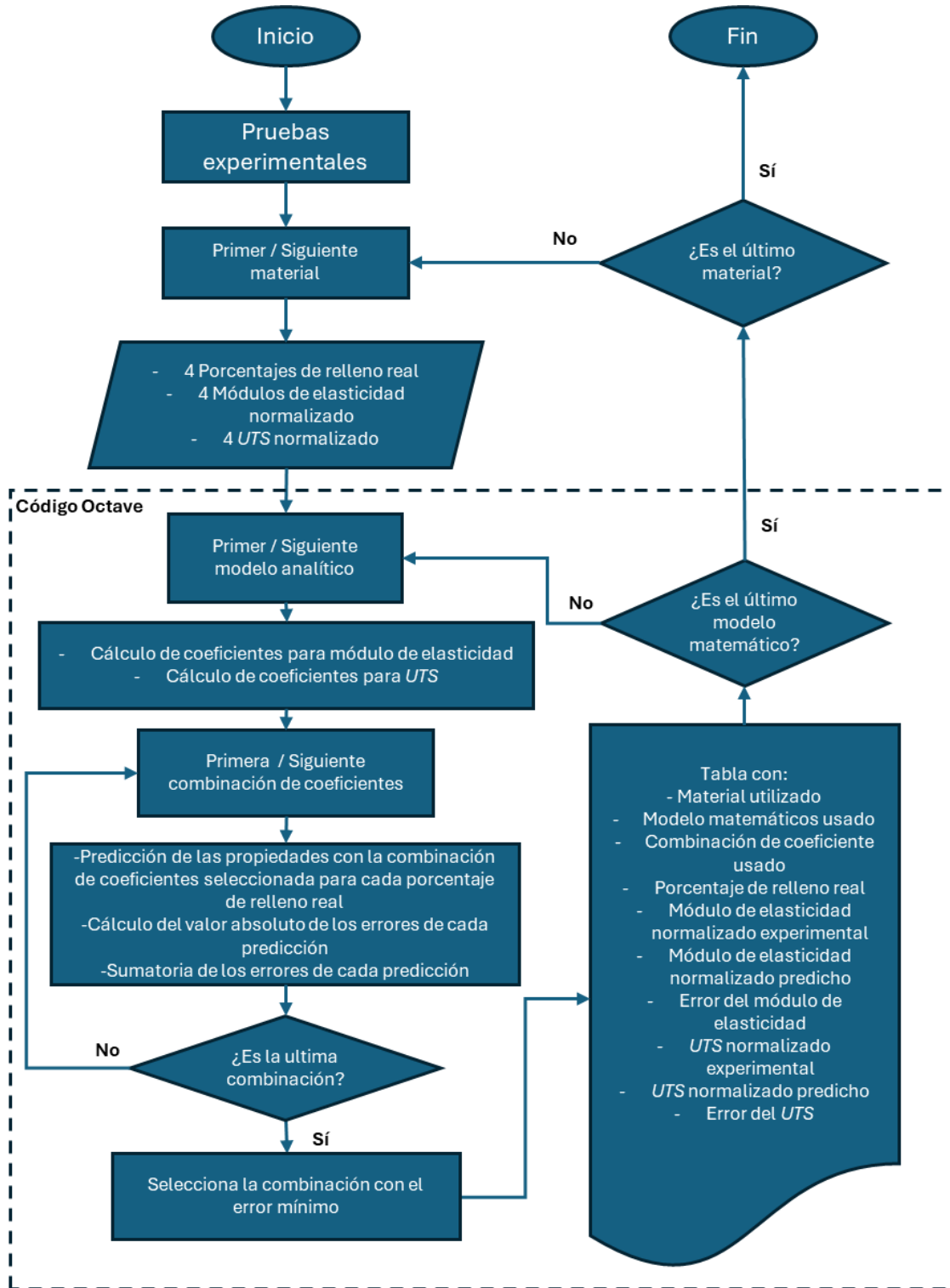


Figura 4.1. Diagrama de flujo del algoritmo utilizado para el cálculo y optimización de los modelos analítico-empíricos para la predicción de propiedades de piezas FFF.

## Capítulo 4. Modelos de predicción de propiedades a tensión de piezas FFF

Un resumen de los coeficientes óptimos obtenidos para cada modelo, propiedad a predecir y material seleccionado, se presenta en la Tabla 4.1. En esta tabla no se incluye el modelo de la ley de mezclas, ya que este modelo no cuenta con coeficientes a optimizar.

**Tabla 4.1.** Coeficientes óptimos para cada modelo analítico-empírico estudiado, según el material y la propiedad a predecir.

Coeficientes para el módulo de elasticidad										
Material	GA P	GA C	Ex P	Ex C	SD	H	R	VD P	VD C	E
<b>PLA CP</b>	0.454	0.277	0.695	0.141	3.054	-8.412	0.467	0.695	0.283	0.420
<b>PLA FF</b>	0.345	0.232	0.738	0.123	3.222	-8.528	0.415	0.738	0.256	0.379
<b>ABS</b>	0.995	0.246	1.638	0.051	17.53	-14.227	0.262	1.638	0.261	0.247
<b>PETG</b>	0.434	0.293	1.518	0.106	2.863	-7.524	0.52	1.518	0.481	0.457
<b>TPU</b>	0.881	0.407	1.843	0.073	3.092	-3.554	0.505	1.843	0.46	0.422
<b>AL</b>	0.464	0.208	1.797	0.057	6.102	-11.697	0.301	1.797	0.342	0.279
<b>Wood</b>	0.947	0.321	2.835	0.035	3.645	-5.26	0.364	2.835	0.604	0.335
<b>Brass</b>	0.941	0.334	1.592	0.077	3.433	-9.682	0.381	1.529	0.38	0.348
<b>Copper</b>	0.531	0.396	1.486	0.135	2.379	-2.216	0.701	1.486	0.595	0.574
Coeficientes para la resistencia última a la tensión normalizada										
Material	GA P	GA C	Ex P	Ex C	SD	H	R	VD P	VD C	E
<b>PLA CP</b>	0.719	0.362	1.112	0.125	2.928	-6.67	0.504	1.112	0.379	0.449
<b>PLA FF</b>	0.758	0.426	2.046	0.093	2.655	-5.634	0.588	2.046	0.716	0.516
<b>ABS</b>	0.786	0.416	1.905	0.094	2.772	-6.044	0.556	1.905	0.631	0.489
<b>PETG</b>	0.617	0.365	1.228	0.123	2.83	-3.073	0.531	1.228	0.42	0.471
<b>TPU</b>	0.453	0.244	1.305	0.096	6.213	-11.717	0.419	1.305	0.353	0.347
<b>AL</b>	1.121	0.501	2.529	0.064	2.947	-3.353	0.573	2.529	0.806	0.481
<b>Wood</b>	1.007	0.457	2.784	0.058	2.904	-3.236	0.508	2.784	0.937	0.454
<b>Brass</b>	0.669	0.293	1.698	0.079	3.298	-7.805	0.412	1.698	0.434	0.374
<b>Copper</b>	0.327	0.301	1.031	0.145	2.673	-6.056	0.582	1.031	0.408	0.512

Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de Hasselman (H), modelo de Rice (R), modelo de la Variante de Duckworth (VD), y modelo de Eficiencia (E). La P significa que el coeficiente se usa como potencia y la C que se usa como constante.

### 4.2.1. Predicción para el PLA CP

En la Tabla 4.2 se presentan las predicciones obtenidas para el material PLA CP usando los ocho modelos analítico-empíricos del módulo de elasticidad normalizado y la resistencia última a la tensión normalizada para cada porcentaje de relleno real estudiado. En estas tablas también se incluye el error de predicción promedio que se obtiene con cada uno de los modelos.

**Tabla 4.2.** Predicción del comportamiento elástico del material PLA CP mediante los ocho modelos analítico-empíricos.

Relleno real (%)	Módulo de elasticidad normalizado								
	Experimental	Modelos							
	$E_p/E_f$	GA P: 0.454 C: 0.277	Ex P: 0.695 C: 0.141	LM NA	E C: 0.420	SD C: 3.054	VD P: 0.695 C: 0.283	R C: 0.467	H C: -8.412
37.01	0.185	0.176	0.183	0.370	0.196	0.146	0.183	0.159	0.065
46.52	0.195	0.195	0.195	0.465	0.195	0.195	0.195	0.195	0.094
71.87	0.233	0.238	0.233	0.719	0.193	0.424	0.233	0.285	0.233
90.35	0.386	0.264	0.265	0.904	0.207	0.745	0.265	0.344	0.527
	<b>Error promedio (%)</b>	9.58	8.07	145.4	17.44	48.96	8.07	11.78	38.32
Relleno real (%)	Resistencia última a la tensión normalizada								
	$UTS_p/UTS_f$	GA P: 0.719 C: 0.362	Ex P: 1.112 C: 0.125	LM NA	E C: 0.449	SD C: 2.928	VD P: 1.112 C: 0.379	R C: 0.504	H C: -6.67
	37.01	0.203	0.177	0.188	0.370	0.210	0.158	0.188	0.170
46.52	0.209	0.209	0.209	0.465	0.209	0.209	0.209	0.209	0.115
71.87	0.277	0.286	0.277	0.719	0.206	0.439	0.277	0.304	0.277
90.35	0.526	0.337	0.340	0.904	0.222	0.754	0.340	0.366	0.584
	<b>Error promedio (%)</b>	12.92	10.65	109.1	21.71	30.98	10.65	14.06	28.99

Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), Ley de mezclas (LM), modelo de Eficiencia (E), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de la Variante de Duckworth (VD), modelo de Rice (R) y modelo de Hasselman (H). La P significa que el coeficiente se usa como potencia, la C que se usa como constante y NA significa no aplica.

### 4.2.2. Predicción para el PLA FF

En la Tabla 4.3 se presentan las predicciones obtenidas para el material PLA FF usando los ocho modelos analítico-empíricos del módulo de elasticidad normalizado y la resistencia última a la tensión normalizada para cada porcentaje de relleno real estudiado. De igual manera se incluye el error de predicción promedio que se obtiene con cada uno de los modelos.

**Tabla 4.3.** Predicción del comportamiento elástico del material PLA FF obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos.

Relleno real (%)	Módulo de elasticidad normalizado								
	Experimental	Modelos							
	$E_p/E_f$	GA P: 0.345 C: 0.232	Ex P: 0.738 C: 0.123	LM NA	E C: 0.379	SD C: 3.222	VD P: 0.738 C: 0.256	R C: 0.415	H C: -8.528
36.15	0.184	0.163	0.160	0.362	0.137	0.128	0.160	0.139	0.062
45.21	0.171	0.176	0.171	0.452	0.171	0.171	0.171	0.171	0.088
68.51	0.203	0.203	0.203	0.685	0.259	0.363	0.203	0.248	0.203
88.61	0.428	0.222	0.236	0.886	0.335	0.693	0.236	0.308	0.477
	<b>Error promedio (%)</b>	15.551	14.432	151.3	18.67	42.64	14.432	18.49	31.49
Relleno real (%)	Resistencia última a la tensión normalizada								
	$UTS_p/UTS_f$	GA P: 0.758 C: 0.426	Ex P: 2.046 C: 0.093	LM NA	E C: 0.516	SD C: 2.655	VD P: 2.046 C: 0.716	R C: 0.588	H C: -5.634
	36.15	0.201	0.197	0.194	0.362	0.187	0.184	0.194	0.191
45.21	0.233	0.233	0.233	0.452	0.233	0.233	0.233	0.233	0.128
68.51	0.279	0.320	0.376	0.685	0.354	0.433	0.376	0.332	0.279
88.61	0.567	0.389	0.567	0.886	0.458	0.739	0.567	0.406	0.580
	<b>Error promedio (%)</b>	12.08	9.63	93.89	13.38	23.63	9.63	13.05	25.52

Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), Ley de mezclas (LM), modelo de Eficiencia (E), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de la Variante de Duckworth (VD), modelo de Rice (R) y modelo de Hasselman (H). La P significa que el coeficiente se usa como potencia, la C que se usa como constante y NA significa no aplica.

### 4.2.3. Predicción para el ABS

En la Tabla 4.4 se presentan las predicciones obtenidas para el material ABS usando los ocho modelos analítico-empíricos del módulo de elasticidad normalizado y la resistencia última a la tensión normalizada para cada porcentaje de relleno real estudiado. También se incluye el error de predicción promedio que se obtiene con cada uno de los modelos.

**Tabla 4.4.** Predicción del comportamiento elástico del material ABS obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos.

Relleno real (%)	Módulo de elasticidad normalizado								
	Experimental	Modelos							
	$E_p/E_f$	GA P: 0.995 C: 0.246	Ex P: 1.638 C: 0.051	LM NA	E C: 0.247	SD C: 17.53	VD P: 1.638 C: 0.261	R C: 0.262	H C: -14.227
37.50	0.094	0.093	0.094	0.375	0.093	0.000	0.094	0.094	0.040
46.88	0.116	0.116	0.109	0.469	0.116	0.000	0.109	0.116	0.058
70.29	0.143	0.173	0.160	0.703	0.174	0.005	0.160	0.168	0.143
91.54	0.227	0.225	0.227	0.915	0.226	0.227	0.227	0.213	0.432
	<b>Error promedio (%)</b>	5.802	4.521	325.4	5.81	74.02	4.521	6.04	49.18
Relleno real (%)	Resistencia última a la tensión normalizada								
	$UTS_p/UTS_f$	GA P: 0.786 C: 0.416	Ex P: 1.905 C: 0.094	LM NA	E C: 00.489	SD C: 2.772	VD P: 1.905 C: 0.631	R C: 0.556	H C: -6.044
	37.50	0.205	0.192	0.192	0.375	0.183	0.177	0.192	0.188
46.88	0.229	0.229	0.229	0.469	0.229	0.229	0.229	0.229	0.127
70.29	0.281	0.315	0.358	0.703	0.344	0.439	0.358	0.323	0.281
91.54	0.537	0.388	0.537	0.915	0.448	0.791	0.537	0.399	0.642
	<b>Error promedio (%)</b>	11.45	8.40	101.9	12.30	29.22	8.40	12.20	29.95

Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), Ley de mezclas (LM), modelo de Eficiencia (E), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de la Variante de Duckworth (VD), modelo de Rice (R) y modelo de Hasselman (H). La P significa que el coeficiente se usa como potencia, la C que se usa como constante y NA significa no aplica.

### 4.2.4. Predicción para el PETG

En la Tabla 4.5, se presentan las predicciones obtenidas para el material PETG usando los ocho modelos analítico-empíricos del módulo de elasticidad normalizado y la resistencia última a la tensión normalizada para cada porcentaje de relleno real estudiado. También se incluye el error de predicción promedio que se obtiene con cada uno de los modelos.

**Tabla 4.5.** Predicción del comportamiento elástico del material PETG obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos.

Relleno real (%)	Módulo de elasticidad normalizado								
	Experimental	Modelos							
	$E_p/E_f$	GA P: 0.434 C: 0.293	Ex P: 1.518 C: 0.106	LM NA	E C: 0.457	SD C: 2.863	VD P: 1.518 C: 0.481	R C: 0.52	H C: -7.524
38.24	0.193	0.193	0.189	0.382	0.175	0.171	0.189	0.180	0.076
45.90	0.212	0.209	0.212	0.459	0.210	0.212	0.212	0.212	0.101
71.65	0.251	0.254	0.314	0.717	0.328	0.444	0.314	0.311	0.251
87.78	0.401	0.277	0.401	0.878	0.401	0.705	0.401	0.367	0.488
	<b>Error promedio (%)</b>	8.355	6.759	129.4	10.26	40.98	6.759	9.75	33.67
Relleno real (%)	Resistencia última a la tensión normalizada								
	$UTS_p/UTS_f$	GA P: 0.617 C: 0.365	Ex P: 1.228 C: 0.123	LM NA	E C: 0.471	SD C: 2.83	VD P: 1.228 C: 0.42	R C: 0.531	H C: -3.073
	38.24	0.208	0.201	0.197	0.382	0.180	0.174	0.197	0.184
45.90	0.216	0.226	0.216	0.459	0.216	0.216	0.216	0.216	0.216
71.65	0.297	0.297	0.297	0.717	0.338	0.448	0.297	0.317	0.451
87.78	0.619	0.336	0.362	0.878	0.414	0.708	0.362	0.373	0.700
	<b>Error promedio (%)</b>	13.26	11.72	94.80	15.07	20.42	11.72	14.52	21.15
Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), Ley de mezclas (LM), modelo de Eficiencia (E), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de la Variante de Duckworth (VD), modelo de Rice (R) y modelo de Hasselman (H). La P significa que el coeficiente se usa como potencia, la C que se usa como constante y NA significa no aplica.									

### 4.2.5. Predicción para el TPU

En la Tabla 4.6 se presentan las predicciones obtenidas para el material TPU usando los ocho modelos analítico-empíricos del módulo de elasticidad normalizado y la resistencia última a la tensión normalizada para cada porcentaje de relleno real estudiado. También se incluye el error de predicción promedio que se obtiene con cada uno de los modelos.

**Tabla 4.6.** Predicción del comportamiento elástico del material TPU obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos.

Relleno real (%)	Módulo de elasticidad normalizado								
	Experimental	Modelos							
	$E_p/E_f$	GA P: 0.881 C: 0.407	Ex P: 1.843 C: 0.0731	LM NA	E C: 0.422	SD C: 3.092	VD P: 1.843 C: 0.46	R C: 0.505	H C: -3.554
37.92	0.147	0.173	0.147	0.379	0.160	0.147	0.147	0.174	0.147
45.06	0.246	0.202	0.167	0.451	0.190	0.183	0.167	0.204	0.187
73.17	0.309	0.309	0.281	0.732	0.309	0.436	0.281	0.309	0.434
93.47	0.408	0.384	0.408	0.935	0.395	0.817	0.408	0.377	0.801
	<b>Error promedio (%)</b>	10.573	10.321	126.8	8.81	41.77	10.321	11.01	40.15
Relleno real (%)	Resistencia última a la tensión normalizada								
	$UTS_p/UTS_f$	GA P: 0.453 C: 0.244	Ex P: 1.305 C: 0.096	LM NA	E C: 0.347	SD C: 6.213	VD P: 1.305 C: 0.353	R C: 0.419	H C: -11.717
	37.92	0.157	0.157	0.157	0.379	0.132	0.021	0.157	0.147
45.06	0.178	0.170	0.172	0.451	0.156	0.033	0.172	0.172	0.065
73.17	0.189	0.212	0.249	0.732	0.254	0.189	0.249	0.264	0.189
93.47	0.324	0.236	0.324	0.935	0.324	0.666	0.324	0.324	0.550
	<b>Error promedio (%)</b>	10.99	8.79	192.5	15.77	68.41	8.79	12.46	50.35
Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), Ley de mezclas (LM), modelo de Eficiencia (E), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de la Variante de Duckworth (VD), modelo de Rice (R) y modelo de Hasselman (H). La P significa que el coeficiente se usa como potencia, la C que se usa como constante y NA significa no aplica.									

### 4.2.6. Predicción para el Al

En la Tabla 4.7 se presentan las predicciones obtenidas para el material Al usando los ocho modelos analítico-empíricos del módulo de elasticidad normalizado y la resistencia última a la tensión normalizada para cada porcentaje de relleno real estudiado. También se incluye el error de predicción promedio que se obtiene con cada uno de los modelos.

**Tabla 4.7.** Predicción del comportamiento elástico del material Al obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos.

Relleno real (%)	Módulo de elasticidad normalizado								
	Experimental	Modelos							
	$E_p/E_f$	GA P: 0.464 C: 0.208	Ex P: 1.797 C: 0.057	LM NA	E C: 0.279	SD C: 6.102	VD P: 1.797 C: 0.342	R C: 0.301	H C: -11.697
40.13	0.141	0.136	0.117	0.401	0.112	0.026	0.117	0.114	0.054
48.39	0.135	0.149	0.135	0.484	0.135	0.043	0.135	0.135	0.074
71.76	0.178	0.178	0.206	0.718	0.201	0.178	0.206	0.194	0.178
87.44	0.273	0.196	0.273	0.874	0.245	0.465	0.273	0.231	0.373
	<b>Error promedio (%)</b>	10.44	8.231	240.8	10.88	55.03	8.231	10.93	35.86
Relleno real (%)	Resistencia última a la tensión normalizada								
	$UTS_p/UTS_f$	GA P: 1.121 C: 0.501	Ex P: 2.529 C: 0.064	LM NA	E C: 0.481	SD C: 2.947	VD P: 2.529 C: 0.806	R C: 0.573	H C: -3.353
	40.13	0.205	0.180	0.177	0.401	0.193	0.171	0.177	0.205
48.39	0.219	0.222	0.219	0.484	0.233	0.219	0.219	0.242	0.219
71.76	0.345	0.345	0.395	0.718	0.345	0.435	0.395	0.337	0.431
87.44	0.587	0.431	0.587	0.874	0.420	0.691	0.587	0.394	0.675
	<b>Error promedio (%)</b>	10.14	7.02	93.44	10.22	15.12	7.02	11.47	14.73

Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), Ley de mezclas (LM), modelo de Eficiencia (E), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de la Variante de Duckworth (VD), modelo de Rice (R) y modelo de Hasselman (H). La P significa que el coeficiente se usa como potencia, la C que se usa como constante y NA significa no aplica.

### 4.2.7. Predicción para el material Wood

En la Tabla 4.8 se presentan las predicciones obtenidas para el material Wood usando los ocho modelos analítico-empíricos del módulo de elasticidad normalizado y la resistencia última a la tensión normalizada para cada porcentaje de relleno real estudiado. También se incluye el error de predicción promedio que se obtiene con cada uno de los modelos.

**Tabla 4.8.** Predicción del comportamiento elástico del material Wood obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos.

Relleno real (%)	Módulo de elasticidad normalizado								
	Experimental	Modelos							
	$E_p/E_f$	GA P: 0.947 C: 0.321	Ex P: 2.835 C: 0.035	LM NA	E C: 0.335	SD C: 3.645	VD P: 2.835 C: 0.604	R C: 0.364	H C: -5.26
37.82	0.104	0.128	0.104	0.378	0.127	0.104	0.104	0.128	0.104
46.00	0.154	0.154	0.131	0.460	0.154	0.140	0.131	0.154	0.139
66.21	0.226	0.217	0.232	0.662	0.222	0.292	0.232	0.214	0.271
84.61	0.390	0.274	0.390	0.846	0.283	0.571	0.390	0.265	0.511
	<b>Error promedio (%)</b>	14.27	4.397	193.2	12.91	21.10	4.397	15.39	15.09
Relleno real (%)	Resistencia última a la tensión normalizada								
	$UTS_p/UTS_f$	GA P: 1.007 C: 0.457	Ex P: 2.784 C: 0.058	LM NA	E C: 0.454	SD C: 2.904	VD P: 2.784 C: 0.937	R C: 0.508	H C: -3.236
	37.82	0.172	0.172	0.166	0.378	0.172	0.164	0.166	0.175
46.00	0.208	0.209	0.208	0.460	0.209	0.208	0.208	0.208	0.208
66.21	0.333	0.301	0.366	0.662	0.300	0.375	0.366	0.286	0.377
84.61	0.610	0.386	0.610	0.846	0.384	0.640	0.610	0.349	0.630
	<b>Error promedio (%)</b>	11.64	3.27	94.64	11.77	5.38	3.27	14.73	6.03

Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), Ley de mezclas (LM), modelo de Eficiencia (E), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de la Variante de Duckworth (VD), modelo de Rice (R) y modelo de Hasselman (H). La P significa que el coeficiente se usa como potencia, la C que se usa como constante y NA significa no aplica.

### 4.2.8. Predicción para el Brass

En la Tabla 4.9 se presentan las predicciones obtenidas para el material Brass usando los ocho modelos analítico-empíricos del módulo de elasticidad normalizado y la resistencia última a la tensión normalizada para cada porcentaje de relleno real estudiado. También se incluye el error de predicción promedio que se obtiene con cada uno de los modelos.

**Tabla 4.9.** Predicción del comportamiento elástico del material Brass obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos.

Relleno real (%)	Módulo de elasticidad normalizado								
	Experimental	Modelos							
	$E_p/E_f$	GA P: 0.941 C: 0.334	Ex P: 1.592 C: 0.077	LM NA	E C: 0.348	SD C: 3.433	VD P: 1.529 C: 0.38	R C: 0.381	H C: -9.682
37.84	0.141	0.134	0.141	0.378	0.132	0.118	0.141	0.134	0.059
47.75	0.166	0.166	0.165	0.478	0.166	0.166	0.165	0.166	0.086
71.70	0.207	0.244	0.242	0.717	0.250	0.379	0.242	0.239	0.207
91.78	0.333	0.308	0.333	0.918	0.320	0.754	0.333	0.295	0.536
	<b>Error promedio (%)</b>	7.629	4.334	194.1	7.76	56.26	4.334	7.88	41.76
Relleno real (%)	Resistencia última a la tensión normalizada								
	$UTS_p/UTS_f$	GA P: 0.669 C: 0.293	Ex P: 1.698 C: 0.079	LM NA	E C: 0.374	SD C: 3.298	VD P: 1.698 C: 0.434	R C: 0.412	H C: -7.805
	37.84	0.151	0.153	0.151	0.378	0.141	0.129	0.151	0.144
47.75	0.179	0.179	0.179	0.478	0.179	0.179	0.179	0.179	0.105
71.70	0.245	0.234	0.268	0.717	0.268	0.393	0.268	0.256	0.245
91.78	0.567	0.276	0.377	0.918	0.343	0.763	0.377	0.315	0.589
	<b>Error promedio (%)</b>	14.22	10.73	143.2	13.78	27.41	10.73	13.30	24.29
Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), Ley de mezclas (LM), modelo de Eficiencia (E), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de la Variante de Duckworth (VD), modelo de Rice (R) y modelo de Hasselman (H). La P significa que el coeficiente se usa como potencia, la C que se usa como constante y NA significa no aplica.									

### 4.2.9. Predicción para el Copper

En la Tabla 4.10 se presentan las predicciones obtenidas para el material Copper usando los ocho modelos analítico-empíricos del módulo de elasticidad normalizado y la resistencia última a la tensión normalizada para cada porcentaje de relleno real estudiado. También se incluye el error de predicción promedio que se obtiene con cada uno de los modelos.

**Tabla 4.10.** Predicción del comportamiento elástico del material Copper obtenida mediante los ocho modelos analítico-empíricos.

Relleno real (%)	Módulo de elasticidad normalizado								
	Experimental	Modelos							
	$E_p/E_f$	GA P: 0.531 C: 0.396	Ex P: 1.486 C: 0.135	LM NA	E C: 0.574	SD C: 2.379	VD P: 1.486 C: 0.595	R C: 0.701	H C: -2.216
36.90	0.233	0.233	0.233	0.369	0.212	0.223	0.233	0.228	0.209
45.34	0.272	0.260	0.264	0.453	0.260	0.272	0.264	0.272	0.272
69.19	0.310	0.325	0.376	0.692	0.397	0.480	0.376	0.384	0.503
91.64	0.526	0.378	0.526	0.916	0.526	0.820	0.526	0.474	0.832
	<b>Error promedio (%)</b>	9.451	6.161	80.68	10.47	28.88	6.161	9.027	32.81
Relleno real (%)	Resistencia última a la tensión normalizada								
	$UTS_p/UTS_f$	GA P: 0.327 C: 0.301	Ex P: 1.031 C: 0.145	LM NA	E C: 0.512	SD C: 2.673	VD P: 1.031 C: 0.408	R C: 0.582	H C: -6.056
	36.90	0.213	0.217	0.213	0.369	0.189	0.185	0.213	0.193
45.34	0.232	0.232	0.232	0.453	0.232	0.232	0.232	0.232	0.120
69.19	0.270	0.266	0.297	0.692	0.354	0.439	0.297	0.332	0.270
91.64	0.638	0.292	0.374	0.916	0.469	0.800	0.374	0.413	0.644
	<b>Error promedio (%)</b>	14.42	12.77	92.08	17.15	25.14	12.77	16.72	26.91
Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), Ley de mezclas (LM), modelo de Eficiencia (E), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de la Variante de Duckworth (VD), modelo de Rice (R) y modelo de Hasselman (H),									

## **Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados**

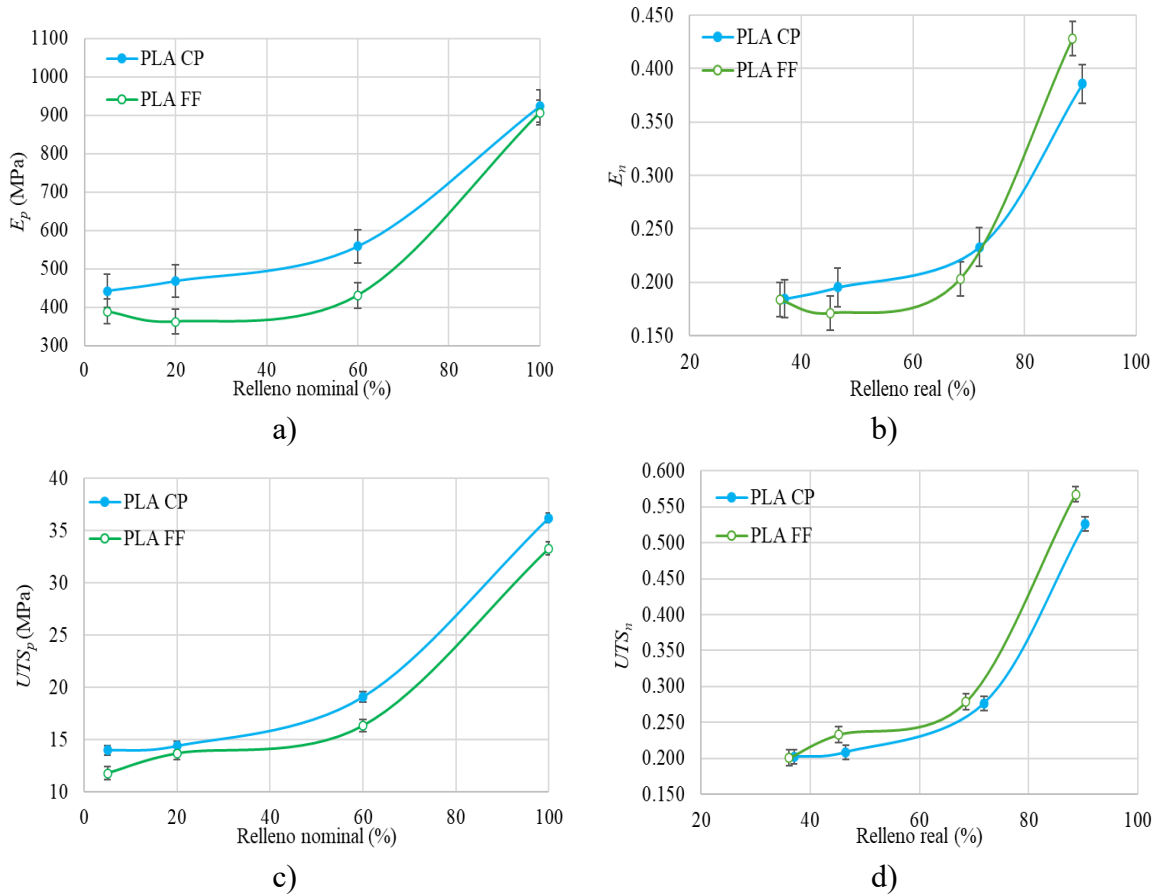
### **5.1. Resultados experimentales**

Los resultados experimentales muestran el comportamiento del módulo de elasticidad y la resistencia última a la tensión de nueve distintos materiales FFF en términos del porcentaje de relleno; es decir, presentan el comportamiento de propiedades a tensión en términos de la cantidad de material utilizado en su fabricación. Esto es de gran utilidad ya que uno de los objetivos generales de la industria actual es el desarrollo de productos óptimos que cumplan con los requerimientos de funcionalidad con el menor uso de material. La disminución del gasto de material implica una menor masa y a su vez una disminución en el conjunto de gasto que implica el traslado de estas piezas. Por otra parte, el objetivo de la universalización de los resultados es contar con resultados experimentales que sean independientes del sistema FFF utilizado y de la condición y calidad del material seleccionado, lo cual se logra utilizando el porcentaje de relleno real y la normalización de las propiedades.

#### **5.1.1. Análisis comparativo entre resultados de un mismo tipo de material**

Para mostrar la importancia de la universalización de los resultados, se analizaron los resultados obtenidos de los dos materiales PLA utilizados en este proyecto. Estos PLA pertenecen a proveedores diferentes, el PLA CP es del proveedor Color Plus y el PLA FF es del proveedor Flashforge. Las probetas de PLA CP fueron fabricadas usando la máquina FFF Flashforge™ Creator Pro, mientras que las probetas de PLA FF se fabricaron usando la máquina FFF Flashforge™ Guider IIs. En la Figura 5.1 se comparan las propiedades del módulo de elasticidad y resistencia última a la tensión sin universalizar y universalizadas de las probetas fabricadas con estos dos tipos de PLA. De las figuras 5.1 a) y c), se pudo observar que a pesar de tratarse del mismo material y pertenecer a rollos recién abiertos, las curvas presentan diferentes valores tanto en sus propiedades como en la tendencia de crecimiento. Esto se debe al hecho de pertenecer a diferentes proveedores y ser fabricadas en distintas máquinas FFF. En las figuras 5.1 b) y d), se puede observar que, al universalizar los resultados, no solo la escala se adapta, sino también las curvas se vuelven más compactas y un mayor número de sus desviaciones estándar colapsan entre ambas curvas. Por lo tanto, sus tendencias se vuelven más similares. De esto se puede concluir que la universalización de los resultados reduce la influencia de la máquina FFF, así como de la condición y calidad de material utilizados para la fabricación. De esta manera se puede decir que la universalización de resultados permite una mejor comparación entre resultados, y los vuelve

más útiles tanto para procesos de diseño convencionales como en el desarrollo de modelos matemáticos para la predicción de propiedades.

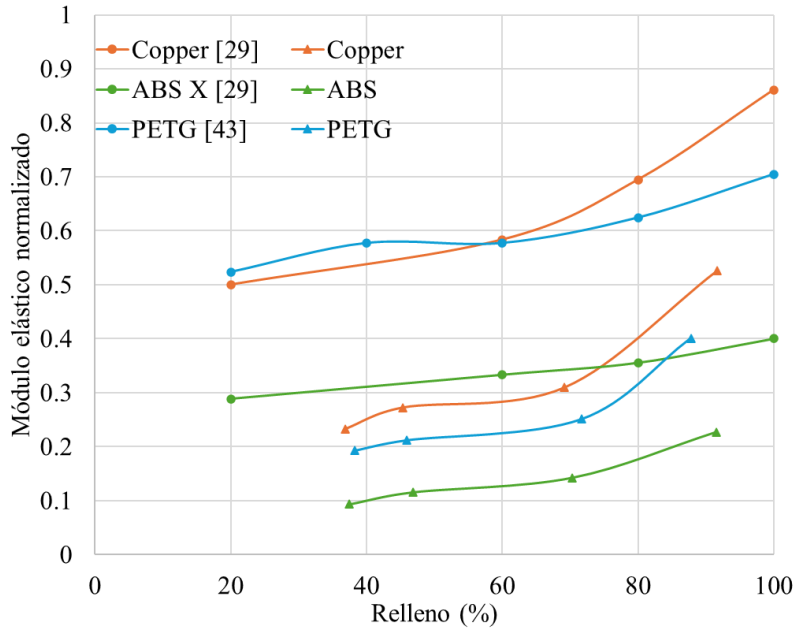


**Figura 5.1.** Propiedades bajo tensión de los materiales PLA: a) módulo de elasticidad no universalizado, b) módulo de elasticidad universalizado, c)  $UTS$  no universalizado, y d)  $UTS$  universalizado.

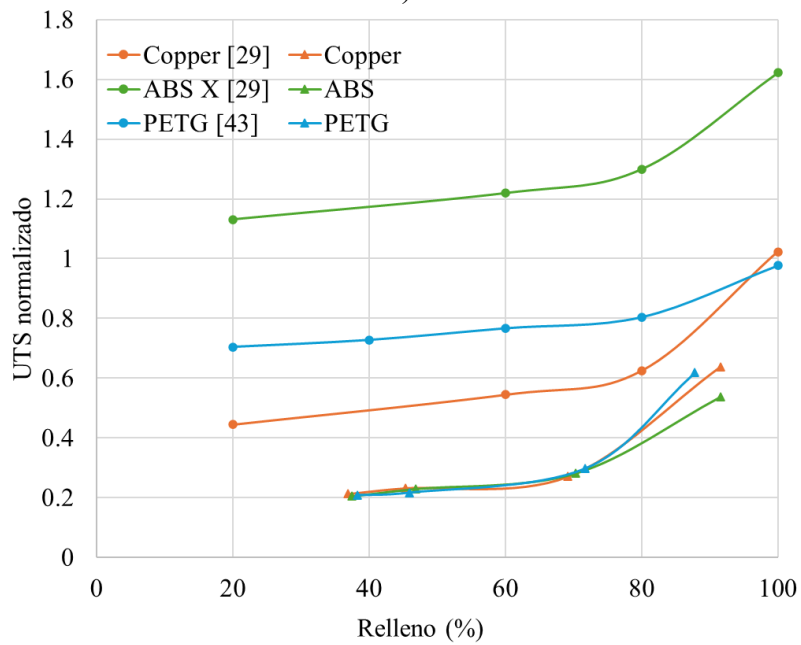
### 5.1.2. Comparación entre resultados de diferentes estudios

Uno de los fines de la universalización es mejorar la capacidad de comparar resultados de múltiples estudios. Para comprobar esta capacidad, se buscó comparar los resultados obtenidos en este proyecto con resultados en la literatura, los cuales debían cumplir con mostrar las propiedades a tensión en función del porcentaje de relleno, lo que llevó a los resultados de [29], [43]. En estos trabajos los resultados del módulo a la tensión y  $UTS$  aparecen en términos del porcentaje de relleno nominal; además se mencionan el valor de estas mismas propiedades, dadas por el proveedor de sus respectivos filamentos, por lo que se usó estas propiedades para normalizar los resultados de las probetas. Al no contar con suficiente información en los artículos para calcular el porcentaje de relleno real, se utilizó, para los resultados de la literatura, el porcentaje de relleno nominal. En la Figura 5.2, se muestra la comparación entre los resultados de la literatura, normalizados en función de las

propiedades del filamento presentes en el artículo de origen, y los resultados universalizados obtenidos en el presente proyecto de investigación.



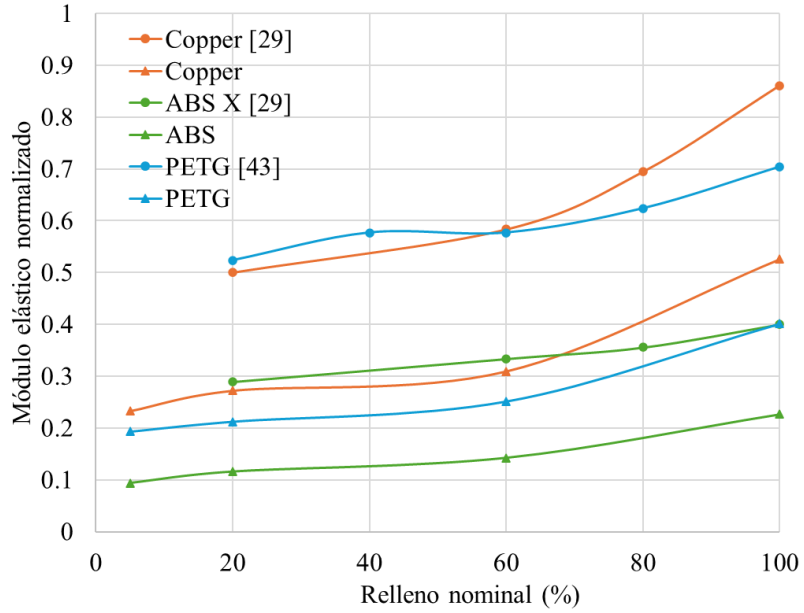
a)



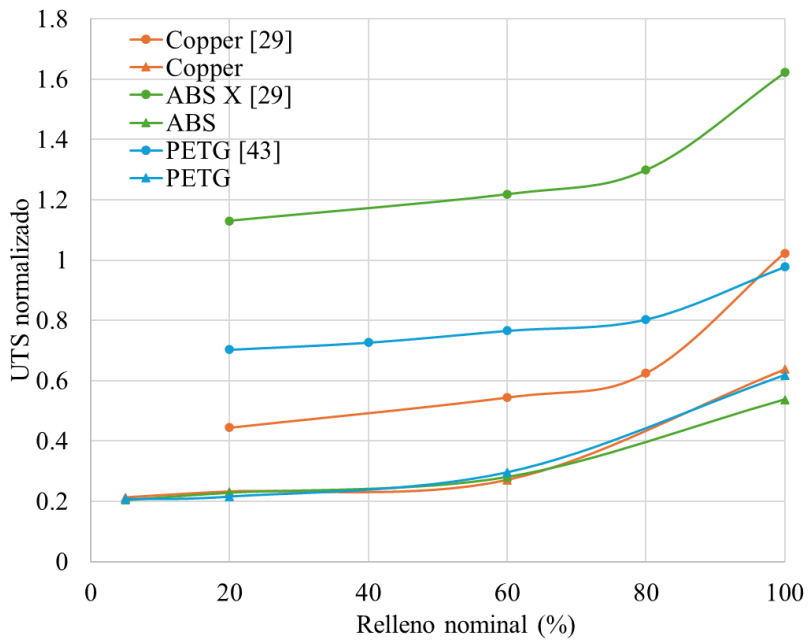
b)

**Figura 5.2.** Comparación de las propiedades a tensión con respecto al porcentaje de relleno: a) módulo elástico normalizado de la literatura y el universalizado obtenido en la investigación y b) *UTS* normalizado de la literatura y el universalizado obtenido en la investigación.

De la Figura 5.2 se puede observar que los valores obtenidos no coinciden en magnitud y la tendencia tampoco muestra el mismo comportamiento. Esto se puede deber a dos factores principalmente. Por un lado, los valores del filamento utilizados para normalizar los resultados de [29], [43] fueron los proporcionados por el proveedor, por lo que seguramente difieren de los valores de las propiedades del filamento utilizado específicamente en la fabricación de las probetas. Por otra parte, el utilizar el relleno nominal en el caso de los resultados de la literatura y el relleno real en los resultados del presente proyecto de investigación genera una fuerte dispersión horizontal en los datos. Por lo tanto, en la Figura 5.3 se presentan los resultados, pero utilizando el relleno nominal en ambos casos. En esta figura se puede observar que, al estar en la misma escala de porcentaje de relleno nominal, la tendencia de los resultados del presente proyecto de investigación se vuelve bastante más similar a la obtenida en [29], [43]. Aun así, se sigue presentando la diferencia en la magnitud de los valores de las propiedades a tensión normalizadas. Esto puede deberse al uso de los valores de la propiedad del filamento erróneos para la normalización de los resultados de la literatura. Se puede confirmar que no se trata de los valores correctos en la gráfica del *UTS* normalizado, ya que los valores en la literatura llegan a superar el valor de uno, lo cual no es posible utilizando manufactura aditiva, ya que este procedimiento no mejora las propiedades del material. Además, parte de esta diferencia en los valores de las propiedades normalizadas puede deberse a que las comparaciones se realizaron con materiales similares, mas no se tratan del mismo tipo de material. En el caso del compuesto de cobre, en [29] se utiliza un compuesto a base de nano partículas de cobre de grado quirúrgico y no se especifica el porcentaje de cobre en el filamento. En el caso del ABS en [29] se utiliza ABS X, el cual es un filamento ABS con propiedades superiores a las del ABS común. Por lo tanto, aunque se realizara la correcta normalización correspondiente aún se esperaría una cierta diferencia en la magnitud de las propiedades, pero esta debería ser considerablemente menor.



a)

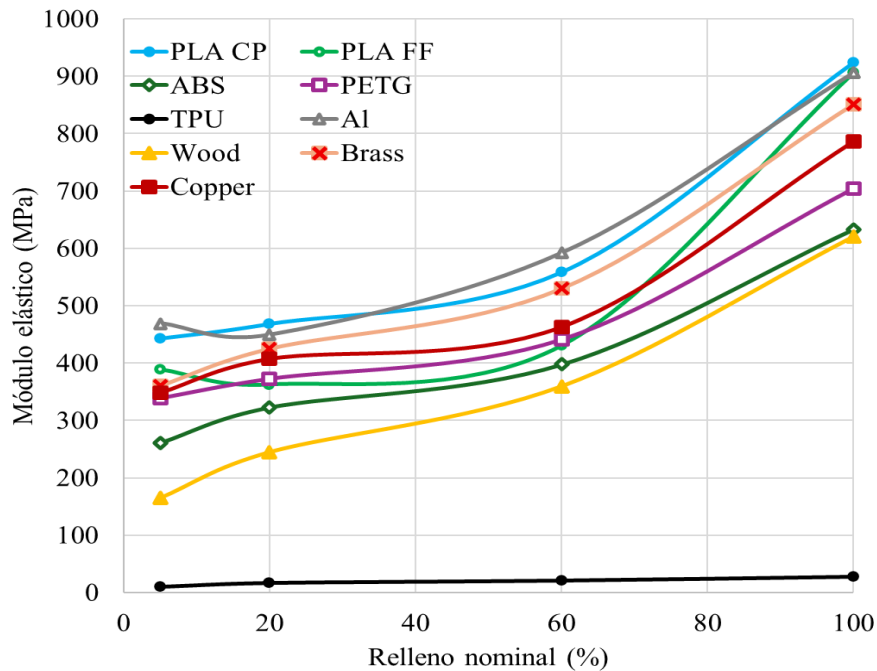


b)

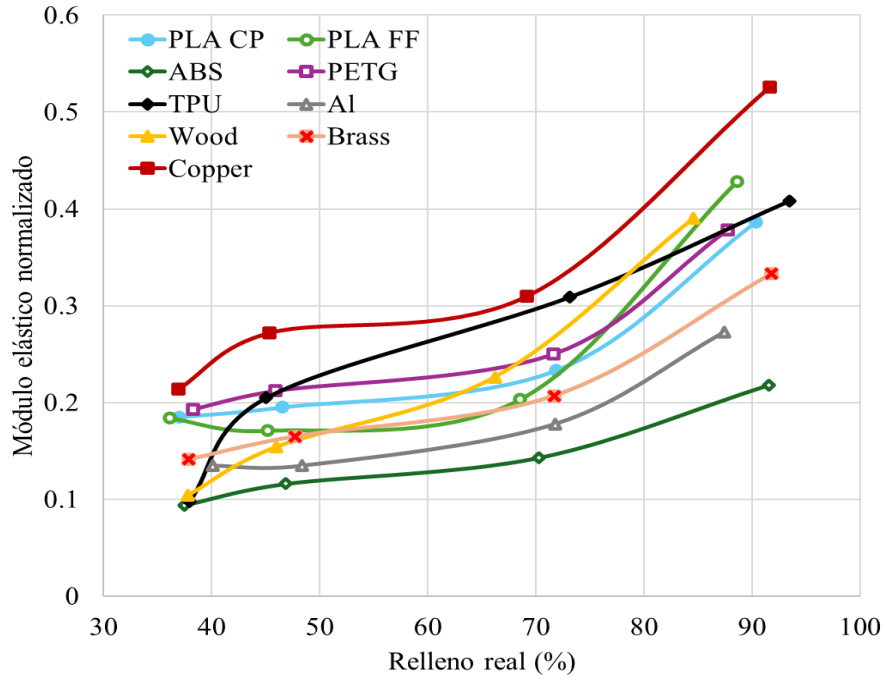
**Figura 5.3.** Comparación de las propiedades a tensión normalizadas con respecto al porcentaje de relleno nominal: a) módulo elástico normalizado y b) *UTS* normalizado.

### 5.1.3. Comportamiento a tensión de múltiples materiales

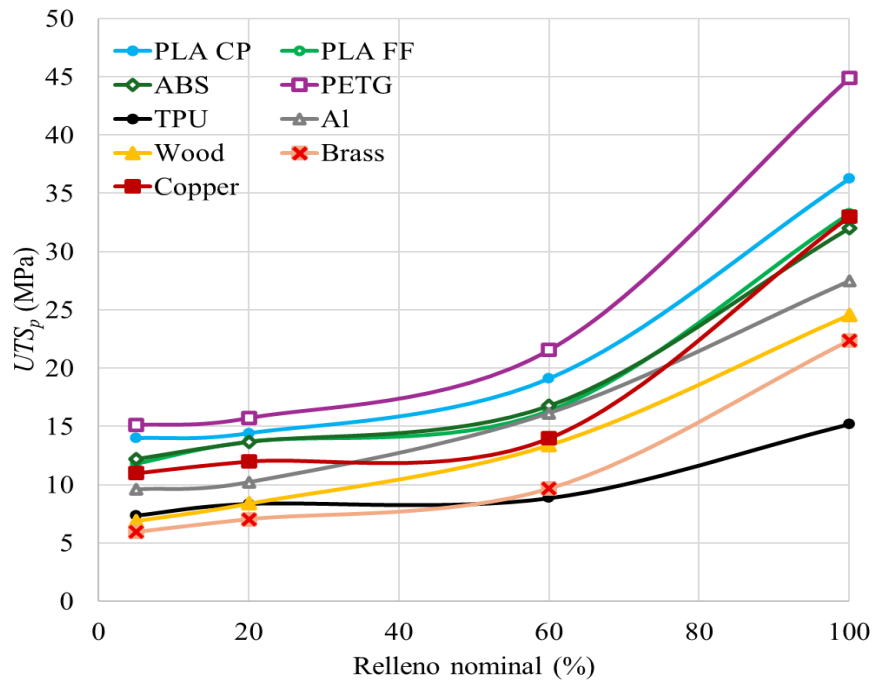
Como resultado general de la etapa experimental, se compara el comportamiento de los resultados obtenidos correspondientes al módulo de elasticidad y la resistencia última a la tensión de los nueve materiales estudiados sin y con la universalización realizada. Esta comparativa se muestra en la Figura 5.4. De esta figura se puede apreciar que, gracias a la universalización, los resultados obtenidos exhiben un comportamiento más compacto entre ellos. Además, al presentarse en términos del porcentaje de relleno real se puede entender mejor el comportamiento de las piezas en función de la cantidad real de material utilizado en su fabricación. A pesar de contar con la normalización correcta para cada probeta, la magnitud de las propiedades para cada material exhibe una diferencia notable. Esto se debe a que la universalización no independiza el comportamiento de las piezas del material, solo de la condición y de la calidad de este. Al tratarse de materiales diferentes, cada uno de ellos reacciona diferente durante las diversas etapas de la fabricación de una pieza, por lo que cada material alterará de forma diferente la estructura interna de la pieza y por lo tanto exhibirá una magnitud diferente.



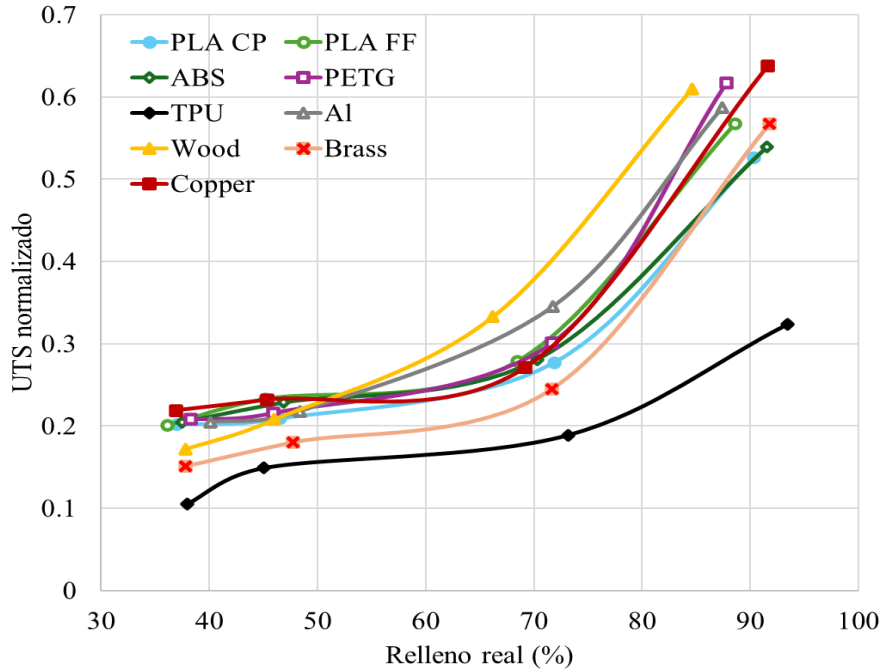
a)



b)



c)



d)

**Figura 5.4.** Comparación de las propiedades elásticas de los nueve materiales estudiados: a) módulo de elasticidad, b) módulo de elasticidad universalizado, c) resistencia última a la tensión, y d) resistencia última a la tensión universalizada.

## 5.2. Resultados de los modelos de predicción

De los coeficientes obtenidos para cada modelo y cada material, los cuales se muestran en la Tabla 4.1, es posible observar que, aunque varios de los coeficientes obtenidos son similares entre sí, no es posible agruparlos en categorías lógicas como lo serían por tipos de materiales; por ejemplo, materiales compuestos a base de PLA. El uso de coeficientes en específico para cada tipo de material pudiera resultar impráctico. Con el propósito de simplificar el uso de los modelos analíticos, se propone determinar el valor promedio de los coeficientes (*Coef. promedio*) para cada modelo considerando todos los materiales. Este valor promedio global para todos los tipos de materiales se muestra en la Tabla 5.1 junto con su respectivo valor de desviación estándar ( $\sigma$ ). El uso de este valor promedio como coeficiente para la predicción de propiedades a tensión para todos los tipos de materiales, genera resultados con un error general mayor que el que se obtendría si se utilizaran los coeficientes óptimos para cada material. Estos resultados se presentan en la Tabla 5.2. En esta tabla no se incluye el modelo de la ley de mezclas ya que no cuenta con coeficientes.

**Tabla 5.1.** Coeficientes promedios para cada modelo analítico-empírico estudiado, según el material y la propiedad a predecir.

Coeficientes para el módulo de elasticidad										
Material	GA P	GA C	Ex P	Ex C	SD	H	R	VD P	VD C	E
<i>Coef. promedio</i>	0.666	0.302	1.571	0.089	5.036	-7.900	0.435	1.564	0.407	0.385
$(\sigma)$	(0.267)	(0.070)	(0.632)	(0.039)	(4.803)	(3.818)	(0.132)	(0.632)	(0.136)	(0.099)
Coeficientes para la resistencia última a la tensión normalizada										
Material	GA P	GA C	Ex P	Ex C	SD	H	R	VD P	VD C	E
<i>Coef. promedio</i>	0.717	0.374	1.738	0.097	3.247	-5.954	0.519	1.738	0.565	0.455
$(\sigma)$	(0.247)	(0.084)	(0.631)	(0.029)	(1.129)	(2.732)	(0.066)	(0.631)	(0.214)	(0.058)

Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de Hasselman (H), modelo de Rice (R), modelo de la Variante de Duckworth (VD), y modelo de Eficiencia (E). La P significa que el coeficiente se usa como potencia y la C que se usa como constante.

**Tabla 5.2.** Errores generales para cada modelo usando un coeficiente promedio para todos los materiales y usando el coeficiente óptimo de cada material y modelo.

Módulo elástico normalizado		
Modelos	Error general usando coeficientes promedio (%)	Error general usando coeficientes óptimos (%)
GA	24.4	10.18
Ex	25.34	7.47
SD	55.26	45.52
H	41.18	35.37
R	24.94	11.15
VD	23.75	7.47
E	24.73	10.81
Resistencia última a la tensión normalizada		
Modelos	Error general usando coeficientes promedio (%)	Error general usando coeficientes óptimos (%)
GA	17.93	12.35
Ex	17.26	9.22
SD	31.27	27.3
H	48.49	25.32
R	18.33	13.61
VD	17.51	9.22
E	18.37	13.76

Modelo de Gibson y Ashby (GA), modelo Exponencial (Ex), modelo de Spriggs Duckworth (SD), modelo de Hasselman (H), modelo de Rice (R), modelo de la Variante de Duckworth (VD), y modelo de Eficiencia (E).

De la Tabla 5.2 se puede observar que el error general obtenido al utilizar los coeficientes óptimos por material es mucho menor que el que se obtiene al utilizar un coeficiente global promedio. Por lo tanto, se sugiere el uso de los coeficientes de la Tabla 4.1 para la predicción de las propiedades utilizando los modelos y materiales analizados. Además, en la Tabla 5.2

se puede apreciar que el modelo Exponencial y el modelo variante de Duckworth tienen errores de predicción menores al 10%.

Finalmente, con base en el error general de los ocho modelos estudiados utilizando los coeficientes óptimos de cada modelo y material, se designa el ranking de cada modelo tanto para la predicción del módulo de elasticidad como para el  $UTS_n$ . Los resultados del ranking se muestran en la Tabla 5.3, en donde se puede observar que tanto para el módulo de elasticidad como para el  $UTS_n$  la posición de los modelos es la misma. El modelo Exponencial (Ex) y el modelo Variante de Duckworth (VD) se posicionan en primer y segundo lugar, con un error general de un 7.47% para el módulo de elasticidad normalizado y un 9.22% para el  $UTS_n$ . Aunque ambos modelos poseen el mismo error se tomó la decisión de poner el modelo Ex como primer lugar ya que su ecuación después de realizar las sustituciones correspondientes resulta ser más simple. A estos modelos le siguen el modelo de Gibson y Ashby (GA), con un error del 10.18% para la predicción del módulo de elasticidad normalizado y 12.53% para el  $UTS_n$ . Esto último es sorprendente, ya que el modelo GA fue uno de los primeros modelos en ser desarrollados, y es relativamente simple. El modelo con el error más alto es la Ley de Mezclas (LM), con un error general de 176.3% en la predicción del módulo de elasticidad normalizado y un 112.9% para la  $UTS_n$ , este resultado es bastante esperable ya que la LM da como resultado un comportamiento de línea recta a 45°, lo cual no representa la tendencia de las curvas obtenidas del comportamiento experimental de los diferentes materiales estudiados.

**Tabla 5.3.** Ranking de los modelos analítico-empíricos, en función de su error general.

Ranking de modelos analítico-empíricos					
Predicción del módulo de elasticidad normalizado			Predicción del $UTS_n$		
Posición	Modelo	Error general (%)	Posición	Modelo	Error general (%)
1	Ex	7.47	1	Ex	9.22
2	VD	7.47	2	VD	9.22
3	GA	10.18	3	GA	12.35
4	R	11.15	4	R	13.61
5	E	21.77	5	E	13.76
6	H	35.37	6	H	25.32
7	SD	45.52	7	SD	27.3
8	LM	176.3	8	LM	112.9

Los resultados obtenidos en relación a la evaluación de los modelos analítico-empíricos de predicción, son de gran trascendencia ya que se trata de las primeras predicciones del comportamiento a tensión de piezas FFF hechas de un gran número de materiales. Además, los resultados obtenidos son comparables con otros estudios dado que los datos utilizados

fueron universalizados, haciéndolos independientes de la máquina FFF utilizada, y de la calidad y estado del material con el que se fabricaron las piezas. Los resultados de los modelos y sus coeficientes son de gran utilidad para los ingenieros o equipos de diseño que requieran fabricar piezas FFF que cumplan con ciertas propiedades estructurales a la tensión. Lo anterior debido a que podrán utilizar los modelos junto con sus coeficientes para determinar las propiedades estructurales requeridas para el diseño de componentes en función del material y el porcentaje de relleno, reduciendo la necesidad de pruebas experimentales o simulaciones numéricas que requieren altos costos y tiempo de desarrollo.

## Capítulo 6. Conclusiones

Con el desarrollo del presente trabajo de investigación se logró la caracterización, el análisis y la predicción del comportamiento mecánico bajo tensión de piezas FFF fabricadas con diversos materiales y porcentaje de relleno, cumpliendo de esta manera con el objetivo general de la tesis y demostrando la validez de la hipótesis planteada. Como parte de los resultados, se caracterizó y analizó tanto el filamento como las piezas FFF fabricadas utilizando nueve diferentes materiales (PLA CP, PLA FF, ABS, PETG, TPU, Al, Wood, Brass y Copper), utilizando los mismos porcentajes de relleno nominal (5%, 20%, 60% y 100%). Los datos generados de las pruebas experimentales demostraron que el uso del porcentaje de relleno real en lugar del nominal permite entender de forma más precisa la cantidad de material que realmente tiene una probeta. También se demostró que hay una clara relación entre el porcentaje de relleno real y la magnitud de las propiedades a tensión del módulo elástico y la *UTS* de los diferentes materiales. Así mismo se demostró que sin importar que tan alto sea el relleno nominal el valor de las propiedades a tensión nunca será mayor que las propiedades del filamento utilizado en la fabricación de las piezas. También se observó que es necesario caracterizar el filamento a usarse en la fabricación de las piezas con el fin de conocer los valores máximos de las propiedades a obtener, idealmente, con las piezas fabricadas de ese material.

Además, al contrastar datos de materiales FFF rígidos y flexibles se pudo observar una clara diferencia en el comportamiento del módulo elástico que tienen estos tipos de materiales, teniendo los materiales flexibles no solo valores más bajos, sino una menor variación conforme se aumenta el porcentaje de relleno, en comparación con los materiales rígidos. Gracias a la introducción de materiales compuestos en la investigación, se pudo corroborar que la implementación de un agente dopante en el PLA no solo modifica sus características estéticas, si no también sus propiedades mecánicas bajo tensión, ya que todos los materiales compuestos obtuvieron valores del módulo elástico y *UTS* menores que las piezas FFF de PLA puro. Esta disminución en los valores de las propiedades a tensión no necesariamente se debe al material dopante en sí, sino a la cantidad de material dopante presente en el filamento; recordando que los filamentos compuestos utilizados en la investigación poseen una composición del 70% de PLA y un 30% del respectivo material dopado. Por lo tanto, se puede concluir que una presencia del 30% del material dopante en el filamento, para los casos estudiados, produce una disminución de las propiedades a tensión.

La metodología experimental desarrollada, como consecuencia del cumplimiento de los objetivos de investigación, y presentada en este trabajo de tesis, permitió la caracterización

tanto de la materia prima como de las piezas FFF fabricadas con dicha materia prima. Esta metodología genera como producto final datos universalizados, los cuales son independientes de la máquina FFF utilizada y de la condición y calidad del material seleccionado. Las curvas de comportamiento obtenidas pueden ser utilizadas en metodologías de diseño tradicionales, ya que los datos universalizados permiten dar una predicción del comportamiento general que tendrían las piezas fabricadas con materiales similares. Aunque durante el presente trabajo se validó el uso de esta metodología para la caracterización a tensión de piezas y materiales FFF, se cree plausible poder extrapolar su uso a otros métodos AM, como puede ser la estereolitografía, y a otros tipos de propiedades, como lo son las propiedades bajo torsión, impacto y fatiga.

Los resultados universalizados permitieron la correcta evaluación de ocho modelos analítico-empíricos para la predicción de propiedades de piezas FFF. Aunque estos modelos no fueron desarrollados originalmente para la predicción del comportamiento de piezas FFF, a través de la evaluación realizada se logró generar predicciones del comportamiento a tensión de piezas FFF con un error general menor al 10%, en dos de ellos, el modelo Exponencial y el modelo variante de Duckworth. Aunque en el presente trabajo se utilizaron estos modelos para predecir el comportamiento a tensión, se cree que es posible extender el uso de estos modelos para predecir propiedades a torsión, impacto y fatiga.

Como resultados del trabajo de investigación doctoral se generó conocimiento, datos experimentales y modelos analítico-empíricos actualizados que pueden llegar a ser de gran utilidad para la academia, la industria y sobre todo para facilitar y extender el uso de las tecnologías AM. Tanto los datos experimentales como los modelos matemáticos obtenidos permiten predecir el comportamiento general de las piezas FFF. En el caso de requerir un valor de un material en específico, solo es necesario multiplicar el dato o predicción universalizada por la propiedad a tensión del filamento en particular, siempre y cuando el mismo se trate de un material similar a los presentados en este trabajo.

### **Contribuciones**

Las contribuciones principales del presente trabajo de investigación se enlistan a continuación.

- Un nuevo conjunto de datos experimentales bajo tensión tanto de las piezas FFF fabricadas con nueve materiales diferentes y utilizando las mismas variaciones del porcentaje de relleno real, como de los filamentos utilizados en la fabricación de estas.
- La presentación de una metodología tanto para la caracterización bajo tensión de probetas y materiales FFF, como para la universalización de sus respectivos resultados, siendo la universalización un proceso por el cual los resultados se vuelven

independientes de la máquina FFF utilizada y de la condición y calidad del material utilizado en su fabricación.

- Evaluación de ocho modelos analítico-empíricos actualizados para su uso en la predicción del comportamiento a tensión de piezas FFF utilizando múltiples materiales y porcentajes de relleno.
- Una tabla de coeficientes optimizados para cada uno de los ocho modelos estudiados según el material FFF utilizado.
- Un ranking de los ocho modelos analítico-empíricos estudiados, en función del error general de sus predicciones.
- La publicación del artículo “Multimaterial experimental characterization of FFF tensile specimens with variable infill density using a universalized methodology”, en la revista International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

### Trabajo futuro

Como trabajo a futuro se consideran las siguientes actividades:

- Utilizar los modelos analítico-empíricos actualizados junto a sus respectivos coeficientes optimizados, para predecir el comportamiento de piezas con geometrías complejas, es decir que no se traten de probetas. El objetivo es evaluar y validar la utilidad práctica de los modelos de predicción en el proceso de diseño para manufactura aditiva de piezas industriales reales.
- Incrementar el número de materiales estudiados. Esto con el fin tanto de extender aún más el catálogo de datos experimentales, como de definir más coeficientes optimizados para los modelos analítico-empíricos. Además de confirmar las diferencias entre los materiales rígidos y flexibles al incrementar el número de materiales flexibles estudiados. Además, se buscaría corroborar el efecto que tiene la presencia de diferentes porcentajes de dopajes en materiales compuestos.
- Aplicar la metodología experimental desarrollada a otros métodos AM, como la estereolitografía. Lo anterior con el fin de confirmar si la metodología es funcional sin importar el método AM utilizado.
- Utilizar la metodología y los modelos analíticos para predecir el comportamiento de piezas AM bajo otros tipos de cargas como son torsión, impacto y fatiga. El objetivo es generar más datos experimentales para otros tipos de cargas.

- Usar los nuevos datos experimentales para alimentar modelos numéricos que usen algoritmos para inteligencia artificial, con el fin de mejorar la calidad y utilidad general de este tipo de modelos.
- Desarrollar una metodología de DfAM, que permita utilizar los resultados obtenidos de forma más eficiente en el diseño de piezas AM.

Finalmente, se espera que los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis doctoral generen nuevas oportunidades de investigación en tecnologías AM, utilizando los resultados obtenidos como referencia para futuras investigaciones.

## Referencias

- [1] Guo N. and Leu M. C. (2013), “Additive manufacturing: Technology, applications and research needs”. *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 8, No. 3, pp. 215–243.
- [2] Tofail S. A. M., Koumoulos E. P., Bandyopadhyay A., Bose S., O’Donoghue L., and Charitidis C. (2018), “Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities”. *Materials Today*, Vol. 21, No. 1, pp. 22–37.
- [3] Babu S. S. and Goodridge R. (2015), “Additive manufacturing”. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, Vol. 31, No. 8, pp. 881–883.
- [4] Medellin-Castillo H. I. and Zaragoza-Siqueiros J. (2019), “Design and Manufacturing Strategies for Fused Deposition Modelling in Additive Manufacturing: A Review”. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, Vol. 32, No. 53, pp. 1-16.
- [5] Jimeno-Morenilla A., Azariadis P., Molina-Carmona R., Kyratzi S., and Moulianitis V. (2021), “Technology enablers for the implementation of Industry 4.0 to traditional manufacturing sectors: A review”. *Computers in Industry*, Vol. 125, pp. 1-27.
- [6] León-Cabezas M. A., Martínez-García A., and Varela-Gandía F. J. (2017), “Innovative functionalized monofilaments for 3D printing using fused deposition modeling for the toy industry”. *Procedia Manufacturing*, Vol. 13, pp. 738–745.
- [7] Grygier D., Kujawa M., and Kowalewski P. (2022), “Deposition of Biocompatible Polymers by 3D Printing (FDM) on Titanium Alloy”. *Polymers (Basel)*, Vol. 14, No. 2, pp. 1-26.
- [8] A. Paolini, S. Kollmannsberger, and E. Rank (2019), “Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods”. *Additive Manufacturing*, Vol. 30, pp. 1-13.
- [9] Vayre B., Vignat F., and Villeneuve F. (2012), “Designing for additive manufacturing”. *Procedia CIRP*, Vol. 3, No. 1, pp. 632–637.
- [10] Klahn C., Leutenecker B., and Meboldt M. (2015), “Design strategies for the process of additive manufacturing”. *Procedia CIRP*, Vol. 36, pp. 230–235.

- 
- [11] Leutenecker-Twelsiek B., Klahn C., and Meboldt M. (2016), “Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing”. *Procedia CIRP*, Vol. 50, pp. 408–413.
- [12] Chekkaramkodi D., Jacob L., Shebeeb C. M., Umer R. and Butt, H. (2024), “Review of vat photopolymerization 3D printing of photonic devices”. *Additive Manufacturing*, Vl. 84, pp. 1-16.
- [13] Saldaña-López A., Maibohm C., Silvestre O. F. and Nieder J. B. (2020), “Polimerización de dos fotones, una tecnología interdisciplinar: de la innovación en investigación biomédica a los dispositivos fotónicos integrados”. *Revista española de física*, Vol. 34, No. 2, pp. 23-28.
- [14] Skawiński P. and Siemiński P. (2017), “The 3D printer farm – function and technology requirements and didactic use”. *Mechanik*, Vol. 8, No. 9, pp. 796-800.
- [15] Thi Hai V. N., Phu S. N., Essomba T. and Lai J. Y. (2022), “Development of a multicolor 3d printer using a novel filament shifting mechanism”. *Inventions*, Vol. 7, No. 34, pp. 1-12.
- [16] Kolarević M., Grković V., Pajović S., Rasinac M. and Nikolić, B. (2023), “Development of FGF 3d printer”. *The 6th international conference on mechanical engineering in XXI century*, pp. 75-82.
- [17] Investors Stratasy, (2025), "Inventor of FDM 3D Printing and CoFounder of Stratasy, Scott Crump, Inducted in to the TCT Hall of Fame", disponible en: <https://investors.stratasy.com/news-events/press-releases/detail/418/inventor-of-fdm-3d-printing-and-co-founder-of-stratasy>.
- [18] Mwema F. M. and Akinlabi E. T. (2020), “Basics of Fused Deposition Modelling (FDM)”. *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, Vol 30, pp. 1-15.
- [19] Krishnanand and Taufik M. (2021), “Fused Filament Fabrication (FFF) Based 3D Printer and Its Design: A Review”. *Advanced Manufacturing Systems and Innovative Product Design* (eds Deepak, B. B. V. L. et al.), pp. 497-505.
- [20] Forster A. M. (2015), “Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability”. *National Institute of Standards and Technology Interagency*, Vol. 8059, pp. 1-54.

- 
- [21] Cerda-Avila, S. N., Medellín-Castillo, H. I. and Lim, T. (2020), "An experimental methodology to analyze the structural behaviour of FDM parts with variable process parameters". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 26, No. 9, pp. 1615-1625.
- [22] Alvarez, K. L., Lagos, R. F. and Aizpun, M. (2016), "Investigating the influence of infill percentage on the mechanical properties of fused deposition modelled ABS parts". *Ingeniería e Investigación*, Vol. 36, No. 3, pp. 110-116.
- [23] Bikas, H., Stavropoulos, P. and Chryssolouris, G. (2014), "Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 83, pp. 389-405.
- [24] Lanzotti, A., Grasso, M., Staiano, G. and Martorelli, M. (2015), "The Impact of process parameters on mechanical properties of parts fabricated in PLA with an open-source 3-D printed". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21, No. 5, pp. 604-617.
- [25] Rajpurohit, S.R. and Dave, H.K. (2018), "Effect of process parameters on tensile strength of FDM printed PLA part". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24, No. 6, pp. 1317-1324.
- [26] Rodríguez-Panes, A., Claver, J. and Camacho, A.M. (2018), "The influence of Manufacturing Parameters on the Mechanical Behaviour of PLA and ABS Pieces Manufactured by FDM: A Comparative Analysis". *Materials*, Vol. 11, No.8, pp.1-21.
- [27] Li, H., Wang, T., Sun, J. and Yu, Z. (2018), "The effect of process parameters in fused deposition modelling on bonding degree and mechanical properties". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 24, No. 1, pp.80-92.
- [28] Gonabadi, H., Yadav, A. and Bull, S.J. (2020), "The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 111, No. 3-4, pp. 695-709.
- [29] Pandžić, A., Hodžić, D. and Kadrić, E. (2021), "Experimental Investigation on Influence of Infill Density on Tensile Mechanical Properties of Different FDM 3D Printed Materials". *Journal of the Association for Information Communication Technologies, Education and Science*. Vol. 10, No. 3, pp. 1195-1201.
- [30] Lendvai, L., Fekete, I., Rigotti, D. (2015), "Experimental study on the effect of filament-extrusion rate on the structural, mechanical and thermal properties of material

- 
- extrusion 3D-printed polylactic acid (PLA) products". *Progress in Additive Manufacturing*. Vol. 10, pp. 619–629.
- [31] ELDeeb, I.S.; Esmael, E.; Ebied, S.; Diab, M.R.; Dekis, M.; Petrov, M.A.; Zayed, A.A.; Egiza, M. (2003), "#Optimization of Nozzle Diameter and Printing Speed for Enhanced Tensile Performance of FFF 3D-Printed ABS and PLA". *Journal of Manufacturing and Materela Processing*. Vol. 9, No. 221, pp. 1-24.
- [32] Bellini, A. and Güçeri, S. (2003), "Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 4, pp. 252-264.
- [33] Ang, K., Leong, K. F., Chua, C. and Margam, C. (2006), "Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 12, No. 2, pp. 100-105.
- [34] Rezayat, H., Zhou, W., Siriruk, A., Penumadu, D. and Babu, S.S. (2015), "Structure–mechanical property relationship in fused deposition modelling". *Material Science and Technology*, Vol. 31, No. 8, pp. 895-903.
- [35] Kozior, T. and Kundera, C. (2017), "Evaluation of the Influence of Parameters of FDM Technology on the Selected Mechanical Properties of Models". *Procedia Engineering*, Vol. 192, pp. 463-468.
- [36] Cantrell, J., Rohde, S., Damiani, D., Gurnani, R., DiSandro, L., Anton. J., Young, A., Jerez, A., Steinbach, D., Kroese, C. and Ifju, P. (2017), "Experimental Characterization of the Mechanical Properties of 3D Printed ABS and Polycarbonate Parts". *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, Vol. 3, pp.89-105.
- [37] Menargues, S., Navas, J., Espinosa, I.; Baile, M.T., Vaz, R.F., Picas, J.A. (2025), "Effect of Additive Manufacturing Parameters on PLA, ABS, and PETG". *Strength. Processes*, Vol. 13, No. 2733, pp. 1-15.
- [38] Szykiedans, K., Credo, W. and Osiński, D. (2017), "Selected Mechanical Properties of PETG 3-D prints". *Procedia Engineering*, Vol. 177, pp. 455-461.
- [39] Özen, A., Abali, B.E., Völlmecke, C., Gerstel, J. and Auhl, D. (2021), "Exploring the Role of Manufacturing Parameters on Microstructure and Mechanical Properties in Fused Deposition Modeling (FDM) Using PETG". *Applied Composite Materials*, Vol. 28, No. 15, pp. 1799-1828.

- 
- [40] Castro, F., Santana, L. and Alves, J.L. (2022) "Colored PETG Filaments: Effects of Pigment on the Mechanical Properties of Heat-Treated FFF Parts". *Materials Proceedings*, Vol. 8, No. 1, pp. 1-2.
- [41] Chauhan, D.B. and Chudasama, M.K. (2022) "Effect of Process Parameters on Different Properties of 3D Printed PETG Parts Prepared Using FDM". *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, Vol. 2, No. 2, pp. 1-7.
- [42] Taqdissillah, D., Mutaqqin, A.Z., Darsin, M., Dwilaksana, D. and Ilminnafik, N. (2022) "The Effect of Nozzle Temperature, Infill Geometry, Layer Height and Fan Speed on Roughness Surface in PETG Filament". *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology*, Vol. 6, No. 2, pp. 74-84.
- [43] Pandžić, A. and Hodžić, D. (2022), "Tensile mechanical properties comparison of PETG, ASA, and PLA-strongman FDM printed materials with and without infill structure". *33rd Danube Adria Association for Automation & Manufacturing International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, pp. 0221-0230.
- [44] Dobrzańska-Danikiewicz, A.D., Siwczyk, B., Bączyk, A. and Romankiewicz, A. (2023) "Mechanical properties of recycled PLA and PETG printed by FDM/FFM method". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 49-59.
- [45] Tunçel, O., Kahya, Ç. and Tüfekci, K. (2024) "Optimization of Flexural Performance of PETG Samples Produced by Fused Filament Fabrication with Response Surface Method". *Polymers*, Vol. 16, No. 14, pp. 1-18.
- [46] Lin, X., Coates, P., Hebda, M., Wang, R., Lu, Y. and Zhang, L. (2020) "Experimental analysis of the tensile property of FFF-printed elastomers". *Polymer Testing*, Vol. 90, pp. 1-30.
- [47] Wang, J., Yang, B., Lin, X., Gao, L., Liu, T., Lu, Y. and Wang, R. (2020) "Research of TPU materials for 3D printing aiming at non-pneumatic tires by FDM method". *Polymers*, Vol. 12, No. 11, pp. 1-19.

- 
- [48] Bruère, V.M., Lion, A., Holtmannspötter, J. and Johlitz, M. (2023) "The influence of printing parameters on the mechanical properties of 3D printed TPU-based elastomers". *Progress in Additive Manufacturing*, Vol. 8, No. 42, pp. 1-9.
- [49] Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J. and Hui, D. (2016), "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective". *Composites Part B*, Vol. 110, pp. 442-45.
- [50] Tao, Y., Wang, H., Li, Z., Li, P. and Shi, S.Q. (2017), "Development and application of wood flour-filled polylactic acid composite filament for 3D printing". *Materials*, Vol. 10, No. 4, pp. 1-6.
- [51] Kariz, M., Sernek, M., Obućina, M. and Kuzman, M.K. (2017), "Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts". *Materials Today Communications*, Vol. 14, pp. 135-140.
- [52] Liu, Z., Lei, Q. and Xing, S. (2019), "Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM". *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, No. 5, pp. 3741-3751.
- [53] Caminero, M.A., Chacón, J.M., García-Plaza, E., Nuñez, P.J., Reverte, J.M. and Becar, J.P. (2019), "Additive manufacturing of PLA-based composites using fused filament fabrication: effect of graphene nanoplatelet reinforcement on mechanical properties, dimensional accuracy and texture". *Polymers*, Vol. 11, No. 5, pp. 1-22.
- [54] Dobrescu, T., Pascu, N.E., Jiga, G., Simion, I., Adir, V., Enciu, G. and Tudose, D.I. (2019), "Tensile behavior of PLA and PLA composite materials under different printing parameter". *Material plastice*, Vol. 56, No. 4, pp. 783-800.
- [55] Ilyas, R.A., Sapuan, S.M., Harussani, M.M., Hakimi, M.Y.A.Y., Haziq, M.Z.M., Atikah, M.S.N, Asyraf, M.R.M., Ishak, M.R., Razman, M.R., Nurazzi, N.M., Norrahim, M.N.F., Abrial, H. and Asrofi, M. (2021), "Polylactic acid (PLA) biocomposite: processing, additice manufacturing and advance application". *Polymers*, Vol.13, No. 8, pp. 1-34.
- [56] Vakharia, V.S., Kuentz, L., Salem, A., Halbig, M.C., Salem, J.A. and Singh, M. (2021), "Additive manufacturing and characterization of metal particulate reinforced polylactic acid (PLA) polymer composites". *Polymers*, Vol. 13, No. 20, pp. 1-16.

- 
- [57] Buj-Corral, I., Sanz-Fraile, H., Uldemolins, A., Tejo-Otero, A., Domínguez-Fernández, A., Almendros, I. and Otero, J. (2022), "Characterization of 3D printed metal-pla coomposite scaffolds for biomedical applications". *Polymers*, Vol. 14, No. 13, pp. 1-12.
- [58] Bochnia, J., Kozior, T. and Blasiak, M. (2023), " The Mechanical Properties of Thin-Walled Specimens Printed from a Bronze-Filled PLA-Based Composite Filament Using Fused Deposition Modelling". *Materials*, Vol. 16, No.8, pp. 1-15.
- [59] Schüßler, P., Franke, J., Czink, S., Antusch, S., Mayer, D., Laube, S., Hanemann, T., Schulze, V. and Dietrich, S. (2023), "Characterization of the metal fused filament fabrication process for manufacturing of pure copper inductors". *Materials*, Vol. 16, No. 20, pp. 1-12.
- [60] Kantaros, A., Soulis, E., Petrescu, F.I.T. and Ganetsos, T. (2023), "Advance composite materials utilized in FDM/FFF 3D printing manufacturing process: the case of filled filaments". *Materials*, Vol. 16, No. 18, pp. 1-27.
- [61] Zhang, Y. and Chou, K. (2006), "Three-dimensional finite element analysis simulations of the fused deposition modelling process". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, No. 10, pp. 1663-1671.
- [62] Zhang, Y. and Chou, K. (2008), "A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, No. 8, pp. 959-968.
- [63] Martínez, J., Diéguez, J.L., Ares, E., Pereira, A., Hernández, P. and Pérez, J.A. (2013), "Comparative between FEM models for FDM parts and their approach to a real mechanical behaviour". *Procedia Engineering*, Vol. 63, pp. 878-884.
- [64] Rayegani, F., Onwubolu, G.C. (2014), "Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE)". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 73, pp. 509-519.

- 
- [65] Costa, S.F., Duarte, F.M. and Covas, J.A., (2014), "Thermal conditions affecting heat transfer in FDM/FFE: a contribution towards the numerical modelling of the process". *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 10, No. 1, pp. 35-46.
- [66] Onwubolu, G.C., and Rayegani, F. (2014), "Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process". *International Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2014, pp. 1-14.
- [67] Somireddy, M., and Czekanski, A. (2017), "Mechanical Characterization of Additively Manufactured Parts by FE Modeling of Mesostructure". *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 1, No. 2, pp. 1-21.
- [68] Grinde, S. (2018), "Topology optimization for additive manufacturing using SIMP method". Graduate Theses, Montana Tech, USA.
- [69] Serdeczny, M.P., Comminal, R., Pedersen, D.B. and Spangenberg, J. (2018), "Numerical prediction of the porosity of parts fabricated with fused deposition modeling". *Solid Freeform Fabrication 2018: Proceedings of the Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1-6.
- [70] Cerda-Avila, S.N., Medellín-Castillo, H.I. and de Lange, D.F. (2019), "Analysis and numerical simulation of the structural performance of fused deposition modeling samples with variable infill values". *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 141, No. 2, pp. 1-7.
- [71] Zouaoui, M., Labergere, C., Gardan, J., Makke., A., Recho, N., Alexandre, Q. and Lafon, P. (2019), "Numerical prediction of 3D printed specimens based on a strengthening method of fracture toughness". *52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, pp. 40-44.
- [72] Nasirov, A., Hasanov, S. and Fidan, I. (2019), "Prediction of mechanical properties of fused deposition modeling parts using multiscale modeling and classical laminate theory". *Solid Freeform Fabrication 2019: Proceedings of the Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1373-1382.
- [73] Nasirov, A. and Fidan, I. (2020), "Prediction of mechanical properties of fused filament fabricated structures via asymptotic homogenization". *Mechanics of Materials*, Vol. 145, pp. 1-14.

- 
- [74] Behdani, B., Senter, M., Mason, L., Leu, M., and Park, J. (2020). Numerical Study on the Temperature-Dependent Viscosity Effect on the Strand Shape in Extrusion-Based Additive Manufacturing”. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 4, No. 2, pp. 1-15.
- [75] Xu, S., Huang, J., Liu, J. and Ma, Y. (2020), "Topology optimization for FDM parts considering the hybrid deposition path pattern". *Micromachines*, Vol. 11, No. 709, pp. 1-23.
- [76] Biswas, P., Guessasma, S. and Li, J. (2020), "Numerical prediction of the orthotropic elastic properties of 3D-printed materials using micro-CT and representative volume element”. *Acta Mech*, Vol. 231, pp. 503-516.
- [77] Hazrat Ali, Md., Batai, S. and Karim D. (2021), "Material minimization in 3D printing with novel hybrid cellular structure". *Materials Today: Proceedings*, Vol. 42, No. 10, pp. 1800-1809.
- [78] Rivet, I., Dialami, N., Cervera, M., Chiumenti, M., Reyes, G. and Pérez, M.A. (2021), "Experimental, Computational, and Dimensional Analysis of the Mechanical Performance of Fused Filament Fabrication Parts". *Polymers*, Vol. 13, pp. 1-18.
- [79] Nasrin, T., Pourali, M., Pourkamali-Anaraki, F. and Peterson, A.M. (2023), "Active learning for prediction of tensile properties for material extrusion additive manufacturing". *Scientific Reports*, Vol. 13, pp. 1-14.
- [80] Liu, Z., Mazzei Capote, G.A., Grubis, E., Pandey, A., Blanco Campos, J.C., Hegge, G.R. and Osswald, T.A. (2023), "Predicting properties of fused filament fabrication parts through sensors and machine learning". *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, Vol. 7, No. 186, pp. 1-25.
- [81] Akbari, P., Zamani, M. and Mostafaei, A. (2024), "Machine learning prediction of mechanical properties in metal additive manufacturing". *Additive Manufacturing*, Vol. 91, pp. 1-23.
- [82] Cerda-Avila, S.N., Medellín-Castillo, H.I. and Cuevas-Tello, J.C. (2023), “A comparative study between backpropagation and general regression neural networks to predict tensile properties of fused filament fabricated parts”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 14, No. 238, pp. 2192-2207.

- 
- [83] Voigt, W. (1889). "Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper". *Annalen der Physik*, Vol. 12, No. 274, pp. 573– 587.
- [84] Gibson, L. and Ashby, M.F. (1988), *Cellular Solids: structure and Properties*. Pergamon Press, Oxford.
- [85] Mouhmid, B., Imad, A., Benseddiq, N., Benmedakhene, S. and Maazouz, A. (2006), "A study of the mechanical behavior of a glass fibre reinforced polyamide 6,6: experimental investigation". *Polymer Testing*, Vol. 25 No. 4, pp. 544-552.
- [86] Choren, J.A., Heinrich, S.M. and Silver-Thorn, M.B. (2013), "Young's modulus and volume porosity relationships for additive manufacturing applications". *Journal of Materials Science*, Vol. 48 No. 15, pp. 5103-5112.
- [87] Gurralla, P.K. and Regalla, S.P. (2014), "Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling". *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 9, No. 3, pp. 141-149.
- [88] Gallegos-Nieto, E., Medellín-Castillo, H.I. and de Lange, D.F. (2015), "A complete structural performance analysis and modelling of hydroxyapatite scaffolds with variable porosity". *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, Vol. 18, No. 11, pp. 1225-1237.
- [89] Casavola, C., Cazzato, A., Moramarco, V. and Pappalettere C. (2015), "Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory". *Materials and Design*, Vol. 90, pp. 453-458.
- [90] Hernández-Rivera, J.L., Medellín-Castillo, H.I. and de Lange, D.F. (2016), "Numerical and theoretical modeling of the elasto-plastic response of aluminum-graphite composites during straining". *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 650, pp. 323-334.
- [91] Wang, Y. and Huang, Z. (2018), "Analytical micromechanics models for elastoplastic behavior of long fibrous composites: a critical review and comparative study". *Materials*, Vol. 11, No. 10, p. 1919.
- [92] Coogan, T.J. and Kazmer, D.O. (2019), "Modeling of interlayer contact and contact pressure during fused filament fabrication". *Journal of Rheology*, Vol 63, No. 4, pp. 655-672.

- 
- [93] Cerda-Avila, S.N., Medellín-Castillo, H.I. and Lim, T. (2021), "Analytical models to estimate the structural behaviour of fused deposition modelling components". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 27, No. 4, pp. 658-670.
- [94] Cerda-Avila, S.N. and Medellín-Castillo, H.I. (2025), "A novel model to estimate the structural properties of PLA-FFF components along any non-orthogonal direction". *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 31, No. 1, pp. 100-110.
- [95] Flashforge, (2025), Datasheet "PLA". Flashforge, disponible en: [https://after-support.flashforge.jp/uploads/datasheet/tds/PLA\\_TDS\\_EN.pdf](https://after-support.flashforge.jp/uploads/datasheet/tds/PLA_TDS_EN.pdf).
- [96] ColorPlus, (2023), Datasheet "ABS", disponible en: <https://www.colorplus3d.com/wp-content/uploads/2020/11/ABS.pdf>
- [97] ColorPlus (2023), Datasheet "PLA", disponible en: <https://www.colorplus3d.com/wp-content/uploads/2020/11/PLA.pdf>
- [98] ColorPlus, (2023), Datasheet "PETG", disponible en: <https://www.colorplus3d.com/wp-content/uploads/2020/11/PETG.pdf>
- [99] ColorPlus, (2023), Datasheet "TPU", disponible en: <https://www.colorplus3d.com/wp-content/uploads/2020/11/TPU.pdf>
- [100] ColorPlus, (2023), Datasheet "ALUMINIO", disponible en: <https://www.colorplus3d.com/wp-content/uploads/2020/11/ALUMINIO.pdf>
- [101] ColorPlus, (2023), Datasheet "MADERA", disponible en: <https://www.colorplus3d.com/wp-content/uploads/2020/11/MADERA.pdf>
- [102] ColorPlus, (2023), Datasheet "LATÓN", disponible en: <https://www.colorplus3d.com/wp-content/uploads/2020/11/LATON.pdf>
- [103] ColorPlus, (2023), Datasheet "COBRE", disponible en: <https://www.colorplus3d.com/wp-content/uploads/2020/11/COBRE.pdf>
- [104] ASTM International (2014), "D638 standard test method for tensile properties of plastics". ASTM International, pp. 1-17.

# Apéndice A. Fichas técnicas de los materiales

## Ficha técnica del material PLA CC



# PLA

El **ácido poliláctico (PLA)** es un polímero biodegradable que puede producirse a partir del **ácido láctico**, que puede fermentarse a partir de cultivos de maíz.

Color Plus realiza su propio **FILAMENTO PLA Premium**, filamento que tiene varias características especiales que lo hacen mejor a cualquier otro filamento en México.



Contamos con 15 colores disponibles en medidas 1.75 y 3 mm.

## DATOS TÉCNICOS

PROPIEDADES MECÁNICAS			
TENSIÓN DE ROTURA	ALARGAMIENTO POR ROTURA	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD
60	29	87	3642
MPa	%	MPa	MPa
RESISTENCIA DE IMPACTO	DENSIDAD	TEMPERATURA DE DISTORSIÓN	
7	1.24	50	
kJ/m <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	°C, 0.45 Mpa	

PROPIEDADES TÉRMICAS		
TEMPERATURA DE EXTRUSOR	TEMPERATURA DE PLATAFORMA	CÁMARA / ENCLOSURE
190-210	50-60	ABIERTA
°C	°C	
SUPERFICIE DE IMPRESIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN	
CINTA AZUL, BUILDTAK, CRISTAL + PEGAMENTO BASE PVA	20-80	
	mm/s	

\*Las temperaturas pueden variar dependiendo de cada impresora 3D.

\*Precios sujetos a cambio sin previo aviso\*

✉ [ventasMexico@colorplus3d.com](mailto:ventasMexico@colorplus3d.com)

🌐 [www.colorplus3d.com](http://www.colorplus3d.com)

☎ 800 00 33123

## Ficha técnica del material PLA FF



### Testing Specimen Printing Conditions:

Test Equipment	Guider IIs (Flashforge)
Nozzle Diameter	0.4mm
Nozzle Temperature	210 °C
Printing Speed	60mm/s
Wall Thickness	1.2mm
Infill	100%
Standard Testing Specimen	Specific dimensions are shown in Attachment 1

**Note:** The above test parameter data are obtained from actual printing, and the printed model has not been annealed.

### Recommended Printing Conditions:

Parameter	
Nozzle Temperature	190~220°C (210°C recommended)
Build Platform Temperature	Room temperature~60°C (40°C recommended)
Build Surface Material	Tempered glass, BuildTak, Carbon fiber board
Nozzle Diameter	φ0.4/0.6mm (φ0.4mm recommended)
Cooling Fan	50~100%
Layer Thickness	0.12~0.3mm
Printing Speed	60~90mm/s (60mm/s recommended)
Travel Speed	60~120mm/s
Ambient Temperature for Printing	Room temperature~40°C
Retraction Length	1~2mm
Retraction Speed	30~50mm/s
Recommended Support Material	Self-supporting, PVA, BVOH

[www.flashforge.com](http://www.flashforge.com)

## Ficha técnica del material ABS



# ABS

El **acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)** es un polímero termoplástico bastante común en la industria, conocido principalmente por su resistencia a las bajas temperaturas y su peso liviano.

Color Plus realiza su propio **FILAMENTO ABS PREMIUM**. Esto crea una mezcla que rebasa por mucho los filamentos que se conocían, con mayor durabilidad, resistencia a impactos y rigidez.



Contamos con 14 colores disponibles en medidas 1.75 y 3 mm.

## DATOS TÉCNICOS

PROPIEDADES MECÁNICAS			
TENSIÓN DE ROTURA	ALARGAMIENTO POR ROTURA	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD
40	30	68	2443
MPa	%	MPa	MPa
RESISTENCIA DE IMPACTO	DENSIDAD	TEMPERATURA DE DISTORSIÓN	
45	1.06	80	
kJ/m <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	°C, 0.45 Mpa	

PROPIEDADES TÉRMICAS		
TEMPERATURA DE EXTRUSOR	TEMPERATURA DE PLATAFORMA	CÁMARA / ENCLOSURE
230-260	80-100	CERRADA-40
°C	°C	°C
SUPERFICIE DE IMPRESIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN	
BUILDTAK, CINTA KAPTON, CRISTAL • DIMAFIX/ MAGIGOO	20-60	
	mm/s	

\*Las temperaturas pueden variar dependiendo de cada impresora 3D.

\*Precios sujetos a cambio sin previo aviso\*

✉ [ventas\\_mexico@colorplus3d.com](mailto:ventas_mexico@colorplus3d.com)

🌐 [www.colorplus3d.com](http://www.colorplus3d.com)

☎ 800 00 33123

## Ficha técnica del material PETG



# PETG

El **tereftalato de polietileno (PETG)** es el copolímero más famoso y utilizado en el mundo de la impresión 3D.

Es un material rígido y transparente. Su dureza y sus resistencia al impacto no pierden calidad con el termomoldeado.

Color Plus realiza su propio **FILAMENTO PETG**, siendo una excelente alternativa para materiales como ABS y PLA.



Disponible en medidas 1,75 y 3 mm.

## DATOS TÉCNICOS

PROPIEDADES MECÁNICAS				PROPIEDADES TÉRMICAS		
TENSIÓN DE ROTURA	ALARGAMIENTO POR ROTURA	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD	TEMPERATURA DE EXTRUSOR	TEMPERATURA DE PLATAFORMA	CÁMARA / ENCLOSURE
49	228	68	2027	230-250	60-75	ABIERTA
MPa	%	MPa	MPa	°C	°C	°C
RESISTENCIA DE IMPACTO	DENSIDAD	TEMPERATURA DE DISTORSIÓN		SUPERFICIE DE IMPRESIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN	
8	1.23	65		BUILDTAK CINTA AZUL CRISTAL + PEGAMENTO BASE PVA/DIMAFIX/ MAGIGOO	20-50	
kJ/m <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	°C, 0.45 Mpa			mm/s	

\*Las temperaturas pueden variar dependiendo de cada impresora 3D.

\*Precios sujetos a cambio sin previo aviso\*

✉ [ventasMexico@colorplus3d.com](mailto:ventasMexico@colorplus3d.com)

🌐 [www.colorplus3d.com](http://www.colorplus3d.com)

☎ 800 00 33123

## Ficha técnica del material TPU



# TPU

El **filamento flexible TPU** de las siglas en inglés "poliuretanos termoplásticos" es un elastómero sumamente versátil con propiedades especiales que ofrece tanto **rendimiento como flexibilidad** de procesamiento.

También conocido como ninjaflex mantiene sus propiedades y diámetro durante toda la impresión, es decir, no tendrá variantes en las capas o en los exteriores. Alta elasticidad y resistencia a la abrasión.



Disponible en medidas 1.75 y 3 mm.

## DATOS TÉCNICOS

PROPIEDADES MECÁNICAS			
TENSIÓN DE ROTURA	ALARGAMIENTO POR ROTURA	DENSIDAD	DUREZA SHORE
52	500	1.12	85A
MPa	%	g/cm <sup>3</sup>	

PROPIEDADES TÉRMICAS		
TEMPERATURA DE EXTRUSOR	TEMPERATURA DE PLATAFORMA	CÁMARA / ENCLOSURE
225-240	50-60	ABIERTA
°C	°C	
SUPERFICIE DE IMPRESIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN	
BUILDTAK, CINTA AZUL, CRISTAL + PEGAMENTO BASE PVA	15-30	
	mm/s	

\*Las temperaturas pueden variar dependiendo de cada impresora 3D.  
\*Precios sujetos a cambio sin previo aviso\*

✉ [ventas\\_mexico@colorplus3d.com](mailto:ventas_mexico@colorplus3d.com)

🌐 [www.colorplus3d.com](http://www.colorplus3d.com)

☎ 800 00 33123

## Ficha técnica del material Al



# ALUMINIO

Es un filamento innovador compuesto por un **70% de PLA** y el **30% de polvo de aluminio** permitiendo que la unión entre capas sea más firme dejando como resultado una resolución más alta.

El metal posee una gran cantidad de propiedades destacables: alta resistencia a la corrosión, baja densidad, buen conductor de electricidad y de calor y fácil de mecanizar.

\*Requiere boquilla resistente a la abrasión



Disponible en medidas 1.75 y 3 mm.

## DATOS TÉCNICOS

PROPIEDADES MECÁNICAS			
TENSIÓN DE ROTURA	ALARGAMIENTO POR ROTURA	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD
45	5	74	4885
MPa	%	MPa	MPa
RESISTENCIA DE IMPACTO	DENSIDAD	TEMPERATURA DE DISTORSIÓN	
4	1.48	52	
kJ/m <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	°C, 0.45 Mpa	

PROPIEDADES TÉRMICAS		
TEMPERATURA DE EXTRUSOR	TEMPERATURA DE PLATAFORMA	CÁMARA / ENCLOSURE
210-230	40-60	ABIERTA
°C	°C	
SUPERFICIE DE IMPRESIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN	
BUILDTAK, CINTA AZUL, CRISTAL + PEGAMENTO BASE PVA	15-35	
	mm/s	

\*Las temperaturas pueden variar dependiendo de cada impresora 3D.

\*Precios sujetos a cambio sin previo aviso\*

✉ [ventas\\_mexico@colorplus3d.com](mailto:ventas_mexico@colorplus3d.com)

🌐 [www.colorplus3d.com](http://www.colorplus3d.com)

☎ 800 00 33123

## Ficha técnica del material Wood



# MADERA

El filamento de madera es fabricado a partir de **fibras de madera y un polímero de unión**, que recrea un acabado de la superficie y textura similar a la de la madera

Su composición de **30% de madera reciclada y un 70% de PLA**, permitiendo que sea extruido como cualquier otro filamento. Éste filamento especial es un filamento con acabado a detalles de este material.



Disponible en medidas 1.75 y 3 mm.

## DATOS TÉCNICOS

PROPIEDADES MECÁNICAS			
TENSIÓN DE ROTURA	ALARGAMIENTO POR ROTURA	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD
N/A	N/A	N/A	N/A
RESISTENCIA DE IMPACTO	DENSIDAD	TEMPERATURA DE DISTORSIÓN	
N/A	0.70 g/cm <sup>3</sup>	45 °C, 0.45 Mpa	

PROPIEDADES TÉRMICAS		
TEMPERATURA DE EXTRUSOR	TEMPERATURA DE PLATAFORMA	CÁMARA / ENCLOSURE
215-230 °C	40-60 °C	ABIERTA
SUPERFICIE DE IMPRESIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN	
BUILDTAK CINTA AZUL CRISTAL + PEGAMENTO BASE PVA	15-40 mm/s	

\*Las temperaturas pueden variar dependiendo de cada impresora 3D.  
\*Precios sujetos a cambio sin previo aviso\*

✉ [ventasMexico@colorplus3d.com](mailto:ventasMexico@colorplus3d.com)

🌐 [www.colorplus3d.com](http://www.colorplus3d.com)

☎ 800 00 33123

## Ficha técnica del material Brass



# LATÓN

Es un filamento con base **70% de PLA** y **30% partículas de latón** lo cual le da una propiedad totalmente diferentes a las de cualquier filamento conocido.

Debido a su gran conductividad metálica le permite tener un **mejor enlace entre capas**, dejando así una mayor resolución independiente de las alturas de capas en la impresión de objetos.

\*Requiere boquilla resistente a la abrasión



Disponible en medidas 1.75.

## DATOS TÉCNICOS

PROPIEDADES MECÁNICAS			
TENSIÓN DE ROTURA	ALARGAMIENTO POR ROTURA	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD
66	16	106	4442
MPa	%	MPa	MPa
RESISTENCIA DE IMPACTO	DENSIDAD	TEMPERATURA DE DISTORSIÓN	
4	1.25	50	
kJ/m <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	°C, 0.45 Mpa	

PROPIEDADES TÉRMICAS		
TEMPERATURA DE EXTRUSOR	TEMPERATURA DE PLATAFORMA	CÁMARA / ENCLOSURE
205-220	40-60	ABIERTA
°C	°C	
SUPERFICIE DE IMPRESIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN	
BUILDTAK, CINTA AZUL, CRISTAL + PEGAMENTO BASE PVA	15-35	
	mm/s	

\*Las temperaturas pueden variar dependiendo de cada impresora 3D.

\*Precios sujetos a cambio sin previo aviso\*

✉ [ventas\\_mexico@colorplus3d.com](mailto:ventas_mexico@colorplus3d.com)

🌐 [www.colorplus3d.com](http://www.colorplus3d.com)

☎ 800 00 33123

## Ficha técnica del material Copper



# COBRE

El cobre es un filamento con base **70% de PLA y 30% partículas de cobre**, lo cual les da unas propiedades totalmente diferentes a las de cualquier filamento conocido.

Debido a su gran conductividad metálica le permite tener un **mejor enlace entre capas**, dejando así una mayor resolución independiente de las alturas de capas en la impresión de objetos.

\*Requiere boquilla resistente a la abrasión



Disponible en medidas 1,75 y 3 mm.

## DATOS TÉCNICOS

PROPIEDADES MECÁNICAS			
TENSIÓN DE ROTURA	ALARGAMIENTO POR ROTURA	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN	MÓDULO DE ELASTICIDAD
40	4	64	4954
MPa	%	MPa	MPa
RESISTENCIA DE IMPACTO	DENSIDAD	TEMPERATURA DE DISTORSIÓN	
4	2.46	52	
kJ/m <sup>2</sup>	g/cm <sup>3</sup>	°C, 0.45 Mpa	

PROPIEDADES TÉRMICAS		
TEMPERATURA DE EXTRUSOR	TEMPERATURA DE PLATAFORMA	CÁMARA / ENCLOSURE
210-230	40-60	ABIERTA
°C	°C	
SUPERFICIE DE IMPRESIÓN	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN	
BUILDTAK, CINTA AZUL CRISTAL + PEGAMENTO BASE PVA	15-35	
	mm/s	

\*Las temperaturas pueden variar dependiendo de cada impresora 3D.

\*Precios sujetos a cambio sin previo aviso\*

✉ [ventasMexico@colorplus3d.com](mailto:ventasMexico@colorplus3d.com)

🌐 [www.colorplus3d.com](http://www.colorplus3d.com)

☎ 800 00 33123

# Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes.

```
% Optimización de Coeficientes
% para todos los modelos matemáticos
% Para Piezas FDM
%
% Nombre: Jesús Alberto Díaz Zaragoza
% Fecha: 09 de Octubre del 2024
%
% Objetivo: Minimizar el error entre el valor experimental y analítico

clc
clear all
close all

% Definir variables del problema
P=[0.369,0.4534,0.6919,0.9164];
ME_exp=[0.2329766,0.2723746,0.3095652,0.5255518];
UTS_exp=[0.2126837,0.2320186,0.2704950,0.6380510];

% Caso Gibson Ashby

% Definir posibles valores de los coeficientes para el ME obtenidos experimentalmente
GA_n=[0,0,0,0,0];
GA_C=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
s=1;
for q = 1:1:4
    for t = q+1:1:4
        GA_n(s)=(log(P(q)/P(t)))/(log(ME_exp(q)/ME_exp(t)));
        s=s+1;
    end
end
end
s=1;
for q = 1:1:4
```

## Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes

---

```

for t = 1:1:6
    GA_C(s)=ME_exp(q)/(P(q)^GA_n(t));
    s=s+1;
end
end
% Definir posibles valores de los coeficientes para el UTS obtenidos experimentalmente%
GA_n2=[0,0,0,0,0];
GA_C2=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
s=1;
for q = 1:1:4
    for t = q+1:1:4
        GA_n2(s)=(log(P(q)/P(t)))/(log(UTS_exp(q)/UTS_exp(t)));
        s=s+1;
    end
end
s=1;
for q = 1:1:4
    for t = 1:1:6
        GA_C2(s)=UTS_exp(q)/(P(q)^GA_n2(t));
        s=s+1;
    end
end

% Definir vectores para resultados %%%
GA_ME=[0,0,0,0];
GA_UTS=[0,0,0,0];
GA_R=[0,0,100,100,100,100];
GA_RUTS=[0,0,100,100,100,100];

%Ciclo
principal%%%%%%%%
%%%%%%%%
for i = 1:1:6
    for j = 1:1:24
        for l = 1:1:4
            GA_ME(l)=100*(abs((GA_C(j)*P(l)^GA_n(i))-ME_exp(l))/ME_exp(l));
            GA_UTS(l)=100*(abs((GA_C2(j)*P(l)^GA_n2(i))-UTS_exp(l))/UTS_exp(l));
        end
        if GA_ME(1)+GA_ME(2)+GA_ME(3)+GA_ME(4)<=GA_R(3)+GA_R(4)+GA_R(5)+GA_R(6)
            GA_R(1)=GA_n(i);
            GA_R(2)=GA_C(j);
            GA_R(3)=GA_ME(1);
            GA_R(4)=GA_ME(2);
            GA_R(5)=GA_ME(3);
            GA_R(6)=GA_ME(4);
        end
    end
end
else

```



## Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes

---

```

for t = 1:1:6
    Ex_C(s)=ME_exp(q)/exp(P(q)*Ex_n(t));
    s=s+1;
end
end

% Definir posibles valores de los coeficientes para el UTS obtenidos experimentalmente%
Ex_n2=[0,0,0,0,0,0];
Ex_C2=[0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0];
s=1;
for q = 1:1:4
    for t = q+1:1:4
        Ex_n2(s)=(log(UTS_exp(q)/UTS_exp(t)))/(P(q)-P(t));
        s=s+1;
    end
end
s=1;
for q = 1:1:4
    for t = 1:1:6
        Ex_C2(s)=UTS_exp(q)/exp(P(q)*Ex_n2(t));
        s=s+1;
    end
end

% Definir vectores para resultados %%%%%%%%%%
Ex_ME=[0,0,0,0];
Ex_UTS=[0,0,0,0];
Ex_R=[0,0,100,100,100,100];
Ex_RUTS=[0,0,100,100,100,100];

%Ciclo
principal%%%%%%%%%
%%%%%%%%%

for i = 1:1:6
    for j = 1:1:24
        for l = 1:1:4
            Ex_ME(l)=100*(abs((Ex_C(j)*exp(P(l)*Ex_n(i)))-ME_exp(l))/ME_exp(l));
            Ex_UTS(l)=100*(abs((Ex_C2(j)*exp(P(l)*Ex_n2(i)))-UTS_exp(l))/UTS_exp(l));
        end
        if Ex_ME(1)+Ex_ME(2)+Ex_ME(3)+Ex_ME(4)<=Ex_R(3)+Ex_R(4)+Ex_R(5)+Ex_R(6)
            Ex_R(1)=Ex_n(i);
            Ex_R(2)=Ex_C(j);
            Ex_R(3)=Ex_ME(1);
            Ex_R(4)=Ex_ME(2);
            Ex_R(5)=Ex_ME(3);
            Ex_R(6)=Ex_ME(4);
        end
    end
end

```



## Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes

```
end

% Definir vectores para resultados %%%%%%%%%%
SD_ME=[0,0,0,0];
SD_UTS=[0,0,0,0];
SD_R=[0,100,100,100,100];
SD_RUTS=[0,100,100,100,100];

%Ciclo
principal%%%%%%%%%
%%%%%%%%%

for i = 1:1:4
    for l = 1:1:4
        SD_ME(l)=100*abs((exp(-SD_k(i)*(1-P(l))))-ME_exp(l))/ME_exp(l);
        SD_UTS(l)=100*abs((exp(-SD_k2(i)*(1-P(l))))-UTS_exp(l))/UTS_exp(l);
    end
    if SD_ME(1)+SD_ME(2)+SD_ME(3)+SD_ME(4)<=SD_R(2)+SD_R(3)+SD_R(4)+SD_R(5)
        SD_R(1)=SD_k(i);
        SD_R(2)=SD_ME(1);
        SD_R(3)=SD_ME(2);
        SD_R(4)=SD_ME(3);
        SD_R(5)=SD_ME(4);
    else
        SD_R(1)=SD_R(1);
        SD_R(2)=SD_R(2);
        SD_R(3)=SD_R(3);
        SD_R(4)=SD_R(4);
        SD_R(5)=SD_R(5);
    end
    if SD_UTS(1)+SD_UTS(2)+SD_UTS(3)+SD_UTS(4)<=SD_RUTS(2)+SD_RUTS(3)+SD_RUTS(4)+SD_RUTS(5)
        SD_RUTS(1)=SD_k2(i);
        SD_RUTS(2)=SD_UTS(1);
        SD_RUTS(3)=SD_UTS(2);
        SD_RUTS(4)=SD_UTS(3);
        SD_RUTS(5)=SD_UTS(4);
    else
        SD_RUTS(1)=SD_RUTS(1);
        SD_RUTS(2)=SD_RUTS(2);
        SD_RUTS(3)=SD_RUTS(3);
        SD_RUTS(4)=SD_RUTS(4);
        SD_RUTS(5)=SD_RUTS(5);
    end
end
end
```



## Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes

---

```

else
    H_R(1)=H_R(1);
    H_R(2)=H_R(2);
    H_R(3)=H_R(3);
    H_R(4)=H_R(4);
    H_R(5)=H_R(5);

end
if H_UTS(1)+H_UTS(2)+H_UTS(3)+H_UTS(4)<=H_RUTS(2)+H_RUTS(3)+H_RUTS(4)+H_RUTS(5)
    H_RUTS(1)=H_A2(i);
    H_RUTS(2)=H_UTS(1);
    H_RUTS(3)=H_UTS(2);
    H_RUTS(4)=H_UTS(3);
    H_RUTS(5)=H_UTS(4);
else
    H_RUTS(1)=H_RUTS(1);
    H_RUTS(2)=H_RUTS(2);
    H_RUTS(3)=H_RUTS(3);
    H_RUTS(4)=H_RUTS(4);
    H_RUTS(5)=H_RUTS(5);
end
end
end

%%%%%%%%%% Fin del Hasselman
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% Caso Rice
%%%%%%%%%%

% Definir posibles valores de los coeficientes para el ME obtenidos experimentalmente%
R_r=[0,0,0,0];
for q = 1:1:4
    R_r(q)=-(log(1-ME_exp(q))/P(q));

end

% Definir posibles valores de los coeficientes para el UTS obtenidos experimentalmente%
R_r2=[0,0,0,0];
for q = 1:1:4
    R_r2(q)=-(log(1-UTS_exp(q))/P(q));

end
end

```

## Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes

---

```

% Definir vectores para resultados %%%%%%%%%%%
R_ME=[0,0,0,0];
R_UTS=[0,0,0,0];
R_R=[0,100,100,100,100];
R_RUTS=[0,100,100,100,100];

%Ciclo
principal%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

for i = 1:1:4
    for l = 1:1:4
        R_ME(l)=100*abs(((1-exp(-R_r(i)*P(l)))-ME_exp(l))/ME_exp(l));
        R_UTS(l)=100*abs(((1-exp(-R_r2(i)*P(l)))-UTS_exp(l))/UTS_exp(l));
    end
    if R_ME(1)+R_ME(2)+R_ME(3)+R_ME(4)<=R_R(2)+R_R(3)+R_R(4)+R_R(5)
        R_R(1)=R_r(i);
        R_R(2)=R_ME(1);
        R_R(3)=R_ME(2);
        R_R(4)=R_ME(3);
        R_R(5)=R_ME(4);

    else
        R_R(1)=R_R(1);
        R_R(2)=R_R(2);
        R_R(3)=R_R(3);
        R_R(4)=R_R(4);
        R_R(5)=R_R(5);

    end
    if R_UTS(1)+R_UTS(2)+R_UTS(3)+R_UTS(4)<=R_RUTS(2)+R_RUTS(3)+R_RUTS(4)+R_RUTS(5)
        R_RUTS(1)=R_r2(i);
        R_RUTS(2)=R_UTS(1);
        R_RUTS(3)=R_UTS(2);
        R_RUTS(4)=R_UTS(3);
        R_RUTS(5)=R_UTS(4);
    else
        R_RUTS(1)=R_RUTS(1);
        R_RUTS(2)=R_RUTS(2);
        R_RUTS(3)=R_RUTS(3);
        R_RUTS(4)=R_RUTS(4);
        R_RUTS(5)=R_RUTS(5);
    end
end
end
%%%%%%%%%% Fin Rice %%%%%%%%%%%

```



## Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes

```
VD_RUTS=[0,0,100,100,100,100];

%Ciclo
principal%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
for i = 1:1:6
for j = 1:1:24
for l = 1:1:4
VD_ME(l)=100*(abs((VD_C(j)*exp(-VD_n(i)*(1-P(l))))-ME_exp(l))/ME_exp(l));
VD_UTS(l)=100*(abs((VD_C2(j)*exp(-VD_n2(i)*(1-P(l))))-UTS_exp(l))/UTS_exp(l));
end
if VD_ME(1)+VD_ME(2)+VD_ME(3)+VD_ME(4)<=VD_R(3)+VD_R(4)+VD_R(5)+VD_R(6)
VD_R(1)=VD_n(i);
VD_R(2)=VD_C(j);
VD_R(3)=VD_ME(1);
VD_R(4)=VD_ME(2);
VD_R(5)=VD_ME(3);
VD_R(6)=VD_ME(4);

else
VD_R(1)=VD_R(1);
VD_R(2)=VD_R(2);
VD_R(3)=VD_R(3);
VD_R(4)=VD_R(4);
VD_R(5)=VD_R(5);
VD_R(6)=VD_R(6);

end
if VD_UTS(1)+VD_UTS(2)+VD_UTS(3)+VD_UTS(4)<=VD_RUTS(3)+VD_RUTS(4)+VD_RUTS(5)+VD_RUTS(6)
VD_RUTS(1)=VD_n2(i);
VD_RUTS(2)=VD_C2(j);
VD_RUTS(3)=VD_UTS(1);
VD_RUTS(4)=VD_UTS(2);
VD_RUTS(5)=VD_UTS(3);
VD_RUTS(6)=VD_UTS(4);

else
VD_RUTS(1)=VD_RUTS(1);
VD_RUTS(2)=VD_RUTS(2);
VD_RUTS(3)=VD_RUTS(3);
VD_RUTS(4)=VD_RUTS(4);
VD_RUTS(5)=VD_RUTS(5);
VD_RUTS(6)=VD_RUTS(6);

end
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Fin del Caso Variante de Duckworth
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```



## Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes

```

E_R(3)=E_R(3);
E_R(4)=E_R(4);
E_R(5)=E_R(5);

end
if E_UTS(1)+E_UTS(2)+E_UTS(3)+E_UTS(4)<=E_RUTS(2)+E_RUTS(3)+E_RUTS(4)+E_RUTS(5)
    E_RUTS(1)=E_A2(i);
    E_RUTS(2)=E_UTS(1);
    E_RUTS(3)=E_UTS(2);
    E_RUTS(4)=E_UTS(3);
    E_RUTS(5)=E_UTS(4);
else
    E_RUTS(1)=E_RUTS(1);
    E_RUTS(2)=E_RUTS(2);
    E_RUTS(3)=E_RUTS(3);
    E_RUTS(4)=E_RUTS(4);
    E_RUTS(5)=E_RUTS(5);
end
end
end

%%%%%%%%%% Fin del Eficiencia
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%% Tabla de Resultados
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%% Resultados Gibson Ashby
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%

disp('+++++')
disp('=====')
disp('      Gibson Ashby Model ')
disp('=====')
disp('      Normalized Elastic Modulus')
disp('')
disp('      n optimized: ', num2str([GA_R(1)]))
disp('      C optimized: ', num2str([GA_R(2)]))
disp('=====')
disp(' Real Infill  E/E0 exp  E/E0 sim  Error')
disp('=====')
for i=1:1:4

```

## Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes

---

```

fprintf(' %d %d %d %.2f\n', P(i), ME_exp(i), GA_R(2)*P(i)^GA_R(1), GA_R(i+2))
end
disp('')
disp('=====')
disp(' Normalized Ultimate Tensile Strength')
disp('')
disp(' n optimized: ', num2str([GA_RUTS(1)]))
disp(' C optimized: ', num2str([GA_RUTS(2)]))
disp('=====')
disp(' Real Infill UTS/UTS0 exp UTS/UTS0 sim Error')
disp('=====')
for i=1:1:4
fprintf(' %d %d %d %.2f\n', P(i), UTS_exp(i), GA_RUTS(2)*P(i)^GA_RUTS(1), GA_RUTS(i+2))
end
disp('=====')
disp('+++++')
%%%%%%%%%% Fin Gibson Ashby
%%%%%%%%%%
%%
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
disp('')
disp('')
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% Exponencial
%%%%%%%%%%
disp('*****')
disp('=====')
disp(' Exponencial Model ')
disp('=====')
disp(' Normalized Elastic Modulus')
disp('')

disp(' n optimized: ', num2str([Ex_R(1)]))
disp(' C optimized: ', num2str([Ex_R(2)]))
disp('=====')
disp(' Real Infill E/E0 exp E/E0 sim Error')
disp('=====')
for i=1:1:4
fprintf(' %d %d %d %.2f\n', P(i), ME_exp(i), Ex_R(2)*exp(P(i)*Ex_R(1)), Ex_R(i+2))
end
disp('')
disp('=====')
disp(' Normalized Ultimate Tensile Strength')
disp('')

```

## Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes

```

disp(['      n optimized: ', num2str(Ex_RUTS(1))])
disp(['      C optimized: ', num2str(Ex_RUTS(2))])
disp('=====')
disp([' Real Infill   UTS/UTS0 exp   UTS/UTS0 sim   Error'])
disp('=====')
for i=1:1:4
    fprintf('   %d      %d      %d      %.2fn', P(i), UTS_exp(i), Ex_RUTS(2)*exp(P(i)*Ex_RUTS(1)), Ex_RUTS(i+2))
end
disp('=====')
disp('*****')
%%% Fin Exponencial
%%%
%%%
%%%
disp('')
disp('')
%%%
%%%
%%% Resultados Spriggs and Duckworth
%%%
%%%
disp('$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$')
disp('=====')
disp(['      Spriggs and Duckworth Model '])
disp('=====')
disp(['      Normalized Elastic Modulus'])
disp('')
disp(['      K optimized: ', num2str(SD_R(1))])
disp('=====')
disp([' Real Infill   E/E0 exp   E/E0 sim   Error'])
disp('=====')
for i=1:1:4
    fprintf('   %d      %d      %d      %.2fn', P(i), ME_exp(i), exp(-SD_R(1)*(1-P(i))), SD_R(i+1))
end
disp('')
disp('=====')
disp(['      Normalized Ultimate Tensile Strength'])
disp('')
disp(['      K optimized: ', num2str(SD_RUTS(1))])
disp('=====')
disp([' Real Infill   UTS/UTS0 exp   UTS/UTS0 sim   Error'])
disp('=====')
for i=1:1:4
    fprintf('   %d      %d      %d      %.2fn', P(i), UTS_exp(i), exp(-SD_RUTS(1)*(1-P(i))), SD_RUTS(i+1))
end
disp('=====')

```

## Apéndice B. Código de obtención y optimización de coeficientes

```
disp('$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$$')
%%%%%%%%%% Fin Spriggs and Duckworth
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
disp('')
disp('')
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%% Resultados Hasselman
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
disp('%%%%%%%%%%')
disp('=====')
disp('      Hasselman Model ')
disp('=====')
disp('      Normalized Elastic Modulus')
disp('')
disp('      A optimized: ', num2str([H_R(1)]))
disp('=====')
disp(' Real Infill   E/E0 exp   E/E0 sim   Error')
disp('=====')
for i=1:1:4
    fprintf(' %d   %d   %d   %.2f\n', P(i), ME_exp(i), 1+((H_R(1)*(1-P(i)))/(1-H_R(1)*(1-P(i))-(1-P(i)))), H_R(i+1))
end
disp('')
disp('=====')
disp('      Normalized Ultimate Tensile Strength')
disp('')
disp('      A optimized: ', num2str([H_RUTS(1)]))
disp('=====')
disp(' Real Infill   UTS/UTS0 exp   UTS/UTS0 sim   Error')
disp('=====')
for i=1:1:4
    fprintf(' %d   %d   %d   %.2f\n', P(i), UTS_exp(i), 1+((H_RUTS(1)*(1-P(i)))/(1-H_RUTS(1)*(1-P(i))-(1-P(i)))),
            H_RUTS(i+1))
end
disp('')
disp('=====')
disp('%%%%%%%%%%')
%%%%%%%%%% Fin Hasselman
%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%
disp('')
disp('')
```





