

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PUCP

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE FABRICACIÓN
MEDIANTE EL PROCESO DE MODELADO POR DEPOSICIÓN
FUNDIDA CON POLIAMIDA Y POLIAMIDA REFORZADA
CON FIBRAS DE CARBONO SEGÚN LA METODOLOGÍA DE
TAGUCHI**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

Luis Felipe Cam Chiang

ASESOR:

Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán

Lima, Noviembre 2020

RESUMEN

La aplicación en la ingeniería del modelado por deposición fundida (*FDM: Fused Deposition Modeling* o *FFF: Fused Filament Fabrication*) está limitada a un uso a nivel de prototipos, en tanto que los productos fabricados presentan anisotropía y no cumplen con las solicitaciones mecánicas esperadas. Actualmente, debido al constante desarrollo de nuevos materiales compatibles con esta tecnología, se está considerando utilizar éstos en la fabricación de productos terminados, cuyas propiedades dependerán directamente de los parámetros de fabricación del proceso de FDM. En esta perspectiva, este trabajo pretende contribuir con el proyecto: “Optimización del uso de polímeros sintéticos en procesos de manufactura aditiva mediante modelos de simulación computacional y técnicas de caracterización de materiales. Caso de estudio: aplicaciones médicas prótesis de mano” que inició en el 2017. Específicamente, el objetivo del presente trabajo es determinar los parámetros de fabricación del proceso de modelado por deposición fundida con poliamida (PA) y poliamida reforzada con fibras de carbono (PA/CF), para establecer el grado de influencia de cada parámetro sobre las propiedades mecánicas, con el fin de aplicarlos en la fabricación de productos terminados. La investigación se desarrolló en tres etapas: 1) Se determinaron los parámetros de fabricación más importantes que influyen en el proceso FDM. 2) Con la ayuda de un arreglo “L₉” de la metodología de Taguchi, la cual permite estudiar la influencia e interacción de las variables con la menor cantidad de ensayos posibles, se estudió el efecto de los parámetros de impresión sobre las propiedades mecánicas de los materiales en probetas de tracción fabricadas según la norma ISO 527 y, al mismo tiempo, se determinaron los parámetros óptimos de fabricación que maximizan dichas propiedades. 3) Se ensayaron probetas fabricadas con los parámetros óptimos, con el propósito de verificar si sus propiedades son realmente máximas y finalmente, con los mismos parámetros óptimos, se estudió el efecto del porcentaje de relleno sobre las propiedades mecánicas. Como resultado, se determinó que las probetas de PA adquieren su mayor resistencia al imprimirlas con los siguientes parámetros: patrón de líneas; 0,1 mm de altura de capa; 30 mm/s de velocidad y 280°C de temperatura de impresión; alcanzando una resistencia de 38,3 MPa y un módulo de 1633 MPa. Para el caso de la PA/CF se mantiene los mismos valores de los parámetros de impresión de la PA excepto que debe usarse una velocidad de deposición de 40 mm/s para lograr valores óptimos de 82,8 MPa de resistencia y 4229 MPa de módulo elástico.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) que, a través del convenio PUCP-FONDECYT 163-2017 me dio la oportunidad de ser parte de un proyecto que permite contribuir a la sociedad. Este trabajo fue financiado por el CONCYTEC-FONDECYT en el marco de la convocatoria Proyecto Investigación Básica y Aplicada, 2017-02 [Contrato N° 163-2017-FONDECYT].

A mi asesor y amigo el Dr. Ing. Julio Acosta por permitirme ser parte de su grupo de investigación, así como también por el apoyo brindado para la presentación de este trabajo.

También agradezco al Dr. Ing. Quino Valverde, quien además de ser mi profesor, es un amigo quien depositó su confianza en mí y me permitió trabajar en un proyecto de investigación con una tecnología muy interesante y nueva para el país como lo es la impresión 3D.

A mis compañeros del Laboratorio 04, en especial a mi amigo Adán Arribasplata, quien me demostró su apoyo desde el primer día que llegué y con quien pasé la mayor parte de los días mientras se realizaba esta investigación.

A la sala VEO 3D-PUCP por las enseñanzas correspondientes a la tecnología de impresión 3D y finalmente al CITE Materiales PUCP por haberme apoyado con los ensayos mecánicos y de caracterización.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1: Fundamentos teóricos	4
1.1 Manufactura aditiva	5
1.2 Materiales para impresión 3D	9
1.3 Investigaciones previas	11
1.4 Aplicaciones de la impresión 3D	15
Capítulo 2: Metodología experimental	21
2.1 Materiales.....	22
2.1.1 Filamentos de poliamida (PA)	22
2.1.2 Filamentos de poliamida reforzada con fibras de carbono (PA/CF).....	24
2.2 Equipos.....	26
2.2.1 Impresora 3D	26
2.2.2 Balanza analítica	27
2.2.3 Secador de filamento.....	28
2.2.4 Horno de convección forzada	28
2.3 Diseño experimental.....	29
2.4 Procedimiento experimental.....	35
2.4.1 Caracterización de filamentos.....	35
2.4.2 Fabricación de probetas	41
2.4.3 Ensayo de tracción a probetas.....	46
2.5 Métodos para descartar valores atípicos	51
Capítulo 3: Resultados y discusión	53
3.1 Caracterización de filamentos	54
3.1.1 Índice de fluidez.....	54
3.1.2 Análisis térmico	55

3.1.3	Ensayo de espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier.....	59
3.1.4	Ensayo de tracción de filamentos	61
3.1.5	Determinación del tiempo de secado de los filamentos.....	62
3.2	Ensayo de tracción de probetas impresas.....	64
3.3	Influencia de los parámetros sobre las propiedades mecánicas	68
3.3.1	Efectos principales	69
3.3.2	Relación señal-ruido	73
3.3.3	Análisis de varianza (ANOVA).....	81
3.3.4	Verificación de las combinaciones óptimas determinadas	85
3.4	Estudio del porcentaje de relleno	88
	Conclusiones	92
	Bibliografía	95
	Anexos	99
	ANEXO A	100
	ANEXO B	101
	ANEXO C	102

Índice de figuras

Figura 1.1.- Tecnologías de impresión más usadas hasta enero del 2018 [Statista, 2018].	6
Figura 1.2.- Esquema de las partes de la impresora por FDM [Bournias, 2017].	8
Figura 1.3.- Características de distintos materiales en impresión 3D [3D MATTER, 2017].	10
Figura 1.4.- Orientaciones de impresión [Bhate, 2016].	13
Figura 1.5.- Relación peso, con módulo E y resist. tracción [Griffiths, 2016].	15
Figura 1.6.- Órgano que funciona como pulmón impreso en 3D.	16
Figura 1.7.- Prótesis de mandíbula fabricadas por FDM [Chen, 2016].	17
Figura 1.8.-Implante de cráneo [Springer].	17
Figura 1.9.- Modelo de columna vertebral con Espondilitis anquilosante [Springer].	18
Figura 1.10.- Prótesis de mano impresa mediante la tecnología de FDM.	19
Figura 1.11.- Modelo de prótesis de mano.	20
Figura 2.1.- Filamento de nylon(natural) de la marca 3DXTECH.	22
Figura 2.2.- Modelo de probeta impresa según norma ISO 527.	23
Figura 2.3.- Filamento de PA/CF (negro) de la marca 3DXTECH.	24
Figura 2.4.- Impresora Ultimaker 3D Extended.	27
Figura 2.5.- Balanza analítica de la marca METTLER TOLEDO.	28
Figura 2.6.- Secador de filamentos de la marca PrintDry™.	29
Figura 2.7.- Horno de convección forzada secando filamentos.	29
Figura 2.8.- Patrones de impresión, a) Triangular a 30° y b) Rejilla a 45°.	32
Figura 2.9.- Patrón de fabricación de líneas, a) 0°, b) 45°, c) 90° y d) 135°.	33
Figura 2.10.- Vista previa de la variación de porcentaje de relleno en las capas de impresión: a) 50%, b) 60%, c) 70%, d) 80%, e) 90% y f) 100%.	35
Figura 2.11.- Granzas de filamento de PA (izquierda) y PA/CF (derecha).	36

Figura 2.12.- Zwick/Roell Mflow Extrusion Plastometer.	37
Figura 2.13.- NETZSCH STA 449 F1 Júpiter®.	38
Figura 2.14.- Espectrómetro Bruker Tensor 27 FT-IR.	39
Figura 2.15.- Filamento de PA (superior) y PA/CF (inferior) para el ensayo de tracción.....	40
Figura 2.16.- Máquina de ensayos Zwick/Roell Z050.....	40
Figura 2.17.- Probetas de tracción 1BA según ISO 527.	42
Figura 2.18.- Vista previa de probeta: (a) sin recubrimiento y (b) con recubrimiento.	43
Figura 2.19.- Interfaz del software Cura para la configuración de parámetros.	44
Figura 2.20.- Procedimiento de obtención de resultados.	44
Figura 2.21.- Probeta de tracción fabricada con material húmedo.	45
Figura 2.22.- Probetas de tracción con filamento húmedo (superior) y con filamento seco (inferior).	45
Figura 2.23.- Alabeo de probeta debido a mala selección de temperatura en la plataforma. ..	46
Figura 2.24.- Celda de carga de 1kN.	48
Figura 2.25.- Sujeción de probeta de tracción en máquina Zwick/Roell 050.....	48
Figura 2.26.- Ensayo de tracción a probeta de prueba tipo 1BA según norma ISO 527-2.....	49
Figura 2.27.- Sujeción de probeta de tracción en máquina Zwick/Roell 050 con la celda de carga de 50 kN.	50
Figura 3.1.- MFI vs Temperatura para la poliamida y la poliamida/CF.	55
Figura 3.2.- Curva de DSC y TGA para la PA.	57
Figura 3.3.- Curva de DSC y TGA para la PA/CF.	57
Figura 3.4.- Espectro infrarrojo del filamento de PA.	60
Figura 3.5.- Espectro infrarrojo del filamento de PA/CF.	60
Figura 3.6.- Esfuerzo vs deformación unitaria para la PA y la PA/CF.....	62
Figura 3.7.- Pérdida de masa vs tiempo del filamento de PA.....	63

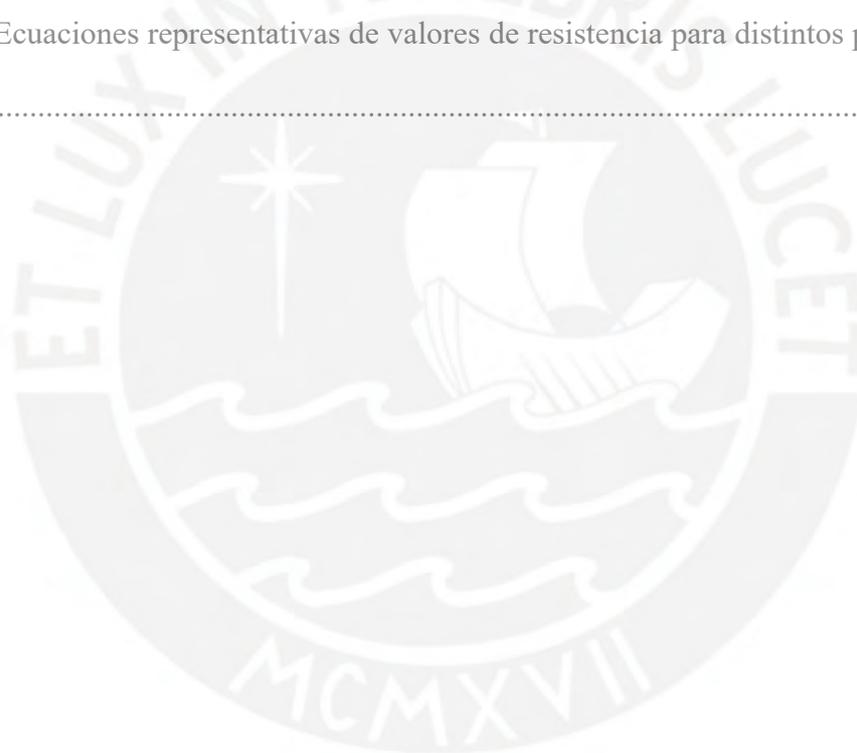
Figura 3.8.- Pérdida de masa vs tiempo del filamento de PA/CF.....	64
Figura 3.9.- Esfuerzo vs deformación para una probeta seca y otra con humedad en configuración #6.	67
Figura 3.10.- Efectos principales para medias de resistencia a la tracción obtenidas en probetas de PA.....	70
Figura 3.11.- Efectos principales para medias de resistencia a la tracción obtenidas en probetas de PA/CF.....	70
Figura 3.12.- Efectos principales para medias de módulo de elasticidad obtenidas en probetas de PA.....	73
Figura 3.13.- Efectos principales para medias de módulos de elasticidad obtenidas en probetas de PA/CF.....	73
Figura 3.14.- Gráfico de medias para la relación S/N de cada parámetro sobre la resistencia a la tracción para el material PA.....	75
Figura 3.15.- Gráfico de medias para la relación S/N de cada parámetro sobre la resistencia a la tracción para el material PA/CF.....	76
Figura 3.16.- Medias de la relación S/N de cada parámetro sobre el módulo elástico para el material PA.	80
Figura 3.17.- Medias de la relación S/N de cada parámetro sobre el módulo elástico para el material PA/CF.	80
Figura 3.18.- Probetas de tracción con distintos porcentajes de relleno. a) 50%, b) 60%, c)70%, d)80%, e)90% y f)100%.	88
Figura 3.19.- Comparación de resistencia específica por unidad de masa para PA y PA/CF.	91

Índice de tablas

Tabla 1.1.- Clasificación de la tecnología de manufactura aditiva [Gao, 2015].	5
Tabla 1.2.- Pacientes atendidos por diferentes discapacidades locomotoras (2004-2014) (INEI, 2015).	18
Tabla 2.1.- Parámetros de impresión recomendados para iOn nylon.	22
Tabla 2.2.- Parámetros de impresión utilizado por 3DXTECH para material iOn nylon.	23
Tabla 2.3.- Propiedades obtenidas de probetas fabricadas con iOn nylon.	24
Tabla 2.4.- Parámetros de impresión recomendados del PA/CF.	25
Tabla 2.5.- Parámetros de impresión utilizado por 3DXTECH para ensayos realizados a probetas fabricadas con PA/CF.	25
Tabla 2.6.- Propiedades obtenidas de probetas fabricadas con PA/CF.	26
Tabla 2.7.- Arreglo ortogonal L_9 de la metodología de Taguchi.	30
Tabla 2.8.- Valores de parámetros estudiados.	32
Tabla 2.9.- Configuración L_9 de Taguchi para la poliamida y poliamida reforzada.	34
Tabla 2.10.- Probetas necesarias para caracterización de ambos materiales.	35
Tabla 2.11.- Métodos estadísticos para valores atípicos.	52
Tabla 3.1.- Índice de fluidez para PA y PA/CF a temperaturas de extrusión.	55
Tabla 3.2.- Resultados del análisis térmico (DSC y TGA).	56
Tabla 3.3.- Entalpías y porcentajes de cristalinidad.	59
Tabla 3.4.- Resistencia a la tracción de filamentos de poliamida y poliamida reforzada con fibras de carbono.	61
Tabla 3.5.- Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para probetas impresas de poliamida en diferentes configuraciones.	66

Tabla 3.6.- Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para probetas impresas de PA/CF en diferentes configuraciones.	68
Tabla 3.7.- Resultados de efectos principales para resistencia a la tracción en probetas de poliamida.....	70
Tabla 3.8.- Resultados de efectos principales para resistencia a la tracción en probetas de PA/CF.	71
Tabla 3.9.- Resultados de efectos principales para módulos de elasticidad en probetas de PA.	72
Tabla 3.10.- Resultados de efectos principales para módulos de elasticidad en probetas de PA/CF.	72
Tabla 3.11.- Relación S/N para resultados de resistencia a la tracción para las 9 configuraciones.....	74
Tabla 3.12.- Relación señal ruido y porcentaje de contribución por cada parámetro sobre la resistencia a la tracción para PA.....	76
Tabla 3.13.- Relación señal ruido y porcentaje de contribución por cada parámetro sobre la resistencia a la tracción para PA/CF.....	77
Tabla 3.14.- Relación S/N para resultados de módulo de elasticidad para las 9 configuraciones.	78
Tabla 3.15.- Relación señal ruido y porcentaje de contribución por cada parámetro sobre el módulo elástico para PA.	79
Tabla 3.16.- Relación señal ruido y porcentaje de contribución por cada parámetro sobre el módulo elástico para PA/CF.	79
Tabla 3.17.- ANOVA de resistencia a la tracción para probetas impresas en PA.....	84
Tabla 3.18.- ANOVA de resistencia a la tracción para probetas impresas en PA/CF.....	84
Tabla 3.19.- ANOVA del modulo elástico para probetas impresas en PA.....	85

Tabla 3.20.- ANOVA del modulo elástico para probetas impresas en PA/CF.....	85
Tabla 3.21.- Valores predictivos con las configuraciones óptimas.	86
Tabla 3.22.- Configuración óptima para ambos materiales	87
Tabla 3.23.- Resultados de ensayos de tracción para las configuraciones óptimas.....	87
Tabla 3.24.- Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para probetas impresas de PA en diferentes porcentajes de relleno con la mejor configuración.	90
Tabla 3.25.- Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para probetas impresas de PA/CF en diferentes porcentajes de relleno con la mejor configuración.....	90
Tabla 3.26.- Ecuaciones representativas de valores de resistencia para distintos porcentajes de relleno.	91



Introducción

En el prototipado convencional se puede demorar semanas o meses para poder fabricar un modelo. Ante esta situación nace el prototipado rápido o también llamado manufactura aditiva por capas el cual ha sido empleado en muchas industrias para fabricar modelos, prototipos y hasta partes funcionales en pocas horas [MacDonald, 2014]. El prototipado rápido se basa en la descomposición de un modelo tridimensional (3D) en un perfil 2D el cual es depositado por capas en un eje vertical Z. Esta tecnología se inventó en 1984, cuando Charles Hull presentó la primera impresora 3D que funcionaba con el método de estereolitografía, el cual utilizaba una técnica de curado en una resina o polímero mediante una luz ultravioleta.

Las impresoras 3D pasaron de ser equipos costosos a equipos accesibles a cualquier persona con la idea de volver al consumidor un creador ya sea de objetos estéticos como de objetos funcionales. Se ha logrado que los innovadores puedan fabricar prototipos de sus ideas con la ayuda de la tecnología 3D [Dizon, 2017]. Esta tecnología permite hoy en día trabajar con diferentes materiales, como polímeros, materiales compuestos, cerámicos y metales, los cuales presentan diferentes comportamientos y propiedades mecánicas. Los materiales para esta tecnología son limitados, los productos resultantes de los mejores procesos de manufactura aditiva presentan propiedades anisotrópicas debido a una mala adherencia entre capas [Gao, 2015]. Para aplicaciones prácticas, las piezas fabricadas por impresión 3D deben soportar diversos esfuerzos mecánicos durante su uso, es por ello que es importante conocer las sollicitaciones requeridas para cada aplicación bajo diversas condiciones de carga, además de que en algunos casos los polímeros presentan mayor resistencia por unidad de masa que los metales [Chen, 2017]. La manufactura aditiva representa una opción de bajo costo para la fabricación de piezas complejas debido a que los polímeros muestran mayores ventajas al usarse con esta tecnología [Agarwal, 2011].

El objetivo del presente trabajo es determinar los parámetros de fabricación óptimos a partir de la caracterización de dos polímeros: Poliamida (PA) y el material compuesto poliamida reforzada con fibras de carbono (PA/CF) utilizando la técnica de modelado por deposición fundida (FDM) o fabricación por filamento fundido (FFF) para el cual se tienen los siguientes objetivos:

- Determinar y seleccionar los principales parámetros de impresión de mayor influencia sobre las propiedades mecánicas de los objetos fabricados mediante FDM, a partir de la literatura existente.
- Caracterizar los filamentos de la poliamida (PA) y la poliamida reforzada por fibras de carbono (PA/CF).
- Definir los rangos de trabajo de cada parámetro seleccionado, mediante ensayos de impresión 3D.
- Definir el diseño y la metodología experimental a usar en la caracterización de materiales fabricados mediante la técnica de FDM a partir de poliamida y poliamida reforzada con fibras de carbono, considerando los parámetros seleccionados.
- Fabricar probetas mediante la técnica de FDM a partir de PA y PA/CF según el diseño experimental.
- Realizar ensayos mecánicos para evaluar las propiedades mecánicas del material impreso.
- Evaluar la influencia de los parámetros seleccionados sobre las propiedades mecánicas y determinar los valores de estos parámetros que optimicen dichas propiedades.
- Evaluar la influencia del porcentaje de relleno sobre las propiedades mecánicas.

El presente trabajo de investigación se ha estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1. En este capítulo se dan a conocer los diferentes tipos de manufactura aditiva que existen en la actualidad. Se explica el funcionamiento del modelado por deposición fundida (FDM o FFF) y los diferentes tipos de materiales con sus características principales para esta técnica. Se incluyen investigaciones pasadas con resultados importantes relacionados con las variaciones de parámetros de impresión. Finalmente se mencionan algunos campos de aplicación en donde se utiliza la técnica de modelado por deposición fundida.

Capítulo 2. En este capítulo se muestran los materiales y equipos utilizados para la presente investigación, seguido de la metodología experimental planteada para cumplir con los objetivos. Se introduce el diseño experimental que contempla el método estadístico utilizado y los parámetros estudiados, junto con el número de probetas y los ensayos realizados. Finalmente se muestra el método para discriminar valores atípicos en estos resultados.

Capítulo 3. En este último capítulo se muestran los resultados de los distintos ensayos realizados a filamentos y probetas impresas, así como el análisis de estos con la finalidad de entender el comportamiento de las piezas fabricadas por impresión 3D.

Por último, se finalizará el presente trabajo de investigación con una exposición de las principales conclusiones que se obtuvieron tras la realización de los diversos ensayos y se presentará la bibliografía consultada para el desarrollo de este.

1. Capítulo 1: Fundamentos teóricos

Este primer capítulo da a conocer los diferentes tipos de manufactura aditiva que existen en la actualidad. Se hace un énfasis en el funcionamiento del modelado por deposición fundida (FDM o FFF) y los diferentes tipos de materiales con sus características principales para esta técnica. Se muestran investigaciones pasadas con resultados importantes relacionados con las variaciones de parámetros de impresión. Finalmente se mencionan algunos campos de aplicación en donde se utiliza la técnica de modelado por deposición fundida.

1.1 Manufactura aditiva

La impresión 3D es un proceso de manufactura aditiva que se encarga de crear objetos físicos a través de un diseño digital mediante la adición de material por capas [Dizon, 2017]. Existen 7 clasificaciones para la manufactura aditiva [Gao, 2015], las cuales son fotopolimerización en tina, extrusión de material, goteo de material, inyección de aglutinante, fusión por capas de polvo, deposición directa de energía y laminación de hojas [3D HUBS, 2017] como se muestra en la **tabla 1.1**:

Tabla 1.1.- Clasificación de la tecnología de manufactura aditiva [Gao, 2015].

CATEGORIES	TECHNOLOGIES	PRINTED "INK"	POWER SOURCE	STRENGTHS / DOWNSIDES
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling (FDM)	Thermoplastics, Ceramic slurries, Metal pastes	Thermal Energy	<ul style="list-style-type: none"> Inexpensive extrusion machine Multi-material printing Limited part resolution Poor surface finish
	Contour Crafting			
Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering (SLS)	Polyamides /Polymer	High-powered Laser Beam	<ul style="list-style-type: none"> High Accuracy and Details Fully dense parts High specific strength & stiffness Powder handling & recycling Support and anchor structure Fully dense parts High specific strength and stiffness
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)	Atomized metal powder (17-4 PH stainless steel, cobalt chromium, titanium Ti6Al-4V), ceramic powder		
	Selective Laser Melting (SLM)			
	Electron Beam Melting (EBM)		Electron Beam	
Vat Photopolymerization	Stereolithography (SLA)	Photopolymer, Ceramics (alumina, zirconia, PZT)	Ultraviolet Laser	<ul style="list-style-type: none"> High building speed Good part resolution Overcuring, scanned line shape High cost for supplies and materials
Material Jetting	Polyjet / Inkjet Printing	Photopolymer, Wax	Thermal Energy / Photocuring	<ul style="list-style-type: none"> Multi-material printing High surface finish Low-strength material
Binder Jetting	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	Polymer Powder (Plaster, Resin), Ceramic powder, Metal powder	Thermal Energy	<ul style="list-style-type: none"> Full-color objects printing Require infiltration during post-processing Wide material selection High porosities on finished parts
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Plastic Film, Metallic Sheet, Ceramic Tape	Laser Beam	<ul style="list-style-type: none"> High surface finish Low material, machine, process cost Decubing issues
Directed Energy Deposition	Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electronic Beam Welding (EBW)	Molten metal powder	Laser Beam	<ul style="list-style-type: none"> Repair of damaged / worn parts Functionally graded material printing Require post-processing machine

Como se aprecia en la **tabla 1.1**, dentro de cada clasificación encontramos distintos procesos de manufactura aditiva (tecnologías) tales como el sinterizado selectivo por láser (SLS), estereolitografía (SLA), modelado por deposición fundida (FDM), procesamiento digital de luz

(DLP), fusión selectiva por láser (SLM), entre otros, de los cuales los más utilizados mundialmente son los 4 primeros como se muestra en la **figura 1.1**.

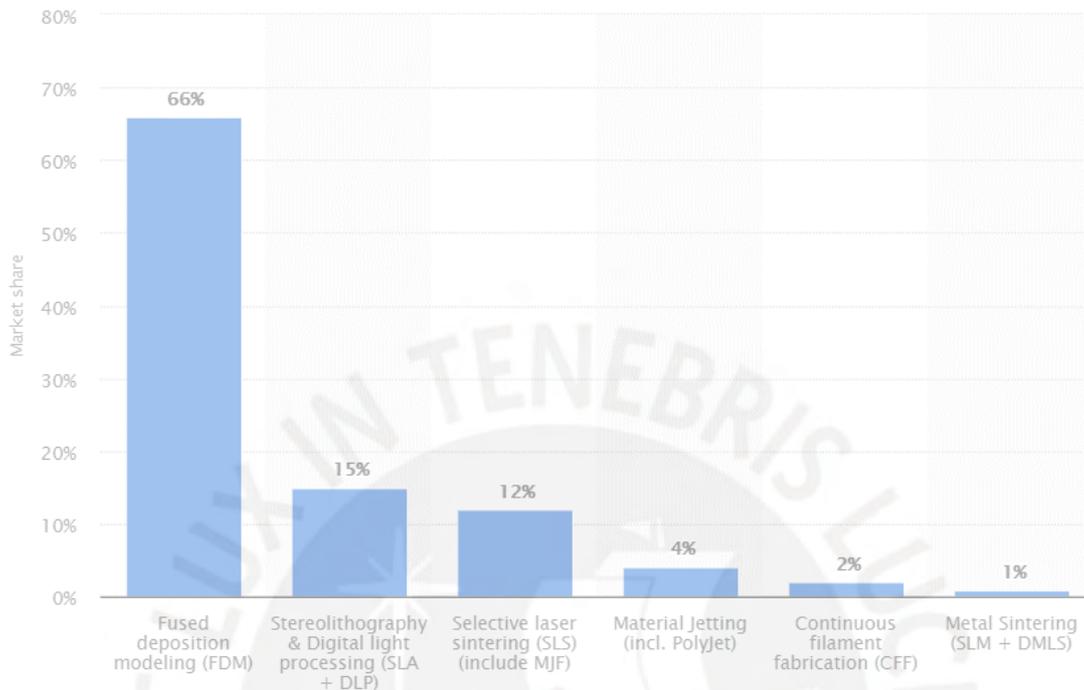


Figura 1.1.- Tecnologías de impresión más usadas hasta enero del 2018 [Statista, 2018].

La **figura 1.1** muestra los resultados de una encuesta sobre los procesos más utilizados hasta el mes de enero del año 2018, en donde el proceso *Fused Deposition Modeling* es el más utilizado a nivel mundial, sobrepasando por mucho a otros procesos como el SLA, DLP y SLS; sin embargo, son procesos los cuales no se pueden dejar de lado debido a las diferentes ventajas que nos dan en la industria.

Entre sus distintas aplicaciones, el proceso de estereolitografía y de procesamiento digital por luz se utiliza para diseños muy detallados como esculturas, moldes de joyería y prototipos que deben tener un acabado muy preciso y suave, pero se limita al uso de resinas [3D HUBS, 2017].

El proceso de SLS es utilizado en aplicaciones industriales como prototipos y productos finales, pues permite realizar con mucha libertad diseños muy complejos con materiales plásticos como

son las poliamidas (nylon), poliestireno y elastómeros termoplásticos; sin embargo, esta tecnología demanda mayor tiempo para enfriar el material y por ende mayores tiempos de entrega.

Son tal vez por estas razones que hoy en día el mundo utiliza la tecnología de *Fused Deposition Modeling* (FDM) o también llamado *Fused Filament Fabrication* (FFF), el cual pertenece a la clase de extrusión de material. Con esta, se construyen objetos como prototipos para una gran variedad de aplicaciones mediante el depositado de material fundido y extruido en ciertos patrones predeterminados [Bournias, 2017] tales como líneas, hexágonos, círculos, etc., depositados capa por capa. Su funcionamiento consiste en un rodete de material termoplástico en filamentos que se carga en un equipo de extrusión llamado impresora 3D y este va a una boquilla calibrada que, una vez llegue a una temperatura requerida dependiendo del material, fundirá el filamento alimentando al cabezal de extrusión [Dizon, 2017].

El cabezal funciona mediante diferentes coordenadas ya sean las cartesianas, delta, polares y se puede lograr más utilizando un brazo robótico [3D natives, 2017]. La más utilizada es la de coordenadas cartesianas, que consiste en un sistema de 3 ejes conocidos como X, Y y Z. El material fundido es depositado por capas en lugares predeterminados donde se enfría, ya sea de manera natural o forzada por ventiladores atados al cabezal de extrusión para que se solidifique [Bournias, 2017].

La deposición o impresión con esta tecnología consiste en varios trayectos repetitivos para poder rellenar el área requerida. Cuando una capa termina de ser impresa, el cabezal o en algunos casos la mesa de trabajo se mueve para empezar a depositar la nueva capa, haciendo un proceso repetitivo hasta completar la pieza.

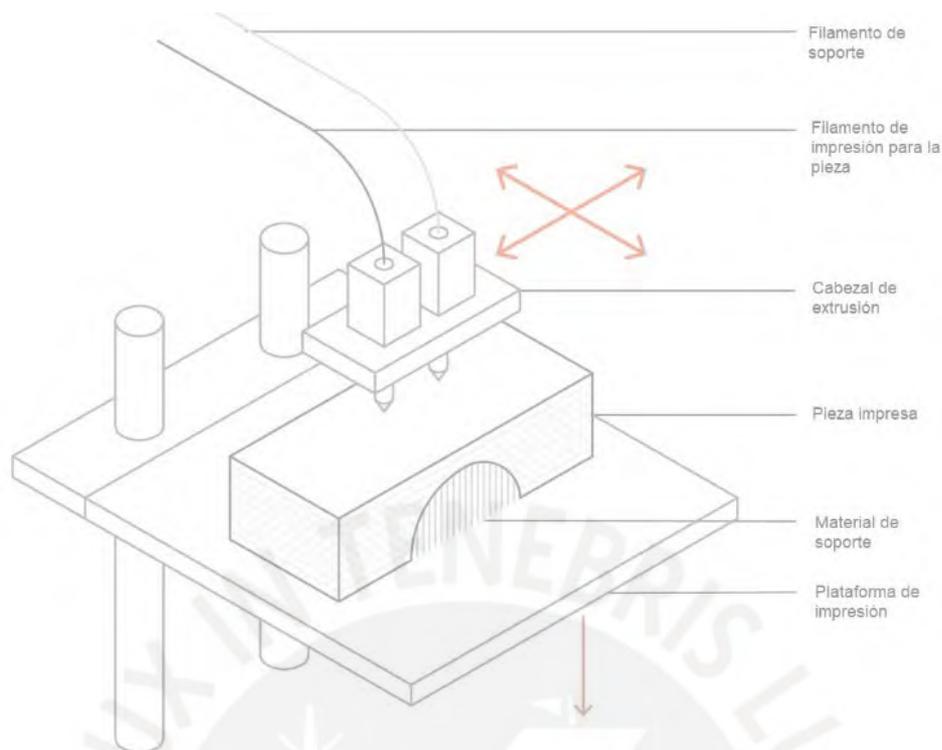


Figura 1.2.- Esquema de las partes de la impresora por FDM [adaptado de Bourmias, 2017].

En la **figura 1.2** se puede apreciar lo mencionado anteriormente sobre el funcionamiento de la tecnología FDM. Se puede observar que, para fabricar algunas piezas es necesario tener material de soporte, el cual sirve de apoyo para fabricar piezas huecas y que es fácil de separar de estas. Entre estos contamos con 3 materiales distintos, el ácido poliláctico (PLA), acetato de polivinilo (PVA) y recientemente se ha creado un nuevo material llamado “*Breakaway*” por la empresa Ultimaker, el cual permite quitar de manera fácil el material de soporte obteniendo un buen acabado superficial en las áreas de contacto. Estos materiales pueden ser utilizados solo con algunos materiales como nylon, acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), PLA y polietileno clorado (CPE). Los materiales de soporte son fáciles de quitar de la pieza impresa, se necesita de alguna herramienta de sujeción para poder romperlo por partes, a excepción del PVA, el cual es un material soluble en agua.

El uso de esta tecnología se aplica para prototipos a un menor costo y tiempo [Dizon, 2017] comparado con el SLS y se pueden utilizar una gran variedad de materiales como el ABS, PLA y poliamidas (PA), comparado con el uso de resinas del SLA y DLP.

En la técnica de FDM existen ciertos parámetros importantes al momento de fabricar una pieza, los cuales afectarán las características de los productos [Griffiths, 2016], tales como la dirección de impresión, el porcentaje de relleno, la velocidad de impresión, la temperatura de extrusión, la altura de capa y el patrón de relleno [Alafaghani, 2017] que, al ser variados de distintas maneras, harán posible la fabricación de una pieza de calidad, tanto en el aspecto geométrico como en las propiedades mecánicas. Entre estos parámetros, se puede considerar que los más importantes son la temperatura, la altura de capa y la orientación de impresión [Kozior, 2017] pues estos en conjunto definirán la adhesión entre capas y los esfuerzos a los que la pieza podrá ser sometida; sin embargo, existirán diversas combinaciones que harán que se tengan mejores resultados para los distintos ensayos como el de tracción, impacto, fatiga, entre otros.

1.2 Materiales para impresión 3D

Los materiales a utilizar en FDM pueden ser clasificados en 3 categorías, las cuales son: rendimiento mecánico, calidad visual y proceso de manufactura [3D MATTER, 2017]. Dichas categorías constan de diferentes propiedades o características las cuales ayudan a escoger el material de trabajo a partir de lo que se desea fabricar como se muestra en la **figura 1.3**.

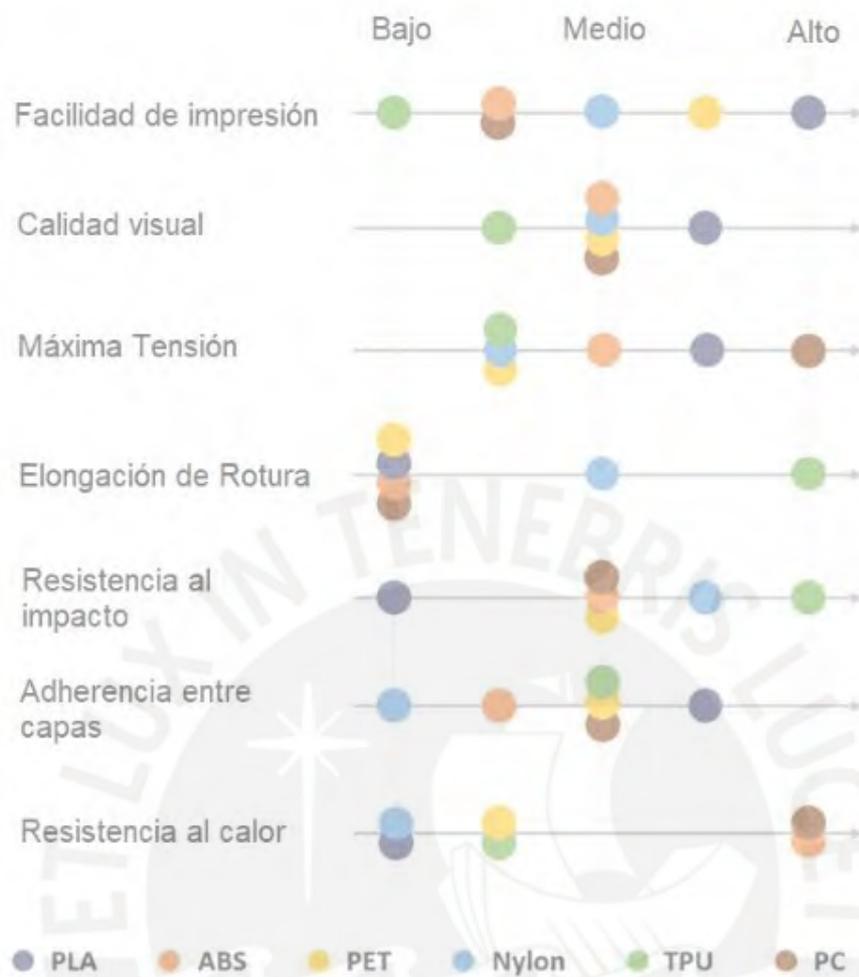


Figura 1.3.- Características de distintos materiales en impresión 3D [3D MATTER, 2017].

Se puede observar las diferentes características que poseen los materiales impresos según los criterios escogidos y que no existe un “buen” material ni uno “malo”. Entre ellos, tenemos:

- PLA: Es un material fácil de imprimir y da buen aspecto visual. Es rígido, resistente y frágil.
- ABS: Es un material que se utiliza para altas temperaturas y cuando se requiere mayor tenacidad.
- PET: Es un material con buena resistencia al impacto y flexible.

- Nylon 6: Es un material que posee buenas propiedades mecánicas y es el de mayor resistencia para los tipos de material con filamentos no flexibles; sin embargo, la adherencia puede presentar dificultades.
- TPU: Es un material utilizado para la gran mayoría de aplicaciones flexibles, pero su gran resistencia al impacto puede dar lugar a nuevas aplicaciones.
- PC: Es el material más resistente y puede ser una buena alternativa de reemplazo para el ABS ya que sus propiedades son similares.

Según lo mencionado anteriormente, podemos decir que la elección del material depende de lo que se desee imprimir, según la aplicación que se le dará a la pieza fabricada. Hoy en día se siguen fabricando materiales de impresión utilizando el mismo polímero de base como el ABS o la poliamida, pero con mejores propiedades finales al añadirle refuerzos como la fibra de carbono o de vidrio.

1.3 Investigaciones previas

La optimización de los parámetros de impresión es uno de los objetivos más importantes para el campo de la manufactura aditiva. Esta optimización se realiza de dos formas, siendo estas la investigación experimental y la simulación. Se han utilizado varios diseños experimentales para la optimización de estos parámetros como por ejemplo el método de Taguchi, el diseño factorial, el ANOVA, entre otros. En estos estudios realizados, algunos investigadores se enfocan en un solo parámetro como los mencionados más adelante, así como también otros se enfocan en 3 o 4 parámetros a la vez como lo hicieron Anitha en el 2001; Lee en el 2005 y Onwubolu en el 2014, quienes utilizaron diseños experimentales como el método de Taguchi y el diseño factorial para optimizar distintos parámetros de impresión, tales como la velocidad de impresión, el patrón de impresión y la altura de capa hasta parámetros poco comunes como el tiempo que toma la impresión y la distancia entre filamentos depositados

llamado “*Air-Gap*”. Otros investigadores [Tontowi, 2017; Mendonsa, 2013; Sood, 2010] utilizaron el análisis de varianza (ANOVA), el cual es un análisis estadístico en donde se evalúa la importancia de uno o más factores al comparar las medias de las variables de respuesta en los distintos niveles de los factores, los cuales normalmente se usan 2 o 3 niveles por cada factor [Alafaghani, 2017].

En los últimos años, el método de Taguchi ha sido muy usado para optimizar tanto a los procesos como a los productos a través de la investigación experimental. Las principales ventajas del diseño de experimentos (DOE) utilizando el método de Taguchi son que se utiliza una menor cantidad de muestras en los experimentos, también que se puede estudiar la interacción de los efectos entre los parámetros estudiados [Anitha, 2001]. Este mismo autor ha realizado investigaciones utilizando el método de Taguchi para optimizar los problemas que aparecen en las superficies al rectificar un material, obteniendo resultados satisfactorios, por lo que continuó utilizando este diseño experimental para identificar los parámetros en distintos procesos.

Es-Said [2000] estudió los efectos de la orientación de impresión (*raster orientation*) variando ésta entre $45^\circ/-45^\circ$, 0° , 45° , 90° y $45/0^\circ$, obteniendo que la variación de este parámetro influye durante la fabricación de las probetas de tracción e impacto debido a que la orientación de impresión hace que las moléculas de polímero se alineen con la dirección de depositado de material.

Lee [2015] estudió los parámetros como la densidad, altura de capa y orientación de impresión, obteniendo que estos parámetros influyen en el rendimiento elástico de la probeta a tracción en el ABS así como en el tiempo necesario para imprimir una pieza y en su acabado superficial, pues disminuir la velocidad de impresión o aumentar la altura de capa afecta negativamente la superficie de la pieza.

Wang [2007] estudió la deformación que ocurre al imprimir un material, afirmando que cuando se extruye un material desde el cabezal, este se enfría desde la temperatura de transición vítrea hasta la temperatura de la cámara, generando esfuerzos internos debido a una velocidad de impresión no óptima, haciendo que las capas se deformen y se formen grietas. La temperatura también afecta las propiedades mecánicas de los componentes extruidos con esta tecnología [Wittbrodt, 2015].

Con estas investigaciones podemos aclarar que los parámetros de impresión al ser variados de muchas maneras nos podrán dar ventajas para las diferentes aplicaciones en las que se quiera utilizar la tecnología FDM.

En la **figura 1.4** se muestra los tipos de orientación de impresión, el cual es un factor importante al imprimir mediante la técnica de FDM.

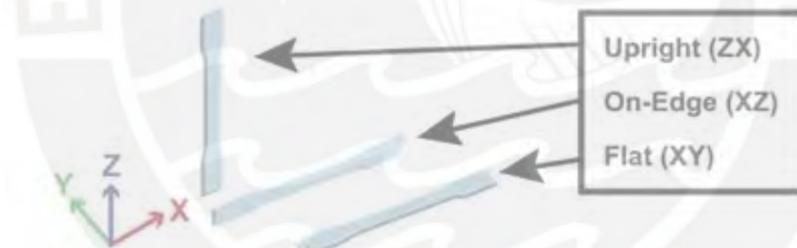


Figura 1.4.- Orientaciones de impresión [Bhate, 2016].

También se afirma en la investigación de Es-Said [2000] que la impresión en los ejes XY presenta los valores máximos de tracción. Esto se debe a que las capas están paralelas a la línea de fuerza, lo que lleva a decir que un menor número de capas depositadas conlleva a mayor resistencia a la tracción en dicho eje [Alafaghani, 2017].

Existen investigaciones [Szykiedans, 2016] en donde se comparó distintos materiales base y sus reforzados, obteniendo como resultado que el tereftalato de polietileno (PET) reforzado con fibra de vidrio muestra un mejor comportamiento en los ensayos a tracción que su material base sin refuerzo, así como también se obtuvo que al imprimir la probeta de PET reforzado con fibras de vidrio sobre el eje ZX (conocido como “*up-right printing*”) hizo que éste soporte el doble de carga a tracción en comparación con una impresión sobre el eje XY, orientación la cual se mostró anteriormente en la **figura 1.4** y refuta a otras investigaciones como las mencionadas previamente. Otros resultados interesantes son que la primera fisura se pudo oír a 1/3 de la carga máxima y que el material reforzado se comporta como un material tenaz sin punto de fluencia.

Otros estudios [Griffiths, 2016] proponen que se debe considerar analizar cómo afectan los parámetros de impresión a las propiedades de las piezas finales y no dejar esta tecnología en prototipos. Así, se obtuvo que al minimizar el uso de material también disminuía el módulo elástico y en general el rendimiento mecánico debido a que, al tener un menor relleno, hay una estructura menos sólida, afectando al módulo de elasticidad y a la resistencia a la tracción como se muestra en la **figura 1.5**. Se puede observar que el área en color verde oscuro, que representa un peso mayor a 2 gramos, presenta mayores propiedades como lo son el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción; mientras que el área azul, que presenta un peso menor a 1,6 gramos, tiene los valores mínimos de estos resultados.

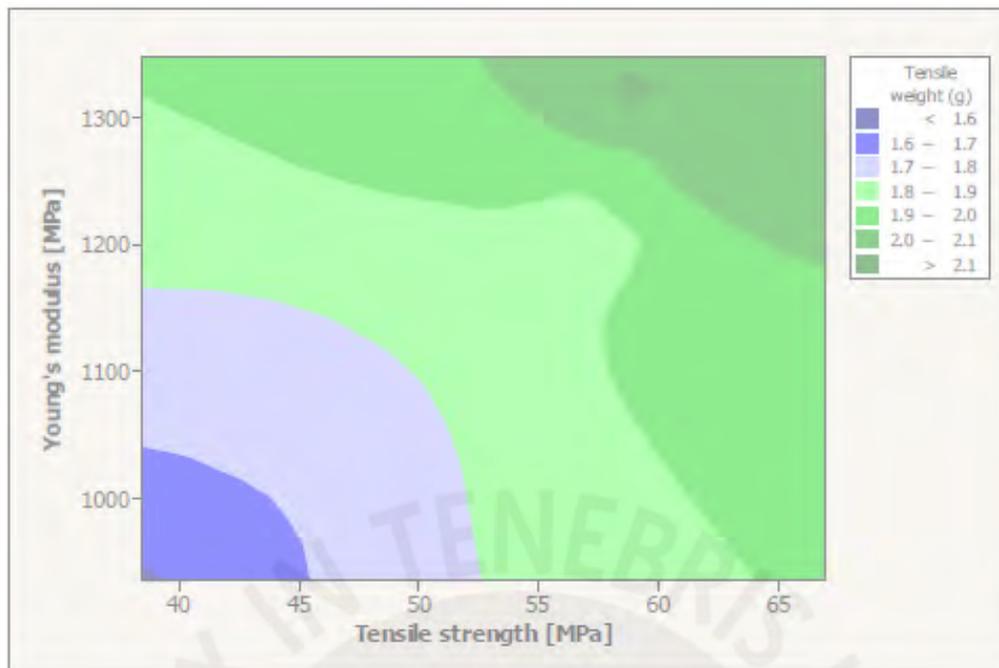


Figura 1.5.- Relación peso, con módulo E y resist. tracción [Griffiths, 2016].

Christiyan[2016] realizó experimentos en probetas de tracción de ABS, impresas con un relleno del 60% y un cabezal de 0,6 mm, variando parámetros como la altura de capa y la velocidad de impresión, obteniendo que, a mayor altura de capa y velocidad de impresión, la resistencia a la tracción disminuye. Con esto podemos entender que la altura de capa es un parámetro importante al estudiar las propiedades mecánicas del material ABS con silicato de magnesio hidratado (talco).

Estas investigaciones ayudan a enfocarse en los parámetros de mayor importancia y la interacción que existe entre estos para sus propiedades mecánicas.

1.4 Aplicaciones de la impresión 3D

Los distintos campos de aplicación en el que la impresión 3D ha llegado varían desde el área automovilística, fabricando prototipos y piezas finales que no son solicitadas mecánicamente a esfuerzos grandes para competencias en Fórmula 1; pasando por la

aeronáutica, fabricando boquillas de combustible para los motores de avión; hasta la producción de calzados, desarrollando zapatos personalizados y únicos, y también ha llegado a un tema muy importante que es la medicina [3D HUBS, 2017], en donde hoy en día se imprimen prototipos de órganos vitales como riñones, pulmones y corazones; en donde para estos últimos se están utilizando técnicas especiales para hacer que el material se acostumbre a los movimientos que el órgano suele tener, y partes del cuerpo humano como orejas y extremidades, las cuales están siendo desarrolladas en forma de prótesis e implantes [Griffiths, 2016].

La Universidad de Rice ha desarrollado con su departamento de bioingeniería la fabricación de un órgano que funciona como un pulmón (**Figura 1.6**) a partir de una pre-solución líquida de un material llamado “*Hydrogel*”, el cual es un material hidrofílico que solidifica al exponerlo a la luz azul [Grigoryan, 2019].



Figura 1.6.- Órgano que funciona como pulmón impreso en 3D.

Se han realizado estudios en China en donde se estableció una alta producción de prótesis de mandíbulas (**Figura 1.7**) con gran precisión en la fabricación de ellas para personas de edad adulta los cuales no presentaban dientes a través de la impresión 3D [Chen, 2016].

La editorial Springer publicó una guía para médicos profesionales sobre los avances de la tecnología de impresión 3D en la medicina [Rybicki, 2017], donde se puede observar casos como restauración de cráneos a través de la impresión como se muestra en la **figura 1.8**.

También se han realizado modelados de columnas con enfermedades para que estas sirvan de práctica para estudiantes de medicina como se muestra en la **figura 1.9**.

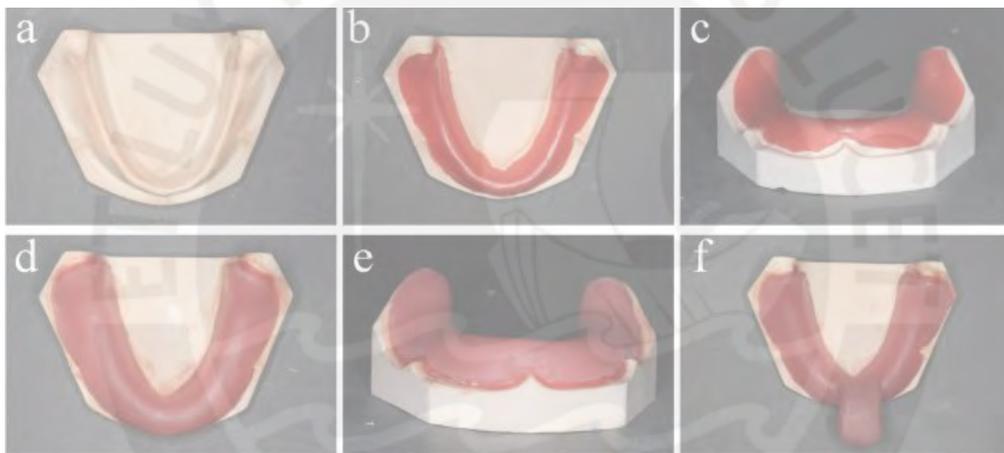


Figura 1.7.- Prótesis de mandíbula fabricadas por FDM [Chen, 2016].



Figura 1.8.-Implante de cráneo [Springer]



Figura 1.9.- Modelo de columna vertebral con Espondilitis anquilosante [Springer].

En el año 2015, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) realizó un compendio llamado “Compendio Estadístico Perú 2015”, en donde en el capítulo 9 llamado “Desarrollo Social” [INEI, 2015] muestra los siguientes datos estadísticos sobre discapacidades locomotoras.

Tabla 1.2.- Pacientes atendidos por diferentes discapacidades locomotoras (2004-2014) (INEI, 2015).

E. PROGRAMA DE ATENCIÓN PARA LA POBLACIÓN CON DISCAPACIDAD

9.38 PACIENTES ATENDIDOS EN EL INSTITUTO NACIONAL DE REHABILITACIÓN "DRA. ADRIANA REBAZA FLORES", SEGÚN TIPO DE DISCAPACIDAD Y DIAGNÓSTICO, 2004 - 2014

(Número de Personas)

Tipo de discapacidad y diagnóstico	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Total	25 555	22 343	21 399	19 915	20 741	20 751	19 190	21 160	19 315	18 092	21 802
Discapacidad del aparato locomotor	14 348	12 107	10 852	10 037	9 881	9 847	10 347	11 467	9 885	9 342	11 109
Defectos posturales	6 579	4 774	4 296	4 229	4 156	4 110	4 596	4 676	3 794	3 586	4 074
Reumatismo extra auricular	2 755	2 500	2 263	1 837	1 622	1 893	1 861	2 297	1 964	1 744	2 043
Secuelas traumáticas (fracturas)	677	601	485	436	524	465	347	418	367	353	558
Enfermedades reumáticas articulares	1 296	1 233	1 137	1 086	1 076	1 017	1 129	1 533	1 458	1 295	1 592
Amputados	355	342	361	387	462	391	456	432	401	408	426
Trastorno sistema nervio periférico	524	462	412	334	294	320	354	379	272	325	402
Secuelas de polio	140	169	130	105	99	121	76	121	46	36	80
Lesiones centrales encefálicas	908	899	939	852	821	730	711	793	807	822	1 082
Lesiones medulares	455	489	382	409	463	475	451	469	464	463	515
Pacientes sanos	284	257	78	23	20	50	66	51	35	26	27
Otros	375	381	369	339	344	275	300	298	277	284	310

La **tabla 1.2** muestra un promedio aproximado anual de 402 personas amputadas; sin embargo, no se encuentra registro de qué extremidad fue amputada.

De estos datos obtenidos, podemos suponer que hay una alta probabilidad de que dichas personas no cuentan ni pueden contar con ningún tipo de prótesis para sus extremidades.

La SALA VEO PUCP ha desarrollado diferentes tecnologías para mejorar la calidad de vida de las personas, entre ellas una prótesis de mano la cual gracias a los mismos usuarios se ha propuesto mejorar la calidad y diseño de esta con ayuda de la ingeniería. Es por esto que mediante el Proyecto de investigación FONDECYT 163-2017 denominado “OPTIMIZACIÓN DEL USO DE POLÍMEROS SINTÉTICOS EN PROCESOS DE MANUFACTURA ADITIVA MEDIANTE MODELOS DE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL Y TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES. CASO DE ESTUDIO: APLICACIONES MÉDICAS PRÓTESIS DE MANO”, se decide mejorar el material de fabricación de estas prótesis de mano (**Figuras 1.10 y 1.11**), así como generar nuevo conocimiento acerca del comportamiento del material depositado con respecto a los parámetros de fabricación sobre un producto terminado que ha sido fabricado con la tecnología de manufactura aditiva.



Figura 1.10.- Prótesis de mano impresa mediante la tecnología de FDM.



Figura 1.11.- Modelo de prótesis de mano.

2. Capítulo 2: Metodología experimental

En este segundo capítulo se muestran y describen los materiales estudiados, los cuales son poliamida y poliamida reforzada con fibras de carbono (PA y PA/CF), estos cuentan con una matriz de poliamida la cual es considerada como uno de los mejores termoplásticos para la manufactura aditiva. También se indican los equipos utilizados para el estudio de filamentos y probetas, seguido del diseño experimental de Taguchi, en donde se establece el número de probetas y cómo es la interacción entre los cuatro parámetros de fabricación entre sí; y el procedimiento experimental que se realizó.

Finalmente se presenta el método utilizado para descartar valores atípicos en los ensayos realizados y poder tener una muestra confiable de resultados.

2.1 Materiales

Para el presente trabajo de investigación se utilizó la poliamida (PA) y poliamida reforzada con fibras de carbono (PA/CF) en forma de filamentos. La marca 3DXTECH® fabrica filamentos de nylon y poliamida reforzada con fibras de carbono, a partir de ahora llamaremos a estos indistintamente como poliamida o nylon. Estos filamentos tienen un diámetro de 2,85 mm.

2.1.1 Filamentos de poliamida (PA)

El nylon, llamado por la misma marca “iOn NYLON” (**Figura 2.1**), viene en una presentación de 0,5 kg. El fabricante brinda las recomendaciones de impresión que se muestran en la **tabla 2.1**.



Figura 2.1.- Filamento de nylon(natural) de la marca 3DXTECH.

Tabla 2.1.- Parámetros de impresión recomendados para iOn nylon.

Parámetros de impresión recomendados	
Temperatura de impresión	250 - 270 °C
Velocidad de impresión	50 - 70 mm/s
Temperatura de la mesa	100 - 110 °C

Adicionalmente, la empresa también nos brinda propiedades mecánicas (**Tabla 2.3**), obtenidas a partir de pruebas a una probeta impresa según la norma ISO 527 como se ve en la **figura 2.2**, la cual fue impresa con los parámetros indicados en la **tabla 2.2**. Sin embargo, la ficha técnica no indica qué tipo de probeta se utilizó para su fabricación. La ficha técnica completa se podrá encontrar en el **ANEXO A**.



Figura 2.2.- Modelo de probeta impresa según norma ISO 527.

Tabla 2.2.- Parámetros de impresión utilizado por 3DXTECH para material iOn nylon.

Técnica de impresión	FDM/FFF
Diámetro de boquilla	0,4 mm A2 endurecida
Altura de capa	0.2 mm
Relleno/ Orientación	100%/ +45°, -45°
Temperatura de extrusión	260 °C
Temperatura de mesa de impresión	110 °C
Preparación de la mesa	ABS/ Gel de acetona
Velocidad de impresión	50 mm/s

Tabla 2.3.- Propiedades obtenidas de probetas fabricadas con iOn nylon.

		Valor	Unidades	Norma
Propiedades generales	Densidad	1,06	g/cc	ISO 1183
	Resistencia a la tracción	45	MPa	ISO 527
	Módulo de elasticidad	2094	MPa	ISO 527
Propiedades mecánicas	Deformación unitaria a la rotura	8,6	%	ISO 527
	Resistencias a la flexión	80	MPa	ISO 178
	Modulo a la flexión	2206	MPa	ISO 178
Propiedades térmicas	Temperatura de transición vítrea (Tg)	105	°C	DSC
	Temperatura de calor de distorsión (HDT) a 0,45 MPa	96,8	°C	ISO 75
Propiedades eléctricas	Resistividad superficial	>10 ¹³	Ohm/sq	IEC 60093

2.1.2 Filamentos de poliamida reforzada con fibras de carbono (PA/CF)

La poliamida reforzada con fibras de carbono (**Figura 2.3**) viene en una presentación en carrete de 2 kg y la empresa fabricante indica que se tiene una composición aproximada de 80% de poliamida y 20% de fibras de carbono. El fabricante también nos brinda las recomendaciones de impresión que se muestran en la **tabla 2.4**.



Figura 2.3.- Filamento de PA/CF (negro) de la marca 3DXTECH.

Tabla 2.4.- Parámetros de impresión recomendados del PA/CF.

Parámetros de impresión recomendados	
Temperatura de impresión	250 - 270 °C
Velocidad de impresión	50 - 70 mm/s
Temperatura de la mesa	100 - 110 °C

Al igual que con la poliamida, la empresa también nos brinda propiedades mecánicas de la poliamida reforzada con fibras de carbono (**Tabla 2.6**), obtenidas a partir de pruebas a una probeta impresa según la norma ISO 527 (**Figura 2.2**), la cual fue impresa con los parámetros indicados en la **tabla 2.5**. Nuevamente la ficha técnica de este material no indica qué tipo de probeta se utilizó para la realización de estos ensayos. La ficha técnica de la PA/CF se encuentra en el **ANEXO B**.

Tabla 2.5.- Parámetros de impresión utilizado por 3DXTECH para ensayos realizados a probetas fabricadas con PA/CF.

Técnica de impresión	FDM/FFF
Diámetro de boquilla	0,4 mm A2 endurecida
Altura de capa	0.2 mm
Relleno/ Orientación	100%/ +45°, -45°
Temperatura de extrusión	260 °C
Temperatura de mesa de impresión	110 °C
Preparación de la mesa	ABS/ Gel de acetona
Velocidad de impresión	50 mm/s

Se puede apreciar que los valores obtenidos son mayores que la poliamida pura en la resistencia a la tracción y en el módulo a la elasticidad. También se puede observar que, al reforzar la poliamida con fibras de carbono, este se vuelve más frágil, presentando una menor deformación

unitaria. Las propiedades térmicas son muy similares. Algunos de estos valores se podrán corroborar al realizar los ensayos pertinentes.

Tabla 2.6.- Propiedades obtenidas de probetas fabricadas con PA/CF.

		Valor	Unidades	Norma
Propiedades generales	Densidad	1,14	g/cc	ISO 1183
	Resistencia a la tracción	63,9	MPa	ISO 527
	Módulo de elasticidad	4387	MPa	ISO 527
Propiedades mecánicas	Deformación unitaria a la rotura	4	%	ISO 527
	Resistencias a la flexión	78	MPa	ISO 178
	Modulo a la flexión	5650	MPa	ISO 178
Propiedades térmicas	Temperatura de transición vítrea (Tg)	105	°C	DSC
	Temperatura de calor de distorsión (HDT) a 0,45 MPa	102	°C	ISO 75
Propiedades eléctricas	Resistividad superficial	>10 ¹⁰ (10)	Ohm/sq	IEC 60093

2.2 Equipos

A continuación, se procederá a describir los equipos utilizados.

2.2.1 Impresora 3D

Para las pruebas de impresión 3D y la fabricación de probetas ensayadas se usó una impresora 3D de la marca Ultimaker modelo 3D Extended (**Figura 2.4**). Este equipo utiliza la técnica de modelado por deposición fundida (FDM) para imprimir las piezas que se requieran. La Ultimaker 3D Extended cuenta con dos extrusores y dos boquillas de 0,4 mm para poder imprimir dos materiales distintos de 2,85 mm de diámetro, ya sean material base y de soporte o ambos materiales base. Este equipo también cuenta con una plataforma de temperatura regulable, la cual es de suma importancia para mejorar la adhesión del material a la base. Una característica importante de esta impresora es que cuenta con los motores en la parte trasera y no en el cabezal de extrusión, lo cual significa que se tiene menos inercia en el cabezal y por

lo tanto se puede tener una buena precisión de impresión. El volumen de impresión es de 215 x 215 x 300 mm para un solo extrusor y de 197 x 215 x 300mm al tener una extrusión doble.



Figura 2.4.- Impresora Ultimaker 3D Extended.

2.2.2 Balanza analítica

Se utilizó una balanza analítica de la marca METTLER TOLEDO (**Figura 2.5**) para pesar los filamentos y las probetas impresas con la finalidad de obtener el tiempo de secado de los materiales. Esta balanza cuenta con una precisión de 0,0001 g y una capacidad máxima de 200 g.

2.2.3 Secador de filamento

Para mantener los filamentos de poliamida y poliamida reforzada secos e imprimir de manera óptima se utilizó un secador de filamentos de la marca PrintDry™ (**Figura 2.6**), el cual consiste en una base giratoria y una carcasa que tiene un orificio por donde puede pasar el filamento y alimentar a la impresora. El rango de trabajo de este secador es desde los 35°C hasta los 70°C y tiene por recomendación secar la poliamida a una temperatura de 70°C.

2.2.4 Horno de convección forzada

Los filamentos de poliamida y poliamida reforzada son materiales higroscópicos, por lo que se utilizó un horno de convección forzada (**Figura 2.7**) para secarlos. Este horno puede llegar a una temperatura máxima de 300°C y se conecta a una red monofásica de 220V para su funcionamiento.



Figura 2.5.- Balanza analítica de la marca METTLER TOLEDO.



Figura 2.6.- Secador de filamentos de la marca PrintDry™.



Figura 2.7.- Horno de convección forzada secando filamentos.

2.3 Diseño experimental

La parte experimental de este trabajo de investigación está dividida en 2. La primera consistió en realizar la caracterización de los filamentos; la segunda parte, en utilizar los

filamentos para fabricar las probetas que fueron usadas en los ensayos de tracción correspondientes.

Se realizaron pruebas de impresión 3D para poder conocer al equipo y familiarizarse con éste y su software. Luego, se procedió a estudiar el efecto de los parámetros de impresión 3D sobre las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos de tracción de las probetas tipo hueso que fueron impresas con los filamentos antes mencionados de la marca 3DXTECH®. Para esto se utilizó la norma ISO 527-2, de donde se definió la geometría de la probeta y la cantidad de repeticiones.

A partir de los parámetros (k) y niveles (o valores) de estudio definidos (3), se hace necesario utilizar la metodología de Taguchi ya que es el más adecuado para estudiar los (k=4) parámetros de fabricación del proceso FDM. Para el caso de estudio se utilizó un arreglo “L₉”, éste requiere de sólo 9 experimentos generados por una serie de combinaciones específicas de los niveles (1, 2 y 3) que toman los parámetros (A, B, C y D) en estudio como se puede observar en la **tabla 2.7**. Una gran ventaja es que se estudian $3^{(k-2)}$ experimentos en comparación a un diseño factorial $3^{(k)}$, el cual requeriría de 81 experimentos.

Tabla 2.7.- Arreglo ortogonal L₉ de la metodología de Taguchi.

N° de experimento	Parámetro / nivel			
	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Los parámetros de estudio, según la influencia de éstos sobre las propiedades mecánicas del material impreso mediante la técnica de modelado por deposición fundida, son los siguientes: (i) patrón de impresión, (ii) temperatura de impresión, (iii) altura de capa y (iv) velocidad de impresión.

Se realizó la caracterización de las propiedades térmicas, reológicas y mecánicas de los filamentos de PA y PA/CF, para así obtener datos importantes como la temperatura de fusión y la de degradación, entre otros, los cuales sirvieron para la obtención de un rango de temperaturas de impresión inicial. Teniendo estas propiedades, como punto de partida, se procedió a determinar los rangos de valores de estudio por cada parámetro, con la ayuda de los parámetros de impresión recomendados por los fabricantes de los filamentos (**Tabla 2.1**).

Además, con la finalidad de ampliar el rango de estudio y obtener los mínimos y máximos valores posibles de cada parámetro de estudio, se realizaron pruebas experimentales de impresión con cada parámetro; sin embargo, dichos rangos resultantes tuvieron que ser modificados debido a la interacción entre los cuatro parámetros de impresión a distintos niveles. Por ejemplo, la máxima velocidad de impresión fue determinada a partir de la combinación con la mínima temperatura de impresión y mínima altura de capa, mientras que la mínima velocidad fue determinada al combinar este parámetro con la máxima temperatura de impresión y máxima altura de capa.

Luego de hacer las consideraciones necesarias para compatibilizar las combinaciones de los parámetros de impresión, de tal manera que sea posible fabricar probetas bajo las combinaciones propuestas por el método Taguchi (**Tabla 2.7**), se obtuvieron los valores de los parámetros de impresión que fueron utilizados para cada material, los cuales son mostrados en la **tabla 2.8**.

Tabla 2.8.- Valores de parámetros estudiados.

Nivel	A: Altura de capa(mm)	B:Velocidad de impresión (mm/s)	C: Patrón de impresión y ángulo (°)	D: Temperatura de impresión (°C)
1	0,1	30	Triángulo [30]	240
2	0,2	40	Líneas [0/45/90/135]	260
3	0,3	50	Rejilla [45]	280

Los patrones de impresión elegidos fueron: triangular, rejilla y de líneas. El patrón triangular se realiza depositando filamentos de manera lineal tal que al finalizar dichos movimientos realizados por el cabezal de impresión se obtengan varios triángulos en una misma capa de impresión. El patrón de rejilla a 45° consiste en filamentos depositados en forma de malla. Al igual que el patrón triangular, éste deja pequeños vacíos en las probetas como se ve en la **figura 2.8.**

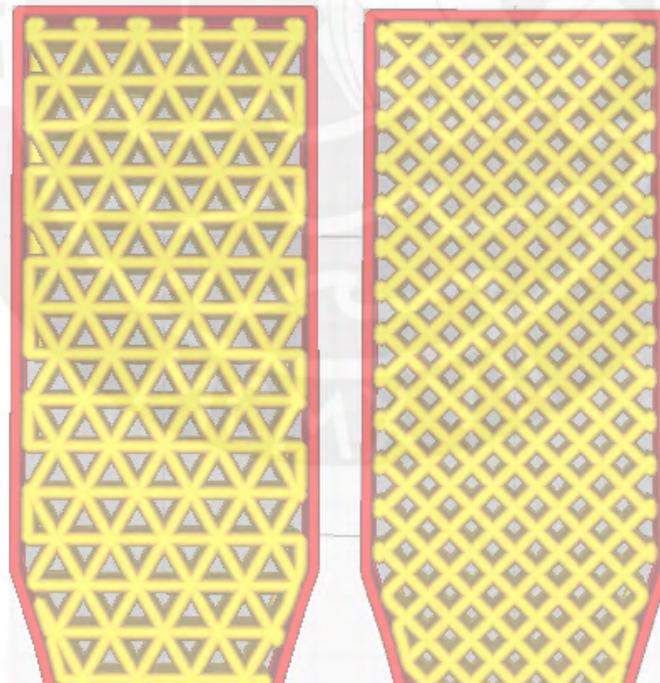


Figura 2.8.- Patrones de impresión, a) Triangular a 30° y b) Rejilla a 45°.

El patrón de líneas a 0° , 45° , 90° y 135° tiene filamentos depositados en cuatro orientaciones, vertical, horizontal y dos en diagonal a 45° y 135° como se aprecia en la **figura 2.9**. La deposición del material se realiza secuencialmente aplicando una capa a 0° , seguido de otra capa a 45° , luego otra de 90° y finalmente a 135° hasta completar la impresión de la probeta.

Estos patrones de impresión fueron usados como punto de partida del diseño experimental para generar las combinaciones adecuadas que permitirán el estudio de los cuatro parámetros de impresión seleccionados.

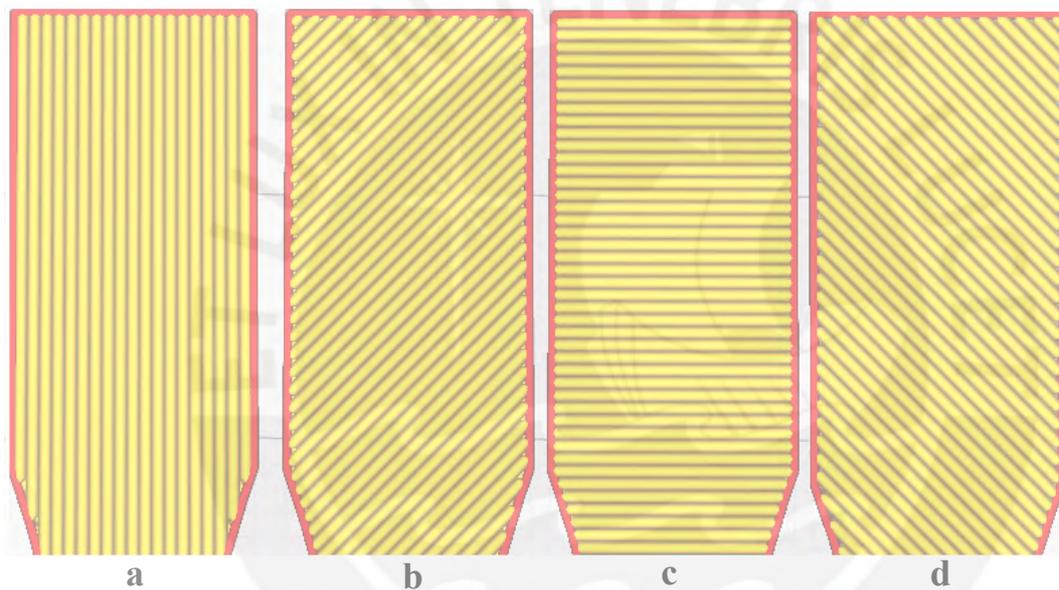


Figura 2.9.- Patrón de fabricación de líneas, a) 0° , b) 45° , c) 90° y d) 135° .

A partir de estos parámetros y niveles se pueden construir arreglos ortogonales “L₉” para cada uno de los materiales en estudio como se aprecia en la **tabla 2.9**. Cada material tiene un orden propio de los parámetros de impresión dependiendo de la complejidad que estos presentan al interactuar entre ellos. Es así que para la PA y PA/CF la matriz ortogonal se ordenó de la siguiente manera: altura de capa, velocidad de impresión, patrón de impresión y temperatura.

Estos 9 experimentos permitirán determinar la mejor combinación que maximice las propiedades mecánicas con una mínima cantidad de probetas, así como determinar la influencia de cada parámetro.

Tabla 2.9.- Configuración L9 de Taguchi para la poliamida y poliamida reforzada.

Configuración L9				
Arreglo	Altura de capa (mm)	Velocidad de impresión (mm/s)	Patrón de impresión y ángulo (°)	Temperatura de Impresión (°C)
1	0,1	30	Triángulo [30]	240
2	0,1	40	Líneas [0/45/90/135]	260
3	0,1	50	Rejilla [45]	280
4	0,2	30	Líneas [0/45/90/135]	280
5	0,2	40	Rejilla [45]	240
6	0,2	50	Triángulo [30]	260
7	0,3	30	Rejilla [45]	260
8	0,3	40	Triángulo [30]	280
9	0,3	50	Líneas [0/45/90/135]	240

Una vez investigado el efecto de estos parámetros de impresión sobre las propiedades mecánicas, se procedió a estudiar el porcentaje de relleno bajo la combinación óptima de los parámetros de impresión anteriormente mencionados. Para ello se evaluó la resistencia a la tracción en función del porcentaje de relleno. En la **figura 2.10** se aprecia una vista previa al variar el porcentaje de relleno, donde el porcentaje de relleno va desde 50% hasta 100%, siendo éstos los valores utilizados para el estudio de dicho parámetro.

En la **tabla 2.10** se muestra la cantidad de probetas impresas necesarias como mínimo para estudiar estos materiales. Un total de 10 porciones de filamento y 150 probetas de tracción fueron necesarios para realizar este estudio. Cabe recalcar que se realizaron 5 repeticiones como mínimo por cada experimento y que de haber utilizado un diseño factorial 3^k , se habría

estudiado 405 probetas por cada material en vez de 45 para el estudio de influencia de los parámetros.

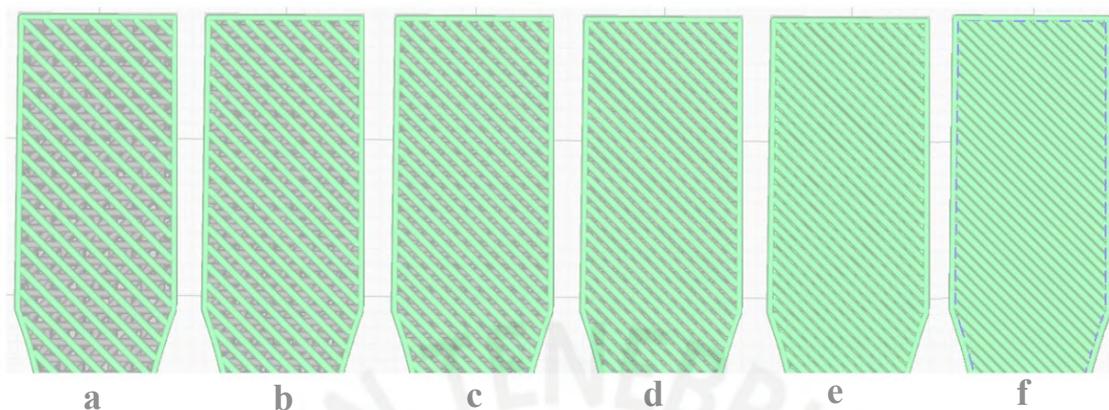


Figura 2.10.- Vista previa de la variación de porcentaje de relleno en las capas de impresión: a) 50%, b) 60%, c) 70%, d) 80%, e) 90% y f) 100%.

Tabla 2.10.- Probetas necesarias para caracterización de ambos materiales.

	Cantidad de probetas	
	PA	PA/CF
Filamentos de impresión	5	5
Estudio de influencia de parámetros	45	45
Estudio de influencia de porcentaje de relleno	30	30

2.4 Procedimiento experimental

2.4.1 Caracterización de filamentos

Se realizaron ensayos de tracción, medición de índice de fluidez y análisis térmicos llamados análisis termogravimétrico y ensayo de calorimetría diferencial de barrido para obtener propiedades mecánicas y térmicas de los filamentos de poliamida y poliamida reforzada con fibras de carbono que podrán ser comparados con otras marcas de filamento.

Estos ensayos fueron realizados en el laboratorio de materiales de la sección de Ingeniería Mecánica (CITE MATERIALES).

A. Medición del índice de fluidez (MFI)

Se midió el índice de fluidez de los filamentos de poliamida y poliamida reforzada mediante los estándares de la norma ASTM D1238-13. Para la realización de este ensayo se acondicionó el material a ensayar, la norma estipula el uso de material en forma de partículas, polvo o pellets. Se procedió a picar los filamentos en pequeñas longitudes de aproximadamente 2 mm y 3 mm como se muestra en la **figura 2.11** y se le aplicó una carga de 5 kg a las diferentes temperaturas de impresión de ambos materiales. El filamento extruido por un agujero calibrado fue cortado a distintos tiempos indicados en los resultados. Luego, se procedió a utilizar la **ecuación 1** para calcular el índice de fluidez. El equipo utilizado fue el medidor de índice de fluidez Zwick/Roell Mflow Extrusion Plastometer (**Figura 2.12**).



Figura 2.11.- Granzas de filamento de PA (izquierda) y PA/CF (derecha).



Figura 2.12.- Zwick/Roell Mflow Extrusion Plastometer.

Ecuación 1.- Ecuación para hallar el índice de fluidez de los materiales.

$$MFI = \frac{m (g)}{\Delta t (s)} \times 600 \left(\frac{s}{10 \text{ min}} \right)$$

Donde:

m : peso de la muestra (g).

Δt : intervalo de tiempo para cada muestra (s).

MFI: índice de fluidez en g/10min.

B. Análisis térmico

Se realizaron dos tipos de análisis térmico a los filamentos de poliamida y poliamida reforzada. Para estos ensayos se usaron muestras de 10 mg por cada material a estudiar.

a) Análisis termogravimétrico (TGA)

En este ensayo se analizó la pérdida de peso del filamento por degradación al someter los filamentos a un incremento de temperatura. La masa del material sometida a un cambio de temperatura se estudia en función del tiempo y temperatura para obtener un análisis de composición del material. También se determina la temperatura en la que la degradación del material inicia. Se utilizó la norma ASTM D3418-15 con el equipo NETZSCH STA 449 F1 Júpiter® (**Figura 2.13**).

b) Ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Se utilizó la norma ASTM E1131-08 para realizar este ensayo. En este análisis se estudió la transferencia de calor a través del cuerpo. Con esto se halló la temperatura de transición vítrea, la temperatura de fusión de los filamentos y las entalpías de fusión para poder determinar el grado de cristalinidad. Para este ensayo se utilizó el mismo equipo que para el análisis termogravimétrico (**Figura 2.13**).



Figura 2.13.- NETZSCH STA 449 F1 Júpiter®.

C. Espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR)

Se realizó un ensayo de espectroscopía para poder determinar qué tipo de poliamida es el filamento de trabajo. Este ensayo consiste en pasar rayos infrarrojos a través de la muestra en donde se genera un espectro el cual es comparado con patrones para identificar el material. Para este ensayo se utilizó el equipo Bruker Tensor 27 FT-IR (**Figura 2.14**).



Figura 2.14.- Espectrómetro Bruker Tensor 27 FT-IR.

D. Ensayo de tracción

Se realizaron ensayos de tracción a los filamentos bajo la norma DIN 527. Se utilizó filamentos cortados a una longitud de 95 mm con una longitud calibrada de 75 mm como se muestra en la **figura 2.15**. El ensayo de tracción fue realizado a 5 muestras de cada material con el equipo Zwick/Roell Z050 (**Figura 2.16**) utilizando una celda de carga de 1kN y unas mordazas de 500 N a una velocidad de 50 mm/min para el filamento de poliamida y de 5 mm/min para el filamento de poliamida reforzada con fibras de carbono. También se utilizó un extensómetro multiXtens para poder determinar la deformación unitaria.



Figura 2.15.- Filamento de PA (superior) y PA/CF (inferior) para el ensayo de tracción.

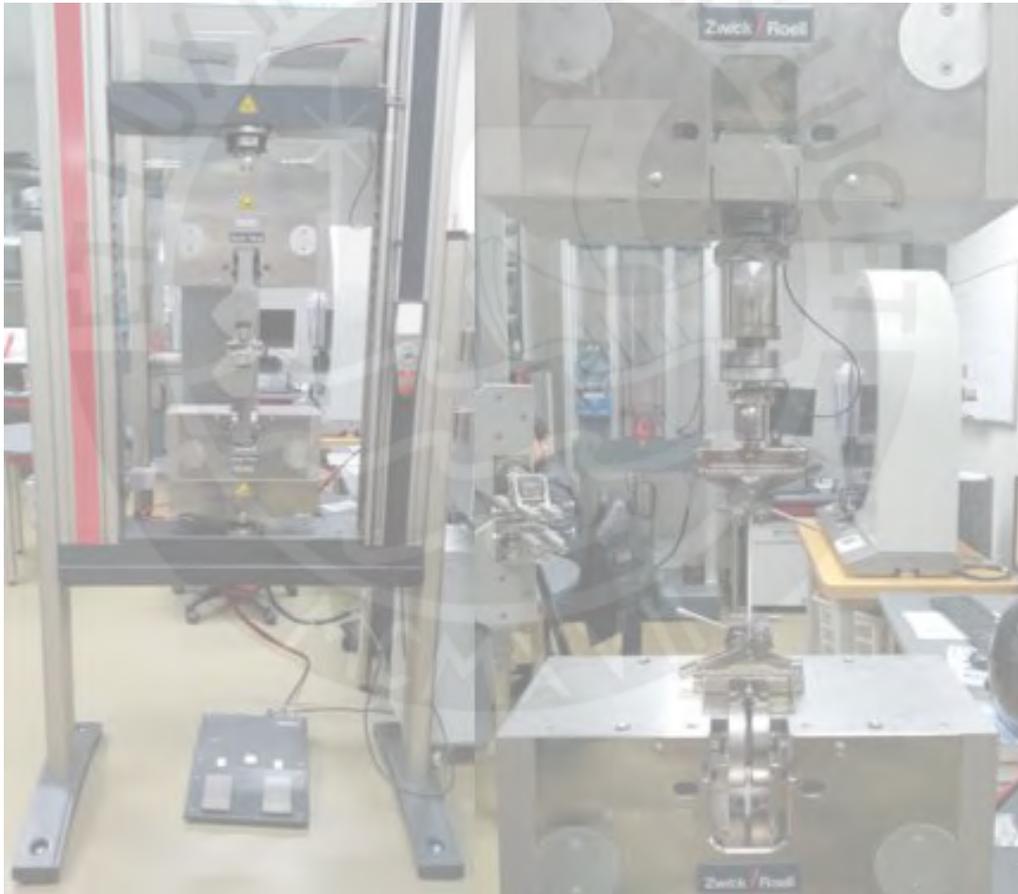


Figura 2.16.- Máquina de ensayos Zwick/Roell Z050.

2.4.2 Fabricación de probetas

Para la fabricación de las probetas de ensayo de tracción se utilizó una impresora Ultimaker 3D Extended y se siguieron los siguientes pasos:

- Diseño tridimensional (CAD) de la probeta de tracción tipo 1BA de la norma ISO 527 (**Figura 2.17**) en Autodesk Inventor 2018 y exportación a archivo con extensión “.STL”.
- Cargar el modelo 3D de la probeta de tracción al programa de impresión CURA y asignar los valores de los parámetros de impresión según el arreglo ortogonal L₉ de Taguchi.
- Secado de filamentos a 70°C por 8 horas y almacenado de éstos en ambiente cerrado con gel de sílice para evitar que el filamento absorba humedad.
- Preparación de la mesa de impresión. Pegado de cinta 3M Scotch Blue tape sobre el vidrio para asegurar una buena adhesión entre mesa y material impreso.
- Elevar la temperatura de la mesa de impresión para disminuir el gradiente de temperatura generado por el contacto entre la superficie y el filamento.
- Impresión de probeta.
- Retiro de la probeta fabricada con una espátula para evitar la deformación y rotura de la probeta impresa.

Cabe volver a mencionar que los filamentos deben ser secados a 70°C por 8 horas antes del proceso de impresión, especialmente los reforzados con fibra de carbono, además estos deben mantenerse a 70°C aproximadamente durante el proceso de impresión utilizando un secador especial para filamentos de impresión 3D. Por último, se debe mencionar que los valores de los parámetros considerados constantes fueron fijados como se explica a continuación:

- Número de contornos: Debido a que se desea estudiar el patrón de impresión, se utilizó un (01) contorno para evitar que este influya de manera considerable. Este se muestra en la **figura 2.18** donde el contorno se aprecia de color rojo.
- Número de capas superior e inferior. Con la finalidad de evaluar las propiedades solo del patrón, se optó por imprimir las probetas sin un recubrimiento tanto en la superficie superior como en la inferior. Un ejemplo puede ser apreciado en la **figura 2.18**, donde se aprecia una vista previa de una probeta impresa (a) sin recubrimiento superior (se puede ver el patrón de impresión) y (b) con recubrimiento superior (se ve la capa y no se puede ver el patrón de impresión).
- Relleno antes que contorno. Permite imprimir primero el patrón y luego el contorno. Se trabajó con esta opción desactivada, pues generaba problemas.
- Temperatura de mesa: Se utilizó una temperatura de 100°C para la PA y 90°C para PA/CF.

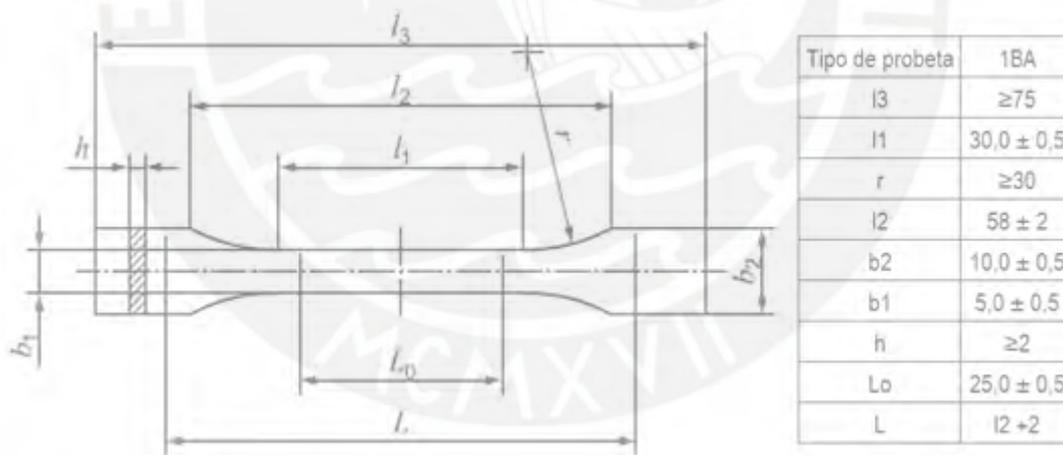


Figura 2.17.- Probetas de tracción 1BA según ISO 527.

Para la asignación de valores de impresión se utilizó el software CURA, donde se tomaron en cuenta algunos otros parámetros para la óptima fabricación de probetas, como se detalla en la **figura 2.20**. Finalmente, un resumen del procedimiento experimental de la fabricación y ensayo de probetas puede ser apreciado en la **figura 2.20**.

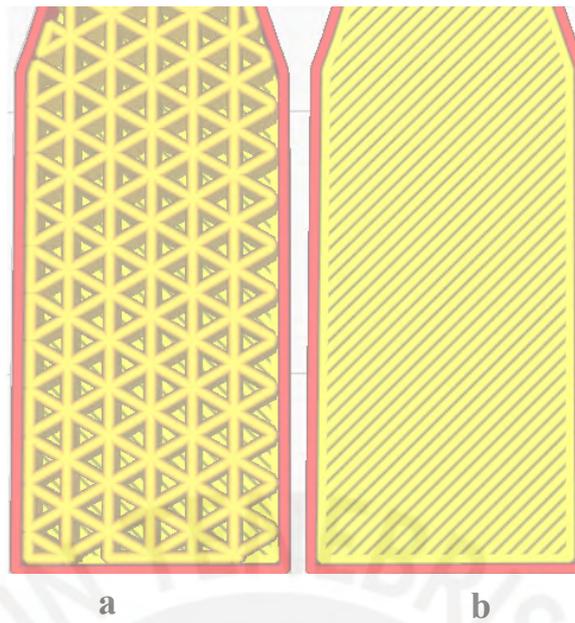


Figura 2.18.- Vista previa de probeta: (a) sin recubrimiento y (b) con recubrimiento.

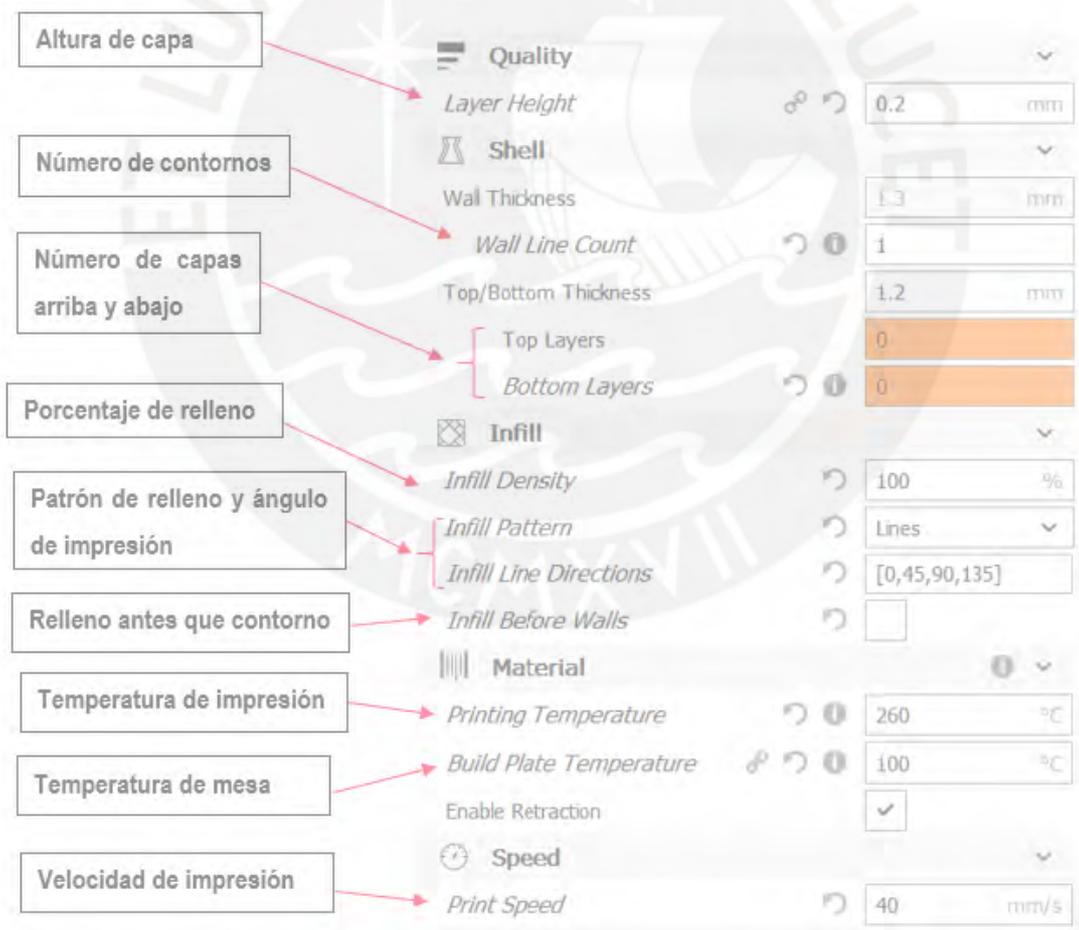


Figura 2.19.- Interfaz del software Cura para la configuración de parámetros.

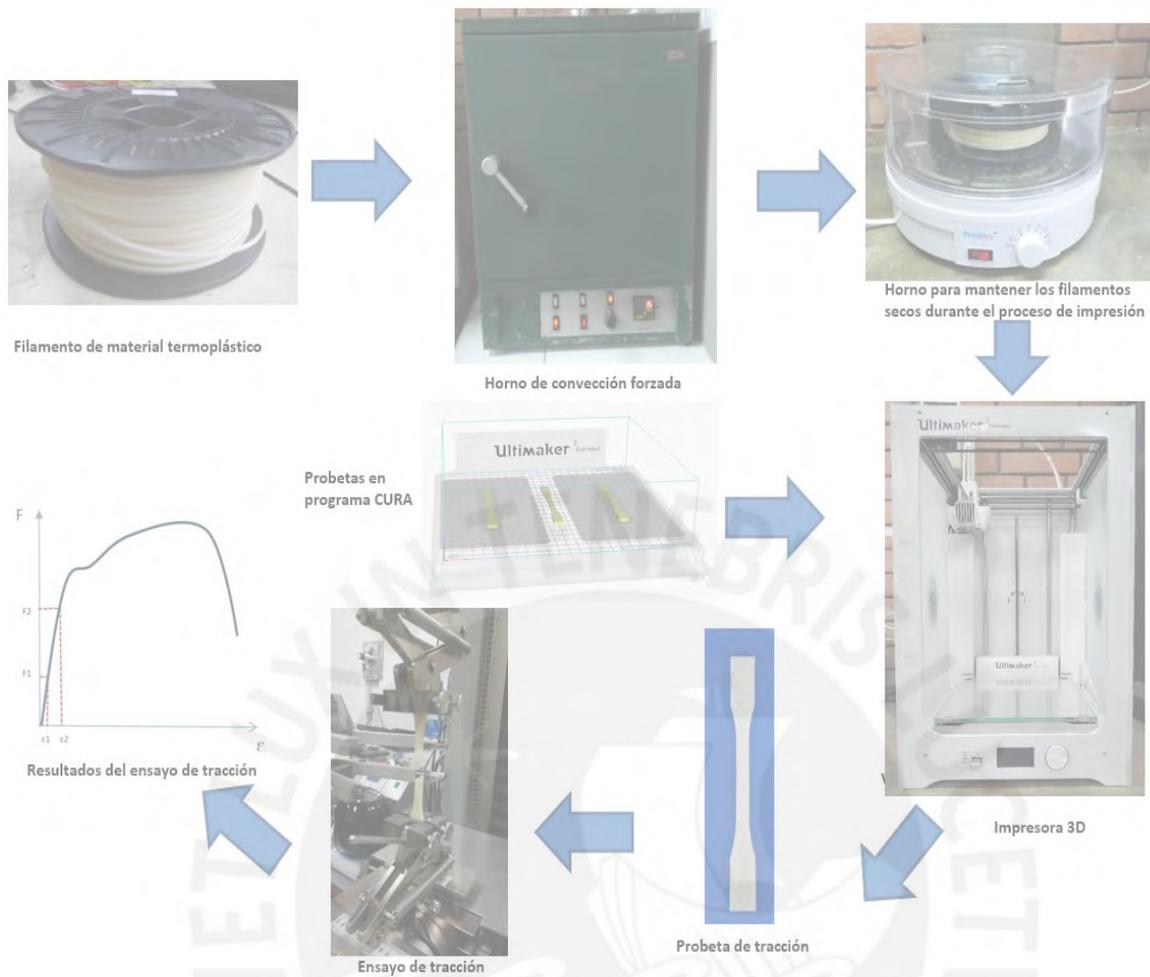


Figura 2.20.- Procedimiento de obtención de resultados.

El nylon es un material higroscópico por lo que tiende a absorber agua y esto afecta negativamente a las impresiones como se muestra en la **figura 2.21**, es por ello que se optó por secar el material por 8 horas a una temperatura de 70°C como se recomienda en la literatura.

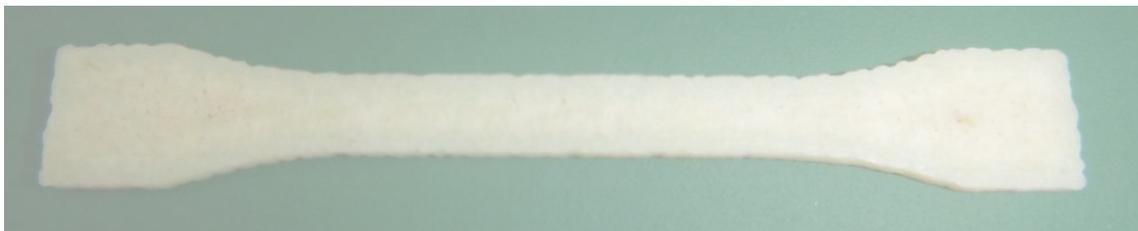


Figura 2.21.- Probeta de tracción fabricada con material húmedo.

Luego de haber secado el material, se puede apreciar un gran cambio en el acabado como se muestra en la **figura 2.22**. Los bordes dejaron de ser rugosos y discontinuos como se muestra en la probeta superior, así como también se generó una mejor deposición del patrón pues ya no se obstruían las pequeñas cavidades y se presentó un ligero cambio de color. También se presentó una mejora en las propiedades mecánicas.



Figura 2.22.- Probetas de tracción con filamento húmedo (superior) y con filamento seco (inferior).

Durante las pruebas de impresión realizadas se utilizó una temperatura de 100°C en la plataforma para la poliamida y una de 90°C para la poliamida reforzada con fibras de carbono, ya que al utilizar temperaturas menores se tenía una mala adhesión a la plataforma lo que ocasionaba que la probeta se despegue y quede pegada a la boquilla o se alabea en un extremo (**Figura 2.23**). Se probó utilizar una cinta azul (Blue tape 3M) para mejorar la adhesión junto con goma en barra, pero los resultados fueron de una mala estética en la base de la probeta o que la cinta azul se quedaba pegada a la probeta. Se optó por imprimir sobre la cinta azul sin goma, lo cual daba un mejor resultado al querer retirar la probeta de la mesa de impresión.

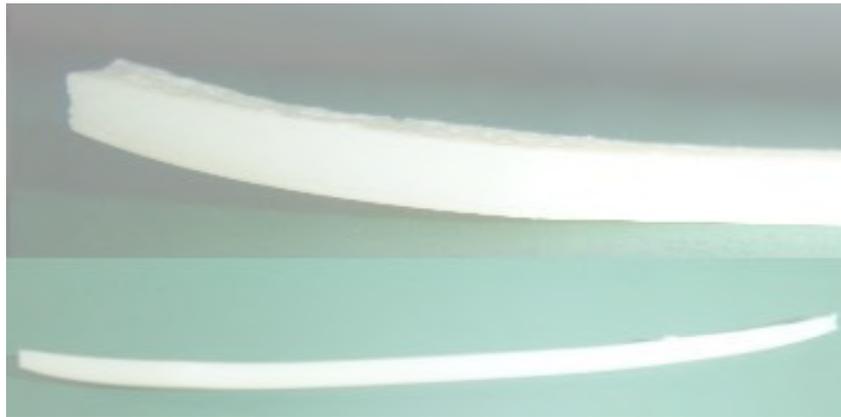


Figura 2.23.- Alabeo de probeta debido a mala selección de temperatura en la plataforma.

2.4.3 Ensayo de tracción a probetas

Para evaluar la influencia de los parámetros de impresión sobre las propiedades mecánicas de probetas de la PA y PA/CF, se realizaron ensayos de tracción. Estos ensayos fueron realizados empleando una máquina de tracción universal Zwick/Roell Z050, la cual fue configurada para realizar ensayos bajo las condiciones especificadas en la norma ISO 527. Esta norma contempla realizar el ensayo de tracción a una velocidad de 5 mm/min, con una longitud calibrada de 25 mm y una distancia entre mordazas de 58 mm. Se usó dos celdas de carga, una de 1kN (**Figura 2.24**) y otra de 50 kN (propia del equipo) debido a la alta resistencia del material reforzado para ciertas configuraciones. También se utilizó un extensómetro multiXtens de la misma marca, la realización del ensayo puede ser observado en la **figura 2.25**. Se realizaron cinco repeticiones por experimento (del arreglo ortogonal L_9). A partir de estos ensayos se obtuvo las curvas de fuerza versus deformación, las cuales al ser divididas por el área respectiva de cada probeta ensayada y comparar el alargamiento respecto a la longitud inicial, se obtuvo las curvas de esfuerzo versus deformación unitaria. Estas curvas son más representativas y permiten determinar las propiedades mecánicas, tales como resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y alargamiento de rotura.

Se realizaron ensayos de tracción divididos en dos etapas para poder evidenciar las influencias de cada parámetro sobre cada material. La primera etapa consistió en ensayar las probetas impresas bajo la configuración asignada según el arreglo L₉ de Taguchi, de estos resultados se pudo cuantificar el grado de influencia de cada parámetro de impresión e identificar los niveles que permiten fabricar probetas con propiedades mecánicas óptimas (mejoradas). En la segunda etapa se imprimieron probetas usando los niveles identificados en la etapa anterior para corroborar la mejora en las propiedades mecánicas en cada material de estudio y finalmente, con los mismos parámetros óptimos, se estudió el efecto del porcentaje de relleno sobre las propiedades mecánicas. De esta manera se medirá el comportamiento del porcentaje de relleno sobre la resistencia del material impreso.

En la **figura 2.25** se puede apreciar la sujeción de la probeta de tracción fabricada del material nylon antes de que la carga sea aplicada. Las líneas marcadas hacen referencia a la longitud a ser calibrada por el extensómetro (25mm) y como se mencionó anteriormente, la falla de la probeta fue dentro de esta zona como se encuentra marcado en la **figura 2.26**. En la zona indicada se puede observar el inicio de la rotura de la probeta de tracción, para esto la probeta debía estar lo más paralelamente posible a la línea de eje de las mordazas al ser sujetadas por éstas, pues al no cumplir con este requisito se genera una rotura fuera de la zona que se quiere, como por ejemplo en la zona de agarre.

En la **figura 2.27** se puede ver la sujeción de una probeta fabricada con poliamida reforzada con fibras de carbono con las mordazas de la celda de carga de 50 kN. Se puede apreciar una curvatura de la probeta respecto al plano vertical debido a la presión que ejercen las mordazas sobre esta antes del inicio del ensayo.



Figura 2.24.- Celda de carga de 1kN.

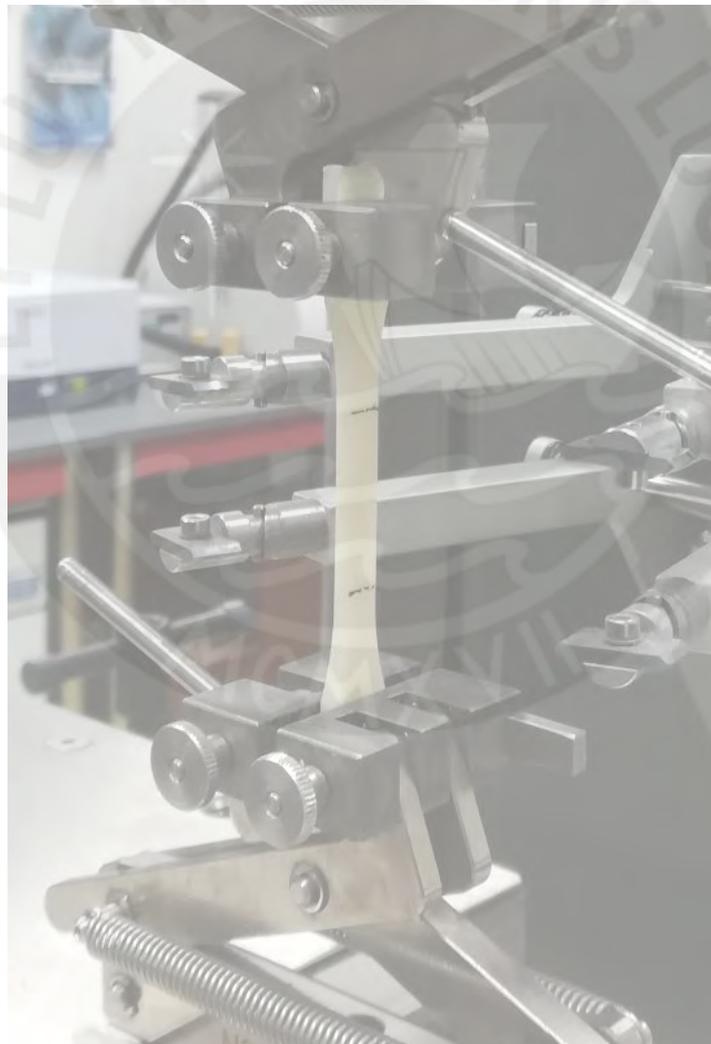


Figura 2.25.- Sujeción de probeta de tracción en máquina Zwick/Roell 050.



Figura 2.26.- Ensayo de tracción a probeta de prueba tipo 1BA según norma ISO 527-2.

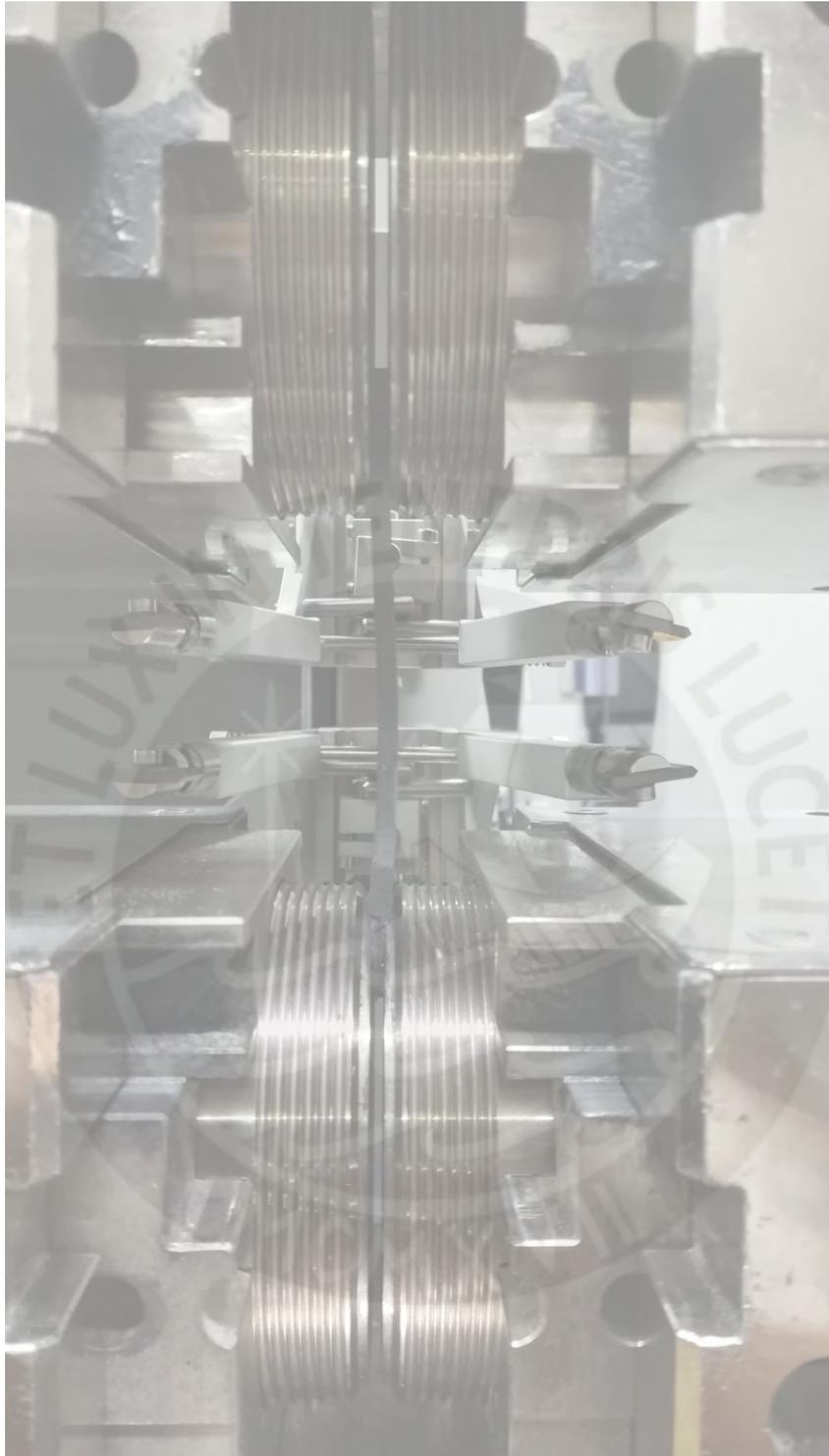


Figura 2.27.- Sujeción de probeta de tracción en máquina Zwick/Roell 050 con la celda de carga de 50 kN.

2.5 Métodos para descartar valores atípicos

Para cada material compuesto se llevarán a cabo un determinado número de ensayos (repeticiones). Por distintas razones, los resultados de estas repeticiones podrían ser diferentes a los valores reales. En este sentido, es importante identificar los valores atípicos o raros dentro de una muestra pues podrían ocultar la tendencia real de los datos. Con el fin de identificar estos valores, la norma ASTM E178-08 resume una serie de métodos estadísticos basados en el nivel de significancia (*significance level*) que se define como el riesgo de rechazar erróneamente una buena observación o resultado. Cada método asume que los datos tienen una distribución normal y, según la norma, se acepta el uso de niveles de significancia menores al 5%. La **tabla 2.11** muestra un resumen de los métodos, en todos los casos, el conjunto de datos $\{x_i\}$ debe estar ordenado en forma ascendente de tal forma que: $x_1 < x_2 < x_3$. Asimismo, para usar los métodos se debe asumir que valor o valores son atípicos, de esta forma, los métodos permitirán verificar si dicha suposición es adecuada o no. Para que un dato sea considerado como atípico, los valores, calculados con las ecuaciones de la **tabla 2.11**, deben estar en el rango de significancia de 0,5% a 5,0%.

Tabla 2.11.- Métodos estadísticos para valores atípicos.

Método	Descripción	Valor	Ecuación
Valor extremo	Solo mínimo es atípico	1 Inferior	$T_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s}$
	Solo máximo es atípico	1 Superior	$T_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s}$
Criterio de Dixon	Solo mínimo es atípico	1 Inferior	$r_1 = \frac{x_2 - x_1}{x_n - x_1}$
	Solo máximo es atípico	1 Superior	$r_n = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}$
Cociente	Máximos y mínimos son atípicos al mismo tiempo	1 Extremos	$e_{1n} = \frac{x_n - x_1}{s}$
Tietjen-Moore	Dos o más valores inferiores son atípicos	2 Inferiores	$L_{ki} = \frac{\sum_{i=k+1}^n (x_i - \bar{x}_{ki})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
	Dos o más valores superiores son atípicos	2 Superiores	$L_{ks} = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x}_{ks})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
Promedio:			$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
Desviación estándar muestral:			$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$
Promedio inferior:			$\bar{x}_{ki} = \frac{1}{n - k} \sum_{i=k+1}^n x_i$
Promedio superior:			$\bar{x}_{ks} = \frac{1}{n - k} \sum_{i=1}^{n-k} x_i$

3. Capítulo 3: Resultados y discusión

En este capítulo se presentan, interpretan, analizan y discuten los resultados obtenidos de todos los ensayos realizados. Se empieza con los resultados obtenidos de los ensayos a los filamentos, luego se analizan los resultados de los ensayos de tracción realizados a las probetas impresas bajo las configuraciones del diseño de Taguchi (matriz L_9), donde se estudiaron los efectos de la variación de parámetros en las propiedades mecánicas con el fin de determinar los mejores parámetros de impresión mediante tres métodos, el de los efectos principales, el de relación señal-ruido y por último el análisis de varianza (ANOVA). Finalmente se presentará el estudio del porcentaje de relleno, en donde se verá cómo afecta a las propiedades mecánicas el variar la cantidad de material usado.

3.1 Caracterización de filamentos

3.1.1 Índice de fluidez

Los resultados de la medición del índice de fluidez para los dos materiales se muestran en la **tabla 3.1** . Los ensayos fueron realizados a tres distintas temperaturas, las cuales están comprendidas en los rangos definidos gracias a las pruebas de impresión y los ensayos de DSC y TGA siendo estas las temperaturas de impresión de 240°C, 260°C y 280°C para el filamento de poliamida y de poliamida reforzada con fibras de carbono, ambos materiales fueron extruidos con una pesa de 5kg.

De los resultados se puede observar que el filamento de poliamida reforzada presenta mayor índice de fluidez que la poliamida pura indicando que, al introducir las fibras de carbono en la matriz polimérica, la viscosidad disminuye, por lo que presenta una menor oposición al flujo y fluye más material por el extrusor. Se afirma lo contrario con respecto al filamento de poliamida, pues este material fluye menos por el extrusor. Esto podría indicar que, al imprimir el material puro o el material compuesto a la misma temperatura, este último tenderá a presentar una mayor adhesión entre sus capas. Así mismo, es posible incrementar la velocidad de impresión, puesto que estos materiales compuestos al tener menor viscosidad fluirán con mayor facilidad, logrando así reducir el tiempo de impresión. En la **figura 3.1** se aprecia una comparación entre el material puro y reforzado a las temperaturas en que se realizaron los ensayos.

Tabla 3.1.- Índice de fluidez para PA y PA/CF a temperaturas de extrusión.

Material	Peso (kg)	Temperatura (°C)	Δt (s)	MFI Promedio	Desviación Estándar	C.V. (%)
PA	5	240	30	5,82	0,132	2,3
		260	20	6,97	0,119	1,7
		280	15	9,71	0,645	6,6
PA/CF	5	240	20	12,82	0,286	2,2
		260	10	30,16	2,001	6,6
		280	10	66,60	0,173	0,3

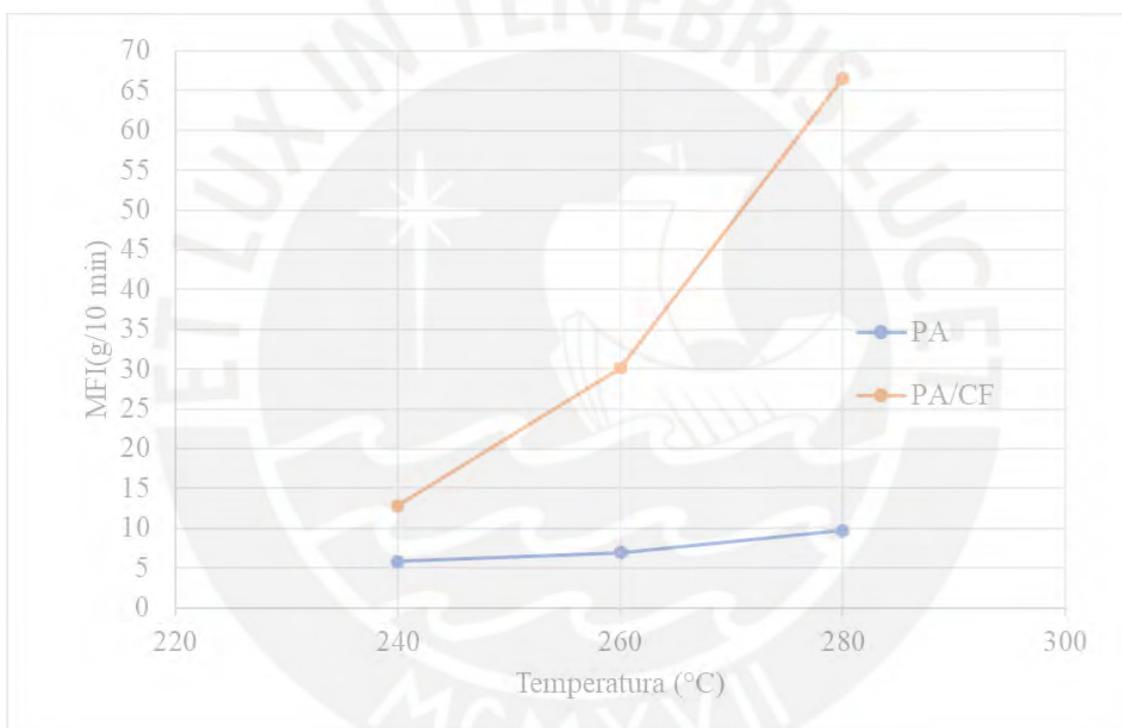


Figura 3.1.- MFI vs Temperatura para la poliamida y la poliamida/CF.

3.1.2 Ensayo de espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier

Se realizó este ensayo con la finalidad de poder determinar qué tipo de poliamida fue el utilizado en forma de filamentos. En la **figura 3.2** se muestra el resultado del ensayo al filamento de poliamida en color rojo y las ondas de color azul y verde representan a una poliamida 6 y poliamida 6,6 respectivamente. De igual manera se puede ver en la **figura 3.3** la

muestra de poliamida/CF en color azul y las referencias de poliamida 6 y 6,6 de color marrón y verde respectivamente. En ambos gráficos se puede observar la similitud de los picos de las muestras con las referencias; sin embargo, no hay un claro reconocimiento de qué tipo de poliamida es la que se estudia (entre 6 y 6,6), pues el equipo que hace este ensayo indicó que se tiene una similitud del 80% con poliamida 6.

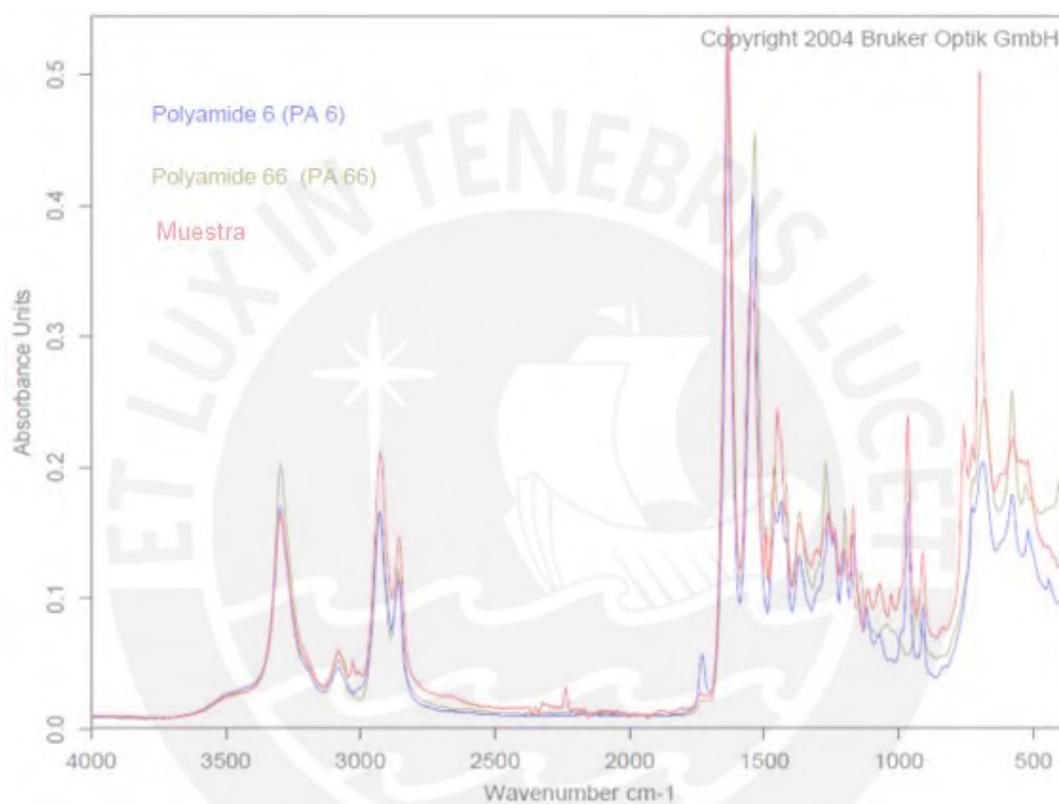


Figura 3.2.- Espectro infrarrojo del filamento de PA.

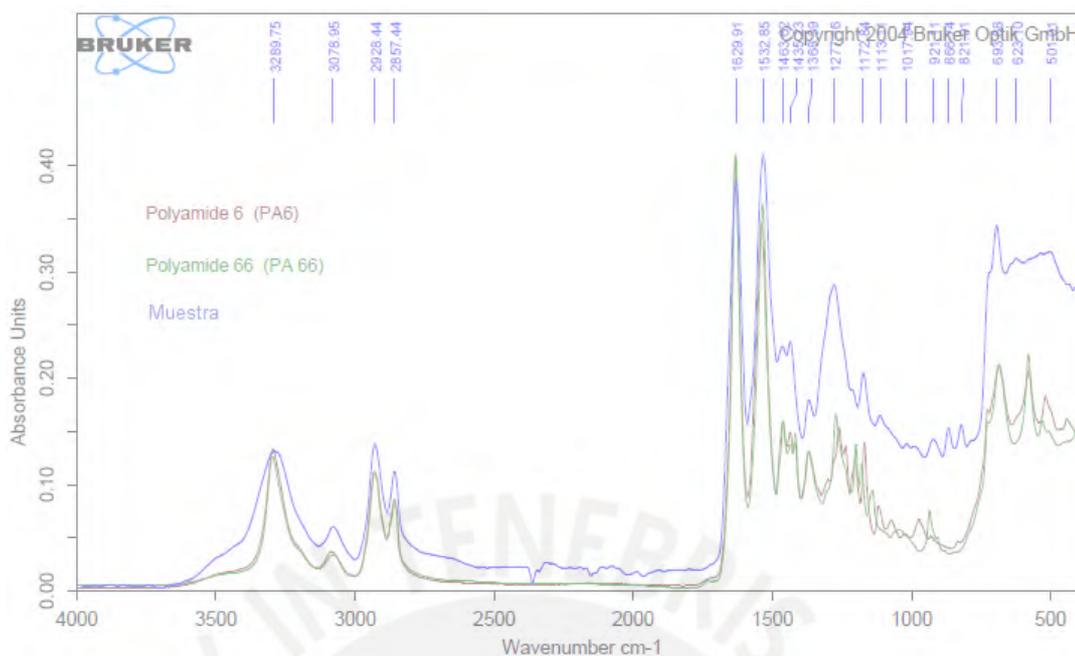


Figura 3.3.- Espectro infrarrojo del filamento de PA/CF.

3.1.3 Análisis térmico

Se realizaron ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis termogravimétrico (TGA) para los filamentos de poliamida y poliamida reforzada con fibras de carbono. Las líneas continuas representan el resultado del ensayo DSC, de donde se puede determinar la temperatura de transición vítrea y temperatura de fusión según sea el caso. Las líneas discontinuas representan el resultado del ensayo TG o TGA, donde se aprecia la pérdida de masa a medida que aumenta la temperatura. Para determinar la máxima tasa de degradación del proceso se debe observar la curva de líneas punteadas, la cual representa la DTG (derivada de la curva de TG). En la **figura 3.4** se puede ver que la temperatura de fusión de la poliamida es de 224,6°C, mientras que la temperatura de inicio de la degradación del material en aproximadamente a 360°C. La temperatura de transición vítrea no se puede apreciar en este gráfico, por lo que tomaremos el dato brindado por el fabricante de 105°C. Cabe resaltar que este valor es atípico respecto a investigaciones [Parodi, 2017], en donde la TG tiene un valor

entre 55°C y 60°C, pero se encuentra que los valores de TG tienden a incrementar a medida que decrece la velocidad de enfriamiento, lo cual podría ser una explicación al valor alto de TG reportado por el fabricante. Se requeriría de mayor investigación en el tipo y proceso del ensayo realizado por la empresa fabricante. De la curva DTG, se observa que por encima de los 500°C queda un 2,85% de masa residual, lo cual podrían ser cenizas, material inorgánico o fibras.

Cabe resaltar que debido al resultado de 80% de similitud de referencia al hacer el ensayo de FTIR y que comparando la temperatura de fusión (224°C) con investigaciones pasadas [Abzan, 2021] (222°C), el material trabajado podría ser PA6.

En la **figura 3.5** se tiene la curva de DSC y TGA para el filamento de poliamida reforzada con fibras de carbono. En esta no se observa un pico de fusión, lo que implicaría que la PA/CF es amorfa; por otro lado, tampoco se detecta la temperatura de transición vítrea; por esta razón se reporta la TG del fabricante de 105°C. El inicio de la degradación se da a 360 °C y de la curva DTG se reporta que por encima de los 500°C queda un 15,86% de masa residual, en este caso podrían ser las fibras de carbono pues el valor concuerda con lo indicado en la ficha técnica del propio material (aproximadamente 20% de material reforzado).

En la **tabla 3.2** se puede ver un resumen de todos estos valores mencionados.

Tabla 3.2.- Resultados del análisis térmico (DSC y TGA).

Material	DSC		TGA	
	Tg (°C)	Tf(°C)	Inicio de la degradación (°C)	Masa residual (%)
PA	105	224,6	360	2,85
PA/CF	105	-	360	15,86

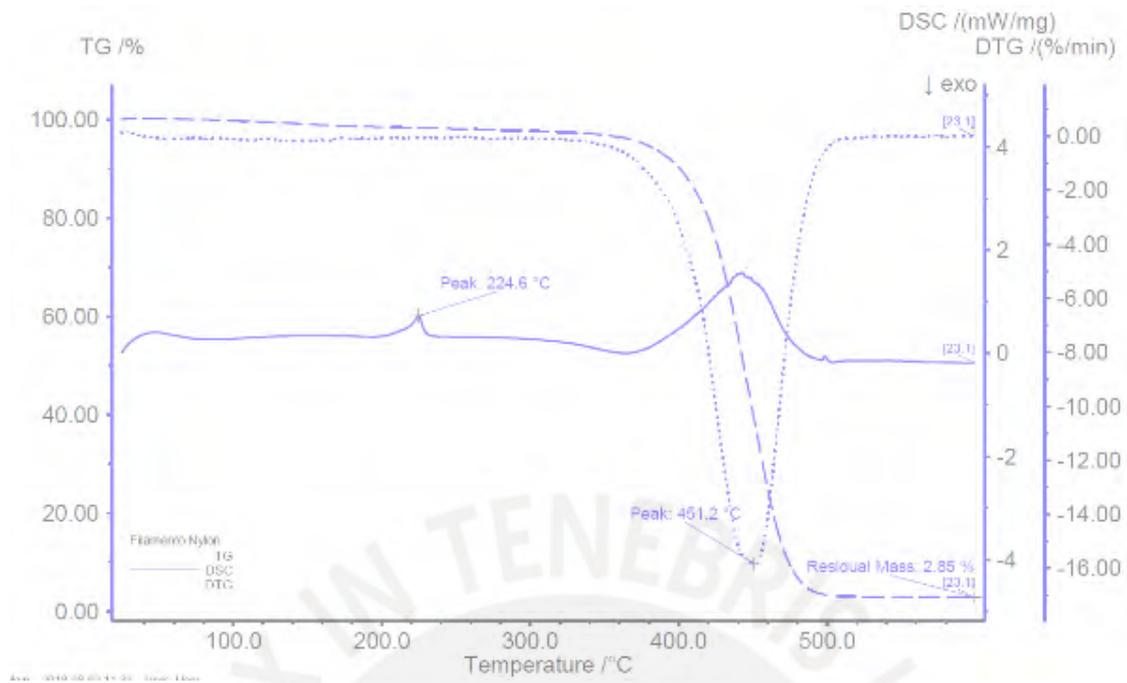


Figura 3.4.- Curva de DSC y TGA para la PA.

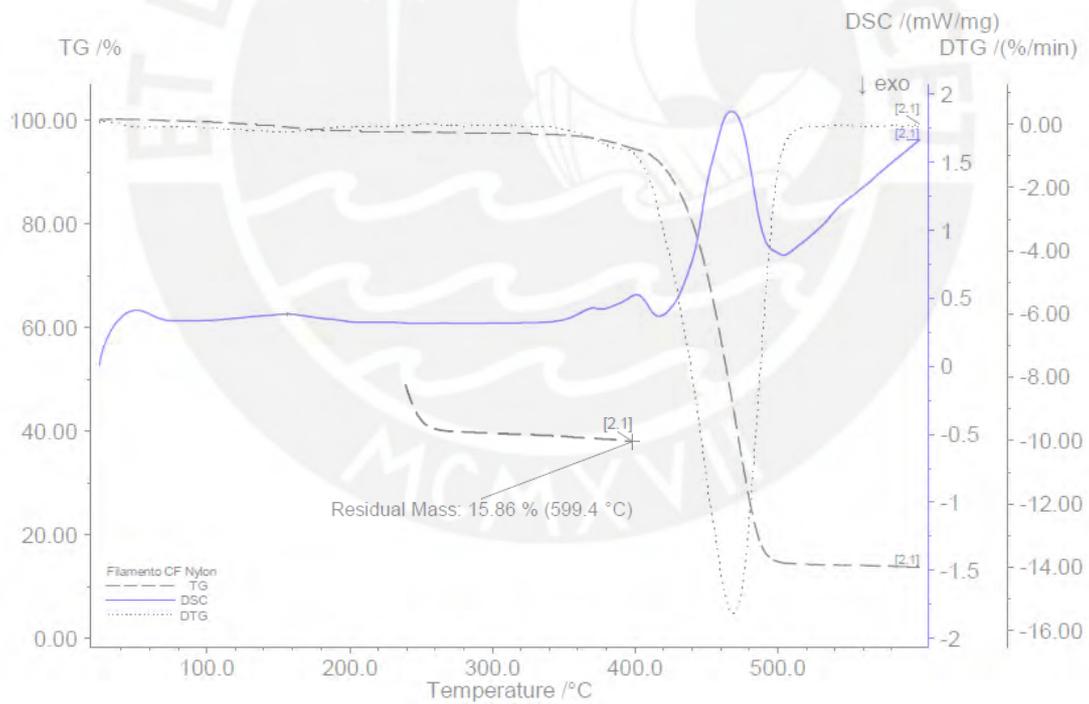


Figura 3.5.- Curva de DSC y TGA para la PA/CF.

La poliamida tendrá un comportamiento plástico (cauchoso) a temperaturas por encima de 105 °C. De manera análoga a un proceso de extrusión, las pruebas de impresión de probetas se realizaron por encima de la temperatura de fusión (las cuales hayan permitido extruir el material) y hasta la temperatura de inicio de la degradación, sin embargo, la temperatura máxima del equipo de impresión 3D es de 300°C, por lo que el valor máximo se definió con aquel valor que permitió un adecuado proceso de impresión. Es de esta forma como se definió el rango de temperaturas de impresión.

De estas curvas también es posible hallar el porcentaje de cristalinidad del polímero, donde a mayor porcentaje de cristalinidad, mejores serán las propiedades mecánicas. La poliamida es un material semicristalino y este valor se mide con la **ecuación 2**, donde:

ΔH_f : La entalpía medida en la zona de fusión.

ΔH_{100} : La entalpía medida en un estado 100% cristalino.

Ecuación 2.- Expresión para calcular el porcentaje de cristalinidad de un polímero.

$$\%C = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_{100}} \times 100 \%$$

De acuerdo con investigaciones pasadas [Klata, 2004], se puede considerar una entalpía específica para la poliamida o nylon 6 100% cristalino (ΔH_{100}) de 230 J/g, y hallando el área bajo la curva de la zona de fusión de los ensayos realizados se presenta en la **tabla 3.3** las entalpías calculadas y el porcentaje de cristalinidad.

Tabla 3.3.-Entalpías y porcentajes de cristalinidad.

Muestra	ΔH_f (J/g)	Cristalinidad (%)
PA (iOn Nylon)	29,87	12,99
PA/CF (Nylon/CF)	-	-

3.1.4 Ensayo de tracción de filamentos

Se realizaron ensayos de tracción a los filamentos de poliamida y poliamida reforzada con el fin de conocer las propiedades mecánicas de ambos materiales antes de ser impresos con los distintos parámetros de impresión.

Los resultados muestran que los filamentos de poliamida reforzada con fibras de carbono (PA/CF) presentan una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad aproximadamente 3 veces mayor que el filamento de poliamida (Tabla 3.4). Sin embargo, en la figura 3.6 se puede observar claramente que el filamento de poliamida presenta una mayor deformación unitaria con respecto al material reforzado, siendo aproximadamente 20 veces mayor.

Tabla 3.4.- Resistencia a la tracción de filamentos de poliamida y poliamida reforzada con fibras de carbono.

Material	Propiedad	Unidad	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)
PA	Resistencia a la tracción	MPa	36,93	0,67	1,8
	Módulo de elasticidad	MPa	593,3	27,95	4,7
	Deformación unitaria a la rotura	%	186,18	62,63	33,6
PA/CF	Resistencia a la tracción	MPa	118,1	0,62	0,5
	Módulo de elasticidad	MPa	2043,5	70,73	3,5
	Deformación unitaria a la rotura	%	9,54	0,4	4,2

De la figura 3.6 se puede ver que comparando el material reforzado con el puro, la inclusión de fibras de carbono a la poliamida resulta en un incremento de resistencia a la tracción y del módulo de elasticidad, pero disminuye la ductilidad y tenacidad como se concluye en otras investigaciones [Ning, 2015].

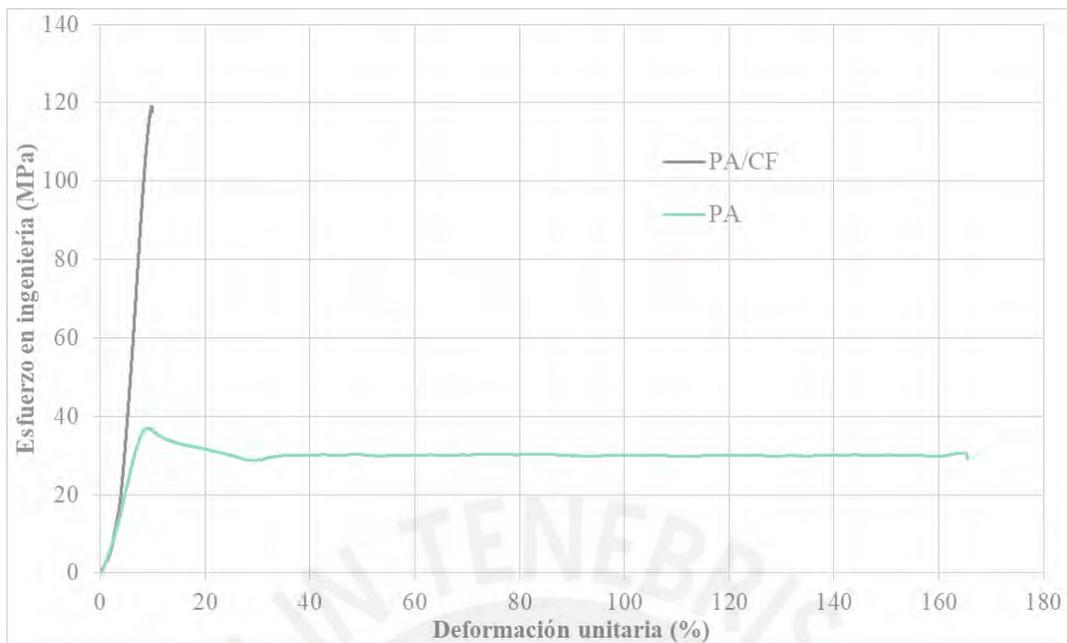


Figura 3.6.- Esfuerzo vs deformación unitaria para la PA y la PA/CF.

3.1.5 Determinación del tiempo de secado de los filamentos

Debido a que en las pruebas de impresión se presentaron problemas estéticos que podrían haber influido en los resultados de las pruebas mecánicas debido a las discontinuidades en las superficies, se analizó la higroscopicidad de la poliamida y poliamida reforzada con fibras de carbono. Esto se realizó en un horno de convección forzada a una temperatura de 70°C como se recomienda para estos materiales.

Se puede ver en la **figura 3.7** la curva pérdida de peso vs tiempo, donde se ve que la poliamida perdió 1,27% en masa luego de 360 minutos, aquí la curva empieza a tener una tendencia lineal, significando que el filamento no presenta restos de humedad. Es por ello que antes de trabajar con el filamento en la impresora 3D debe ser secado para evitar problemas como el de la **figura 2.21**.

Para la poliamida reforzada con fibras de carbono se tiene la curva de la **figura 3.8**, en esta se puede ver que el material perdió un 1,53% en masa luego de 330 minutos. Al imprimir con la PA/CF se podía apreciar en las impresiones un color negro más intenso. Una razón por la que el material reforzado pueda secar más rápido es debido a que posee menor contenido de matriz de poliamida, siendo este menos higroscópico que el filamento de poliamida pura.

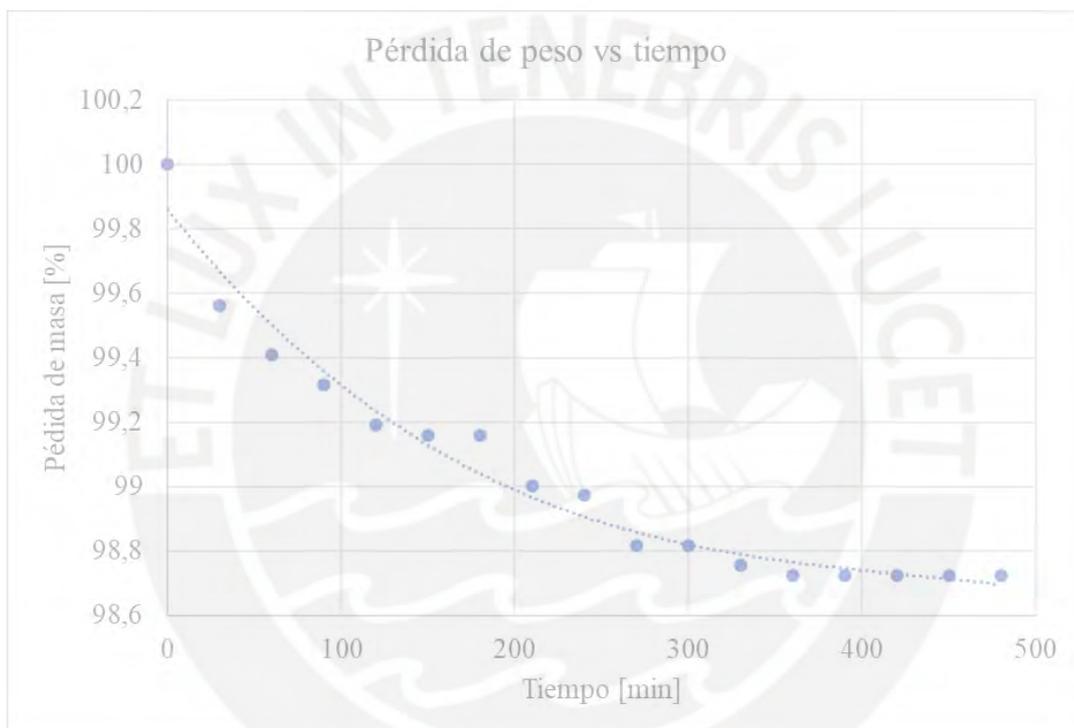


Figura 3.7.- Pérdida de masa vs tiempo del filamento de PA.

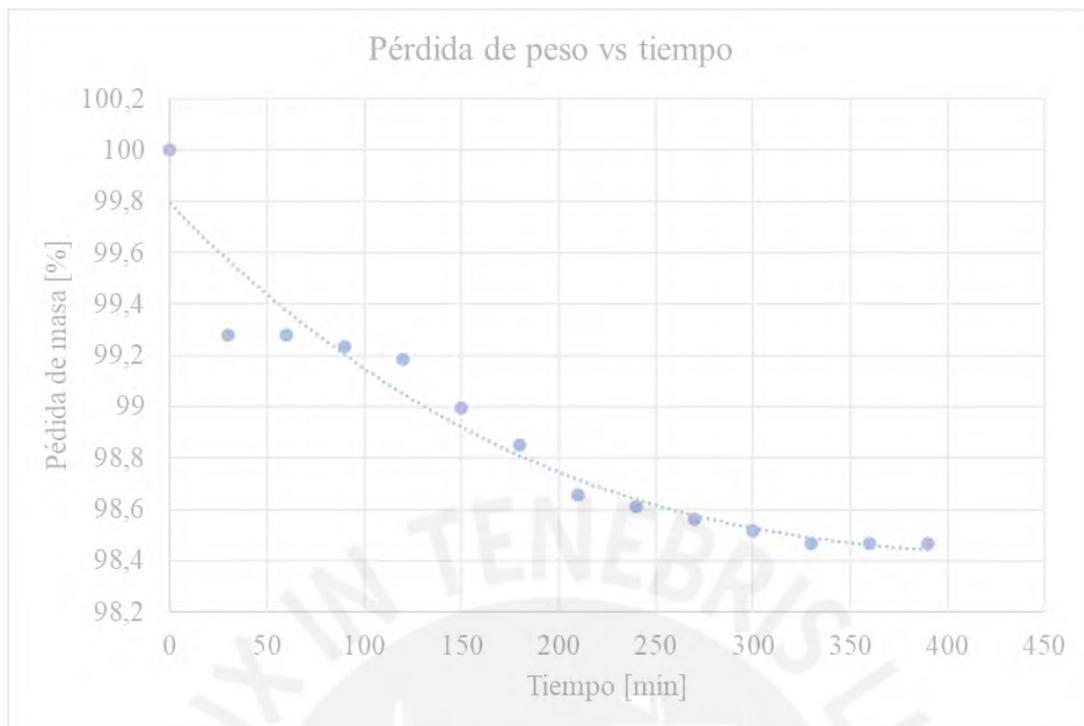


Figura 3.8.- Pérdida de masa vs tiempo del filamento de PA/CF.

3.2 Ensayo de tracción de probetas impresas.

Para el estudio de las variaciones de los diferentes parámetros de impresión en las propiedades mecánicas se realizaron ensayos de tracción. Se utilizó las diferentes combinaciones de parámetros mostrados en la **tabla 2.9**.

De los resultados de los ensayos de tracción de probetas impresas de poliamida, se puede observar que, a menor temperatura de impresión, siendo esta 240°C, se presenta la menor resistencia a la tracción, debido a que, como resultado de la velocidad de enfriamiento, no hay buena adherencia entre filamentos, obteniendo mayor cantidad de espacios sin material y por lo tanto actuando de concentradores de esfuerzos. Por otro lado, el mayor valor de resistencia a la tracción fue de 37,1 MPa, a una temperatura de 260°C, una velocidad de 40mm/s, mientras que el mayor valor del módulo de elasticidad fue de 1686 MPa para la misma configuración (arreglo L₂).

Se puede observar en la **tabla 3.5** que a temperaturas diferentes a 240°C, el valor de la resistencia a la tracción destaca a menores alturas de capa y en el patrón de impresión de líneas a [0°, 45°, 90°, 135°] debido a que estas poseen filamentos en dirección paralela al eje en que la carga es aplicada; sin embargo, en la configuración L8 se obtuvo un valor discrepante respecto a las configuraciones L7 y L9, siendo estos arreglos impresos bajo la misma altura de capa de 0,3 mm, esto se debe a que la temperatura de impresión utilizada en dicha configuración es la mayor (280°C), generando una buena adherencia entre capas. Además, en el proceso de deposición del material a alta temperatura existe un mejor proceso de adhesión debido a que la temperatura a la que se extruye el material está más alejada de la temperatura de fusión del material, obteniendo una unión que mejora la resistencia mecánica.

La velocidad de impresión también influye en la adherencia entre filamentos y capas del material, es por ello que a velocidades altas y menores temperaturas se obtiene una menor deposición del material, obteniendo una estructura más débil y que enfría de manera rápida debido a la baja temperatura de impresión. Este caso se puede ver en la configuración L9.

Del mismo modo que se realizó un análisis de la resistencia a la tracción, podemos hacerlo con el módulo de elasticidad, de donde se puede destacar que las configuraciones L2 y L4 presentan los mayores módulos de elasticidad al estar fabricados con el parámetro de líneas a [0°, 45°, 90° Y 135°], el cual presenta fibras en dirección a la línea de fuerza.

Tabla 3.5.- Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para probetas impresas de PA en diferentes configuraciones.

Arreglo	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Desv. Est.	CV(%)	Media	Desv. Est.	CV(%)
L1	17,82	0,29	1,3	981	17,7	1,81
L2	37,10	0,91	2,5	1686	31,5	1,87
L3	24,16	1,25	5,2	1159	7,8	0,68
L4	33,61	0,72	2,1	1275	42,2	3,31
L5	17,95	1,29	7,2	1152	12,7	1,11
L6	19,52	0,3	1,5	1117	47,6	4,26
L7	18,49	0,47	2,6	1308	40,4	3,08
L8	26,25	0,84	3,2	1201	37,8	3,14
L9	19,17	0,4	2,1	1239	43,1	3,48

Durante los ensayos realizados, también se estudió el efecto de la humedad en la resistencia a la tracción. Se dejó al ambiente cuatro probetas de PA de los arreglos L5, L6, L7, L8 y L9 para que estas absorban humedad por un día. Estas configuraciones fueron escogidas debido a que son las que toman menor tiempo de fabricación debido a la mayor altura de capa con las que fueron diseñadas.

Se obtuvo que la resistencia a la tracción disminuye aproximadamente 5 MPa y que el módulo de elasticidad también disminuye considerablemente, por otro lado, se obtuvo que la deformación unitaria a la rotura aumento de manera significativa; es decir, la humedad funciona como un plastificante, disminuyendo la plasticidad y también propiedades de resistencia y rigidez, pero aumentando la elongación y tenacidad.

En la **figura 3.9** se puede apreciar el comportamiento de una probeta seca y otra con humedad. Se puede apreciar que la máxima resistencia disminuye aproximadamente 5 MPa y que la deformación unitaria a la rotura es casi 9 veces mayor.

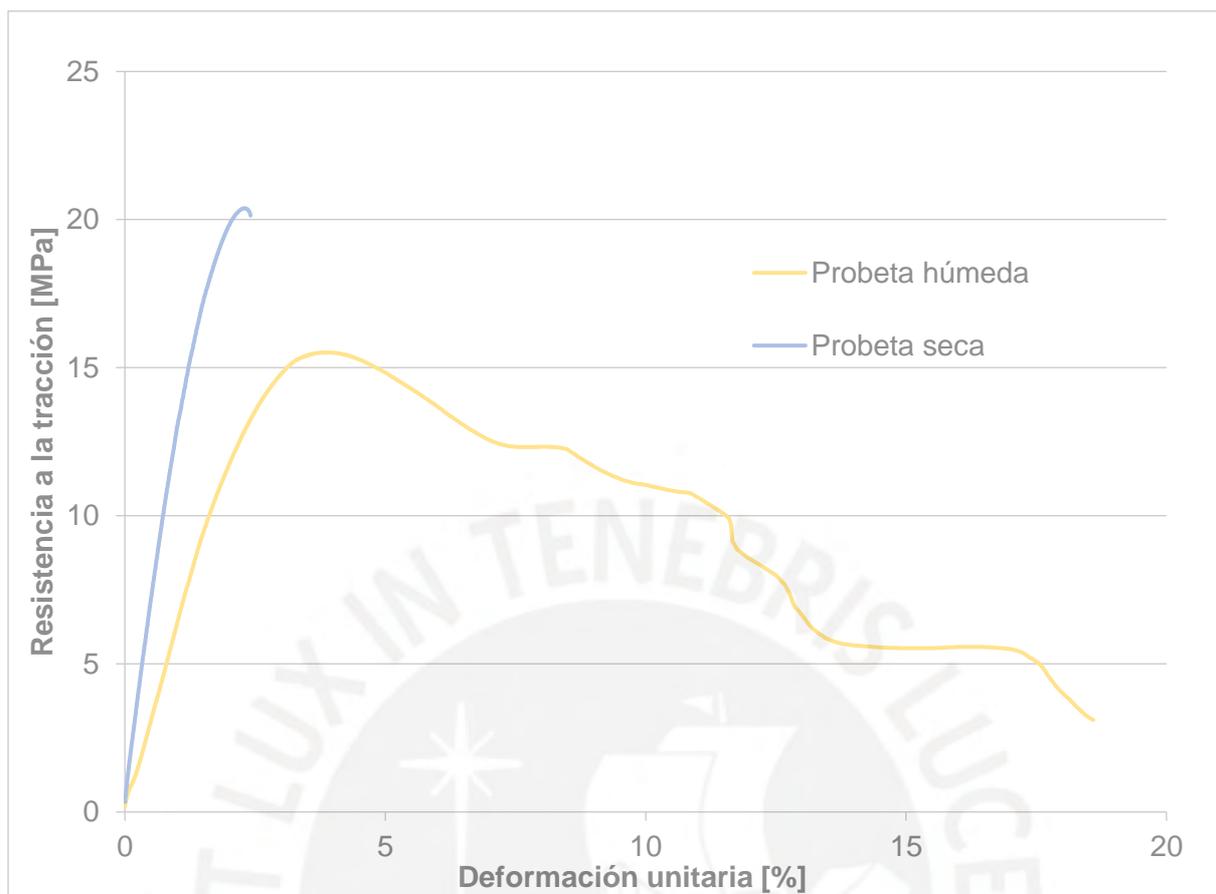


Figura 3.9.- Esfuerzo vs deformación para una probeta seca y otra con humedad en configuración #6.

En la **tabla 3.6** se muestran los resultados obtenidos para las probetas impresas a partir de poliamida reforzada con fibras de carbono (PA/CF) para las 9 configuraciones anteriormente mencionadas. Se obtuvo de igual manera que el patrón de líneas en las configuraciones L2, L4 y L9 presentan los mayores valores de resistencia a la tracción dentro de cada grupo de altura de capa, es decir que la configuración L2 sobresale entre los 3 experimentos de 0,1 mm de altura de capa, la L4 dentro de las de 0,2 mm de altura de capa y la L9 dentro de las de 0,3 mm de altura de capa.

Se observa que la resistencia a la tracción puede llegar hasta 76,51 MPa junto con un módulo de elasticidad de 3946 MPa, siendo estos valores mayores al doble comparado con una probeta

impresa del material sin refuerzo. Se aprecia que las fibras de carbono aumentan la rigidez de la poliamida. Además, la menor resistencia para ambos materiales fue de aproximadamente 18 MPa.

Tabla 3.6.- Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para probetas impresas de PA/CF en diferentes configuraciones.

Arreglo	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Desv. Est.	CV(%)	Media	Desv. Est.	CV(%)
L1	33,53	1,9	5,7	2474	123,4	4,99
L2	76,51	1,28	1,7	3946	87,5	2,22
L3	56,41	2,30	4,1	2820	10,6	0,38
L4	69,13	2,08	3,0	3176	51,5	1,62
L5	17,80	1,38	7,8	1238	52,3	4,22
L6	22,90	1,55	6,8	1524	35,4	2,32
L7	25,34	1,02	4,0	1703	24,8	1,46
L8	31,64	3,22	10,2	2022	16,6	0,82
L9	34,37	2,20	6,4	1826	52,5	2,88

Cabe resaltar que **en un experimento de Taguchi no se puede tomar decisiones a partir de la matriz presentada (Tablas 3.5 y 3.6)** y que el análisis realizado líneas atrás son ideas generales que nos ayudan a entender un poco mejor el comportamiento de los materiales impresos por esta tecnología. Para entender por completo este comportamiento y tener una idea concreta, se deben realizar distintos estudios, lo cual se realizó en la sección 3.3.

3.3 Influencia de los parámetros sobre las propiedades mecánicas

Para el estudio de la influencia de los parámetros de impresión sobre las propiedades mecánicas se utilizaron tres métodos: efectos principales, relación señal-ruido (S/N) y, por último, el análisis de varianza (ANOVA); con los cuales se puede realizar un mejor análisis de los resultados obtenidos en la sección anterior. El primer método permite hallar el orden de

importancia de los parámetros, así como también da a conocer la configuración óptima, mientras que los otros dos métodos permiten hallar el porcentaje de contribución de los parámetros estudiados sobre la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad.

3.3.1 Efectos principales

Con los resultados de los ensayos de tracción para los dos materiales estudiados, se determinó los efectos principales de los parámetros de impresión sobre la resistencia a la tracción, estos pueden ser apreciados en las **figuras 3.10 y 3.11**, representando el efecto de cada parámetro de manera individual. Se debe recordar que se ha asignado las letras **A, B, C** y **D** a cada parámetro y los números **1, 2 y 3** a los niveles de cada uno de éstos.

La **tabla 3.7** y **tabla 3.8** muestran los efectos principales de los valores promedios de la resistencia a la tracción para cada nivel de los parámetros. La diferencia entre los valores máximos y mínimos de la resistencia a la tracción (Delta) de cada parámetro de impresión nos indica el orden de influencia de los parámetros.

Se puede observar para el caso de la poliamida que el patrón de impresión es el parámetro más influyente en la obtención de la resistencia a la tracción, seguido de la temperatura de impresión, velocidad de impresión y finalmente la altura de capa, esto debido al delta entre valor máximo y mínimo para cada parámetro (**tabla 3.7**). Se realizó el mismo análisis en las probetas impresas con poliamida reforzada con fibras de carbono, en donde se puede ver que el patrón de impresión es también la variable más influyente en los resultados obtenidos para dicho ensayo, seguido por la altura de capa, la temperatura de impresión y finalmente la velocidad de impresión o deposición.

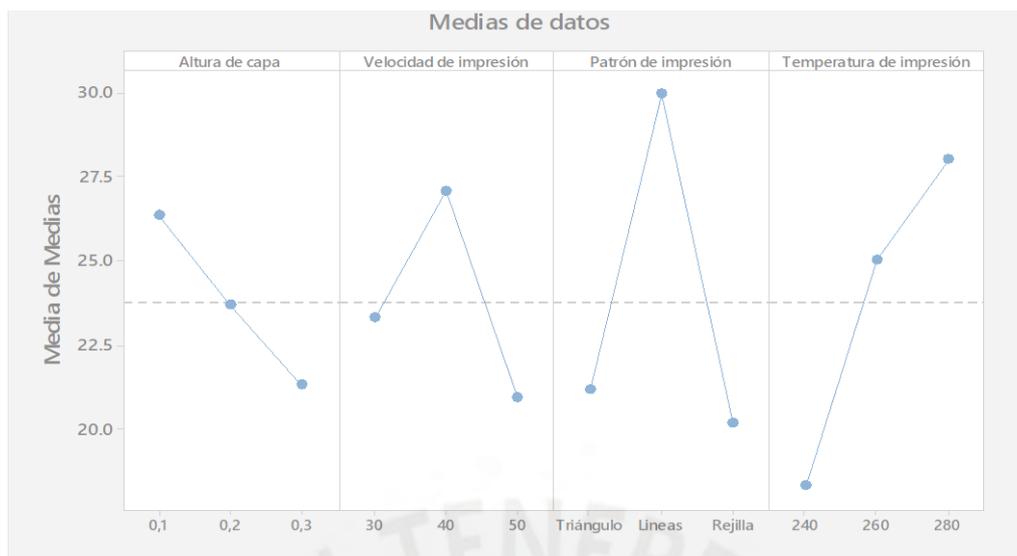


Figura 3.10.- Efectos principales para medias de resistencia a la tracción obtenidas en probetas de PA.

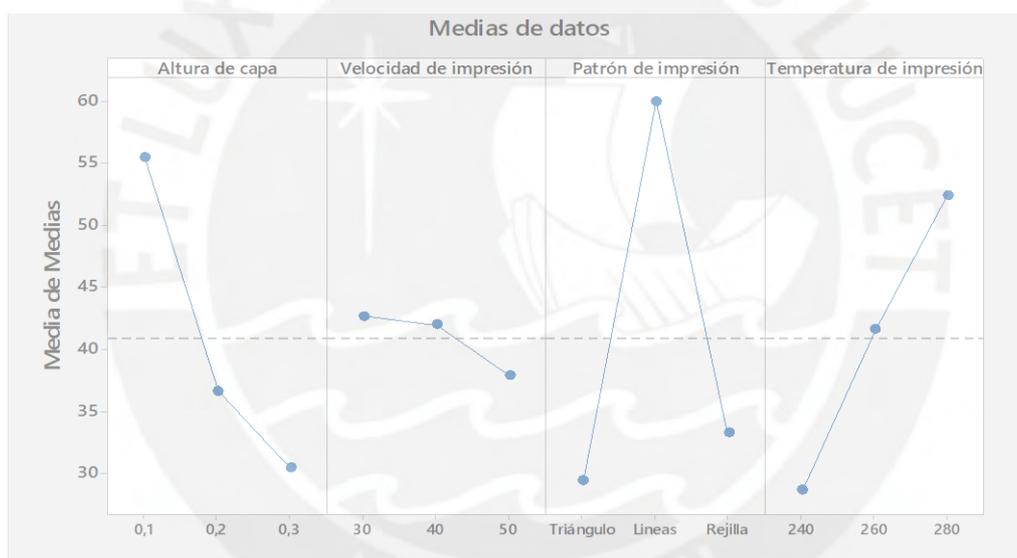


Figura 3.11.- Efectos principales para medias de resistencia a la tracción obtenidas en probetas de PA/CF.

Tabla 3.7.- Resultados de efectos principales para resistencia a la tracción en probetas de poliamida.

PA	Nivel			Delta	Importancia	
	Parámetro	1	2			3
A	Altura de capa	26,36	23,5	21,3	5,06	4
B	Velocidad de impresión	23,31	26,9	20,95	5,95	3
C	Patrón de impresión	21,2	29,96	20	9,96	1
D	Temperatura de impresión	18,12	25,04	28	9,88	2
Promedio (m)		23,78				

Tabla 3.8.- Resultados de efectos principales para resistencia a la tracción en probetas de PA/CF.

PA/CF	Nivel			Delta	Importancia
	1	2	3		
A Altura de capa	55,48	36,61	30,49	24,99	2
B Velocidad de impresión	42,66	41,98	37,93	4,73	4
C Patrón de impresión	29,35	60,04	33,18	30,69	1
D Temperatura de impresión	28,6	41,58	52,4	23,8	3
Promedio (m)	40,85				

Según el estudio de efectos principales, se tiene que la configuración de parámetros óptima se determina utilizando los máximos puntos, siendo para la poliamida **A₁B₂C₂D₃**, la altura de capa de 0,1 mm, la velocidad de 40 mm/s, el patrón de líneas (capas orientadas a 0°, 45°, 90° y 135°) y la temperatura de impresión 280°C. Análogamente, para la poliamida reforzada con fibras de carbono se tiene que la combinación **A₁B₁C₂D₃** producirá la probeta de máxima resistencia a la tracción.

De estos resultados, se puede afirmar que al igual que a [Lee, 2005], la mejor configuración tiene una altura de capa de 0,1 mm. Otras investigaciones [Alafaghani, 2017] muestran que la resistencia a la tracción aumenta al tener una mayor temperatura, lo cual se explica debido a la mejor fusión que existe en la capa depositada y entre las capas. También se aprecia que la velocidad no afecta tanto a estos resultados, lo cual se puede ver mejor en la **figura 3.11** relacionado con la poliamida reforzada con fibras de carbono, pues el delta entre puntos máximo y mínimo es pequeño. Sin embargo, se discrepa con que el patrón de impresión no influye en los resultados. Otros estudios ([Tymrak, 2014], [Sood, 2010]) muestran que el patrón de impresión sí afecta la resistencia a la tracción como en este caso de estudio.

Se realizó el mismo análisis para el módulo de elasticidad, en este se puede ver que la configuración óptima para maximizar el módulo elástico con el material de poliamida pura es **A₁B₂C₂D₂** (**Figura 3.12**), mientras que para la poliamida reforzada con fibras de carbono es **A₁B₁C₂D₃** (**Figura 3.13**) la cual es la misma configuración para maximizar la resistencia a la

tracción con este último material. Podemos observar que el orden de importancia varía entre la PA y la PA/CF, siendo para la PA el patrón de impresión el parámetro de mayor importancia, seguido de la temperatura de impresión, la velocidad de impresión y finalmente la altura de capa (**Tabla 3.9**). En el caso de la poliamida reforzada con fibras de carbono se aprecia una diferencia, pues la altura de capa se vuelve el parámetro de mayor importancia, seguido del patrón de impresión, la temperatura y finalmente la velocidad de impresión (**Tabla 3.10**).

Tabla 3.9.- Resultados de efectos principales para módulos de elasticidad en probetas de PA.

PA	Nivel			Delta	Importancia
	Parámetro	1	2		
A Altura de capa	1284	1153	1229	131	4
B Velocidad de impresión	1204	1310	1152	158	3
C Patrón de impresión	1083	1340	1244	257	1
D Temperatura de impresión	1124	1341	1202	217	2
Promedio (m)	1222,2				

Tabla 3.10.- Resultados de efectos principales para módulos de elasticidad en probetas de PA/CF.

PA/CF	Nivel			Delta	Importancia
	Parámetro	1	2		
A Altura de capa	2979	1950	1812	1167	1
B Velocidad de impresión	2376	2290	2075	301	4
C Patrón de impresión	1983	2839	1918	921	2
D Temperatura de impresión	1770	2365	2606	836	3
Promedio (m)	2246,9				

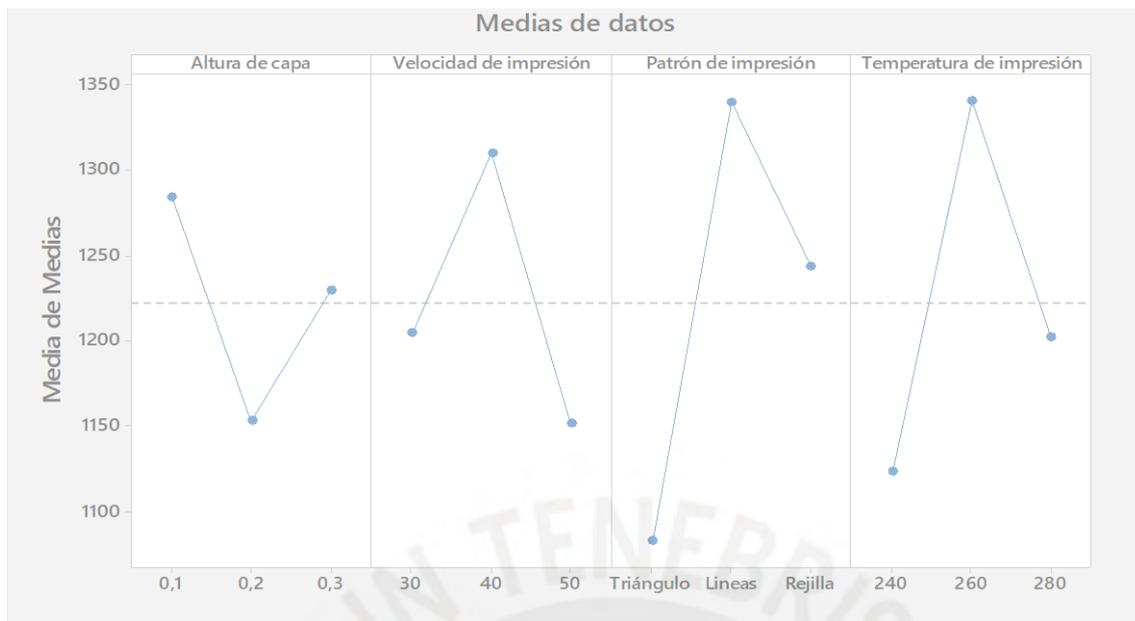


Figura 3.12.- Efectos principales para medias de módulo de elasticidad obtenidas en probetas de PA.

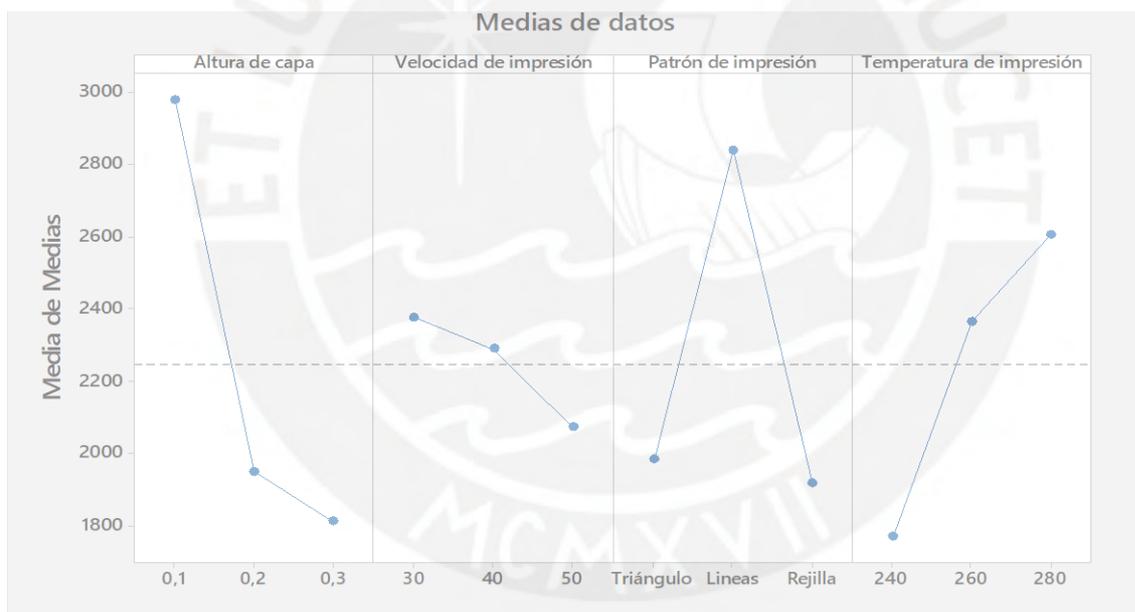


Figura 3.13.- Efectos principales para medias de módulos de elasticidad obtenidas en probetas de PA/CF.

3.3.2 Relación señal-ruido

La relación señal-ruido (S/N : *signal to noise ratio*) es una medida utilizada para identificar parámetros de diseño y proceso que minimizan los efectos de los factores que no se pueden controlar (ruido o error).

La categoría “más grande es mejor” (*HB: Higher is Better*) es empleada con el objeto de maximizar las propiedades mecánicas; donde la relación S/N se calcula con la **ecuación 3**:

Ecuación 3.- Expresión para calcular la relación S/N de tipo “más grande es mejor”.

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{Y_i^2} \right)$$

La relación señal-ruido para los 9 experimentos de la matriz ortogonal L₉ de ambos materiales respecto a la resistencia a la tracción se muestra en la **tabla 3.11**, mientras que las **tablas 3.12 y 3.13** se obtienen a partir de la tabla anterior. En estas dos últimas, se muestra la relación S/N para los 3 niveles de cada parámetro, así como el porcentaje de contribución del parámetro sobre la resistencia a la tracción.

En la **tabla 3.11** se observa que el mayor valor de S/N se da en la configuración L2, así como también es esta configuración la de mayor resistencia a la tracción. Al realizar el análisis de las medias por cada parámetro se obtienen las **figuras 3.14 y 3.15**, este tipo de gráfico tiene como característica que se parece mucho al de efectos principales de Taguchi (**figuras 3.10 y 3.11**), por lo que podemos validar los valores obtenidos para cada parámetro.

Tabla 3.11.- Relación S/N para resultados de resistencia a la tracción para las 9 configuraciones.

#Arreglo	Altura de capa (mm)	Velocidad de impresión (mm/s)	Patrón de impresión y ángulo (°)	Temperatura de Impresión (°C)	S/N PA	S/N PA/CF
1	0,1	30	Triángulo [30]	240	25,03	30,47
2	0,1	40	Líneas [0/45/90/135]	260	31,38	37,67
3	0,1	50	Rejilla [45]	280	27,63	35,01
4	0,2	30	Líneas [0/45/90/135]	280	30,52	36,78
5	0,2	40	Rejilla [45]	240	24,69	24,96
6	0,2	50	Triángulo [30]	260	25,81	27,15
7	0,3	30	Rejilla [45]	260	25,33	28,06
8	0,3	40	Triángulo [30]	280	28,37	29,9
9	0,3	50	Líneas [0/45/90/135]	240	25,65	30,71

En la **tabla 3.12** se muestra la relación S/N para los 3 niveles de cada parámetro, así como el porcentaje de contribución del parámetro sobre la resistencia a la tracción. Se puede observar que con este método se obtiene para la PA que la temperatura de impresión es el parámetro de mayor influencia con un 35,9%, seguido del patrón de impresión con un 31,8% y finalmente la velocidad de impresión y la altura de capa con 17,2% y 15,1% respectivamente, mientras que para la PA/CF (**Tabla 3.13**), el parámetro de mayor influencia es el patrón de impresión, con 34,7%, seguido de la temperatura de impresión con un 30,9%, cercano a este valor se encuentra la altura de capa con 28,7% y finalmente la velocidad con un 5,6% del total, por lo que podríamos decir que la velocidad de deposición en el material reforzado no tiene mucha influencia. Se recomienda usar valores más altos de velocidad de impresión para reducir el tiempo de impresión sin una pérdida considerable de la resistencia a la tracción.

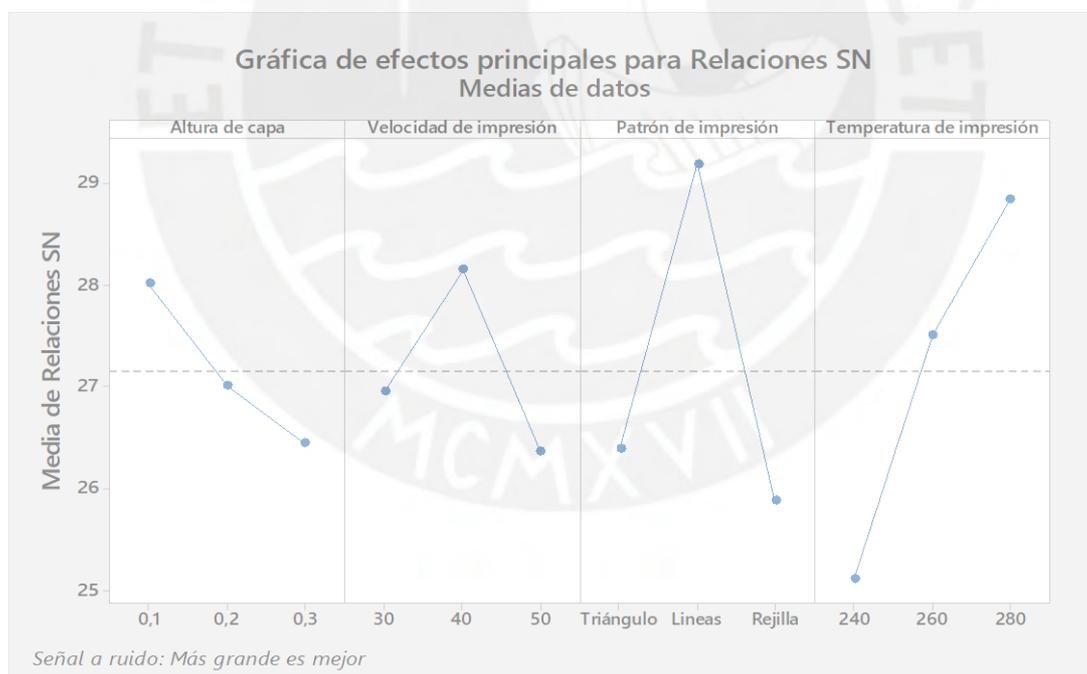


Figura 3.14.- Gráfico de medias para la relación S/N de cada parámetro sobre la resistencia a la tracción para el material PA.

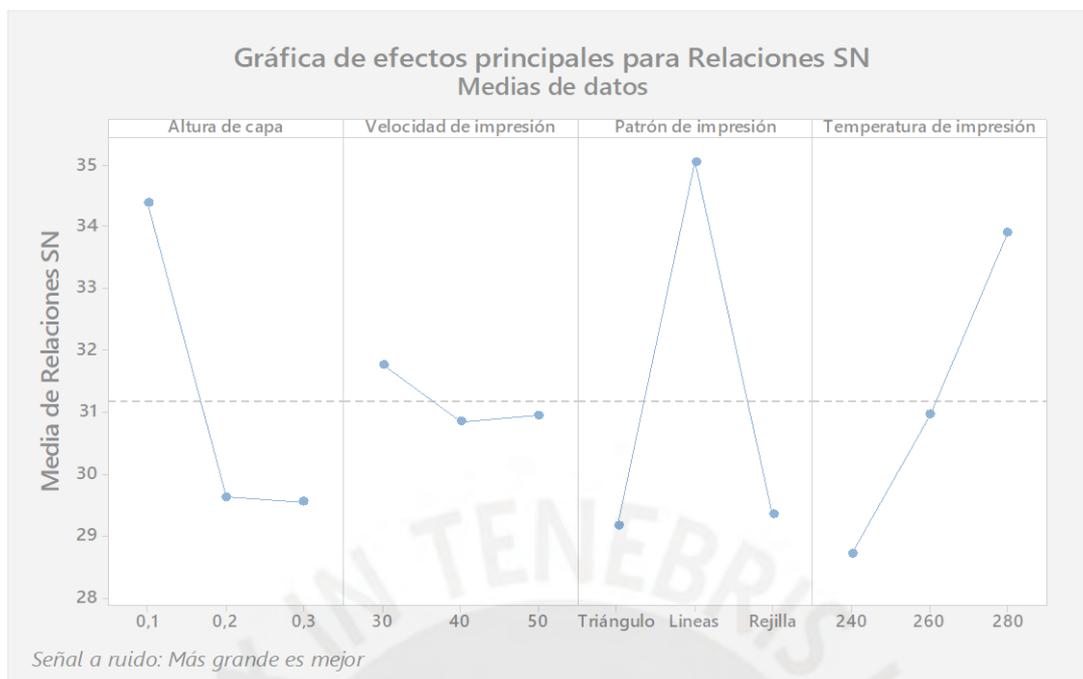


Figura 3.15.- Gráfico de medias para la relación S/N de cada parámetro sobre la resistencia a la tracción para el material PA/CF.

Tabla 3.12.- Relación señal ruido y porcentaje de contribución por cada parámetro sobre la resistencia a la tracción para PA.

	Nivel	Relación S/N	Promedio S/N	Delta	Orden Importancia	Contribución (%)	
Altura de capa	1	0,1	25,03 31,38 27,63	28,02	4	15,1	
	2	0,2	30,52 24,69 25,81				27,01
	3	0,3	25,33 28,37 25,65				26,45
Velocidad	1	30	25,03 30,52 25,33	28,15	3	17,2	
	2	40	31,38 24,69 28,37				26,96
	3	50	27,63 25,81 25,65				26,36
Patrón de impresión	1	T	25,03 25,81 28,37	29,18	2	31,8	
	2	L	31,38 30,52 25,65				26,40
	3	G	27,63 24,69 25,33				25,88
Temperatura de impresión	1	240	25,03 24,69 25,65	28,84	1	35,9	
	2	260	31,38 25,81 25,33				25,12
	3	280	27,63 30,52 28,37				27,51

Tabla 3.13.- Relación señal ruido y porcentaje de contribución por cada parámetro sobre la resistencia a la tracción para PA/CF.

	Nivel		Relación S/N			Promedio S/N	Delta	Orden	Contribución (%)
						Promedio S/N		Importancia	
Altura de capa	1	0,1	30,48	37,67	35,01	34,39	4,86	3	28,7
	2	0,2	36,86	24,96	27,15	29,66			
	3	0,3	28,06	29,90	30,62	29,52			
Velocidad	1	30	30,48	36,86	28,06	31,80	0,95	4	5,6
	2	40	37,67	24,96	29,90	30,84			
	3	50	35,01	27,15	30,62	30,93			
Patrón de impresión	1	T	30,48	27,15	29,90	29,17	5,87	1	34,7
	2	L	37,67	36,86	30,62	35,05			
	3	G	35,01	24,96	28,06	29,34			
Temperatura de impresión	1	240	30,48	24,96	30,62	28,69	5,24	2	30,9
	2	260	37,67	27,15	28,06	30,96			
	3	280	35,01	36,86	29,90	33,92			

Al igual que con el estudio de los efectos principales, se puede ver que las mejores configuraciones (debido al mayor S/N) son nuevamente $A_1B_2C_2D_3$ para la poliamida y $A_1B_1C_2D_3$ para la poliamida reforzada con fibras de carbono.

Algunas investigaciones [Martí, 2017] muestran que, a mayor velocidad de deposición, la resistencia a la tracción aumenta, lo cual es falso para nuestro caso de estudio, esto puede ser debido al tipo de material utilizado en su investigación. También afirma que el tener hilos alineados con la línea de fuerza hace que el material sea más resistente, por lo que el patrón de líneas es el indicado para mejorar la resistencia.

Se realizó el mismo análisis de relación señal-ruido para el módulo de elasticidad, en este se puede ver que la configuración L_2 es también la configuración más robusta (mayor S/N) para ambos materiales (Tabla 3.14).

En las tablas 3.15 y 3.16 se muestra la relación S/N para los 3 niveles de cada parámetro, así como el porcentaje de contribución del parámetro sobre el módulo de elasticidad. Se puede observar que con este método se obtiene para la PA que el patrón de impresión es el parámetro de mayor influencia con un 35,6%, seguido de la temperatura de impresión con 28,5%, la

velocidad de impresión con 20,4% y la altura de capa con 15,5% (Tabla 3.15), mientras que para la PA/CF (Tabla 3.16), el parámetro de mayor influencia es la altura de capa con 33,6%, seguido de la temperatura de impresión con 28,5%, el patrón de impresión con 28,1% y finalmente la velocidad con un 9,9% del total. De estos resultados se puede observar que el porcentaje de contribución es más uniforme en la poliamida que en el material reforzado, donde se ve claramente en este último que la velocidad no afecta mucho la magnitud de la respuesta.

En los gráficos de efectos principales de relaciones S/N (Figuras 3.16 y 3.17) se obtiene que las configuraciones óptimas son las mismas anteriormente halladas por el método de efectos principales, siendo para el material poliamida $A_1B_2C_2D_2$, mientras que para la poliamida reforzada con fibras de carbono es $A_1B_1C_2D_3$, con lo que podemos confirmar nuestros resultados nuevamente al obtener las mismas tendencias.

Tabla 3.14.- Relación S/N para resultados de módulo de elasticidad para las 9 configuraciones.

# Arreglo	Altura de capa (mm)	Velocidad de impresión (mm/s)	Patrón de impresión y ángulo (°)	Temperatura de impresión (°C)	S/N PA	S/N PA/CF
1	0,1	30	Triángulo [30]	240	60,15	67,42
2	0,1	40	Líneas [0/45/90/135]	260	64,02	71,37
3	0,1	50	Rejilla [45]	280	61,65	69,04
4	0,2	30	Líneas [0/45/90/135]	280	61,77	69,58
5	0,2	40	Rejilla [45]	240	61,26	61,44
6	0,2	50	Triángulo [30]	260	60,46	64,17
7	0,3	30	Rejilla [45]	260	62,56	64,75
8	0,3	40	Triángulo [30]	280	61,23	65,78
9	0,3	50	Líneas [0/45/90/135]	240	61,36	64,83

Tabla 3.15.- Relación señal ruido y porcentaje de contribución por cada parámetro sobre el módulo elástico para PA.

	Nivel		Relación S/N			Promedio S/N	Delta	Orden Importancia	Contribución (%)
Altura de capa	1	0,1	60,15	64,02	61,65	61,94	0,77	4	15,5
	2	0,2	61,77	61,26	60,46	61,16			
	3	0,3	62,56	61,23	61,36	61,72			
Velocidad	1	30	60,15	61,77	62,56	61,49	1,02	3	20,4
	2	40	64,02	61,26	61,23	62,17			
	3	50	61,65	60,46	61,36	61,16			
Patrón de impresión	1	T	60,15	60,46	61,23	60,61	1,77	1	35,6
	2	L	64,02	61,77	61,36	62,38			
	3	G	61,65	61,26	62,56	61,83			
Temperatura de impresión	1	240	60,15	61,26	61,36	60,92	1,42	2	28,5
	2	260	64,02	60,46	62,56	62,34			
	3	280	61,65	61,77	61,23	61,55			

Tabla 3.16.- Relación señal ruido y porcentaje de contribución por cada parámetro sobre el módulo elástico para PA/CF.

	Nivel		Relación S/N			Promedio S/N	Delta	Orden Importancia	Contribución (%)
Altura de capa	1	0,1	67,42	71,37	69,04	34,39	4,21	1	33,6
	2	0,2	69,58	61,44	64,17	29,66			
	3	0,3	64,75	65,78	64,83	29,52			
Velocidad	1	30	67,42	69,58	64,75	31,80	1,24	4	9,9
	2	40	71,37	61,44	65,78	30,84			
	3	50	69,04	64,17	64,83	30,93			
Patrón de impresión	1	T	67,42	64,17	65,78	29,17	3,52	3	28,1
	2	L	71,37	69,58	64,83	35,05			
	3	G	69,04	61,44	64,75	29,34			
Temperatura de impresión	1	240	67,42	61,44	64,83	28,69	3,57	2	28,5
	2	260	71,37	64,17	64,75	30,96			
	3	280	69,04	69,58	65,78	33,92			

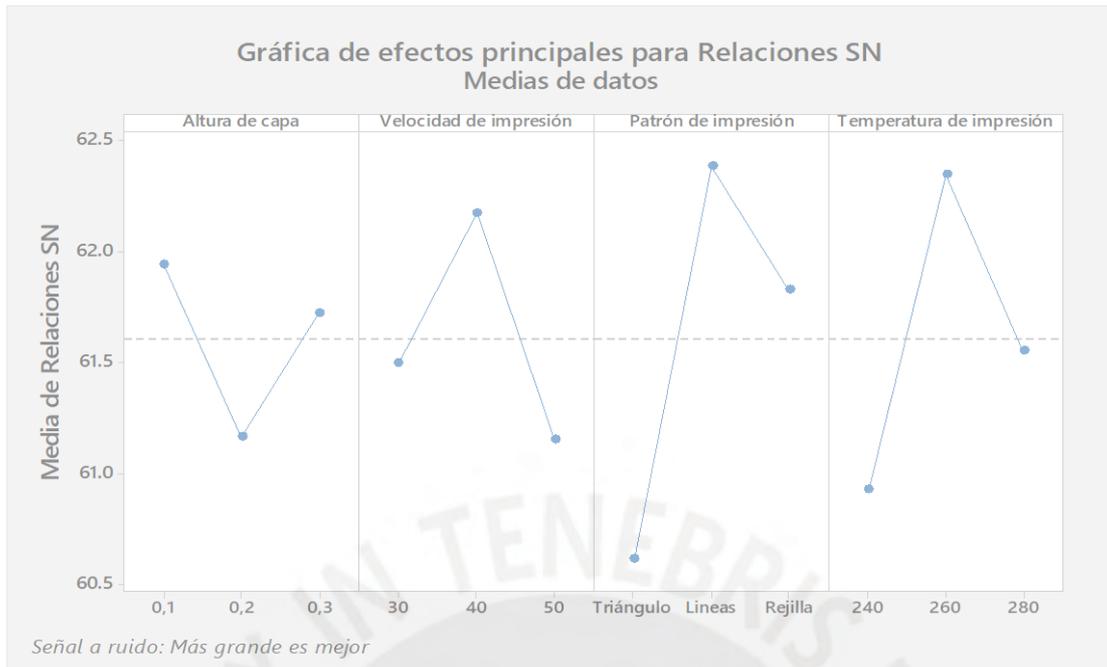


Figura 3.16.- Medias de la relación S/N de cada parámetro sobre el módulo elástico para el material PA.

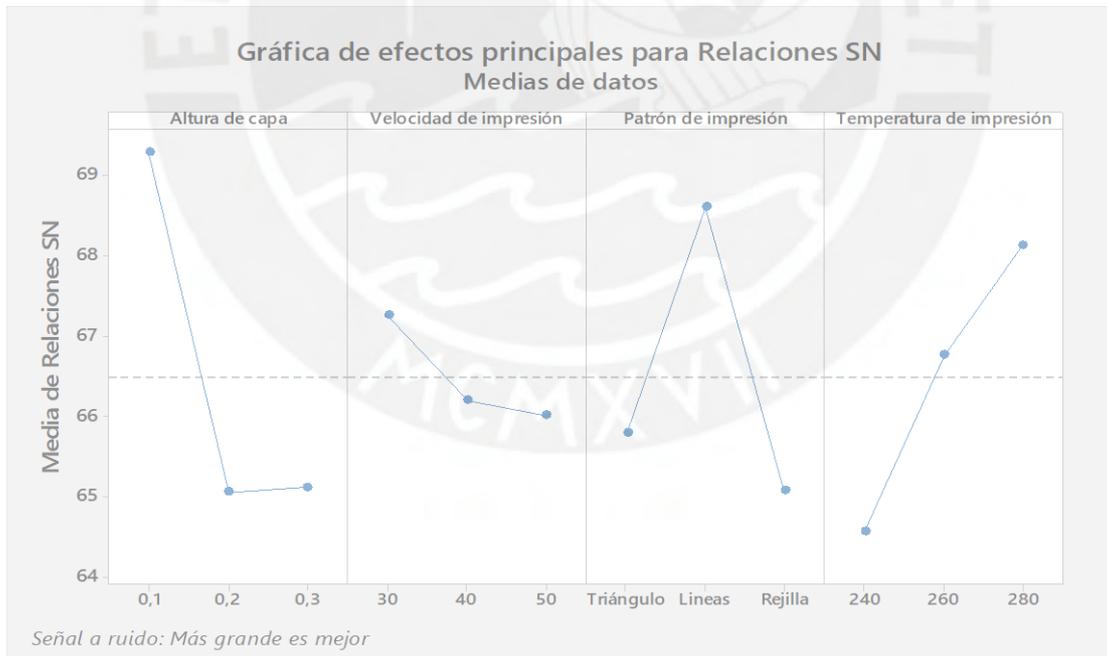


Figura 3.17.- Medias de la relación S/N de cada parámetro sobre el módulo elástico para el material PA/CF.

3.3.3 Análisis de varianza (ANOVA)

La validación de estos resultados también se realizó con el análisis de varianza (ANOVA). El ANOVA consiste en separar la variación total en partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento [Gutiérrez Pulido, 2008]. Este análisis se realiza utilizando la fuente de variabilidad (FV), la suma de cuadrados (SC), los grados de libertad (GL), el cuadrado medio (CM) y el estadístico de prueba (F_0), donde finalmente se puede obtener el grado de contribución de cada parámetro de impresión y aceptar o rechazar la hipótesis de igualdad de medias al comparar el estadístico de prueba con el percentil de la distribución F (estadístico de Fisher), el cual es obtenido de una tabla que se muestra en el **ANEXO 3**. Para este análisis se supone que las variables de respuesta se distribuyen de manera normal, con varianza constante y que las mediciones son independientes entre sí.

La hipótesis nula que se planteó fue $H_0: \gamma_i = 0$, lo que significa que no hay efecto significativo de un factor (parámetro de impresión) sobre la variable de respuesta (resistencia a la tracción o módulo de elasticidad). Con el ANOVA, al igual que con la relación S/N, también se pudo determinar el efecto individual de cada parámetro de impresión. Se procedió a calcular la suma total de cuadrados (SCT) de las observaciones (experimentos) mediante la **ecuación 4**, luego se calculó la suma de cuadrados por cada factor (SC_{TRAT}) con la **ecuación 5**. Estos dos valores hallados al ser restados dan como resultado el llamado error, que mide la variación dentro de los factores mostrado en la **ecuación 6**. Para poder calcular lo mencionado se debe tener en cuenta las siguientes cantidades de interés:

- $Y_{i\bullet}$ = Suma de las observaciones del tratamiento i .
- $\bar{Y}_{i\bullet}$ = Media de las observaciones del i -ésimo tratamiento.
- $Y_{\bullet\bullet}$ = Suma total de las $N = n_1 + n_2 + \dots + n_k$ mediciones.
- $\bar{Y}_{\bullet\bullet}$ = Media global o promedio de todas las observaciones.

Ecuación 4.- Ecuación para calcular la suma de cuadrados totales (SCT).

$$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (Y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$$

Ecuación 5.- Ecuación para calcular la suma de cuadrados de un factor (SC_{TRAT})

$$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_{i.}^2}{n_i} - \frac{Y_{..}^2}{N}$$

Ecuación 6.- Ecuación para calcular la suma de cuadrados del error (SC_E)

$$SC_T = SC_{TRAT} + SC_E$$

Ecuación 7.- Ecuación para calcular el cuadrado medio (CM)

$$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k-1}$$

Ecuación 8.- Ecuación para hallar el número de grados de libertad total.

$$f_T = n \times r - 1$$

Se procedió a hallar el cuadrado medio (CM) a partir de la suma de cuadrados y de los grados de libertad (**Ecuación 7**). Los grados de libertad son una medida de la cantidad de información que puede ser determinado de forma única a partir de un conjunto de datos. Los grados de libertad para nuestros factores que poseen 3 niveles, tendrán 1 grado de libertad menos debido a que el nivel A₁ se comparará con A₂ Y A₃, no pudiendo compararse a sí mismo. En lo experimental, el número de grados de libertad se halla utilizando la **ecuación 8**, donde “n” es el número de experimentos y “r” es el número de repeticiones [Roy, 2010]. Siendo en este caso 9 experimentos y 5 repeticiones, teniendo un total de 44 grados de libertad. De la misma manera que se halló la suma de cuadrados del error (SC_E), se hallan los grados de libertad de este, mediante la resta se obtiene 36 grados de libertad. Luego de tener estos valores, se halló el porcentaje de contribución mediante una división entre la suma de cuadrados por tratamiento y la suma de cuadrados totales y finalmente se halló el estadístico de prueba F₀, valor que se

comparó con el estadístico de Fisher que se halla mediante tablas con datos de entrada como el número de grados de libertad del numerador (en este caso de cada tratamiento) y del denominador (error) y el porcentaje de confiabilidad el cual es del 95%.

En la **tabla 3.17** se muestran los resultados del ANOVA para los parámetros de impresión en probetas fabricadas con poliamida. Se puede ver que el porcentaje de contribución de los parámetros corresponde al análisis de efectos principales en la **figura 3.10**, siendo el parámetro de mayor contribución el patrón de impresión, con un porcentaje de 41,24%, seguido de la temperatura de impresión con un 35,84%, la velocidad de impresión con un 12,56% y finalmente la altura de capa con un 9,03%. Luego el estadístico de prueba F_0 de cada parámetro es un valor mucho mayor al percentil de la distribución de Fisher de 3,32, por lo que se puede rechazar la hipótesis de igualdad de medias, indicando que la importancia de la variación de parámetros es significativa sobre la resistencia a la tracción.

En la **tabla 3.18** se muestra los resultados del mismo análisis de varianza aplicado en los parámetros de impresión de las probetas impresas en poliamida reforzada con fibras de carbono. En este análisis se obtuvo los mismos resultados que el mostrado en la **figura 3.11**, pues el valor de porcentaje de contribución más alto le corresponde al patrón de impresión con un 46,40%, seguido de la altura de capa con un 28,17%, luego la temperatura de impresión con un 23,57% y finalmente la velocidad de impresión con un 1,09%. Luego, al comparar el estadístico de prueba F_0 con el percentil de distribución de Fisher; el cual es también hallado al definir una confiabilidad del 95%, se puede afirmar que se rechaza la hipótesis de igualdad de medias al igual que en el primer caso, indicando que sí existe una importancia en la variación de parámetros de impresión sobre la resistencia a la tracción.

Tabla 3.17.- ANOVA de resistencia a la tracción para probetas impresas en PA.

FV	SC	GL	CM	% Contribución	F0	F(0,05;2;36)
Altura de capa	193,98	2	96,99	9,03	122,59	3,32
Velocidad de impresión	269,81	2	134,91	12,56	170,52	3,32
Patrón de impresión	885,97	2	442,99	41,24	559,92	3,32
Temperatura de impresión	770,01	2	385,01	35,84	486,64	3,32
Error	28,48	36	0,79	1,33		
Total	2 148,26	44		100		

Tabla 3.18.- ANOVA de resistencia a la tracción para probetas impresas en PA/CF.

FV	SC	GL	CM	% Contribución	F0	F(0,05;2;36)
Altura de capa	5 091,74	2	2 545,87	28,17	654,21	3,32
Velocidad de impresión	196,68	2	98,34	1,09	25,27	3,32
Patrón de impresión	8 386,19	2	4 193,09	46,40	1 077,49	3,32
Temperatura de impresión	4 259,78	2	2 129,89	23,57	547,31	3,32
Error	140,09	36	3,89	0,78		
Total	18 074,48	44		100		

Realizando el análisis de varianza para determinar el grado de contribución de los parámetros sobre el módulo elástico, se obtuvo que para el material poliamida el parámetro con mayor influencia es el patrón de impresión con un 32,93%, seguido de la temperatura de impresión con 23,06%, la velocidad de impresión con 12,70% y finalmente la altura de capa con 8,47% (Tabla 3.19). En la tabla 3.20 se muestran los resultados para el material reforzado con fibras de carbono, aquí se obtuvo que la altura de capa es el parámetro de mayor influencia representando un 44,57%, seguido del patrón de impresión con 28,96%, la temperatura de impresión con un 20,33% y finalmente la velocidad de impresión con 2,64%.

En el caso del material poliamida podemos observar que existe una “contribución del error” de aproximadamente 22%, este valor al ser tan alto y en algunos casos mayor a la contribución de otros parámetros, indica que las medias son iguales; es decir que la hipótesis de igualdad es aceptada aquí y no hay efecto significativo tanto de la altura de capa como la velocidad de impresión sobre la variable de respuesta (módulo de elasticidad). En el caso de la poliamida

reforzada con fibras de carbono sí se tiene un error por debajo de la contribución de los parámetros, por lo que el estadístico de prueba F_0 al ser comparado con el percentil de distribución F (o estadístico de Fisher) afirma que se rechaza la igualdad de medias, habiendo importancia en la variación de parámetros sobre el módulo de elasticidad.

Tabla 3.19.- ANOVA del modulo elástico para probetas impresas en PA.

FV	SC	GL	CM	% Contribución	F0	F(0,05;2;36)
Altura de capa	130 147,45	2	65 073,73	8,47	6,83	3,32
Velocidad de impresión	195 166,40	2	97 583,20	12,70	10,24	3,32
Patrón de impresión	506 270,89	2	253 135,44	32,93	26,57	3,32
Temperatura de impresión	362 729,16	2	181 364,58	23,60	19,04	3,32
Error	342 925,82	36	9 525,72	22,31		
Total	1 537 239,72	44		100		

Tabla 3.20.- ANOVA del modulo elástico para probetas impresas en PA/CF.

FV	SC	GL	CM	% Contribución	F0	F(0,05;2;36)
Altura de capa	12 188 500,27	2	6 094 250,13	44,57	229,66	3,32
Velocidad de impresión	723 118,06	2	361 559,03	2,64	13,63	3,32
Patrón de impresión	7 921 649,53	2	3 960 824,76	28,96	149,26	3,32
Temperatura de impresión	5 560 750,13	2	2 780 375,06	20,33	104,78	3,32
Error	955 285,31	36	26 535,70	3,49		
Total	27 349 303,29	44		100		

3.3.4 Verificación de las combinaciones óptimas determinadas

Una vez determinadas las combinaciones que permiten fabricar probetas con las mejores propiedades mecánicas para cada material, siendo estas combinaciones los puntos más altos para cada parámetro de los gráficos mostrados en el estudio de efectos principales y de señal-ruido, se decidió verificar los resultados estimados contra los experimentales, siendo los valores estimados o teóricos utilizando la **ecuación 9** [M.S. Phadke, 1989] :

Ecuación 9.- Ecuación para hallar el valor predicho.

$$\sigma_{opt} = m + (mA_{opt} - m) + (mB_{opt} - m) + (mC_{opt} - m) + (mD_{opt} - m)$$

Donde:

m: Promedio de los valores obtenidos de la gráfica de media de datos

mA_{opt}: Valor óptimo para el parámetro A.

mB_{opt}: Valor óptimo para el parámetro B.

mC_{opt}: Valor óptimo para el parámetro C.

mD_{opt}: Valor óptimo para el parámetro D.

Debido a los resultados obtenidos anteriormente en el ANOVA, se decidió realizar esta verificación sólo para la configuración de máxima resistencia a la tracción. Además, investigaciones previas [Burn, 2016; Alkhatib, 2019; O'Brien, 2020; Sareen, 2020; Spencer, 2020] afirman utilizar materiales como el PLA y el ABS con propiedades mecánicas menores a la de la PA y PA/CF para diferentes órtesis a nivel de prototipos.

Para este análisis se recuerda que las configuraciones óptimas eran las siguientes: **A₁B₂C₂D₃** para la poliamida y **A₁B₁C₂D₃** para la poliamida/CF. Sus valores se obtienen de las **tablas 3.7** y **3.8**. Entonces, reemplazando en la **ecuación 9** se obtienen los valores estimados mostrados en la **tabla 3.21**.

Tabla 3.21.- Valores predictivos con las configuraciones óptimas.

Material	Resistencia a la tracción (MPa)
PA	40,08
PA/CF	87,99

Estos resultados se corroboraron tras realizar ensayos con las configuraciones óptimas indicadas en la **tabla 3.22**.

Tabla 3.22.- Configuración óptima para ambos materiales

Material	Altura de capa (mm)	Velocidad de impresión (mm/s)	Patrón de impresión y ángulo (°)	Temperatura de impresión (°C)
PA	0,1	40	Líneas [0/45/90/135]	280
PA/CF	0,1	30	Líneas [0/45/90/135]	280

Una vez realizados los ensayos de tracción, se obtuvo los resultados mostrados en la **tabla 3.23**, donde para el material PA se tiene un 95,6% del valor estimado, mientras que para la poliamida/CF se tiene un 94,09% del valor estimado, los cuales son valores aceptables y que superan a los valores hallados en los 9 experimentos del arreglo ortogonal L₉ de Taguchi.

Tabla 3.23.- Resultados de ensayos de tracción para las configuraciones óptimas

Material	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Desv. Est.	CV(%)	Media	Desv. Est.	CV(%)
PA	38,32	0,59	1,53	1633	25,9	1,59
PA/CF	82,79	0,76	0,92	4230	225,4	5,33

Si bien los resultados obtenidos no son iguales a los predichos teóricamente, se obtuvieron valores aproximados; con esto podemos afirmar que la mejor configuración para ambos materiales es la obtenida a partir de los estudios de efectos principales y de señal-ruido pues se obtuvo el máximo valor en la resistencia a la tracción, siendo estos 38,32 MPa para la poliamida y 82,79 MPa para la poliamida reforzada con fibras de carbono, verificando así que el método de Taguchi pudo encontrar las combinaciones de los parámetros de impresión que permiten alcanzar las mejores resistencias a la tracción con una cantidad mínima de ensayos.

Se puede observar que a comparación de la configuración L2, el parámetro de la temperatura es mayor por 20°C, haciendo que la resistencia a la tracción aumente considerablemente, como lo demostró [Alafaghani, 2017].

3.4 Estudio del porcentaje de relleno

Para el estudio de la influencia del porcentaje de relleno, se escogió un rango de 50% a 100% con intervalos de 10% utilizando la configuración óptima obtenida mediante los métodos de estudio anteriormente mostrado en la **tabla 3.22**. En la **figura 3.18** se aprecia una representación generada por el programa de impresión CURA de cómo se realizan las capas de impresión al variar el porcentaje de relleno, en donde se puede apreciar la variación de porcentaje de relleno desde 50% (a) hasta 100% (f) y que la última capa depositada es la orientada a 45°.

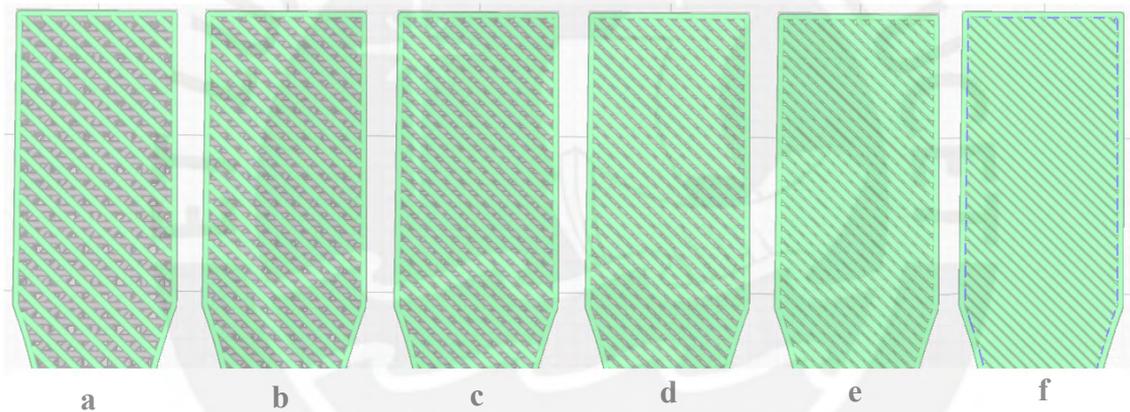


Figura 3.18.- Probetas de tracción con distintos porcentajes de relleno. a) 50%, b) 60%, c)70%, d)80%, e)90% y f)100%.

Luego de realizar los ensayos de tracción, se obtuvieron los resultados que se muestran para poliamida en la **tabla 3.24** y para poliamida reforzada en la **tabla 3.25**. En estos se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de relleno, las probetas presentan mejores propiedades mecánicas (resistencia a la tracción y módulo de elasticidad).

Con el fin de tener un análisis más específico sobre la conveniencia de añadir masa para incrementar la resistencia del material, se pesó las probetas de cada porcentaje de relleno analizada para medir la resistencia alcanzada por unidad de masa.

En los resultados de la poliamida mostrados en la **tabla 3.24** se puede observar que los valores se encuentran entre 9,87 MPa y 38,32 MPa, habiendo pequeñas variaciones hasta las probetas con un relleno del 90% y en la variación de 90% a 100% se aprecia una variación de resistencia de 11,56 MPa, es decir que aumenta en aproximadamente 43%. Los valores de resistencia de 50%-90% representan el 25,75%, 35,98%, 48,72%, 54,04% y 69,83% de los 38,32 MPa conseguidos con un 100% de relleno.

Analizando los resultados de la poliamida reforzada con fibras de carbono que se muestra en la **tabla 3.25**, los resultados varían desde 28,51 MPa hasta 82,79 MPa y representan el 34,43%, 41,84%, 49,02%, 66,98% y 81,97% de los 82,79 MPa que se obtiene en la probeta de 100% de relleno; sin embargo no se aprecia un gran salto del 90% al 100%, pues solo aumenta en un 22% aproximadamente, mientras que de 70% a 80% se aprecia un aumento del 36,6% en la resistencia.

Estos resultados eran de esperarse, pues al tener mayor cantidad de material depositado, se tiene una mayor área resistente. Algunas investigaciones [Fernandez, 2016] concuerdan con los resultados obtenidos que a mayor cantidad de material depositado, mayor será la resistencia a la tracción; sin embargo, otros estudios [Alvarez, 2016] presentan resultados donde al aumentar el porcentaje de relleno de 0%-100% en saltos de 5% obtiene algunos puntos en donde la resistencia decae un poco, argumentando que esto se debe principalmente a que existen muchas variables que no se pueden controlar (ruidos) como lo es la nivelación de la mesa o plataforma, la distancia entre extrusor y mesa; pues esta con el uso se va descalibrando, entre otros.

Tabla 3.24.- Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para probetas impresas de PA en diferentes porcentajes de relleno con la mejor configuración.

Relleno	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)			Masa promedio g	Resistencia por u.m. MPa/g
	Media	Desv. Est.	CV(%)	Media	Desv. Est.	CV(%)		
50	9,9	0,29	2,98	366	5,20	1,41	1,09	9,1
60	13,8	0,93	6,73	589	2,20	0,37	1,28	10,8
70	18,7	0,39	2,07	821	19,80	2,41	1,56	12,0
80	20,7	0,61	2,95	976	35,70	3,66	1,72	12,0
90	26,8	0,85	3,17	1401	27,00	1,92	1,85	14,5
100	38,3	0,59	1,53	1633	25,90	1,59	2,01	19,1

Tabla 3.25.- Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para probetas impresas de PA/CF en diferentes porcentajes de relleno con la mejor configuración.

Relleno	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)			Masa promedio g	Resistencia por u.m. MPa/g
	Media	Desv. Est.	CV(%)	Media	Desv. Est.	CV(%)		
50	28,5	1,01	3,55	1746	79,10	4,53	1,25	22,8
60	34,6	1,07	3,09	2307	62,30	2,70	1,58	21,9
70	40,6	0,85	2,10	2571	46,00	1,86	1,73	23,5
80	55,5	2,59	4,67	2874	114,40	3,98	1,94	28,6
90	67,9	3,48	5,13	3174	15,70	0,49	2,08	32,6
100	82,8	0,76	0,92	4230	225,40	5,33	2,33	35,5

Por otra parte, como se mencionó antes, un parámetro interesante para el análisis es la resistencia por unidad de masa que, a diferencia de la resistencia a la tracción, no siempre es proporcional al aumento de masa como se puede observar en la **figura 3.19** para la PA/CF, pues con un 50% de relleno se tiene 22,80 MPa/g la cual supera a la resistencia desarrollada al 60%, dando a entender que es más conveniente imprimir a 50% que a 60% de relleno, mientras que para la poliamida es más conveniente imprimir a 70% de relleno en vez de 80% ya que presentan la misma resistencia por unidad de masa.

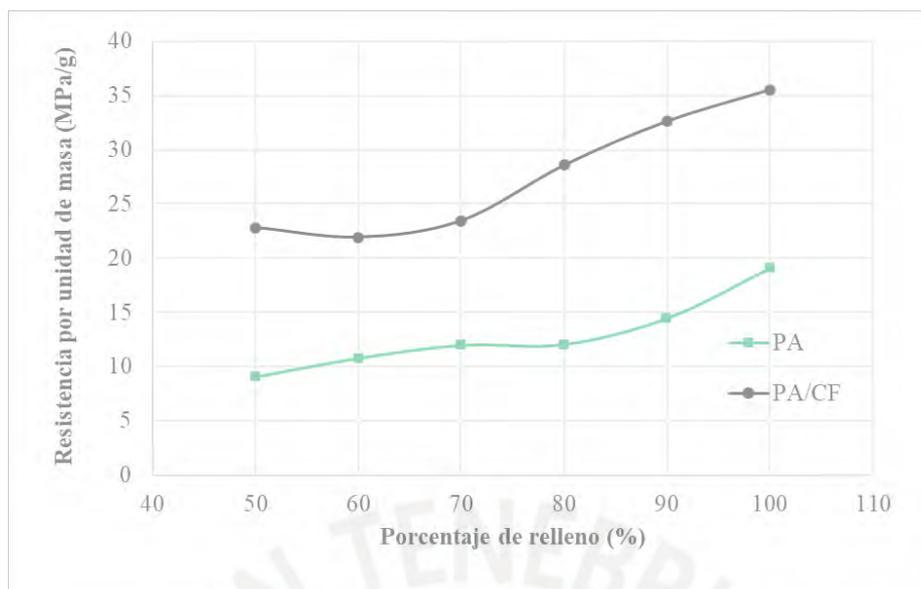


Figura 3.19.- Comparación de resistencia específica por unidad de masa para PA y PA/CF.

Las ecuaciones de la **tabla 3.26** son de utilidad para poder extrapolar los valores a porcentajes de relleno menor, los cuales pueden ser utilizados en las fabricaciones de ciertos productos. Para ello se muestra en la tabla las ecuaciones representativas y el valor R^2 , el cual nos asegura qué tan precisa ha sido dicha aproximación de la curva hacia los puntos reales, resultando en más del 90%.

Tabla 3.26.- Ecuaciones representativas de valores de resistencia para distintos porcentajes de relleno.

Material	Ecuación representativa	R^2
PA	$y = 0,0035x^2 - 0,3427x + 18,181$	0,9443
PA/CF	$y = 0,0052x^2 - 0,4864x + 33,417$	0,9622

Conclusiones

Los parámetros de fabricación más importantes del proceso FDM utilizando filamentos de PA y PA/CF son: temperatura de impresión, velocidad de impresión, altura de capa y patrón de impresión. Los parámetros y los niveles estudiados fueron: (i) altura de capa: 0,1 mm; 0,2 mm y 0,3 mm; (ii) velocidad de impresión: 30 mm/s, 40 mm/s y 50 mm/s; (iii) patrón de impresión: líneas, triángulo y rejilla y (iv) temperatura de impresión: 240°C, 260°C y 280°C.

La metodología de Taguchi es la más adecuada para el estudio de los 4 parámetros de fabricación del proceso FDM. Para este caso de estudio el arreglo ortogonal L9 requiere de solo 45 por cada material, cantidad que es siempre menor a la requerida por otros diseños experimentales como por ejemplo el diseño factorial donde se necesitarían 405 ensayos. La desventaja de este método es que requiere del soporte de métodos estadísticos.

Se determinó, a partir del *análisis de efectos principales*, que las probetas de PA adquieren su mayor resistencia al imprimirlas con los siguientes parámetros: patrón de líneas; 0,1 mm de altura de capa; 30 mm/s de velocidad y 280°C de temperatura de impresión; alcanzando una resistencia de 38,3 MPa y un módulo de 1633 MPa. Para el caso de la PA/CF se mantiene los mismos valores de los parámetros de impresión de la PA excepto que debe usarse una velocidad de deposición de 40 mm/s para lograr valores óptimos de 82,8 MPa de resistencia y 4229 MPa de modulo elástico, comprobándose que el principal efecto de las fibras de carbono es incrementar el módulo elástico del material.

Se demuestra para la PA que el patrón y la temperatura de impresión son los parámetros de mayor influencia con un 41,24% y 35,84% respectivamente, mientras que la altura de capa con 9,03% y la velocidad de deposición del material con 12,56% son parámetros que contribuyen poco sobre las propiedades mecánicas según el porcentaje de contribución del análisis de

varianza (ANOVA). Análogamente para la PA/CF, se demuestra que el patrón de impresión con 46,4%, la altura de capa con 28,17% y la temperatura con 23,57% son los parámetros de mayor influencia sobre las propiedades mecánicas, mientras que la velocidad de deposición no tiene una influencia considerable sobre éstas (1,09%).

Del análisis de varianza (ANOVA) se confirma que los cuatro parámetros elegidos en este estudio tienen una influencia significativa sobre la resistencia a la tracción, ya que los estadísticos de prueba F_0 de cada parámetro superan al estadístico de Fisher con valor $F=3,32$ para una confiabilidad de 95% en ambos materiales. Por otro lado, no se asegura lo mismo para el módulo de elasticidad, pues para la PA se obtiene que tanto la velocidad como la altura de capa no tienen efecto sobre el módulo.

En general, la influencia de la velocidad de impresión presenta bajos porcentajes de contribución, siendo 12,6% para la PA y 1,09% para la PA/CF. Razón por la cual se podría optar por usar la máxima velocidad de impresión con la finalidad de reducir el tiempo de impresión sin disminuir apreciablemente la resistencia a la tracción del material impreso.

Se comprueba que la máxima resistencia a la tracción se consigue con 100% de relleno para los dos materiales impresos con los parámetros óptimos antes mencionados: 19,1 MPa/g y 35,5 MPa/g para la PA y la PA/CF respectivamente. Con el propósito de reducir los tiempos de impresión sin sacrificar resistencia en productos de PA/CF, conviene imprimir con 50% de relleno (22,8 MPa/g) en vez de 60% (21,9 MPa/g) y 70% (23,5 MPa/g). De manera análoga para la PA, conviene imprimir con 70% de relleno en vez de 80%, pues ambos tienen 12,0 MPa/g.

Al introducir fibras de carbono (CF) en los filamentos de PA se incrementa la resistencia a la tracción de 37 MPa a 118 MPa; así mismo, el módulo elástico aumenta considerablemente de

593 MPa a 2043 MPa. Contrariamente, las CF reducen drásticamente el alargamiento de rotura de los filamentos de PA; los filamentos de PA/CF tienen un alargamiento de 9,5%, mucho menor que el correspondiente a los filamentos de PA pura (186%). Los filamentos reforzados con CF presentan un mayor índice de fluidez que la PA pura a las distintas temperaturas de ensayo, así, por ejemplo: a 280°C el índice de fluidez de los filamentos de PA es de 9,7 g/(10 min) que es muy inferior a los filamentos de PA/CF que tiene un valor de 66,6 g/(10min), lo cual indica que el refuerzo de fibras de carbono actúa como un plastificante en la matriz de poliamida, aumentando la movilidad de las cadenas poliméricas bajo calor y carga.



Este trabajo fue financiado por el CONCYTEC-FONDECYT en el marco de la convocatoria Proyecto Investigación Básica y Aplicada, 2017-02, titulado: Optimización del uso de Polímeros sintéticos en procesos de manufactura aditiva mediante modelos de simulación numérica y técnicas de caracterización de materiales. Caso de estudio: aplicaciones médicas en prótesis de mano [Contrato N° 163-2017-FONDECYT]

Bibliografía

- 3D HUBS. (2017). *What is 3D Printing? The definitive guide to additive manufacturing*. <https://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing#materials>
- 3D MATTER. (2017). *FDM 3D Printing materials compared*. FDM 3D Printing Materials Compared
- 3D natives. (2017). *The 4 Types of FFF / FDM 3D Printer Explained (Cartesian, Delta, Polar)*. <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/>
- A.E, T., L, R., R.V, E., & D.K, B. (2017). Optimization of 3D-Printer Process Parameters for Improving Quality of Polylactic Acid Printed Part. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(2), 589–600. <https://doi.org/10.21817/ijet/2017/v9i2/170902044>
- Abzan, M. S., Mirzaee, R., & Ahmadi, S. (2021). The correlation between morphological variations and Thermo-mechanical properties of the PA6/PC/PP ternary blends: An established boundary between structures. *Polymer Testing*, 93, 106930. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106930>
- Agarwal, S., Arisman, R. K., Baghdachi, J., Benson, R., Belcher, S. L., Berry, M., Cantor, K. M., Carroll, W. F., Coleman, E. A., Coutinho, C., DeArmitt, C., Ebnesajjad, S., Frizelle, W. G., GangaRao, H., Gijsman, P., Godwin, A. D., Gupta, R. K., Gupta, V. K., Hári, J., ... Zumbrennen, D. A. (2011). Applied Plastics Engineering Handbook. In *Applied Plastics Engineering Handbook*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10040-6>
- Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017a). Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791–803. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.079>
- Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017b). Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791–803. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.079>
- Alkhatib, F., Cabibihan, J. J., & Mahdi, E. (2019). Data for benchmarking low-cost, 3D printed prosthetic hands. *Data in Brief*, 25, 104163. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104163>
- Alvarez C, K. L., Lagos C, R. F., & Aizpun, M. (2016). Influencia del porcentaje de relleno en la resistencia mecánica en impresión 3D, por medio del método de Modelado por Deposición Fundida (FDM). *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24(Especial), 17–24. <https://doi.org/10.4067/s0718-33052016000500003>
- Anitha, R., Arunachalam, S., & Radhakrishnan, P. (2001). Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling. *Journal of Materials Processing Technology*, 118(1–3), 385–388. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00980-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00980-3)
- Bhate, D. (2016). *used Deposition Modeling (FDM) Properties: A Micromechanics Perspective*. <http://www.padtinc.com/blog/the-focus/fused-deposition-modeling-fdm-properties-a-micromechanics-perspective>
- Bournias, A. (2017). *Introduction to FDM 3D printing | 3D Hubs*.

<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing#author>

- Burn, M. B., Ta, A., & Gogola, G. R. (2016). Three-dimensional printing of prosthetic hands for children. *Journal of Hand Surgery*, 41(5), e103–e109. <https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2016.02.008>
- Chen, H., Yang, X., Chen, L., Wang, Y., & Sun, Y. (2016). Application of FDM three-dimensional printing technology in the digital manufacture of custom edentulous mandible trays. *Scientific Reports*, 6(July 2015), 1–6. <https://doi.org/10.1038/srep19207>
- Christiyan, K. G. J., Chandrasekhar, U., & Venkateswarlu, K. (2016). A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114, 012109. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012109>
- Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2017). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
- Es-Said, O. S., Foyos, J., Noorani, R., Mendelson, M., Marloth, R., & Pregger, B. A. (2000). Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Materials and Manufacturing Processes*, 15(1), 107–122. <https://doi.org/10.1080/10426910008912976>
- Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(3). <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0036>
- Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *CAD Computer Aided Design*, 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
- Griffiths, C. A., Howarth, J., Rowbotham, G. D. A., & Rees, A. (2016). Effect of Build Parameters on Processing Efficiency and Material Performance in Fused Deposition Modelling. *Procedia CIRP*, 49, 28–32. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.07.024>
- Grigoryan, B., Paulsen, S. J., Corbett, D. C., Sazer, D. W., Fortin, C. L., Zaita, A. J., Greenfield, P. T., Calafat, N. J., Gounley, J. P., Ta, A. H., Johansson, F., Randles, A., Rosenkrantz, J. E., Louis-Rosenberg, J. D., Galie, P. A., Stevens, K. R., & Miller, J. S. (2019). Multivascular networks and functional intravascular topologies within biocompatible hydrogels. *Science*, 364(6439), 458–464. <https://doi.org/10.1126/science.aav9750>
- Gutiérrez Pulido, H. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*.
- INEI. (2015). *Programa de atención para población con discapacidad*. https://www.inei.gov.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1253/cap09/ind09.htm
- Klata, E., Borysiak, S., Van de Velde, K., Garbarczyk, J., & Krucińska, I. (2004). Crystallinity of polyamide-6 matrix in glass fibre/polyamide-6 composites manufactured from hybrid yarns. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 12(3), 64–69.
- Kozior, T., & Kundera, C. (2017). Evaluation of the Influence of Parameters of FDM

- Technology on the Selected Mechanical Properties of Models. *Procedia Engineering*, 192, 463–468. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.080>
- Lee, B. H., Abdullah, J., & Khan, Z. A. (2005). Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(1), 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259>
- M.S. Phadke. (1989). Quality Engineering Using Robust Design. In *Technometrics* (Vol. 1). Prentice Hall International Inc. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00401706.1991.10484810>
- MacDonald, E., Salas, R., Espalin, D., Perez, M., Aguilera, E., Muse, D., & Wicker, R. B. (2014). 3D printing for the rapid prototyping of structural electronics. *IEEE Access*, 2(December), 234–242. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2014.2311810>
- Mendonsa, C., Naveen, K., Upadhyaya, P., & Shenoy, V. D. (2013). Influence of FDM Process Parameters on Build Time Using Taguchi and ANOVA Approach. *International Journal of Science and Research (IJSR) ISSN (Online Index Copernicus Value Impact Factor*, 14(2), 2319–7064. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J., & Wang, S. (2015). Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*, 80, 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.06.013>
- O'Brien, L., Cho, E., Khara, A., Lavranos, J., Lommerse, L., & Chen, C. (2020). 3D-printed custom-designed prostheses for partial hand amputation: Mechanical challenges still exist. *Journal of Hand Therapy*, 5–7. <https://doi.org/10.1016/j.jht.2020.04.005>
- Onwubolu, G. C., & Rayegani, F. (2014). Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactured by the Fused Deposition Modelling Process. *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2014, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2014/598531>
- Parodi, E., Govaert, L. E., & Peters, G. W. M. (2017). Glass transition temperature versus structure of polyamide 6: A flash-DSC study. *Thermochimica Acta*, 657(September), 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.09.021>
- Roy, R. K. (2010). *A Primer on the Taguchi Method* (Second edi). Society of Manufacturing Engineers.
- Rybicki, F. J., & Grant, G. T. (2017). *3D printing in medicine a practical guide for medical professionals*. <https://doi.org/10.1023/B:RJAC.0000044110.16799.94>
- Sareen, A., Singh, A., Sinha, A., Arya, A., Arya, A., Sapra, G., Kumar, R., Kumar, P., & Singh, D. (2020). Design and fabrication of prosthetic glove for hand rehabilitation. *Materials Today: Proceedings*, 28(xxxx), 1612–1615. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.849>
- Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2010). Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts. *Materials and Design*, 31(1), 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.06.016>
- Spencer, S. R., & Kay Watts, L. (2020). Three-Dimensional Printing in Medical and Allied Health Practice: A Literature Review. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, 51(3), 489–500. <https://doi.org/10.1016/j.jmir.2020.06.003>

- Statista. (2018). *Worldwide most used 3D printing technologies*. <https://scihub.tw/https://www.statista.com/statistics/756690/worldwide-most-used-3d-printing-technologies/>
- Szykiedans, K., & Credo, W. (2016). Mechanical properties of FDM and SLA low-cost 3-D prints. *Procedia Engineering*, 136, 257–262. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.207>
- Tymrak, B. M., Kreiger, M., & Pearce, J. M. (2014). Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. *Materials and Design*, 58, 242–246. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.038>
- Wang, T. M., Xi, J. T., & Jin, Y. (2007). A model research for prototype warp deformation in the FDM process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(11–12), 1087–1096. <https://doi.org/10.1007/s00170-006-0556-9>
- Wittbrodt, B., & Pearce, J. M. (2015). The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components. *Additive Manufacturing*, 8, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.09.006>



Anexos



ANEXO A

Ficha técnica de PA



iOn™ NYLON Copolymer 3D Filament

iOn™ Nylon copolymer is an engineering grade 3D printing material that can be used in demanding industrial applications due to its high mechanical, thermal, and chemical performance. iOn™ Nylon has excellent resistance to many chemicals – including solvents, fuels, alcohols, and lubricants. Offering a low gloss matte finish, iOn™ is ideal for technical components that require real-world functional performance. iOn™ Nylon is suitable for use in practically all consumer-grade FDM/FFF printers that have a heated print bed. Made by 3DXTECH® in the USA.

The reported technical data was generated from printed ISO test specimen. The general print parameters utilized are noted below.

- Desktop FDM/FFF Printer
- Nozzle: 0.4mm A2 hardened
- Layer height: 0.2mm
- Infill: 100%, +/- 45°
- Extrusion temp: 260°C
- Bed temp: 110°C
- Bed prep: ABS/Acetone Gel
- Print speed: 50 mm/sec



Disclaimer: The technical data contained on this data sheet is furnished without charge or obligation and accepted at the recipient's sole risk. This data should not be used to establish specifications limits or used alone as the basis of design. The data provided is not intended to substitute any testing that may be required to determine fitness for any specific use.

General Property	Unit	Standard	Typical Value
Density	g/cc	ISO 1183	1.06

Mechanical Property	Unit	Standard	Typical Value
Tensile Strength	MPa	ISO 527	45
Tensile Modulus	MPa	ISO 527	2094
Tensile Elongation, Break	%	ISO 527	8.6
Flexural Modulus	MPa	ISO 178	2206
Flexural Strength	MPa	ISO 178	80

Thermal Property	Unit	Standard	Typical Value
Glass Transition Temperature (Tg)	°C	DSC	105

Heat Distortion Temperature (HDT) @ 0.45MPa	°C	ISO 75	96.8
---	----	--------	------

Electrical Property	Unit	Standard	Typical Value
Surface Resistivity	Ohm/sq	IEC 60093	>10 ⁹

Printing Recommendation	Typical Range
Extruder Temperature	250 - 270°C
Bed Temperature	100 - 110°C
Print Speed	50 - 70 mm/sec

ANEXO B

Ficha técnica de PA/CF



CarbonX™ Carbon Fiber Reinforced Nylon 3D Filament

CarbonX™ Carbon Fiber Reinforce Nylon is a high-performance carbon fiber reinforced 3D printing filament. This grade was formulated utilizing high-modulus carbon fiber and an advanced semi-aromatic polyamide copolymer – making it ideal for applications that require superior chemical resistance, thermal properties, mechanical properties, and dimensional stability compared to other FDM/FFF nylon materials. Suitable for use in practically all consumer-grade FDM/FFF printers that have a heated print bed. Made 3DXTECH® in the USA.

The reported technical data was generated from printed ISO test specimen. The general print parameters utilized are noted below.

- Desktop FDM/FFF Printer
- Nozzle: 0.4mm A2 hardened
- Layer height: 0.2mm
- Infill: 100%, +/- 45°
- Extrusion temp: 260°C
- Bed temp: 110°C
- Bed prep: ABS/Acetone Gel
- Print speed: 50 mm/sec



Disclaimer: The technical data contained on this data sheet is furnished without charge or obligation and accepted at the recipient's sole risk. This data should not be used to establish specifications limits or used alone as the basis of design. The data provided is not intended to substitute any testing that may be required to determine fitness for any specific use.

General Property	Unit	Standard	Typical Value
Density	g/cc	ISO 1183	1.14

Mechanical Property	Unit	Standard	Typical Value
Tensile Strength	MPa	ISO 527	63.9
Tensile Modulus	MPa	ISO 527	4387
Tensile Elongation, Break	%	ISO 527	4
Flexural Modulus	MPa	ISO 178	5650
Flexural Strength	MPa	ISO 178	78

Thermal Property	Unit	Standard	Typical Value
Glass Transition Temperature (Tg)	°C	DSC	105

Heat Distortion Temperature (HDT) @ 0.45MPa	°C	ISO 75	102
---	----	--------	-----

Electrical Property	Unit	Standard	Typical Value
Surface Resistivity	Ohm/sq	IEC 60093	>10 ¹⁰

Printing Recommendation	Typical Range
Extruder Temperature	240 - 270°C
Bed Temperature	100 - 110°C
Print Speed	50 - 70 mm/sec

WWW.3DXTECH.COM

571 Gordon Industrial Court, Suite E
Byron Center, MI 49315 USA

ANEXO C

Tabla con valores de estadístico de Fisher al 95%

		Grados de libertad en el numerador																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20	25	30	40	50	75	100	∞		
Grados de libertad en el denominador	1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245	246	248	249	250	251	252	253	253	254		
	2	18.5	19.0	19.2	19.2	19.3	19.3	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.4	19.5	19.5	91.5	19.5	19.5	19.5	19.5		
	3	10.1	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70	8.66	8.63	8.62	8.59	8.58	8.56	8.55	8.53		
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.70	5.68	5.66	5.63		
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62	4.56	4.52	4.50	4.46	4.44	4.42	4.41	4.37		
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94	3.87	3.83	3.81	3.77	3.75	3.73	3.71	3.67		
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.55	3.53	3.51	3.44	3.40	3.38	3.34	3.32	3.29	3.27	3.23		
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.26	3.24	3.22	3.15	3.11	3.08	3.04	3.02	2.99	2.97	2.93		
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.05	3.03	3.01	2.94	2.89	2.86	2.83	2.80	2.77	2.76	2.71		
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.89	2.86	2.85	2.77	2.73	2.70	2.66	2.64	2.60	2.59	2.54		
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.76	2.74	2.72	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.47	2.46	2.41		
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.66	2.64	2.62	2.54	2.50	2.47	2.43	2.40	2.37	2.35	2.30		
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.58	2.55	2.53	2.46	2.41	2.38	2.34	2.31	2.28	2.26	2.21		
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48	2.46	2.39	2.34	2.31	2.27	2.24	2.21	2.19	2.13		
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.45	2.42	2.40	2.33	2.28	2.25	2.20	2.18	2.14	2.12	2.07		
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.40	2.37	2.35	2.28	2.23	2.19	2.15	2.12	2.09	2.07	2.01		
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.35	2.33	2.31	2.23	2.18	2.15	2.10	2.08	2.04	2.02	1.96		
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.31	2.29	2.27	2.19	2.14	2.11	2.06	2.04	2.00	1.98	1.92		
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.28	2.26	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	2.00	1.96	1.94	1.88		
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.25	2.22	2.20	2.12	2.07	2.04	1.99	1.97	1.93	1.91	1.84		
	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.22	2.20	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.94	1.90	1.88	1.81		
	22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.20	2.17	2.15	2.07	2.02	1.98	1.94	1.91	1.87	1.85	1.78		
	23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.18	2.15	2.13	2.05	2.00	1.96	1.91	1.88	1.84	1.82	1.76		
	24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.15	2.13	2.11	2.03	1.97	1.94	1.89	1.86	1.82	1.80	1.73		
	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.20	2.16	2.14	2.11	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.84	1.80	1.78	1.71		
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.12	2.09	2.07	1.99	1.94	1.90	1.85	1.82	1.78	1.76	1.69			
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.17	2.13	2.10	2.08	2.06	1.97	1.92	1.88	1.84	1.81	1.76	1.74	1.67			
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.09	2.06	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.79	1.75	1.73	1.65			
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.14	2.10	2.08	2.05	2.03	1.94	1.89	1.85	1.81	1.77	1.73	1.71	1.64			
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.13	2.09	2.06	2.04	2.01	1.93	1.88	1.84	1.79	1.76	1.72	1.70	1.62			
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.97	1.95	1.92	1.84	1.78	1.74	1.69	1.66	1.61	1.59	1.51			
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.95	1.92	1.89	1.86	1.84	1.75	1.69	1.65	1.59	1.56	1.51	1.48	1.39			
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.89	1.85	1.82	1.79	1.77	1.68	1.62	1.57	1.52	1.48	1.42	1.39	1.28			
∞	3.84	3.00	2.61	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.79	1.75	1.72	1.69	1.67	1.57	1.51	1.46	1.40	1.35	1.28	1.25	1.03			