

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE MANUFACTURA EN EL  
PROCESO DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA A PARTIR DE  
ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS) Y ACRILONITRILO  
BUTADIENO ESTIRENO REFORZADO CON FIBRAS DE CARBONO  
(ABS/CF)**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico**

**AUTOR:**

Jose Alejandro Torres Cerron

**ASESOR:**

Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán

**Lima, octubre, 2023**

### Informe de Similitud

Yo, Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado “**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE MANUFACTURA EN EL PROCESO DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA A PARTIR DE ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS) Y ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO REFORZADO CON FIBRAS DE CARBONO (ABS/CF)**”, del autor José Alejandro Torres Cerrón.

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 14%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 10/10/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: San Miguel 10 de octubre de 2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Acosta Sullcahuamán, Julio Arnaldo</u>	
DNI: 07960574	Firma 
ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-1518-4282">https://orcid.org/0000-0002-1518-4282</a>	

## RESUMEN

El presente proyecto pretende determinar los efectos de los principales parámetros de impresión sobre las propiedades mecánicas de los productos obtenidos mediante la técnica de modelado por deposición fundida a partir de ABS y ABS/CF.

El objetivo del presente trabajo es determinar los parámetros de fabricación óptimos del proceso de modelado por deposición fundida usando acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y acrilonitrilo butadieno estireno reforzado con fibras de carbono (ABS/CF), así como determinar la influencia de cada parámetro sobre las propiedades mecánicas, con el fin de fabricar productos terminados.

En la investigación se determinaron los parámetros de fabricación más importantes que influyen en el proceso FDM: altura de capa, patrón de impresión, temperatura de impresión y velocidad de movimiento del cabezal de impresión. Luego se usó la metodología de Taguchi (arreglo L9) para analizar la influencia de los parámetros de impresión sobre la resistencia a la tracción y el módulo elástico, para determinar la combinación que maximice dichas propiedades. Esta metodología permitió reducir considerablemente el número ensayos de tracción (según ISO 527) necesarios debido a que concentró su análisis sobre los efectos principales. Luego se realizó una comprobación experimental y teórica de las combinaciones óptimas halladas. Finalmente se evaluó el efecto del porcentaje de relleno sobre las propiedades de los productos impresos de ABS y ABS/CF.

La combinación óptima para maximizar la resistencia a la tracción en probetas de ABS (35.5 MPa con un módulo de 2105 MPa) fue: altura de capa de 0.2 mm, patrón de líneas, temperatura de impresión de 260°C y velocidad de impresión de 40 mm/s. Mientras para el ABS/CF se usó 0.1mm de capa, patrón de líneas 280°C y 30mm/s, resultando una resistencia de 35.2 MPa y un módulo de 3460 MPa.

## AGRADECIMIENTOS

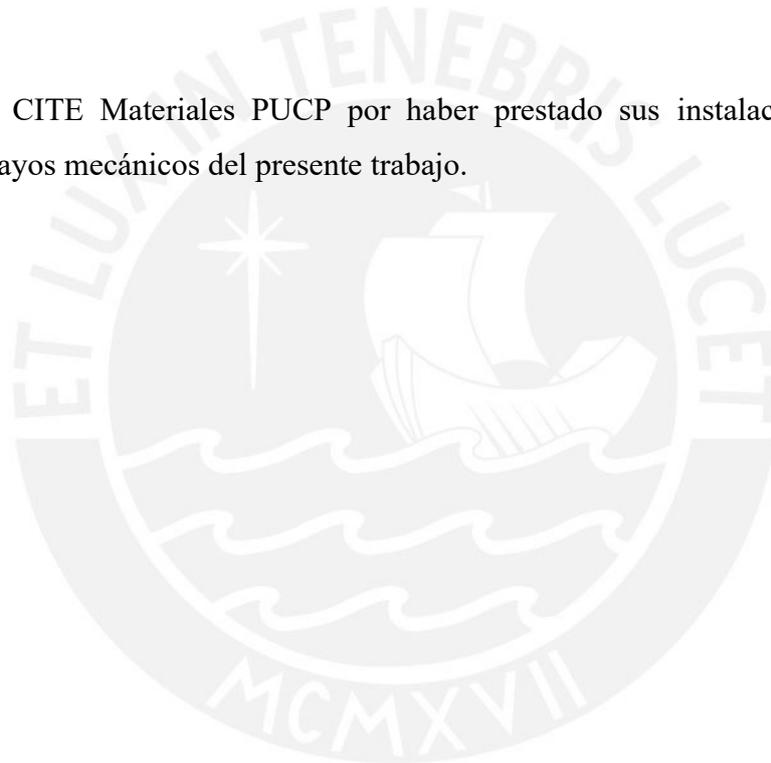
A mis padres por todo el apoyo prestado durante todos estos años.

Agradezco el financiamiento otorgado por PROCENCIA de acuerdo con el Contrato N° 163-2017-FONDECYT.

Al profesor Julio Acosta por haberme permitido formar parte del proyecto mencionado y el acompañamiento a lo largo del desarrollo de la tesis.

A la sala VEO 3D-PUCP por la capacitación y apoyo brindado en área de manufactura aditiva.

Finalmente, al CITE Materiales PUCP por haber prestado sus instalaciones para realizar los ensayos mecánicos del presente trabajo.



# Índice

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo I: Estado del arte</b> .....	<b>5</b>
1.1. Manufactura aditiva .....	6
1.2. Técnicas de manufactura aditiva.....	8
1.2.1. Estereolitografía (SLA).....	8
1.2.2. Modelado por deposición fundida (FDM) .....	9
1.2.3. Sintetizado selectivo por láser (SLS).....	11
1.2.4. Polyjet .....	12
1.3. Propiedades del Acrilonitrilo Butadieno Estireno y su refuerzo con fibra de carbono	13
1.4. Investigaciones previas sobre las propiedades del ABS impreso mediante FDM.....	15
1.5. Ejemplos aplicativos de técnicas de manufactura aditiva.....	19
<b>Capítulo II: Parte experimental</b> .....	<b>25</b>
2.1. Materiales.....	26
2.1.1. Filamento de Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).....	26
2.1.2. Filamento de Acrilonitrilo butadieno estireno con refuerzo de fibras de carbono (ABS/CF).....	29
2.2. Equipos .....	31
2.2.1. Impresora 3D .....	31
2.2.2. Secador de filamentos .....	32
2.2.3. Balanza digital .....	33
2.3. Diseño experimental .....	34
2.4. Procedimiento experimental .....	40
2.4.1. Caracterización de filamentos.....	40
2.4.2. Fabricación de probetas .....	45
2.4.3. Ensayo de tracción a probetas.....	54
2.5. Método para descartar valores atípicos.....	57

<b>Capítulo III: Resultados y discusión.....</b>	<b>59</b>
3.1. Caracterización de filamentos.....	60
3.1.1. Ensayo de tracción de filamentos .....	60
3.1.2. Análisis térmico .....	62
3.1.3. Índice de fluidez.....	65
3.2. Ensayo de tracción a las probetas impresas .....	66
3.3. Influencia de los parámetros sobre las propiedades mecánicas .....	68
3.3.1. Efectos principales .....	68
3.3.2. Relación señal ruido.....	72
3.3.3. Análisis de varianza (ANOVA) .....	78
3.3.4. Validación teórica para la resistencia .....	80
3.4. Estudio del porcentaje de relleno.....	81
<b>Conclusiones .....</b>	<b>89</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>92</b>
<b>Anexo 1: Ficha técnica de filamentos .....</b>	<b>95</b>

## Lista de figuras

Figura 1 Proceso de manufactura por adición. [Adaptado de Defense Acquisition University, 2018].	7
Figura 2 Principio de funcionamiento de SLA. [Adaptado de Kim, 2016].	9
Figura 3 Principio de funcionamiento de FDM.	10
Figura 4 Principio de funcionamiento de SLS. [Adaptado de Kim, 2016].	12
Figura 5 Principio de funcionamiento de Polyjet. [Adaptado de Kim, 2016].	13
Figura 6 Simulación de la probeta usada por el proveedor 3DXTECH.	19
Figura 7 Fabricación de nuevos diseños para turbinas desarrollado por Renishaw [Gibbones, 2017].	20
Figura 8 Proceso de manufactura para tejidos orgánicos [Sanjairaj, 2018].	20
Figura 9 Muestra de audífonos personalizados impreso por la empresa Envision TEC [Contreras, 2018].	21
Figura 10 Modelo de prótesis de pierna usual. Arriba unión con muñón, al medio soporte principal y abajo prótesis de pie [Mei,2015].	22
Figura 11 Simulaciones de la prótesis presentada por Mei [Mei, 2015]	22
Figura 12 Filamento de ABS marca 3DXTECH	26
Figura 13 Representación gráfica de la probeta de ABS usada [3DXTECH, 2019]	27
Figura 14 Filamento de ABS-CF marca 3DX TECH	29
Figura 15 Impresora Ultimaker 3 Extended.	32
Figura 16 Secador de filamentos marca PrintDry	33
Figura 17 Balanza digital marca METTLER TOLEDO	33
Figura 18 Patrones de relleno. Triangular, rejillas y líneas.	35
Figura 19 Ejemplos de porcentajes de relleno al 20%, 40% y 80%	36
Figura 20 Calculo de tratamientos o corridas necesarios para la experimentación, A la izquierda con un diseño factorial y a la derecha con el diseño de Taguchi [Gutiérrez, 2008].	38
Figura 21 Filamentos para realizar ensayo de tracción de ABS (izquierda) y ABS/CF (derecha).	41
Figura 22 Maquina para ensayo de tracción marca Zwick/Roell Z050	41
Figura 23 Trozos de filamentos de ABS (izquierda) y ABS/CF (derecha).	42
Figura 24 Medidora del índice de fluidez marca Zwick/Roell MFlow	43
Figura 25 Netzsch STA 449 F1 Jupiter.	44

Figura 26 Probeta ISO 527, modelo 1BA.....	45
Figura 27 Probeta diseñada en CAD.....	46
Figura 28 Probeta cargada en el programa Cura.....	47
Figura 29 Etapas de ensayos de impresión para la selección de niveles de los parámetros. ...	48
Figura 30 Mala adhesión de los contornos al imprimir ABS hasta 200 °C, con patrón triangular, 60 mm/s de velocidad y 0.2 mm de altura de capa. ....	49
Figura 31 Defectos de adhesión en las líneas que forman el patrón al imprimir ABS/CF desde 200°C hasta 230°C, con patrón de cuadrículas, 60 mm/s de velocidad y 0.2 mm de altura de capa. ....	50
Figura 32 Pruebas de temperaturas superiores a 230 °C, manteniendo el resto de parámetros constantes.....	50
Figura 33 Comparación entre configuración típica (superior) y crítica (inferior). ....	51
Figura 34 Pruebas críticas para el ABS/CF a 235 °C (izquierda) y 240 °C (derecha). ....	52
Figura 35 Esquema del efecto “warping” sobre materia impreso en FDM. (3Dsource, 2022). ....	53
Figura 36 Celda de carga de 1 kN de capacidad.....	55
Figura 37 Probeta sujeta por mordazas (A) y pinzas extensiométricas (B). ....	56
Figura 38 Prueba de rotura en la zona calibrada usando el equipo Zwick/Roell Z050. ....	57
Figura 39 Curva de esfuerzo versus deformación unitaria para el ABS y ABS/CF .....	60
Figura 40 Curvas de análisis térmico para el ABS .....	62
Figura 41 Curvas de análisis térmico para el ABS/CF .....	62
Figura 42 Ampliación para determinar Tg para el ABS.....	64
Figura 43 Ampliación para determinar Tg para el ABS/CF.....	64
Figura 44 Medición del índice de fluidez del ABS y ABS/CF.....	66
Figura 45 Efectos principales de las medias de resistencia para ABS.....	69
Figura 46 Efectos principales de las medias de módulo para ABS .....	70
Figura 47 Efectos principales de las medias de resistencia para ABS/CF.....	71
Figura 48 Efectos principales de las medias de modulo para ABS/CF .....	72
Figura 49 Efectos principales de la señal ruido de resistencia para ABS .....	74
Figura 50 Efectos principales de la señal ruido de módulo para ABS.....	75
Figura 51 Efectos principales de la señal ruido de resistencia para ABS/CF .....	76
Figura 52 Efectos principales de la señal ruido de módulo para ABS/CF.....	77
Figura 53 Comparación de resistencia para distintos porcentajes de relleno .....	83
Figura 54 Comparación de módulo para distintos porcentajes de relleno .....	84

Figura 55 Comparación de resistencia respecto al peso para distintos porcentajes de relleno 87

Figura 56 Comparación de módulo respecto al peso para distintos porcentajes de relleno ....88



## Lista de tablas

Tabla 1 Propiedades volumétricas, térmicas y mecánicas del ABS extruido típico. [Tomado de Fried, 2003 y Ellis, 2008].....	14
Tabla 2 Propiedades volumétricas, térmicas y mecánicas del ABS/CF extruido típico. [Tomado de Fried, 2003]. .....	15
Tabla 3 Condiciones usadas para variación del porcentaje de relleno. [Tomado de Álvarez, 2016].....	16
Tabla 4 Parámetros de impresión correspondiente a la ficha técnica del proveedor 3DXTECH. ....	18
Tabla 5 Resultados de RNPCD de marzo 2020 [CONADIS,2020].....	23
Tabla 6 Parámetros de impresión recomendados para ABS. [3DXTECH,2019].....	27
Tabla 7 Propiedades mecánicas de la probeta de ABS [3DXTECH, 2019].....	27
Tabla 8 Parámetros usados en la probeta de prueba [3DXTECH, 2019] .....	28
Tabla 9 Parámetros de impresión recomendados para ABS/CF. [3DXTECH,2019] .....	29
Tabla 10 Propiedades correspondientes al filamento de ABS/CF. [3DXTECH, 2019] .....	30
Tabla 11 Parámetros usados en la probeta de prueba [3DXTECH, 2019] .....	31
Tabla 12 Arreglo ortogonal L9 de Taguchi [Gutiérrez, 2008].....	39
Tabla 13 Parámetros seleccionados para ABS y ABS/CF.....	39
Tabla 14 Configuración del arreglo para ensayo del ABS y ABS/CF.....	40
Tabla 15 Parámetros constantes que no serán objeto de estudio .....	53
Tabla 16 Métodos estadísticos para evaluar valores atípicos .....	58
Tabla 17 Propiedades mecánicas determinadas para el filamento de ABS .....	61
Tabla 18 Propiedades mecánicas determinadas para el filamento de ABS/CF .....	61
Tabla 19 Datos obtenidos del análisis térmico .....	65
Tabla 20 Índice de fluidez a distintas temperaturas de impresión para los materiales. ....	65
Tabla 21 Media de resistencia a la tracción y módulo para ABS .....	67
<i>Tabla 22 Media de resistencia a la tracción y módulo para ABS/CF.....</i>	<i>67</i>
Tabla 23 Resultados de efectos principales para resistencia a la tracción de probetas de ABS .....	69
Tabla 24 Resultados de efectos principales para módulo de probetas de ABS .....	70
Tabla 25 Resultados de efectos principales para resistencia a la tracción de probetas de ABS/CF .....	71
Tabla 26 Resultados de efectos principales para módulo de probetas de ABS/CF .....	72

Tabla 27 Señal ruido de resistencia y módulo para ABS.....	73
Tabla 28 Señal ruido de resistencia y módulo para ABS/CF.....	73
Tabla 29 Porcentaje de contribución de Relación señal ruido para resistencia de ABS.....	74
Tabla 30 Porcentaje de contribución de Relación señal ruido para módulo de ABS .....	75
Tabla 31 Porcentaje de contribución de Relación señal ruido para resistencia de ABS/CF....	76
Tabla 32 Porcentaje de contribución de Relación señal ruido para módulo de ABS/CF .....	77
Tabla 33 ANOVA sobre las medias de resistencia de ABS .....	78
Tabla 34 ANOVA sobre las medias de módulo de ABS .....	79
Tabla 35 ANOVA sobre las medias de resistencia de ABS/CF .....	79
Tabla 36 ANOVA sobre las medias de módulo de ABS/CF .....	80
<i>Tabla 37 Configuración óptima para maximizar la resistencia del ABS y ABS/CF .....</i>	<i>80</i>
Tabla 38 Valores óptimos y experimentales para el ABS y ABS/CF.....	81
Tabla 39 Ensayos a diferentes porcentajes de relleno para ABS.....	82
Tabla 40 Ensayos a diferentes porcentajes de relleno para ABS/CF.....	83
Tabla 41 Reducción de las propiedades mecanizas en función del porcentaje de relleno para ABS .....	84
Tabla 42 Reducción de las propiedades mecanizas en función del porcentaje de relleno para ABS/CF .....	85
Tabla 43 Esfuerzo y módulo respecto al peso para probetas de ABS .....	86
Tabla 44 Esfuerzo y módulo respecto al peso para probetas de ABS/CF .....	86

## Introducción

La impresión 3D es un término que viene ganando mucha popularidad sobre la población debido a las facilidades que brinda para la creación de objetos sólidos y los accesibles precios de las impresoras 3D de escritorio, menos de 1000 dólares [Tymrak, 2014]. Este término resulta ser muy ambiguo debido a que las personas hacen uso de este tanto para referirse a todas las técnicas de manufactura por adición como para referirse a alguna en específico.

La manufactura aditiva es el nombre correcto para hacer referencia a los distintos tipos de procesos que mediante la unión de materiales, usualmente capa sobre capa, generarán un objeto a partir de un modelo 3D [ASTM F2792, 2013]. Las principales ventajas de este tipo de manufactura son la posibilidad de producción de geometrías muy complejas, uso eficiente de materiales y la viabilidad económica de la producción personalizada. Las cuales vienen siendo aprovechadas en industrias de alto valor como aeroespacial, automotriz, dental y médica [Babu, 2015].

El inicio de manufactura aditiva se dio en 1986 cuando Charles Hull patentó la estereolitografía (SLA), la cual fue la primera técnica de manufactura por adición. Esta técnica se basa en la solidificación de capas de resinas de fotopolímeros [Shilo, 2018]. Dos años más tarde, Carl Deckard desarrollo una patente para la técnica de síntesis por selección laser (SLS) la cual consiste en unir capas del material base en forma de polvo fusionándolo por medio de un láser localizado. Durante el mismo año, 1988, Scott Crump patentó la técnica de modelado por deposición fundida (FDM). Dicha técnica consiste en llevar el material termoplástico por encima de su temperatura de fusión y así depositarlo capa por capa. Scott se convirtió en el co-fundador de una de la empresas más importantes hasta la actualidad relacionados al tema de impresión 3D, Stratasys [Hannah, 2016].

Fue así como en este corto periodo quedaron establecidas las tres principales técnicas de impresión 3D. Estas han sido durante años las técnicas más usadas hasta la actualidad. Según el último reporte de Sculpteo, the state of 3D printing 2020, la técnica FDM es la más popular siendo usada por el 46 % de los encuestados, seguido de SLA usado por el 38 % y finalmente SLS por el 33 %. Adicionalmente, dicho informe indicó que los plásticos siguen siendo el material más usado con 65 %, seguido de los metales con un 36 %.

Sin embargo, su escasa participación en la industria manufacturera actual se debe principalmente a dos factores. La insuficiente diversidad de materiales disponible para ser procesados, ya que solo se pueden procesar metales y cerámicos en polvo, resinas en soluciones y filamentos a base de polímeros.

La segunda, la falta de conocimiento del efecto que tienen los procesos de manufactura aditiva sobre los materiales, por ejemplo, las propiedades de los productos obtenidos [Babu, 2015].

Respecto a este último punto, la finalidad del presente trabajo de tesis es de carácter experimental. El cual busca generar datos relevantes acerca de la relación de las propiedades mecánicas de los materiales y los principales parámetros de impresión. Estos datos podrán ser usados en futuras aplicaciones en ingeniería.

El objetivo del presente trabajo es determinar los parámetros de fabricación óptimos del proceso de modelado por deposición fundida usando acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y acrilonitrilo butadieno estireno reforzado con fibras de carbono (ABS/CF), así como determinar la influencia de cada parámetro sobre las propiedades mecánicas, con el fin de fabricar productos terminados.

A partir del objetivo principal se desprenden los siguientes objetivos específicos.

- 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 acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y acrilonitrilo butadieno estireno reforzado con fibras de carbono (ABS/CF).
- Definir los rangos de trabajo de cada parámetro seleccionado, mediante ensayos de impresión 3D.
- Definir el diseño experimental a ser usado en la caracterización de materiales fabricados mediante la técnica FDM a partir de ABS y ABS/CF, considerando los parámetros seleccionados.
- Fabricar probetas mediante la técnica FDM a partir de ABS y ABS/CF según el diseño experimental.
- Realizar ensayos mecánicos para evaluar las propiedades mecánicas de material impreso.
- Evaluar la influencia de los parámetros seleccionados sobre las propiedades mecánicas y determinar los valores de estos parámetros que maximicen las propiedades en tracción.
- Corroborar los valores de los parámetros obtenidos para maximizar las propiedades en tracción, mediante el ensayo de probetas elaboradas con dichos parámetros.
- Evaluar la influencia del porcentaje de relleno sobre las propiedades mecánicas.

En resumen, se busca poder explicar como la variación de distintos parámetros de impresión afectará las propiedades mecánicas propias del material impreso mediante la técnica de modelado por deposición fundida, en este trabajo se estudiará materiales impresos a partir de polímeros termoplásticos como ABS y la misma matriz con refuerzo de fibras de carbono.

El presente trabajo de tesis se estructuró de la siguiente manera:

**Capítulo 1.** En este capítulo se describirá las principales técnicas de manufactura aditiva, las características de los polímeros termoplásticos y los compuestos haciendo énfasis en los reforzados por fibras. Así como también, se presentarán resultados de investigaciones relacionadas a la impresión 3D y de los materiales a tratar. Finalizando con ejemplos aplicativos relacionados al modelado por deposición fundida.

**Capítulo 2.** En este capítulo se exponen los materiales y equipos usados durante la realización del trabajo. Luego, se presentará la metodología experimental planteada, la cual fue utilizada para cumplir los objetivos presentados anteriormente. También, se expone el diseño experimental seleccionado para realizar los ensayos. Los cuales quedaran definidos completamente con los parámetros de estudio seleccionados, numero de probetas a usar, criterio de discriminación sobre valores atípicos y el tipo de ensayo mecánico adecuado.

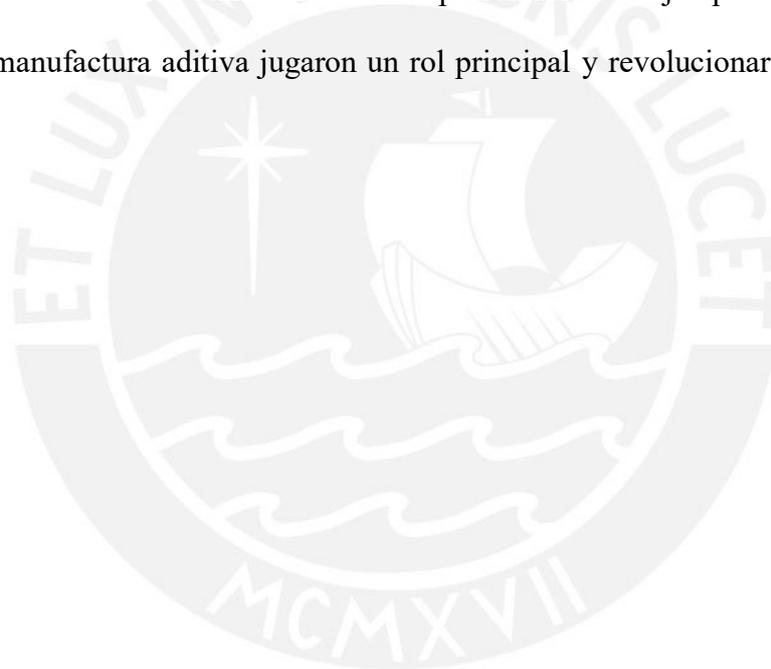
**Capítulo 3.** En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos de los diversos ensayos realizados sobre filamentos y probetas de los materiales en estudio. Con estos se procederá a analizar el comportamiento de cada uno y su interacción con las propiedades mecánicas correspondientes.

Se concluirá el presente trabajo exponiendo las principales conclusiones extraídas a partir de los ensayos realizados. Finalizando con la presentación de la bibliografía consultada para la realización del presente trabajo.

# Capítulo I:

## Estado del arte

En este primer capítulo se repasará la historia del proceso de manufactura aditiva. Seguido de la descripción de los principales procesos, haciendo énfasis sobre el proceso de modelado por deposición fundida (FDM o FFF). Seguido se expondrá las propiedades de los materiales en estudio del presente trabajo como son el ABS y ABC/CF. Luego se presentará las principales investigaciones previas sobre la influencia de parámetros de impresión FDM sobre las propiedades de los materiales. Culminando con la presentación de ejemplos aplicativos donde las técnicas de manufactura aditiva jugaron un rol principal y revolucionario en las distintas áreas.



## 1.1. Manufactura aditiva

La manufactura aditiva surgió inicialmente como una tecnología de prototipado rápido, desarrollada para usos industriales y de ingeniería. Sin embargo, su uso se extendió a diversas aplicaciones y en diversos campos.



Gráfico 1 Aplicaciones de la impresión 3D. [Adaptado de Sculpteo, 2018].

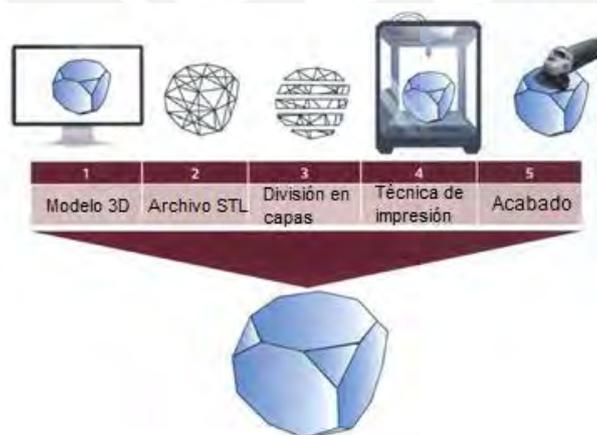
Como se puede apreciar en el **Gráfico 1**, las tres principales aplicaciones son el prototipado y la producción de objetos terminados. Cabe resaltar que el uso se extiende sobre áreas tan diversas como el marketing, la educación y el arte.

Las principales ventajas de este tipo de manufactura frente a los procesos tradicionales son los siguientes:

- La complejidad del diseño que se puede lograr con la manufactura por adición muchas veces es inalcanzable con métodos de manufactura tradicionales.
- La personalización del diseño no encarecerá el producto debido a que no será necesario maquinado o material adicional.

- Ínfima necesidad de herramientas adicionales para la producción, ahorrando dinero y tiempo en conseguir dichas herramientas.
- Máxima eficiencia en el uso de la materia prima, ya que se aporta material exclusivamente en la zona de construcción de la pieza. En caso se requiera generar estructuras de apoyo se suele usar el mismo material de la pieza o incluso unos hidrosolubles.
- La ventaja competitiva de este tipo de manufactura se da en volúmenes de producción tanto medianos como pequeños.

Existen diversas técnicas de manufactura por adición. Sin embargo, el proceso que comprenden todas son similares. En la **Figura 1**, se muestra cómo se inicia con un diseño 3D del producto, luego se discretiza la superficie usando diversas formas geométricas, a continuación, se divide la superficie en finas capas para poder establecer el orden en el cual serán creados. Finalmente, según la técnica de impresión seleccionado se procederá a la manufactura del objeto añadiendo capa por capa de líquido o polvo. Adicionalmente, el proceso puede ser complementado con un post tratamiento generalmente para lograr un acabado superficial específico.



*Figura 1 Proceso de manufactura por adición. [Adaptado de Defense Acquisition University, 2018].*

Con se mencionó anteriormente, existen diversas técnicas de impresión y con el transcurrir de los años siguen surgiendo más. Sin embargo, no todas logran gran popularidad debido a sus

usos muy específicos o costos muy elevados. Según el último informe de 3D Hubs Q1 2018, el modelado por deposición fundida es usado por un 66% de los entrevistados, le sigue la estereolitografía, sintetizado selectivo por láser y polyjet. Con porcentajes de uso de 15, 12 y 4 % respectivamente.

## **1.2. Técnicas de manufactura aditiva**

### **1.2.1. Estereolitografía (SLA)**

Fue la primera técnica de manufactura aditiva la cual fue patentada en 1986 por Charles Hull, un año luego Charles formó la primera empresa de manufactura aditiva llamada 3D Systems Corporation la cual es una de las líderes a nivel mundial en este mercado.

La estereolitografía es un proceso en el cual se usa como materia prima fotopolímeros de resina líquida que serán curados con ayuda de un láser de luz ultravioleta. En la **Figura 2**, se puede apreciar los principales componentes de las impresoras que usan esta técnica como son: la batea para el fotopolímero, plato de impresión, escáner y láser UV. El proceso se inicia con la batea llena del fotopolímero, luego se eleva el plato de impresión y este irá descendiendo según la altura de capa seleccionada por el usuario. Cabe resaltar que las alturas de capa típicas de este tipo de impresión están comprendidas desde 0.05 mm hasta 0.15 mm. De esta manera, ya con cierta capa de resina líquida sobre el plato, se direcciona la luz del láser con ayuda del escáner. Este realiza la función de un espejo, entonces el haz de luces se mueve sobre el plato dibujando la configuración determinada por el usuario. Así, el fotopolímero será curado a medida que la luz ultravioleta incida sobre este. Formando así la primera capa sólida, este proceso se repetirá hasta finalizar el sólido. Al concluir la impresión se drena la resina líquida excedente y se finaliza exponiendo la pieza a una cámara de luz ultravioleta para incrementar el porcentaje de curado del fotopolímero [Kim, 2016].

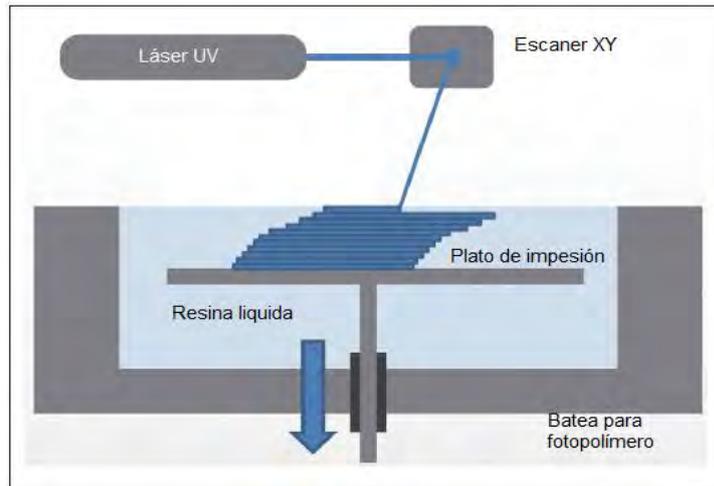


Figura 2 Principio de funcionamiento de SLA. [Adaptado de Kim, 2016].

La estereolitografía es considerada la técnica que genera el mejor acabado superficial y mayor precisión que cualquier otra técnica actual. Una muestra de ello es el uso de esta técnica en la reconstrucción de huesos del cráneo en humanos, donde se obtienen desviaciones de alrededor de  $0.23 \pm 1.37$  mm respecto al hueso real [Nizam, 2006].

### 1.2.2. Modelado por deposición fundida (FDM)

En 1988 Scott Crump patentó la técnica de modelado por deposición fundida para luego fundar Stratasys Ltd. Actualmente, es la técnica de impresión de mayor uso a nivel mundial debido a la facilidad y versatilidad que presenta comparado con las demás técnicas. Esta técnica puede ser usada para la producción de artículos decorativos, así como para producción de partes de automóviles.

Esta técnica usa filamentos de polímeros termoplásticos como materia prima que pueden ser de 1.75 mm o 2.85 mm de diámetro. Los principales componentes de las impresoras que usan esta técnica son: el plato de impresión, los rodillos alimentadores, boquillas y el cabezal extrusor, estos componentes se aprecian en la **Figura 3**. Este último, el cabezal extrusor, se encargará de llevar por encima de su temperatura de fusión al material y así poder depositarlo en el plato de impresión.

El proceso se inicia colocando las bobinas de filamentos en el carrete. Luego con el plato de impresión elevado se procede a descender una altura equivalente al espesor de capa a realizar. Para que el material llegue al plato deberá pasar por la boquilla ubicada a la salida del cabezal donde adquirirá las dimensiones del orificio de la boquilla, esto se logrará debido a la acción impulsora de los rodillos sobre el filamento. Una vez finalizado la deposición de la primera capa, el plato descenderá y se repetirá el proceso hasta obtener el objeto final.

El acabado superficial que se logra mediante FDM no es de los mejores por lo cual muchas veces para aplicaciones estéticas se opta por un post-tratamiento con acetona. Sin embargo, puede ser de los procesos aditivos que mayor volumen deposita y así reducir sus tiempos de fabricación. Los principales parámetros a controlar para aumentar la velocidad son la altura de capa y la velocidad de movimiento del cabezal.

Respecto a la altura de capa, esta será limitada según la boquilla que se use para imprimir. La boquilla delimitará el ancho de las líneas que formarán la impresión. Además, las alturas de capa que se pueden lograr durante la impresión dependerán del diámetro de boquilla que se use teniendo como límite máximo una altura de capa igual al diámetro de la boquilla, razones por las cuales la elección de una boquilla adecuada no debe pasarse por alto.

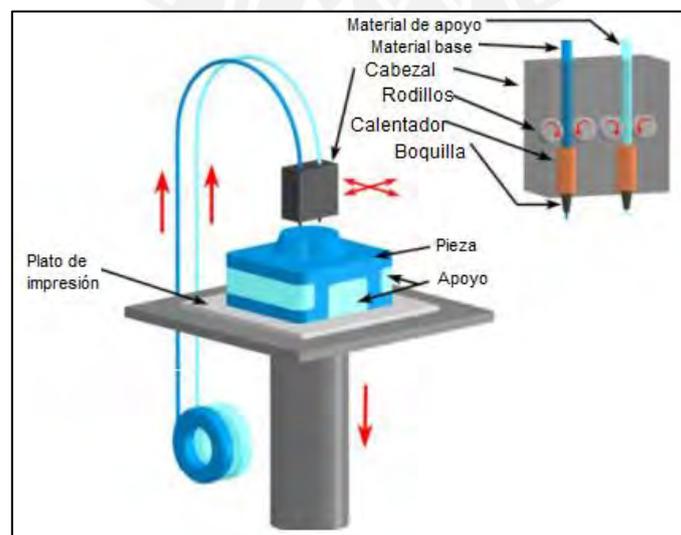


Figura 3 Principio de funcionamiento de FDM.

### 1.2.3. Sintetizado selectivo por láser (SLS)

En 1988 en la universidad de Texas en Austin, Carl Deckard en colaboración con Joe Beaman desarrollaron la patente de la técnica de sintetizado por láser selectivo patrocinados por una agencia gubernamental. Al año siguiente crearon la empresa DTM, dedicada la producción de impresoras que aplicarán la tecnología SLS. Sin embargo, en el año 2001 una de las empresas de impresión 3D más grandes 3D System adquirió DTM.

En este proceso se emplea materia prima en forma de polvo, pudiendo ser polímeros termoplásticos, metales o cerámicos. Los componentes principales usado en este proceso son: un láser de CO<sub>2</sub> de potencias entre 50 y 200 W, un escáner, dos bandejas, un rodillo y el plato de impresión. La disposición de los componentes se puede apreciar en la **Figura 4**. El proceso de impresión se inicia con una bandeja llena del polvo base y la otra libre del material con el plato de impresión elevado. En base a la altura de capa seleccionada, el rodillo transportará material sobre el plato de impresión. Luego el escáner direccionará el láser sobre la superficie del plato, el láser calentará el material hasta fusionarlo y así formar una capa sólida. A continuación, el plato de impresión desciende una altura determinada según la altura de la siguiente capa y se repetirá el proceso hasta concluir la pieza. Para finalizar se hace un tratamiento superficial de granallado con polvo, esto debido a que las impresiones obtenidas por SLS son opacas, con acabados abrasivos y porosos. [Kim, 2016].

Debido a los altos costos del material y elevados tiempos de impresión se suele aprovechar al máximo el área de impresión realizando varias piezas a la vez.

La precisión que se puede lograr con esta técnica es alta con errores entre 0.1 y 0.6 mm.

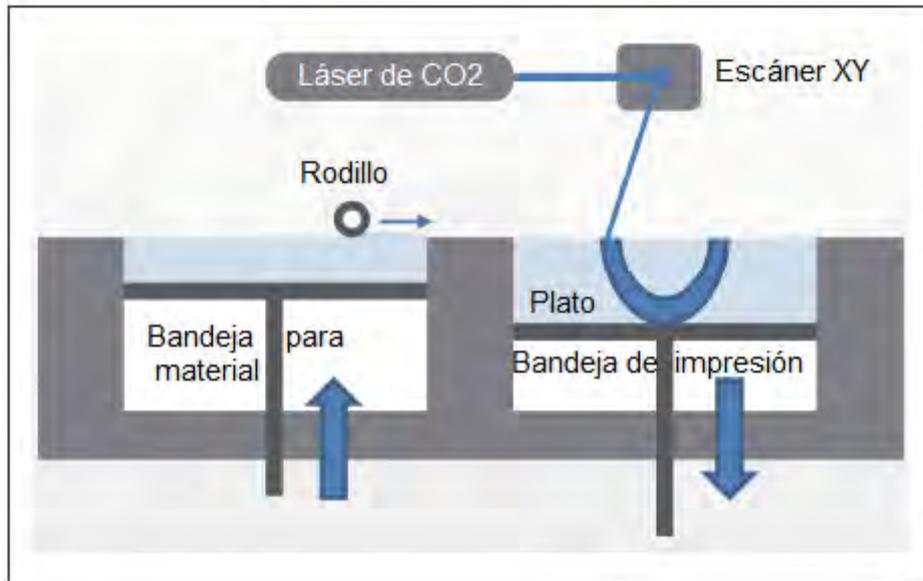


Figura 4 Principio de funcionamiento de SLS. [Adaptado de Kim, 2016].

#### 1.2.4. Polyjet

Al igual que los procesos antes mencionados, se inicia con el plato de impresión elevado. Sobre el cual se inyectará en chorros de fotopolímeros en capas muy finas de alrededor de 16  $\mu\text{m}$ , como se visualiza en la **Figura 5**, cada capa será curada inmediatamente por la lámpara de luz UV. En el caso de necesitar capas de apoyo debido a la complicada geometría del modelo, se cuenta con un inyector especial para gel, cuya posterior remoción puede hacerse manual o disolverse en agua.

Debido al curado inmediato que reciben las capas, el sólido obtenido no necesita recibir un tratamiento de post curado como en el caso de la estereolitografía.

Pese a la buena precisión que se logra con esta técnica, su poca popularidad se debe a los extensos tiempos de manufactura.

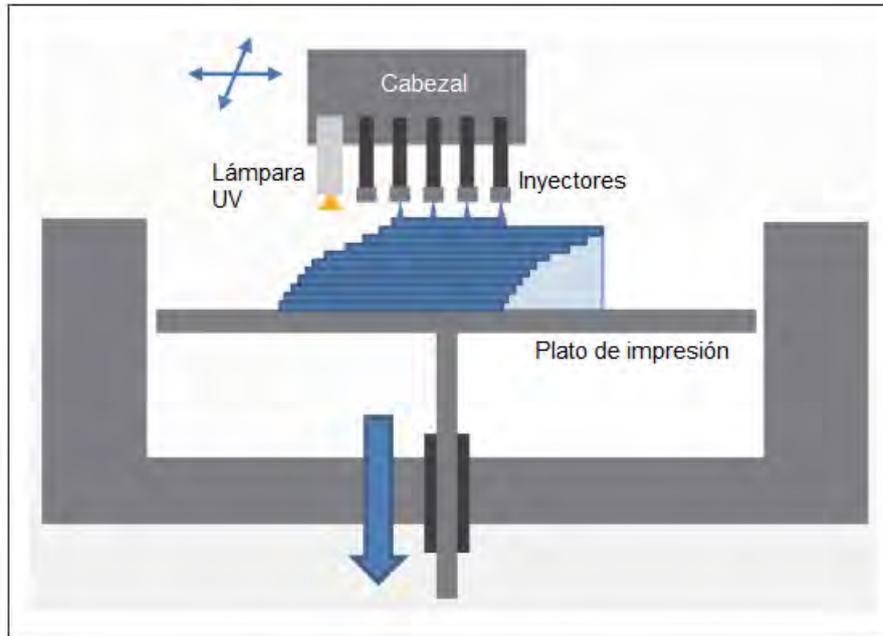


Figura 5 Principio de funcionamiento de Polyjet. [Adaptado de Kim, 2016].

### 1.3. Propiedades del Acrilonitrilo Butadieno Estireno y su refuerzo con fibra de carbono

Existen diversas clasificaciones para los polímeros como son: basado en su comportamiento de procesamiento térmico, mecanismo de polimerización, estructura polimérica, etc. Para este caso nos centraremos en la primera, el comportamiento térmico de los polímeros, diferenciándose en dos grandes grupos los termoplásticos y los termoestables. Los termoplásticos como el ABS pueden ser calentados para ablandarlos y ser procesados, incluso estos una vez desechados pueden ser recuperados aplicando calor y presión para ser reutilizados. En cambio, los polímeros termoestables debido a que sus cadenas poliméricas están unidas por enlaces covalentes, son resistentes al ablandamiento por calor, efecto creep y ataques solventes imposibilitando la reutilización de estos. [Fried, 2003]

El ABS también está clasificado como un plástico de ingeniería, debido a que los procesos necesarios para obtener este material suelen ser más complejos que los otros polímeros. Durante 1960 se desarrollaron diversos procesos de obtención de ABS entre ellos están el

polimerizado en masa, polimerización por suspensión y emulsión. Siendo esta última la más usada. En cuanto a la composición del ABS los valores de una formulación típica son menos de 15 % de butadieno y menos de 20 % de acrilonitrilo.

A continuación, en la **Tabla 1**, se presentan el rango admisible del ABS extruido típico.

*Tabla 1 Propiedades volumétricas, térmicas y mecánicas del ABS extruido típico.*

*[Tomado de Fried, 2003 y Ellis, 2008].*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Observación</b>
<b>Volumétricas y térmicas</b>		
<b>Densidad</b>	1.06 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
<b>Tf</b>	230-250°C	-
<b>Tg</b>	88-120°C	-
<b>Mecánicas</b>		
<b>Resistencia a la tracción</b>	35 - 45 MPa	50 mm/min, ISO 527
<b>Modulo elástico</b>	1 600-2 700 MPa	1 mm/min, ISO 527
<b>Resistencia a la flexión</b>	52 – 85 MPa	5 mm/min, ISO 178
<b>Módulo de flexión</b>	1 800-2 400 MPa	2 mm/min, ISO 178

Los polímeros son usados extensamente para distintas aplicaciones debido al bajo costo de procesamiento y gran versatilidad que presentan. Esta última característica es la que permitió el mejoramiento de las propiedades mecánicas a partir de la incorporación de refuerzos a la matriz polimérica base.

Dentro de los refuerzos más usuales se encuentran los refuerzos de fibras de carbono, cuyo efecto principal sobre la matriz del polímero es aumentar la rigidez del compuesto, disminuir la deformación de rotura y en alguna medida aumentar la resistencia a la tracción. Estas mejoras se logran debido a que, al reforzar el polímero, se insertan pequeños filamentos dentro de la

estructura. Logrando así limitar la movilidad entre las cadenas de la matriz polimérica. A continuación, en la **Tabla 2**, se presentan el rango admisible del ABS reforzado con fibras de carbono extruido típico.

*Tabla 2 Propiedades volumétricas, térmicas y mecánicas del ABS/CF extruido típico. [Tomado de Fried, 2003].*

<b>Propiedades Volumétricas y térmicas</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Norma</b>
Densidad	1.12 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Tf	210-260°C	-
Tg	100-110°C	-
<b>Propiedades Mecánicas</b>		
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>	<b>Norma</b>
Resistencia a la tracción	80 MPa	50 mm/min, ISO 527
Modulo elástico	12 409-13 788 MPa	1 mm/min, ISO 527
Resistencia a la flexión	100 MPa	5 mm/min, ISO 178
Módulo de flexión	6 000 MPa	2 mm/min, ISO 178

#### **1.4. Investigaciones previas sobre las propiedades del ABS impreso mediante FDM**

Existen estudios acerca del comportamiento del ABS luego de ser impreso mediante diversas técnicas, esto debido en gran medida a que este al ser un polímero de ingeniería es de suma importancia conocer sus propiedades mecánicas, para poder ser usado en distintas aplicaciones de requerimientos específicos. A continuación, se presentarán series de estudios y resultados relevantes acerca de ciertos parámetros de impresión usualmente usados en la técnica de modelado deposición fundida.

Kenny Álvarez, investigador de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, estudió el comportamiento de la resistencia al variar el porcentaje de relleno de las probetas que ensayó.

Para dichas probetas utilizó la norma ASTM D638, las cuales fueron impresas por una MakerBot modelo Replicator 2X. Las condiciones para obtener las probetas se pueden apreciar en **Tabla 3**.

*Tabla 3 Condiciones usadas para variación del porcentaje de relleno. [Tomado de Álvarez, 2016]*

<b>Temperatura de mesa de impresión</b>	125 °C
<b>Temperatura de impresión</b>	250 °C
<b>Velocidad de impresión</b>	90 mm/s
<b>Velocidad de avance</b>	150 mm/s
<b>Numero de capas superior / inferior</b>	2
<b>Altura de capa</b>	0.2 mm
<b>Díámetro del extrusor</b>	0.4 mm

Cabe resaltar que se configuró un patron hexagonal para la impresión; sin embargo, cuando se realizo la impresión al 100 % de relleno el software propio de la impresora tomó una configuración de líneas con orientación longitudinal.

A partir de las pruebas se obtuvo la mayor resistencia a la tracción para el 100 % de relleno (ver **Gráfico 2**), siendo esta de 34.6 MPa con deformación unitaria a la rotura de 6.3 % y con un módulo de elasticidad de 1015 MPa, como se puede apreciar en **Gráfico 3**. También, se analizó la resistencia al impacto registrando un máximo de 1,55 J para la probeta rellena al 100%.



Gráfico 2 Resistencia a la tracción- porcentaje de relleno. [Tomado de Álvarez, 2016].

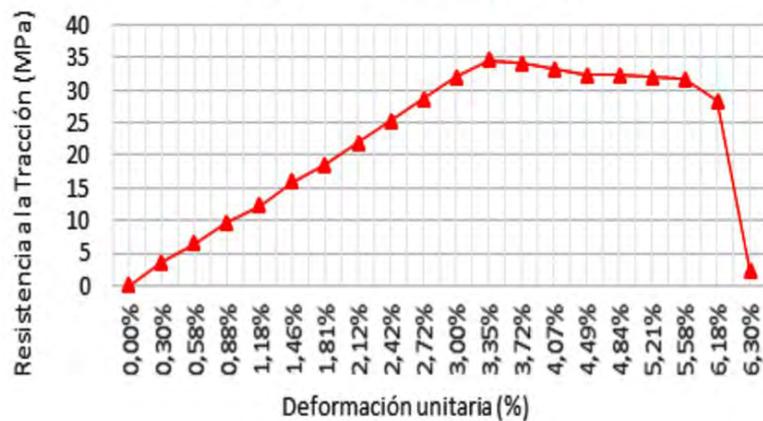


Gráfico 3 Resistencia a la tracción- deformación unitaria para relleno del 100 %. [Tomado de Álvarez, 2016].

Respecto al ángulo de impresión, Ziemian en el 2012 y Letcher en el 2015 realizaron estudios cuyos resultados coinciden en que para un ángulo de  $0^\circ$  respecto al eje longitudinal se obtienen las mayores resistencias a la tracción. Cabe resaltar que durante el estudio se comparó orientaciones entre  $0^\circ$  a  $90^\circ$  aumentando a una tasa de  $15^\circ$ .

Se realizó ensayos acerca de la variación del ángulo de impresión, donde se demostró que para un ángulo de  $0^\circ$  se obtuvo la máxima resistencia a la tracción comparándolo respecto a los ángulos de  $45^\circ$  y  $90^\circ$ . [Letcher, 2015; Ziemian, 2012].

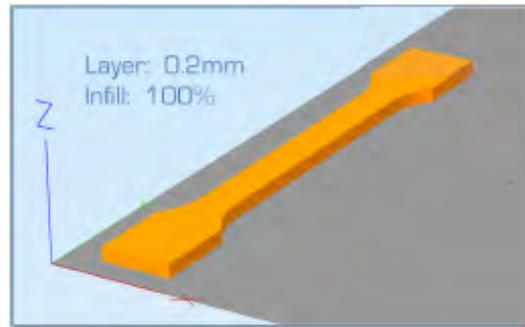
Sin embargo, no se podrá alcanzar las propiedades de una probeta semejante producida por inyección teniendo como un máximo usual el 78% del valor de la resistencia a la tracción. [Ryan, 2018]

En cuanto a la altura de capas que conforman las piezas impresas, fue demostrado estadísticamente que a menores alturas de capa se logra mayores resistencias a la tracción. El estudio realizado por [Rankouhi, 2016] demostró que usando capas de 0.2 mm se mejoró la resistencia respecto a capas de 0.4 mm.

Cabe resaltar que algunos fabricantes de filamentos comerciales como 3DXTECH proporcionan cierta información sobre las propiedades del material impreso bajos ciertos parámetros establecidos como se presentarán a continuación.

*Tabla 4 Parámetros de impresión correspondiente a la ficha técnica del proveedor 3DXTECH.*

<b>Técnica de impresión</b>	<b>FDM</b>
<b>Boquilla</b>	0.4 mm
<b>Altura de capa</b>	0.2 mm
<b>Relleno/ orientación</b>	100%/ +/- 45°
<b>Temperatura de impresión</b>	230 °C
<b>Temperatura de mesa</b>	110°C
<b>Velocidad de impresión</b>	50 mm/s



*Figura 6 Simulación de la probeta usada por el proveedor 3DXTECH.*

### **1.5. Ejemplos aplicativos de técnicas de manufactura aditiva**

Como se mencionó anteriormente, los campos de aplicación de la manufactura aditiva siguen en aumento con el pasar de los años, ya no solo a nivel de prototipado sino como producto final. Uno de los ejemplos más relevante proviene de la industria aeroespacial, donde desde el 2017 se viene ejecutando el proyecto Futuralve. Cuya finalidad es desarrollar nuevas turbinas de alta velocidad, como se aprecia en la **Figura 7**, que permitan alcanzar mayores flujos de aire durante los despegues. [Gibbones, 2017]

La geometría de los nuevos diseños de turbinas se presenta muy complejas o incluso inviables con métodos de manufactura tradicional, es por ellos que la empresa Renishaw en conjunto con el Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales (CATEC) perteneciente a Sevilla en España vienen incorporando técnicas de manufactura aditiva de sinterizado laser. En esta técnica incorporan aleaciones metálicas de hasta 10 tipos distintos que otorgan las propiedades mecanizas específicas a cada zona de las turbinas. [Gibbones, 2017]

También el campo de la biomedicina surge como uno donde se ha tenido mayores avances en estos años. Al comienzo se usó solo para el prototipado con carácter meramente educativo. Luego con la incorporación nuevos procesos al de manufactura aditiva, estos se aprecian en la **Figura 8**, como lo son la captura de imágenes, desarrollo de materiales mediante cultivo de células y el proceso de maduración de tejidos se dio inicio al desarrollo de tejidos funcionales [Sanjairaj, 2018].



Figura 7 Fabricación de nuevos diseños para turbinas desarrollado por Renishaw [Gibbones, 2017]

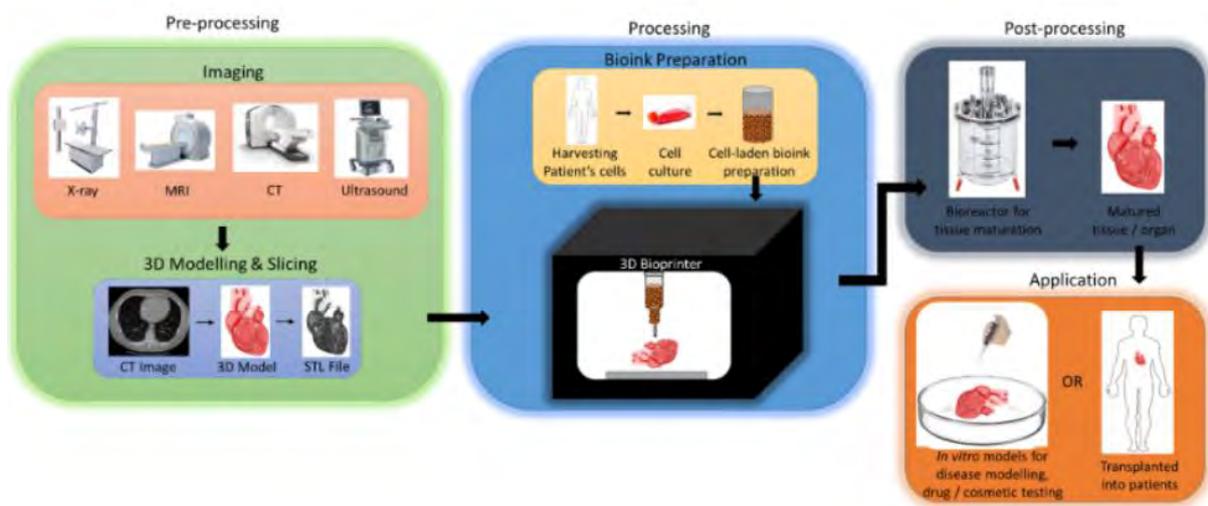


Figura 8 Proceso de manufactura para tejidos orgánicos [Sanjairaj, 2018]

A continuación, se presentan algunos casos resaltantes:

Durante el 2013, se llegaron a producir 10 millones de audífonos personalizados a nivel mundial [Dodziuk, 2016]. Esto gracias a que el proceso paso de un modelado artesanal de 9 pasos a uno estandarizado y eficiente, con ayuda del escaneo e impresión 3D. Por ejemplo, la empresa Envision TEC aceleró enormemente su línea, pasó de una producción semanal de 60 prótesis a 65 piezas por hora [Contreras, 2018]. En la **Figura 9** se muestra el modelo de audífono generado por impresión 3D. Cabe resaltar que los precios de fabricación de estas piezas personalizadas son mucho más económicos que las obtenidas a partir de inyección plástica, esto debido a que no hace falta un molde o pre forma inicial.



*Figura 9 Muestra de audífonos personalizados impreso por la empresa Envision TEC [Contreras, 2018].*

Otro ejemplo de aplicación interesante es en la unión de la prótesis del tren inferior con la zona amputada. A pesar que las prótesis de pierna vienen siendo usadas hace años, los usuarios muchas veces terminan rechazándolas para optar por muletas y sillas de ruedas [Taylor, 2020]. Esto se debe principalmente a la gran molestia y dolor que les origina el contacto entre el muñón y la pieza superior de la prótesis, ver **Figura 10** se hace referencia a la pieza superior

[Mei, 2015]. Esta dolencia manifestada por los usuarios se debe a la forma y crecimiento particular de cada muñón.

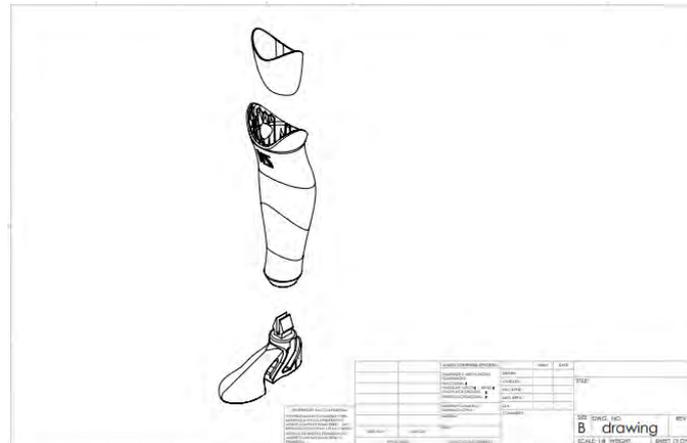


Figura 10 Modelo de prótesis de pierna usual. Arriba unión con muñón, al medio soporte principal y abajo prótesis de pie [Mei,2015].

Para resolver esta problemática en el 2015 en la universidad de Auburn, el estudiante de maestría Zhe Mei desarrolló una propuesta con tecnología de impresión 3D de prótesis inferior de bajo presupuesto. En la **Figura 11** se puede observar las múltiples posiciones que adopta la prótesis durante la caminata del usuario.

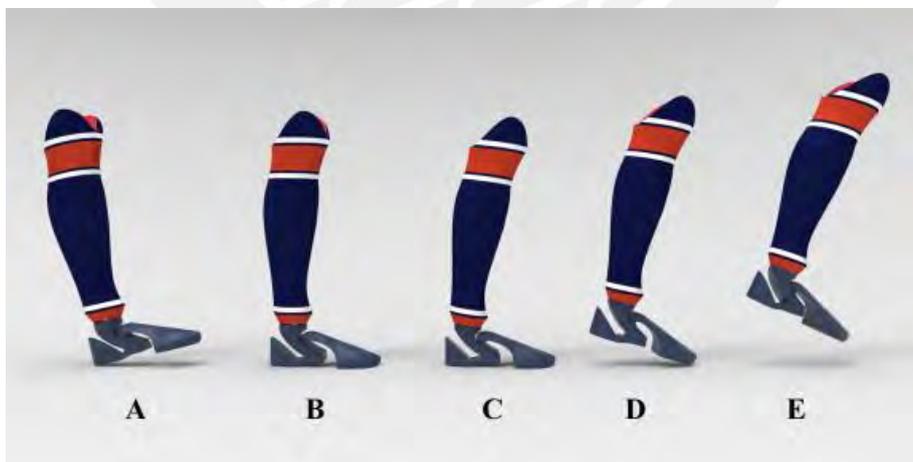


Figura 11 Simulaciones de la prótesis presentada por Mei [Mei, 2015]

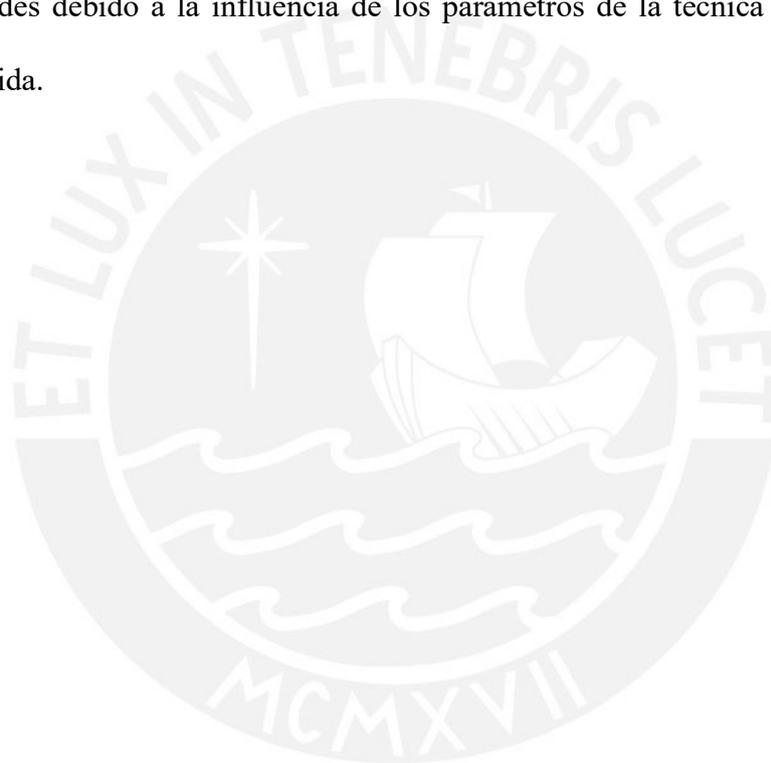
Como se pudo apreciar en los múltiples ejemplos presentados, la manufactura aditiva presenta el potencial necesario para brindar apoyo a las poblaciones con discapacidad de nuestro país.

Respecto a esto último, en el Perú el último registro de personas con discapacidad data del 2020. El Consejo Nacional para la Integración de la Persona con discapacidad (CONADIS) con ayuda de Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) elaboró el Registro Nacional de la Persona con Discapacidad o también llamado RNPCD, el cual busca contabilizar y clasificar a los registrados según su ubicación, educación, sexo y edad. Todo con la finalidad de poder direccionar de mejor manera los recursos y planear sus próximas acciones. En la **Tabla 5** se presentan los resultados obtenidos de dicho registro.

*Tabla 5 Resultados de RNPCD de marzo 2020 [CONADIS,2020]*

Región	Censos Nacionales 2017: XII de Población y VII de Vivienda	Registro Nacional de la Persona con Discapacidad 1/	
	Abs.	Abs.	%
<b>Total</b>	<b>3 209 261</b>	<b>299 280</b>	<b>9.3</b>
Amazonas	36 557	8 069	22.1
Áncash	129 219	9 631	7.5
Apurímac	45 723	6 961	15.2
Arequipa	158 987	11 740	7.4
Ayacucho	67 082	7 482	11.2
Cajamarca	119 632	14 532	12.1
Callao	114 750	11 410	9.9
Cusco	144 562	15 009	10.4
Huancavelica	35 137	7 127	20.3
Huánuco	70 901	8 219	11.6
Ica	93 671	8 420	9.0
Junín	134 820	10 602	7.9
La Libertad	167 632	11 599	6.9
Lambayeque	123 765	8 164	6.6
<b>Lima</b>	<b>1 109 948</b>	<b>90 574</b>	<b>8.2</b>
Loreto	77 260	4 680	6.1
Madre De Dios	13 805	1 309	9.5
Moquegua	21 067	2 424	11.5
Pasco	26 446	5 503	20.8
Piura	173 477	21 373	12.3
Puno	160 082	12 449	7.8
San Martín	76 781	8 079	10.5
Tacna	40 065	3 554	8.9
Tumbes	22 211	6 393	28.8
Ucayali	45 683	3 548	7.8

Justamente pensando en apoyar a este grupo de personas el grupo de investigación liderado por el profesor Julio Acosta en colaboración con la SALA VEO PUCP presentó el proyecto de investigación 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”. Justamente esta tesis aportará la caracterización de los materiales en estudio como son el ABS y ABS/CF y la mejora en sus propiedades debido a la influencia de los parámetros de la técnica de modelado por deposición fundida.



## **Capítulo II:**

### **Parte experimental**

En este segundo capítulo se presentarán los materiales de estudio, acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y una matriz compuesta por este mismo polímero y refuerzos de fibras de carbono (ABS/CF). También se expondrá los equipos y ensayos necesarios tanto para caracterizar el material original como el material impreso elaborado a partir de los filamentos de ABS y ABS/CF. El procedimiento experimental usado para reducir el número de ensayos requeridos, metodología de Taguchi, y establecer los niveles de cada parámetro en estudio.

Así mismo se detallará el procedimiento para la fabricación de probetas y método estadístico seleccionado para descartar valores atípicos.

## 2.1. Materiales

Para el presente trabajo de investigación se usó filamentos obtenidos a partir de polímeros termoplásticos de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y el mismo con refuerzos de fibra de carbono (ABS-CF) provenientes de la marca de origen americano, llamada 3DXTECH®. Estos igual que todos los demás proveedores brindan sus presentaciones en bobinas que facilitan su almacenamiento y alimentación a las impresoras.

### 2.1.1. Filamento de Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

El filamento de resinas de acrilonitrilo butadieno estireno usado fue de 2,85 mm de diámetro, color natural. El proveedor 3DXTECH lo comercializa carretes de 1 kg y 5 kg. En este caso se usó carretes de filamentos de 1 kg como se puede observar en la **Figura 12**.



*Figura 12 Filamento de ABS marca 3DXTECH*

El proveedor también proporcionó parámetros recomendados de impresión para este material, los cuales se muestran a continuación en la **Tabla 6**. Estos fueron usados de manera referencial en la etapa inicial de la experimentación.

Tabla 6 Parámetros de impresión recomendados para ABS. [3DXTECH,2019]

Parámetro recomendado	Rango típico
Temperatura de extrusión	220-240 °C
Temperatura de cama	100-110°C
Velocidad de impresión	50-70 mm/seg

Así mismo, el fabricante compartió información técnica sobre las propiedades mecánicas evaluadas en sus probetas bajo la normativa ISO 527, ver **Tabla 7** y los parámetros de fabricación usados, ver **Tabla 8**. Dichos resultados a extensión se encuentran a detalle en el **ANEXO A**, y se presenta un resumen en las tablas siguientes, donde la representación geométrica de la probeta usada se presenta en la **Figura 13**.

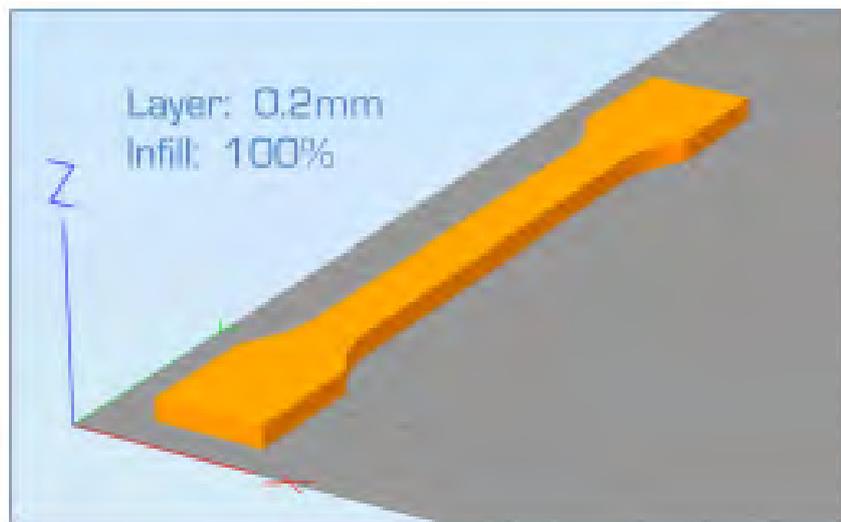


Figura 13 Representación gráfica de la probeta de ABS usada [3DXTECH, 2019]

Tabla 7 Propiedades mecánicas de la probeta de ABS [3DXTECH, 2019]

Propiedad general	Unidad	Norma	Valor
Densidad	g/cc	ISO 1183	1.05

<b>Propiedad mecánica</b>	<b>Unidad</b>	<b>Norma</b>	<b>Valor</b>
Resistencia la tracción	MPa	ISO 527	41
Módulo elástico	MPa	ISO 527	1950
Deformación unitaria	%	ISO 527	10
Modulo a la flexión	MPa	ISO 178	1983
Esfuerzo a la flexión	MPa	ISO 178	76

<b>Propiedad térmica</b>	<b>Unidad</b>	<b>Norma</b>	<b>Valor</b>
Temperatura de transición vítrea	°C	DSC	105

*Tabla 8 Parámetros usados en la probeta de prueba [3DXTECH, 2019]*

<b>Técnica de impresión</b>	FDM
<b>Diámetro de boquilla</b>	0.4 mm endurecida
<b>Altura de capa</b>	0.2 mm
<b>Relleno</b>	100 %
<b>Temperatura de extrusión</b>	230 °C
<b>Temperatura de cama</b>	110 °C
<b>Preparación de la cama</b>	Gel Acetona
<b>Velocidad de impresión</b>	50 mm/s

### 2.1.2. Filamento de Acrilonitrilo butadieno estireno con refuerzo de fibras de carbono (ABS/CF)

Filamento de resinas de acrilonitrilo butadieno estireno con refuerzo de fibras de carbono cuya concentración es de al menos el 15 %, según el proveedor. Las bobinas usadas fueron de 2,85 mm de diámetro, color negro perteneciente a la serie CarbonX™ de la marca 3DX TECH. En el presente trabajo se utilizó carretes de filamentos de 2 kg como se puede observar en la **Figura 14**.



Figura 14 Filamento de ABS-CF marca 3DX TECH

El proveedor también proporcionó parámetros recomendados de impresión para este material, los cuales se muestran a continuación en la **Tabla 9**. Estos fueron usados de manera referencial en la etapa inicial de la experimentación.

Tabla 9 Parámetros de impresión recomendados para ABS/CF. [3DXTECH,2019]

Parámetro recomendado	Rango típico
Temperatura de extrusión	220-240 °C
Temperatura de cama	100-110°C
Velocidad de impresión	50-70 mm/seg

Al igual que para el filamento puro, el fabricante publicó información técnica sobre las propiedades mecánicas de probetas a base del ABS/CF. Estas fueron realizadas según la norma ISO 527 y se exponen en la **Tabla 10**. Respecto a los parámetros usados en las probetas, ver **Tabla 11**. Cabe resaltar que el detalle total de la caracterización del material por parte de fabricante se encuentra en **ANEXO A**.

*Tabla 10 Propiedades correspondientes al filamento de ABS/CF. [3DXTECH, 2019]*

<b>Propiedad general</b>	<b>Unidad</b>	<b>Norma</b>	<b>Valor</b>
Densidad	g/cc	ISO 1183	1.11
<b>Propiedad mecánica</b>			
<b>Propiedad mecánica</b>	<b>Unidad</b>	<b>Norma</b>	<b>Valor</b>
Resistencia a la tracción	MPa	ISO 527	44
Módulo elástico	MPa	ISO 527	4018
Deformación unitaria	%	ISO 527	1.8
Módulo a la flexión	MPa	ISO 178	5260
Esfuerzo a la flexión	MPa	ISO 178	76
<b>Propiedad térmica</b>			
<b>Propiedad térmica</b>	<b>Unidad</b>	<b>Norma</b>	<b>Valor</b>
Temperatura de transición vítrea	°C	DSC	105

Tabla 11 Parámetros usados en la probeta de prueba [3DXTECH, 2019]

<b>Técnica de impresión</b>	FDM
<b>Diámetro de boquilla</b>	0.4 mm endurecida
<b>Altura de capa</b>	0.2 mm
<b>Relleno</b>	100 %
<b>Temperatura de extrusión</b>	230 °C
<b>Temperatura de cama</b>	110 °C
<b>Preparación de la cama</b>	Gel Acetona
<b>Velocidad de impresión</b>	50 mm/s

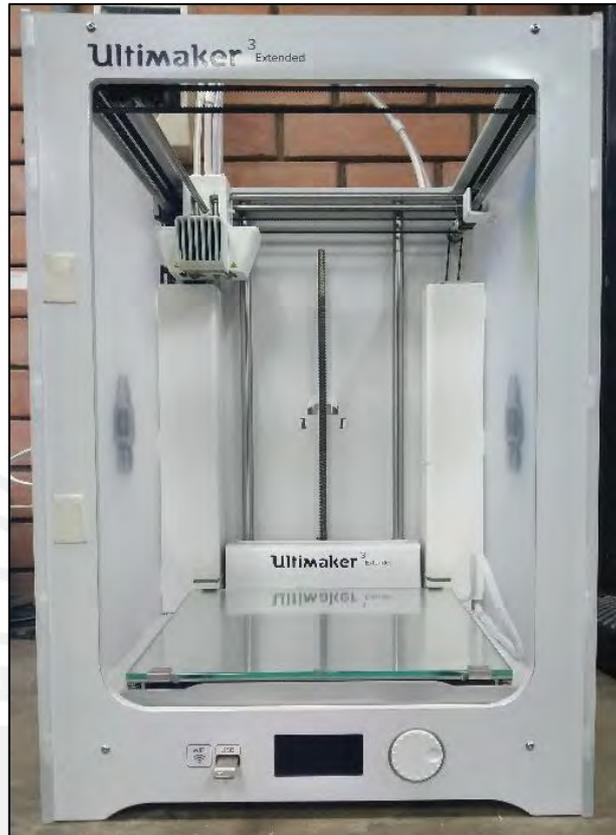
## 2.2. Equipos

En las siguientes líneas se presentan los equipos usados durante la experiencia del presente trabajo.

### 2.2.1. Impresora 3D

Para la elaboración de las probetas del material impreso se empleó la impresora 3D modelo Ultimaker 3 versión Extended. Esta se aprecia en la **Figura 15**, y pertenece a la marca Ultimaker de origen holandés. Esta impresora utiliza la tecnología de modelado por deposición fundida, también llamada “FDM” o “FFF”, cuya capacidad de volumen de impresión máximo es de 215 x 215 x 300 mm con una resolución de entre 20 a 200  $\mu\text{m}$  usando la boquilla de 0,4 mm. La Ultimaker 3 trabaja con filamentos de 2.85 mm de diámetro y entre sus principales diferenciadores cuenta con dos extrusores para el uso de dos materiales a la vez, plataforma de temperatura regulable y permite el uso de boquillas de 0.25, 0.4 y 0.8 mm. Por último, la impresora sitúa sus motores muy próximos a los carretes de filamento, es decir no sobre su cabezal de impresión, a esta arquitectura se le denomina tipo bowden y entre su principal

beneficio se encuentra la capacidad alcanzar altas velocidades de impresión. Esto debido a la menor inercia que presenta el tipo de cabezal bowden respecto al tradicional que lleva los motores sobre el cabezal.



*Figura 15 Impresora Ultimaker 3 Extended*

### **2.2.2. Secador de filamentos**

Debido a la naturaleza hidrófila del ABS y el ABS con refuerzo se usó el secador de filamentos marca PrintDry como se puede apreciar en la **Figura 16**. Para realizar el secado de la bobina de filamento basta con colocar la bobina sobre la base giratoria del secador, hacer pasar el filamento por el orificio de salida y conectar a la impresora. Finalmente, seleccionar la temperatura de secado adecuada según el material. Para nuestro caso se expusó durante 2 horas a una temperatura de 60 °C los filamentos antes de realizar impresiones, tiempo más que suficiente considerando que el ABS absorbe alrededor de 1.1 % de humedad [Halidi, 2012].



*Figura 16 Secador de filamentos marca PrintDry*

### **2.2.3. Balanza digital**

Se usó la balanza marca METTLER TOLEDO (ver **Figura 17**) para pesar los filamentos picados necesarios para los ensayos de fluidez. Esta balanza cuenta con una precisión de 0.0001 gramo y una capacidad máxima de 200 g.



*Figura 17 Balanza digital marca METTLER TOLEDO*

### 2.3. Diseño experimental

El desarrollo de la parte experimental del presente trabajo se llevó a cabo en dos etapas.

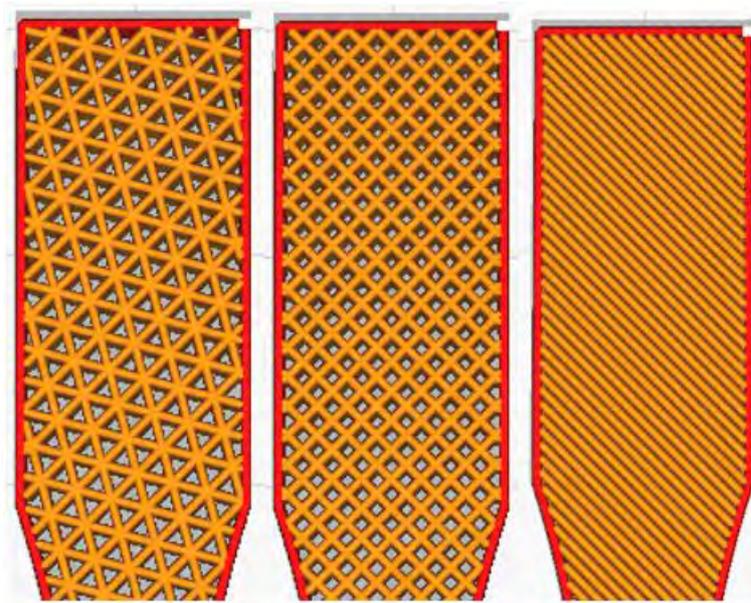
La primera se centró en la caracterización de los filamentos, con la finalidad de conocer las propiedades originales de los materiales en estudio.

En la segunda etapa, se ensayó a tracción probetas elaboradas a partir de los filamentos estudiados con la finalidad de evaluar parámetros característicos de la técnica de impresión 3D y su efecto en las propiedades mecánicas del producto final. Apoyados por la literatura previa, sabemos que el principio de la impresión por FDM es la adhesión de una capa sobre otra para formar objetos. Razón por la cual, las propiedades mecánicas de los objetos impresos dependerán de cuan fuerte se realice esta adhesión. A continuación, se presentarán los parámetros identificados que tienen impacto sobre la adhesión y serán parte del estudio del proyecto. Estos son la altura de capa, patrón de impresión, temperatura de impresión, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

La altura de capa influye sobre la coalescencia de los filamentos depositados, ya que al tener una menor altura de capa el material depositado será más compacto, produciéndose objetos con mejores propiedades mecánicas [Tymrak, 2014; Rankouhi, 2016]. Sin embargo, a bajos valores de altura de capa, el tiempo del proceso de fabricación de un componente puede llegar a duplicarse en comparación con una altura de capa de tamaño promedio (altura de capa de 0.2 mm). Se debe considerar que la altura de capa es también función de las propiedades reológicas del material; así, materiales de baja viscosidad depositaran filamentos más anchos y menos altos que otros de mayor viscosidad, influyendo en la compactación del componente impreso. Se tomó los valores de 0.1mm, 0.2mm y 0.3mm de altura de capa para la experimentación.

El patrón de impresión afecta en la densidad del elemento debido a las formas geométricas que dibuja sobre las capas. Al usar distintas figuras geométricas se reduce la cantidad de material

aportado por capa y así se obtiene elementos más livianos. Además, los patrones con capas más densas pueden dar lugar a una mayor adhesión entre estas y así aumentar la integridad estructural del elemento impreso. Para este trabajo se determinó el uso de los patrones de triangular, rejillas y líneas, los cuales fueron previamente estudiados por otros investigadores y demostraron ser los de mejor resistencia [Cabreira, 2020]. Se aprecian los patrones en la **Figura 18.**

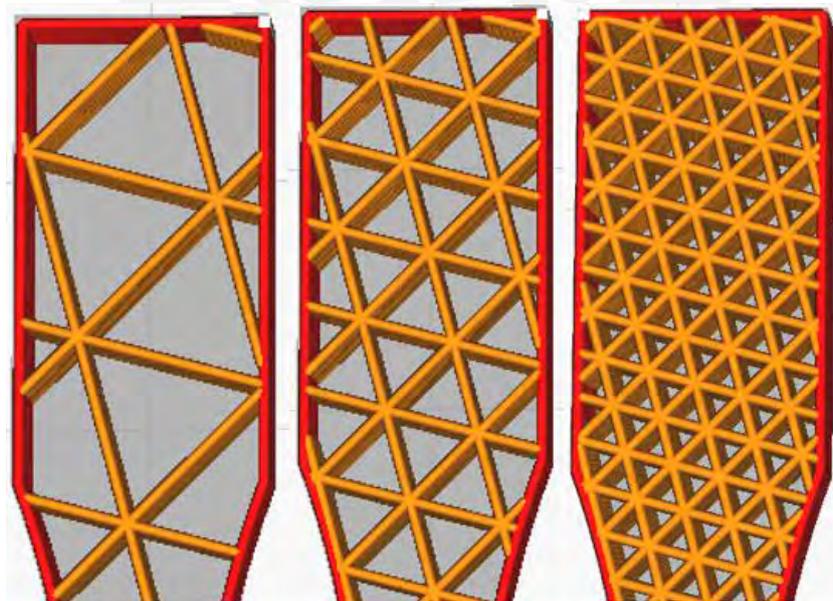


*Figura 18 Patrones de relleno. Triangular, rejillas y líneas.*

La temperatura de impresión influye sobre las propiedades mecánicas de los componentes impresos [Wittbrodt, 2015], así como en el acabado superficial y la precisión dimensional. Si la temperatura de impresión es baja se tendrá muy poca coalescencia entre los filamentos depositados, produciéndose mayores espacios vacíos en el interior del componente y por ende bajas propiedades mecánicas. Sin embargo, con geometrías complejas, las temperaturas de impresión altas distorsionarían el objeto a producir, teniendo además objetos con baja precisión dimensional. El proceso de selección de temperaturas se detalla en el apartado **2.4.2.1 Parámetros de estudio**, donde se describe los pasos para la experiencia. Las temperaturas seleccionadas en este caso fueron 240°C, 260°C y 280°C.

La velocidad de impresión es un parámetro importante, en tanto que éste influye sobre el tiempo que dura el proceso de impresión, además de tener una mayor deposición de material si se imprime con una baja velocidad; como resultado se podría producir un componente de acabado superficial deficiente pero más denso o también llamado de mayor integridad estructural. No obstante, al imprimir con una alta velocidad se podría conseguir una mayor coalescencia entre el filamento depositado y la capa anterior depositada, en tanto que se tiene un menor tiempo de enfriamiento entre capa y capa, por ende, mejores propiedades mecánicas. Este parámetro al igual que con la temperatura requirió una experimentación específica que se detalla en el apartado **2.4.2.1 Parámetros de estudio**. Las velocidades usadas para la investigación fueron 30mm/s, 40mm/s y 50mm/s.

El porcentaje de relleno controla cuan compacta será la estructura interna del elemento impreso y por consiguiente afectará tanto en el peso como integridad estructural de la pieza. En la **Figura 19** se puede apreciar tres diferentes configuraciones de relleno sobre un elemento al 20%, 40% y 80%. Para este estudio se varió el relleno de las probetas desde 50% hasta alcanzar el 100%.



*Figura 19 Ejemplos de porcentajes de relleno al 20%, 40% y 80%*

La evaluación sobre estos parámetros se hizo de la siguiente manera. Los cuatro primeros parámetros llámese altura de capa, patrón de relleno, temperatura y velocidad de impresión fueron estudiados en conjunto, en esta etapa se imprimió a 100% de relleno. A partir del resultado que maximice la resistencia a la tracción se procedió a variar el porcentaje de relleno para cada caso y evaluar su comportamiento.

Para el estudio de la influencia de los cuatro primeros parámetros de impresión se pensó en usar tres valores para cada parámetro. Ello implicó el uso de técnicas estadísticas las cuales emplean la terminología de factores (o por su símbolo “k”) a los parámetros de estudio y a los valores que toma cada factor se le denominó como niveles. Por último, cada experimento que es el resultado de ciertos factores en determinados niveles se le conoce como “corrida” o “tratamiento”.

Entonces en primera instancia se pensó en el uso de un diseño factorial del tipo  $3^k$ , en este caso  $3^4$ . Sin embargo, la cantidad de corridas experimentales o “tratamientos” mínimos necesarias serían de 81 haciendo solo una repetición por cada uno (ello consiste en analizar las 80 interacciones posibles) y como sabemos en muchas normas como la de tracción, ISO 527-2, se requieren mínimo 5 repeticiones, de esta manera se deberían realizar 405 ensayos asumiendo que todos estos sean válidos.

Debido a lo antes mencionado se decidió el uso de la metodología de Taguchi, el cual sacrifica cierto nivel de información a cambio de disminuir considerablemente las corridas necesarias. Lo cual no quiere decir que el experimento pierda validez, sino que aplica un criterio de jerarquización de los efectos [Gutiérrez , 2008]. Esto centra el estudio y sus resultados sobre los efectos principales y dobles de los parámetros en mención.

La metodología de Taguchi opta por el diseño factorial fraccionado  $3^{4-2}$  conocido como el arreglo ortogonal L9 de Taguchi, el cual demanda de 9 tratamientos como mínimo haciendo

una repetición por cada tratamiento como se aprecia en la **Figura 20**. De tal manera se redujo considerablemente el número de ensayos a realizar, debido a que se centrará el estudio sobre los efectos individuales de cada tratamiento.

<p><u>Diseño factorial <math>3^k</math>:</u></p> <p><math>3^k = \# \text{ de tratamientos}</math></p>	<p><u>Diseño factorial fraccionado <math>3^{k-p}</math>:</u></p> <p><math>\left(\frac{1}{3}\right)^p \times 3^k = \# \text{ de tratamientos}</math></p>
<p><u>Diseño factorial <math>3^4</math>:</u></p> <p><math>3^4 = 81 \text{ tratamientos}</math></p>	<p><u>Diseño factorial fraccionado <math>3^{4-2}</math>:</u></p> <p><math>\left(\frac{1}{3}\right)^2 \times 3^4 = 9 \text{ tratamientos}</math></p>

*Figura 20* Cálculo de tratamientos o corridas necesarios para la experimentación, A la izquierda con un diseño factorial y a la derecha con el diseño de Taguchi [Gutiérrez, 2008].

En la **Tabla 12** se muestra las combinaciones que propone la metodología de Taguchi. Donde la primera columna hace referencia a los nueve tratamientos o experimentos que serán requeridos. Luego se presentan las columnas 1, 2, 3 y 4, las cuales representan los parámetros o factores a estudiar y en el interior se puede apreciar los niveles que tomará cada parámetro para un mismo tratamiento.

Tabla 12 Arreglo ortogonal L9 de Taguchi [Gutiérrez, 2008].

Arreglo L <sub>9</sub> (3 <sup>4-2</sup> )				
N° Corrida	Núm. de columna			
	1	2	3	4
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

2 factores: columnas 1, 2.  
3 factores: columnas 1, 2, 3.  
4 factores: columnas 1, 2, 3, 4.

Entonces considerando el primer grupo de parámetros que se buscó evaluar y consiguiendo los niveles adecuados para poder fabricar probetas adecuadas a partir de los materiales de ABS y ABS reforzado, se presenta en la **Tabla 13** la matriz que contiene los parámetros de impresión usados y sus respectivos niveles.

Tabla 13 Parámetros seleccionados para ABS y ABS/CF

Parámetros de impresión del ABS y ABS/CF				
Nivel	Altura de capa (mm) H	Patrón P	Temperatura de impresión (°C) T	Velocidad de impresión (mm/s) V
1	0,1	Triangular	240	30
2	0,2	Rejilla	260	40
3	0,3	Líneas	280	50

De esta manera los datos provenientes de la **Tabla 13** fueron incluidos en la tabla del arreglo “L9” ortogonal de Taguchi, **Tabla 12**, y se procedió a fabricar las probetas de ambos materiales siguiendo las combinaciones mostradas en la **Tabla 14** para ambos materiales en estudio. A partir de estas nueve experiencias se podrá identificar la influencia de cada parámetro y

encontrar los niveles que maximicen las propiedades de resistencia para cada material, todo ello con un número mucho menor de experimentos gracias al empleo del modelo del factorial fraccionado.

*Tabla 14 Configuración del arreglo para ensayo del ABS y ABS/CF*

<b>Arreglo -L9</b>				
<b>N° corrida</b>	<b>Parámetros</b>			
	<b>H</b>	<b>P</b>	<b>T</b>	<b>V</b>
<b>1</b>	0.1	T	240	30
<b>2</b>	0.1	R	260	40
<b>3</b>	0.1	L	280	50
<b>4</b>	0.2	T	260	50
<b>5</b>	0.2	R	280	30
<b>6</b>	0.2	L	240	40
<b>7</b>	0.3	T	280	40
<b>8</b>	0.3	R	240	50
<b>9</b>	0.3	L	260	30

Finalmente, se evaluó la influencia del porcentaje de relleno a partir de probetas impresas bajo las configuraciones óptimas de cada material.

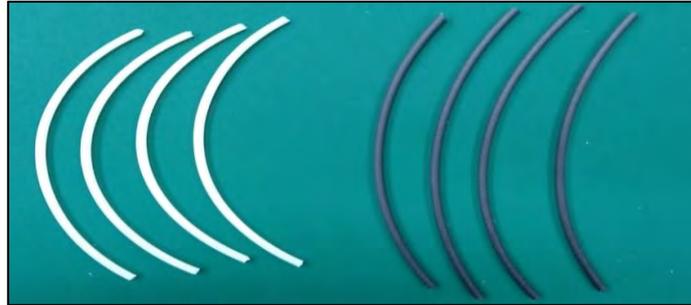
## **2.4. Procedimiento experimental**

### **2.4.1. Caracterización de filamentos**

#### **2.4.1.1. Ensayo de tracción**

Para evaluar las propiedades mecánicas de los filamentos, se realizaron ensayos de tracción, tomando como referencia a la norma ISO 527. Se ensayan al menos 5 repeticiones por cada

filamento, en muestras de 95 mm con una longitud calibrada de 60 mm como se aprecia en la **Figura 21**. Los ensayos fueron realizados con una máquina de tracción universal Zwick/Roell Z050 (ver **Figura 22**) utilizando una celda de carga de 1 kN, la velocidad de deformación fue de 1 mm/min hasta llegar al esfuerzo máximo y luego de 5 mm/min hasta llegar a la rotura.



*Figura 21 Filamentos para realizar ensayo de tracción de ABS (izquierda) y ABS/CF (derecha).*



*Figura 22 Maquina para ensayo de tracción marca Zwick/Roell Z050*

#### **2.4.1.2. Medición del índice de fluidez**

Se realizó la medición del índice de fluidez de cada material basado en la norma ASTM-D1238. Para este ensayo fue necesario acondicionar el material ya que la norma estipula el uso de material en forma de partículas, polvo y pellets. Por ello se optó por picar el filamento en longitudes de entre 3 a 4 mm (ver **Figura 23**). Se realizaron múltiples ensayos por cada material

según el procedimiento B, debido a las características del equipo con el que se dispone (ver **Figura 24**).



*Figura 23 Trozos de filamentos de ABS (izquierda) y ABS/CF (derecha).*

Tras acondicionar le material se procedió a fijar la temperatura y la pesa a usarse, en este caso se optó por una de 5 kg. De esta manera se forzó a pasar el material a través de un dado ubicado en el interior del equipo. Se seleccionó distintos intervalos de tiempo dentro del cual con ayuda de una cuchilla se obtendrán muestras del material que se fue extruyendo. Finalmente, se procede a medir cada muestra obtenida y calcular el índice de fluidez de cada una empleando la siguiente ecuación:

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

Donde:

$m$ : peso de la muestra.

$\Delta t$ : intervalo de tiempo para cada muestra.

MFI: índice de fluidez en g/10min.



*Figura 24 Medidora del índice de fluidez marca Zwick/Roell MFlow*

### **2.4.1.3. Análisis térmico**

El análisis se realizó según la norma ASTM-D3418-15. Se usó el equipo mostrado en la **Figura 25**, el cual permitió realizar los dos ensayos requeridos en simultaneo. El ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y el análisis termogravimétrico (TGA).

Se usó 10 mg de los materiales a ensayar según indica la norma, los cuales fueron sometidos a un calentamiento desde 30°C hasta 600°C y luego un enfriamiento controlado hasta la temperatura inicial. En ambos casos se usó una tasa de calentamiento y enfriamiento controlado a un valor de 10 °K/min y un flujo de nitrógeno de 10 ml/min.



*Figura 25 Netzsch STA 449 F1 Jupiter*

### **Ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC)**

Este ensayo se usará para determinar la temperatura de transición vítrea del polímero en estudio y su temperatura de fusión, los cuales suelen presentarse como picos de liberación de calor durante el proceso.

### **Análisis termogravimétrico (TGA)**

Durante este ensayo a medida que se fue incrementando la temperatura dentro del equipo se midió la pérdida de masa de la muestra con el fin de determinar la temperatura de inicio y fin de la degradación para el polímero en estudio. En el caso del polímero reforzado se usará para cuantificar en peso el porcentaje de refuerzo usado en la matriz de polímero base.

### 2.4.2. Fabricación de probetas

Para evaluar los materiales impresos propuestos por esta investigación se seleccionó la norma ISO 527-2, donde se usó el modelo 1BA (ver **Figura 26**). Dicha norma comprende los modelos de probetas para materiales poliméricos y el modelo seleccionado es el especificado para especímenes pequeños. De esta manera se redujo el tiempo empleado en la manufactura de probetas y el consumo de materiales durante la experimentación. Es así como conseguimos maximizar nuestros recursos y llevar a cabo la investigación de la manera más eficiente posible.

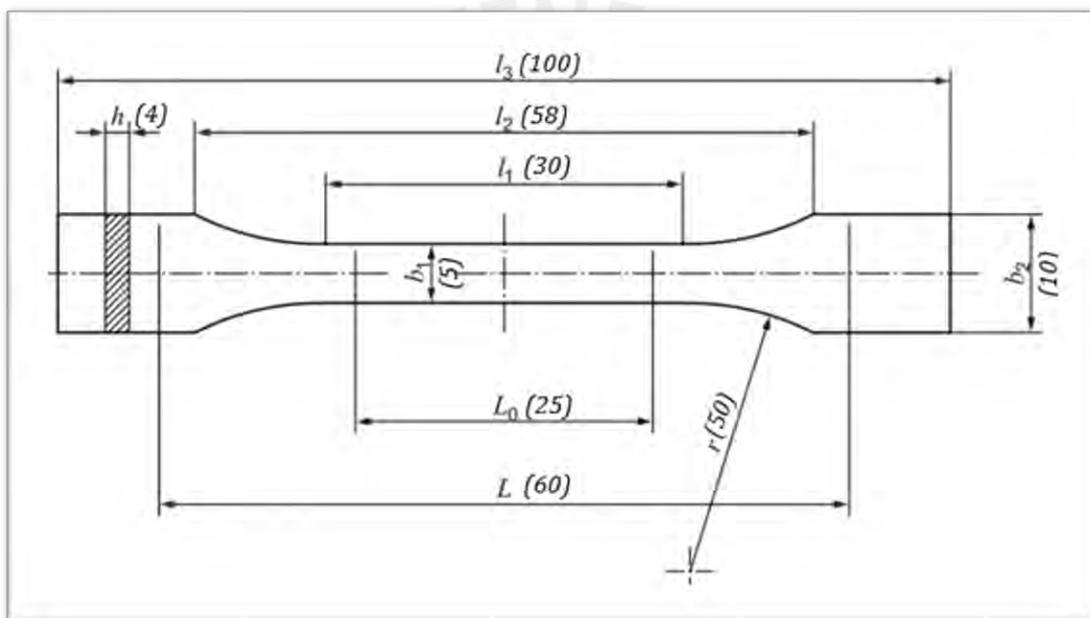
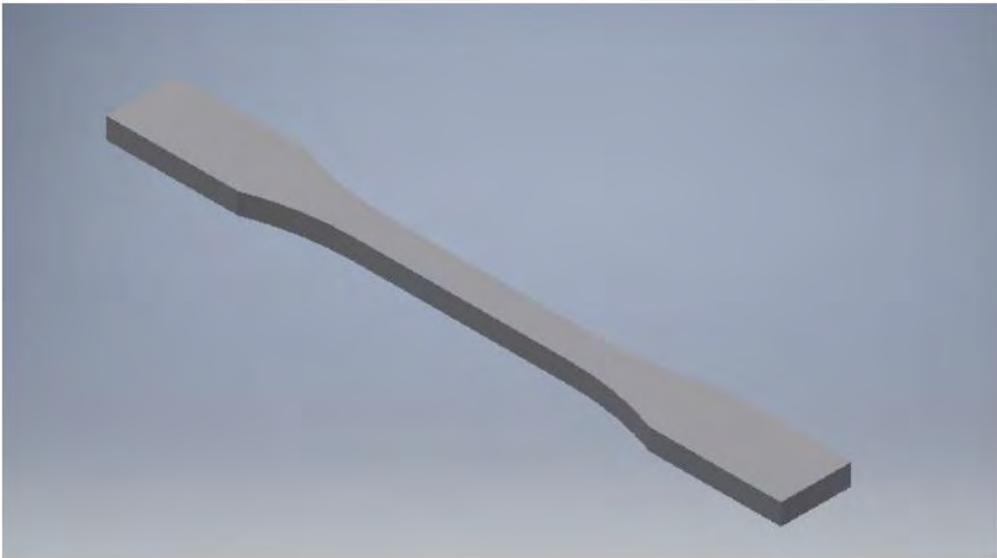


Figura 26 Probeta ISO 527, modelo 1BA

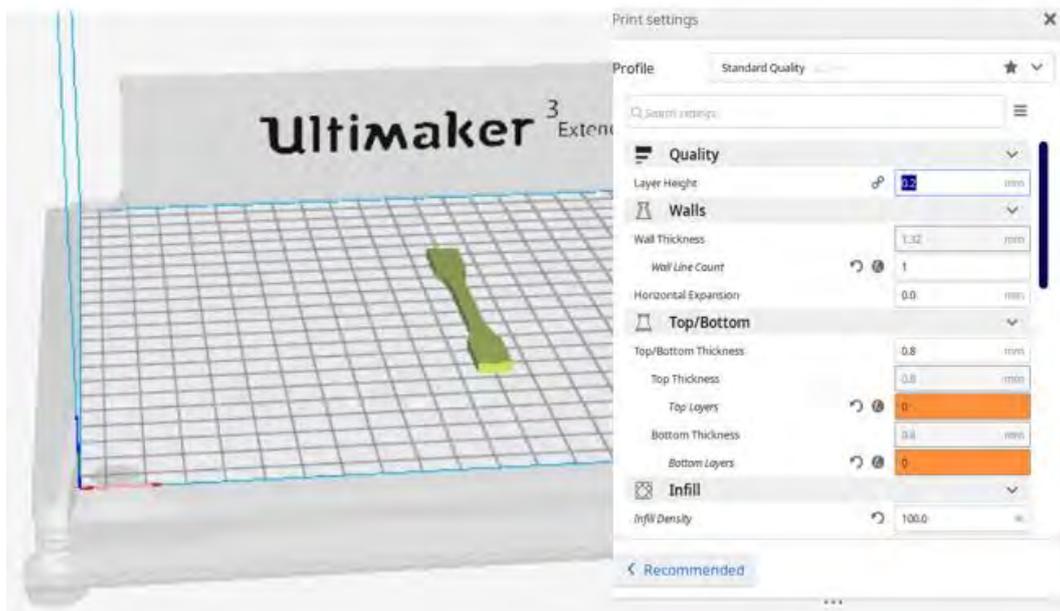
Para la etapa de fabricación de probetas luego de realizar las pruebas y ajustes pertinentes sobre la impresora Ultimaker 3 y comprobar el buen estado de las bobinas con filamentos de ABS y ABS/CF se adoptó el siguiente procedimiento:

- Elaborar el diseño computarizado CAD, ver **Figura 27**, de la probeta para tracción, según norma ISO 527-2, 1BA. Y almacenar del archivo en formato “.STL”

- Cargar el archivo “.STL” en el programa Cura, ver **Figura 28**. Una vez en este, asignar los parámetros de estudio y los parámetros que se mantendrán constantes durante la experimentación.
- Generar el archivo en formato “.gcode”, a partir de la configuración de parámetro en CURA.
- Depositar en la impresora el archivo “.gcode” para proceder con la impresión de la pieza, en este caso se realizó mediante un USB.
- Finalmente retirar la pieza impresa y repetir del mismo modo para la impresión de la siguiente probeta.



*Figura 27 Probeta diseñada en CAD*



*Figura 28 Probeta cargada en el programa Cura*

Dentro de la técnica de modelado por deposición fundida se encuentran muchos parámetros de control. La cantidad de parámetros de impresión que pueden ser controlados dependerá del software que se utilice para transformar el archivo del sólido CAD a formato STL. En el presente proyecto se usó el programa Ultimaker Cura 3.4.1 para realizar la configuración de los parámetros de impresión.

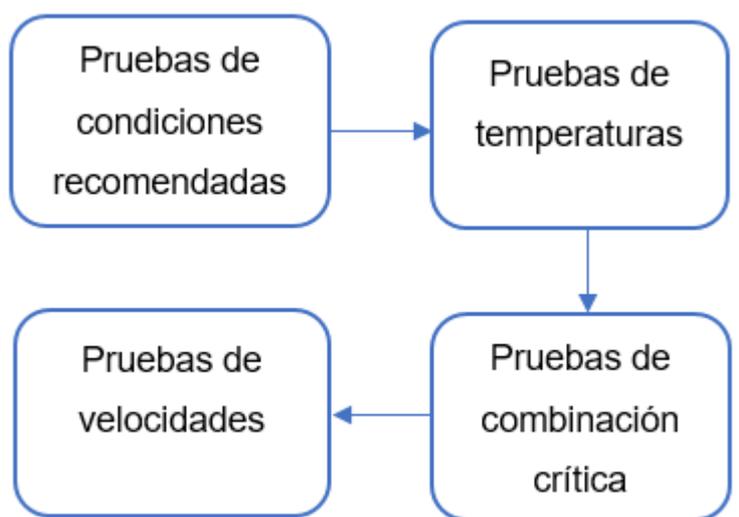
Además, se sabe que estos parámetros tienen una influencia muy significativa en las propiedades mecánicas de los componentes impresos. Por ello se debe considerar que para cada polímero termoplástico le corresponde valores específicos de cada parámetro para lograr un proceso de fabricación adecuado [Gowda, 2014; Torrado, 2014; Carneiro, 2015].

Respecto a los parámetros usados en los ensayos, se pueden clasificar en dos grupos. Los parámetros de estudio y los que se mantendrán constantes durante la fabricación de todas las probetas.

#### 2.4.2.1. Parámetros de estudio

Como se mencionó en el apartado **2.3 Diseño Experimental** los parámetros a estudiar fueron la altura de capa, patrón de relleno, temperatura, velocidad de impresión y porcentaje de relleno. Ahora se explicará sobre la determinación de los niveles para dichos parámetros.

Luego de la selección de los parámetros de impresión pertenecientes al presente estudio acompañado del diseño factorial fraccionado escogido, se procedió a determinar los niveles para cada parámetro. Para ello se procedió a realizar diversas probetas impresas variando ciertos parámetros en cada etapa. Se puede apreciar las distintas etapas en la **Figura 29**.



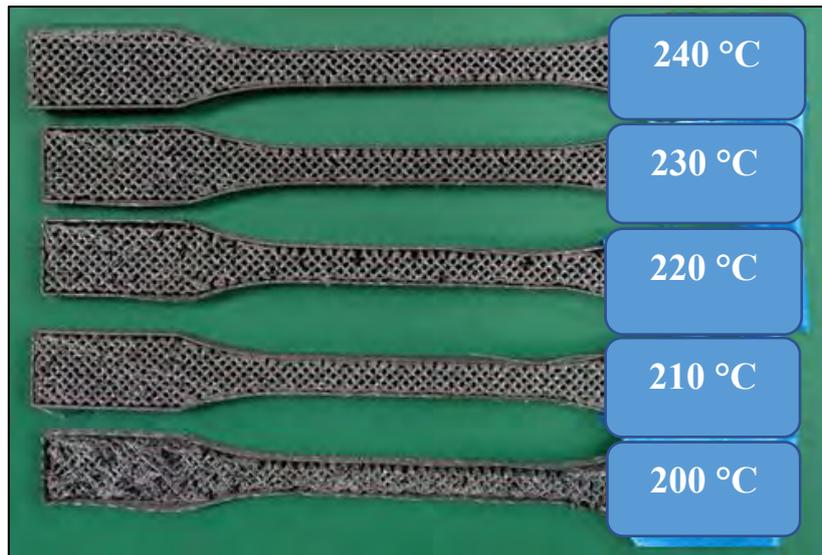
*Figura 29 Etapas de ensayos de impresión para la selección de niveles de los parámetros.*

Se inició imprimiendo probetas a las condiciones recomendadas por el fabricante, para ello se configuró los parámetros de temperatura, velocidad y altura de capa recomendadas intermedias, siendo estas 230 °C, 60 mm/s y 0.2 mm. De esta manera se probó la viabilidad de los patrones seleccionados anteriormente los cuales fueron triangular, cuadrículas y líneas, sin encontrar problema alguno.

Luego se procedió a realizar pruebas variando solo las temperaturas de impresión, manteniendo la velocidad y altura de capas anteriores (60 mm/s y 0.2 mm), con la finalidad de expandir el rango útil de estas. Primero se buscó la temperatura mínima, se procedió a disminuir el nivel de temperatura a una tasa de 10°C hasta encontrar la temperatura en la cual se presente defectos debido a la mala adhesión del polímero depositado. Para el ABS estos defectos de adhesión se dieron en los contornos como se puede apreciar en la **Figura 30**, mientras que para el ABS/CF los defectos se dieron principalmente en la adhesión al intentar formar las líneas del patrón como se aprecia en la **Figura 31**. Para ambos casos se puede apreciar que hasta la temperatura de 220°C el efecto de la mala adhesión imposibilita la fabricación de la probeta, mientras que a partir de 230 °C estos defectos no imposibilitan la fabricación. De esta manera se eligió como niveles de temperatura preliminares mínimos, 230°C para ambos polímeros.

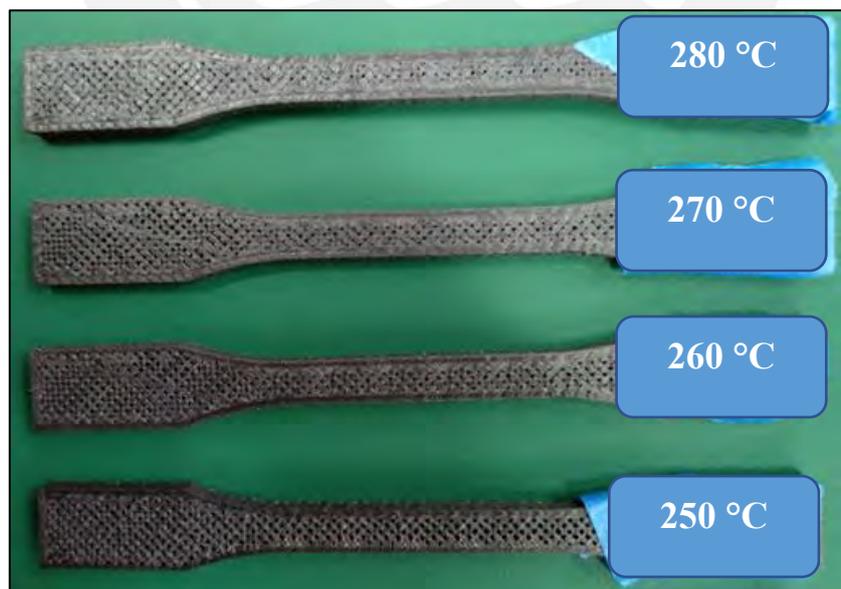


*Figura 30 Mala adhesión de los contornos al imprimir ABS hasta 200 °C, con patrón triangular, 60 mm/s de velocidad y 0.2 mm de altura de capa.*



*Figura 31 Defectos de adhesión en las líneas que forman el patrón al imprimir ABS/CF desde 200°C hasta 230°C, con patrón de cuadrículas, 60 mm/s de velocidad y 0.2 mm de altura de capa.*

Luego buscando los valores de temperaturas máximas posibles, se realizó pruebas a temperaturas superiores a 230°C como se puede ver en la **Figura 32** para el material reforzado. Para ambos polímeros en cuestión la temperatura máxima posibles la determinó la impresora cuyo límite fue 280°C.



*Figura 32 Pruebas de temperaturas superiores a 230 °C, manteniendo el resto de parámetros constantes.*

La siguiente etapa constó de realizar pruebas usando la configuración crítica. Esta configuración combinó los parámetros de velocidad con la altura de capa en su máximo nivel posible (0,3 mm) y la temperatura en su mínimo valor. Para entender la criticidad de la prueba nos apoyaremos en la **Figura 33**, donde al usar una temperatura menor a la usual se depositará menor cantidad de material debido a que la fluidez del polímero es proporcional a la temperatura. Adicionalmente, el uso de una alta velocidad de movimiento del cabezal minimiza la cantidad de masa que se puede depositar en un mismo punto. Todo ello ligado al empleo de una altura de capa mayor, la cual facilitará una mayor transferencia de calor al ambiente, terminarán haciendo sumamente difícil la impresión de la probeta para estas condiciones.

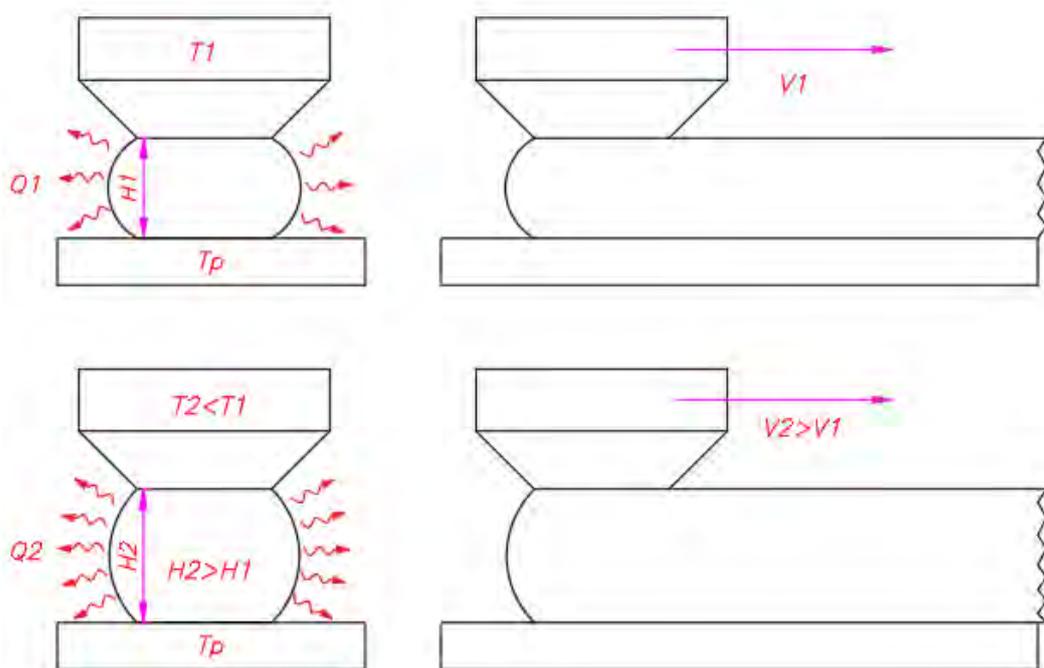
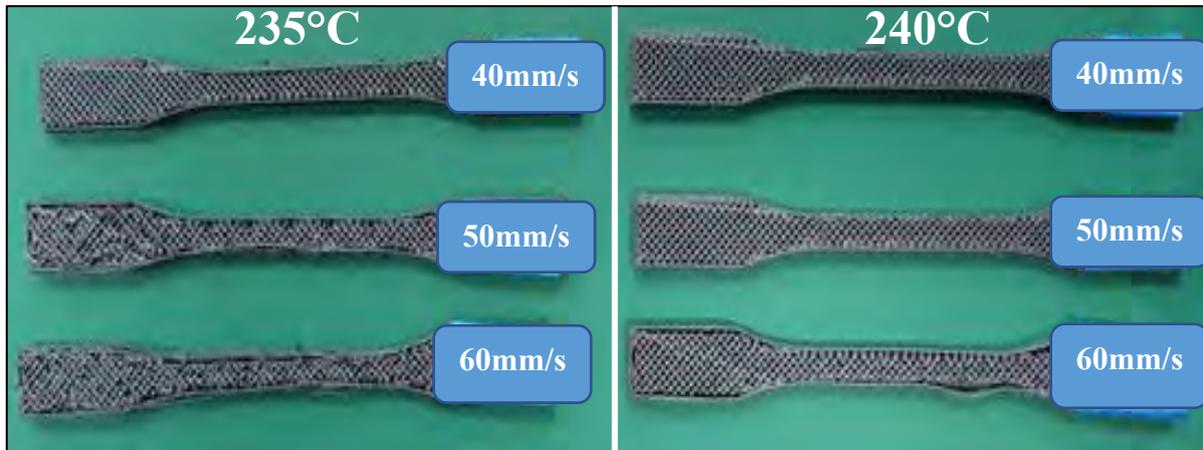


Figura 33 Comparación entre configuración típica (superior) y crítica (inferior).

Al realizar esta prueba se comenzó tomando como referencia la máxima velocidad de referencia y la temperatura mínima seleccionada en la etapa anterior. Para el caso del ABS se apreció que a las condiciones 70 mm/s, 230 °C y 0.3 mm de altura de capa no presenta dificultad al imprimir, por ello se incrementó los valores de velocidad hasta llegar a 85 mm/s, la cual fue la máxima velocidad posible de realizar para este material. En cambio, para el ABS reforzado

a 70 mm/s con 230 °C y 0,3 mm fue imposible obtener probetas, por ello se probó incrementando la temperatura a 235 °C y 240 °C con velocidades menores como 40, 50 y 60 mm/s, como se aprecia en **Figura 34**.



*Figura 34 Pruebas críticas para el ABS/CF a 235 °C (izquierda) y 240 °C (derecha).*

Determinando de esta manera la nueva temperatura mínima y velocidad máxima para que puedan ser impresos sin problemas ambos materiales como 240°C con 50 mm/s.

Finalmente, en la última etapa se procedió a realizar pruebas con temperaturas elevadas y velocidades bajas. Esto con el fin de poder identificar un posible atasco del cabezal durante la impresión, debido a que la boquilla al depositar gran cantidad de material por la elevada temperatura y al moverse a velocidades bajas podría dar cabida a que esta quede atrapada en alguna zona de la probeta y arruine la impresión. En esta etapa se estableció las velocidades mínimas y temperaturas máximas para ambos materiales. Siendo estos una velocidad de 30 mm/s y 280°C debido a la limitación del equipo de impresión.

#### **2.4.2.2. Parámetros que se mantendrán constantes**

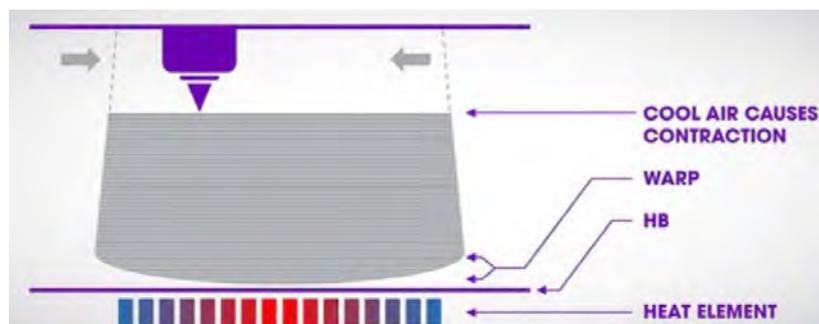
Se seleccionó mediante la experimentación otro grupo de parámetros, los cuales no serán objeto de estudio del presente trabajo, pero necesarios para permitir la adecuada fabricación de las

probetas y permitir centrarle estudio sobre los parámetros en estudio. Estos parámetros se mantendrán estables a lo largo de la experimentación y son presentados en la **Tabla 15**.

*Tabla 15 Parámetros constantes que no serán objeto de estudio*

<b>Parámetros que se mantendrán constantes</b>	
<b>Temperatura de mesa de impresión</b>	100 °C
<b>Número de contornos</b>	1
<b>Paredes externas antes que internas</b>	Desactivado
<b>Número de capas superiores e inferiores</b>	0
<b>Porcentaje de relleno</b>	100%
<b>Alineación de la costura Z</b>	Esquina más alejada
<b>Habilitar retracción</b>	Activada
<b>Construcción del plato de adhesión</b>	Tipo falda

-Temperatura de mesa: Se usó la temperatura de 100°C de la mesa de impresión ya que permitirá a la base de la probeta mantener el contacto en todo momento con la mesa y así evitar el efecto conocido como “warping”. Como se aprecia en la figura##, el efecto warping se debe al cambio brusco de temperatura entre la mesa y pieza. Las esquinas al estar expuesta a menor temperatura comparado con el centro, proceden a despegarse y así se deforma la pieza.



*Figura 35 Esquema del efecto “warping” sobre materia impreso en FDM. (3Dsourced, 2022).*

-Número de contornos: Se usó solo un contorno para albergar la estructura del patrón de la probeta. De esta manera al evaluar las propiedades mecánicas de las probetas, el efecto del contorno será muy imperceptible.

-Paredes externas antes que internas: Debido al uso de solo un contorno, esta opción fue necesaria desactivarla de lo contrario no permitiría una correcta impresión de las probetas.

-Número de capas superiores e inferior: Como se mencionó antes el objetivo es evaluar los parámetros de estudio. Por ello se eligió no usar capas superiores o inferiores debido a que estas al ser solidas aportarían más resistencia a la probeta, dificultando percibir la influencia de los parámetros en estudio.

-Porcentaje de relleno: Para la fabricación de las probetas según la metodología de Taguchi se usó el relleno al 100% según el parámetro indicado por la combinación L9.

-Alineación de la costura en z: Se usó la alineación por la esquina de la probeta, de esta manera se mantuvo el resto de contorno lo más homogéneo posible.

-Habilitación de la retracción: Se usó la opción para evitar la salida de filamento mientras el cabezal realiza movimientos auxiliares. Consiste en activar el retroceso de los servomotores al finalizar la capa impresa hasta el siguiente plano de impresión.

-Construcción del plato de adhesión: Es recomendable purgar el filamento antes de iniciar la fabricación de la probeta, para eliminar posibles restos quemados o suciedad. Por ello esta opción realizar la deposición de filamento alrededor de la zona donde iniciará el trabajo.

### **2.4.3. Ensayo de tracción a probetas**

Como se mencionó en apartados anteriores para evaluar las propiedades del material impreso mediante la técnica de modelado por deposición fundida se usó el ensayo de tracción para

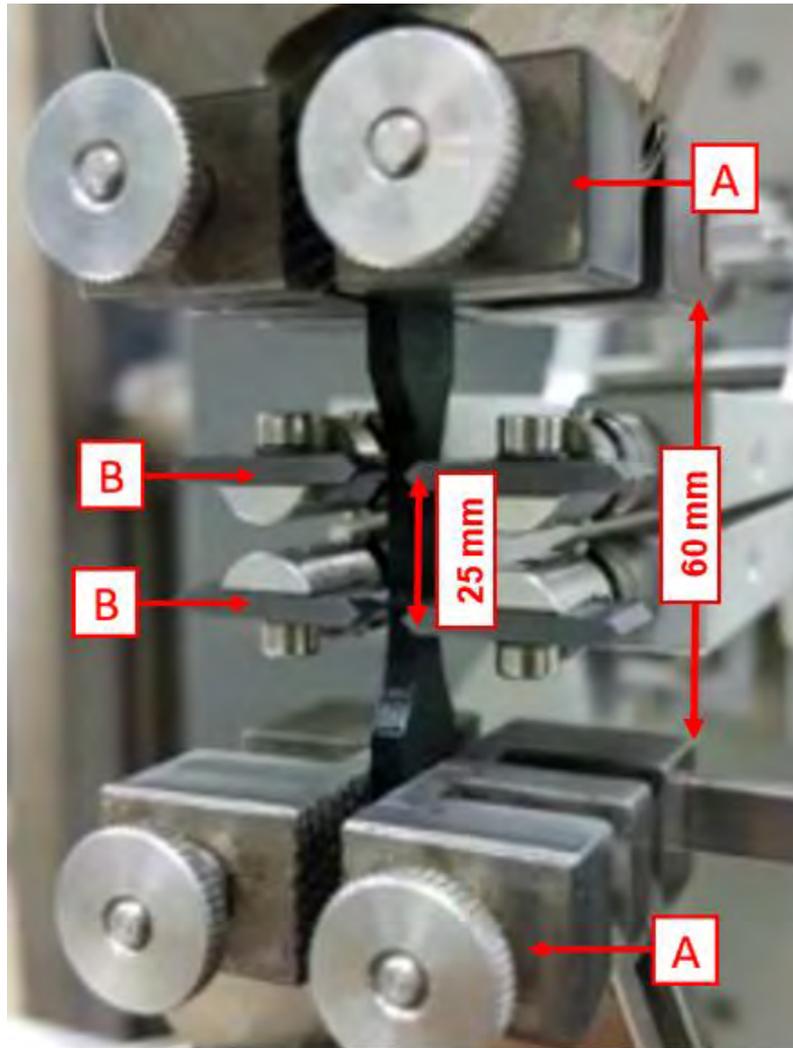
polímeros según la norma ISO 527-2. Para el caso de estudio se fabricó probetas del tipo de espécimen 1BA a partir de los materiales ABS y ABS/CF.

Como se mencionó en el apartado **2.4.1.1 Ensayo de tracción**, el equipo disponible fue una máquina de tracción universal marca Zwick/Roell, modelo Z050 equipada con la celda de carga mostrada en la **Figura 36**.



*Figura 36 Celda de carga de 1 kN de capacidad*

En cuanto a los accesorios usados para sostener las probetas se pueden apreciar en la **Figura 37**. Siendo estos el juego de mordazas planas (A), cuya separación fue de 60 mm como estipula la norma ISO. Además del uso de pinzas extensiométricas, las cuales nos permitieron medir la deformación que sufrirá el espécimen hasta llegar a la rotura. Para la separación entre ellas se consideró 25 mm.



*Figura 37 Probeta sujeta por mordazas (A) y pinzas extensiométricas (B).*

El ensayo se realizó a una velocidad de 5 mm/min según se contempla en la norma ISO 527 y como se realizó en investigaciones previas del presente proyecto. Se puede apreciar en la **Figura 38**, la correcta rotura en la zona calibrada de esta probeta. De igual manera se ejecutó todas las probetas de la experimentación haciendo 5 repeticiones validas por combinación según el arreglo ortogonal L9, mostrado en la **Tabla 14**.



*Figura 38 Prueba de rotura en la zona calibrada usando el equipo Zwick/Roell Z050.*

## **2.5. Método para descartar valores atípicos**

Como se mencionó líneas arriba, se realizarán 9 tratamientos o combinaciones posibles para generar las probetas a ser ensayadas. Esto no quiere decir que ese mismo será el número de probetas a producir. La norma ISO 527-2 establece como mínimo 5 probetas válidas para tomar un valor como válido; por ello, en el presente trabajo se optó por realizar 10 probetas por cada tratamiento. Al tratarse de dos materiales y con 9 tratamientos cada uno, se produjo 180 probetas en total.

Luego de realizar los ensayos correspondientes se usó la norma ASTM E178-08 para realizar la discriminación de datos, esto debido a que si se aceptaban todos los valores sin criterio alguno se verían comprometidos los estadísticos como la media y desviación estándar de las muestras. Es así como el valor del coeficiente de varianza de cada tratamiento se vería

enormemente comprometido de no aplicar criterio estadístico alguno para procesar y discriminar los datos observados o también llamados valores atípicos.

La norma usada comprende cuatro métodos estadísticos, contemplados en la **Tabla 16**, que asumen una distribución normal de los datos a evaluar. Luego se analiza el nivel de significancia usando cada método y el que resulte en el rango de 0.5% a 5% de nivel de significancia será el escogido.

Tabla 16 Métodos estadísticos para evaluar 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	Máximo 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:	$\bar{x}_{ks} = \frac{1}{n - k} \sum_{i=1}^{n-k} x_i$

## **Capítulo III:**

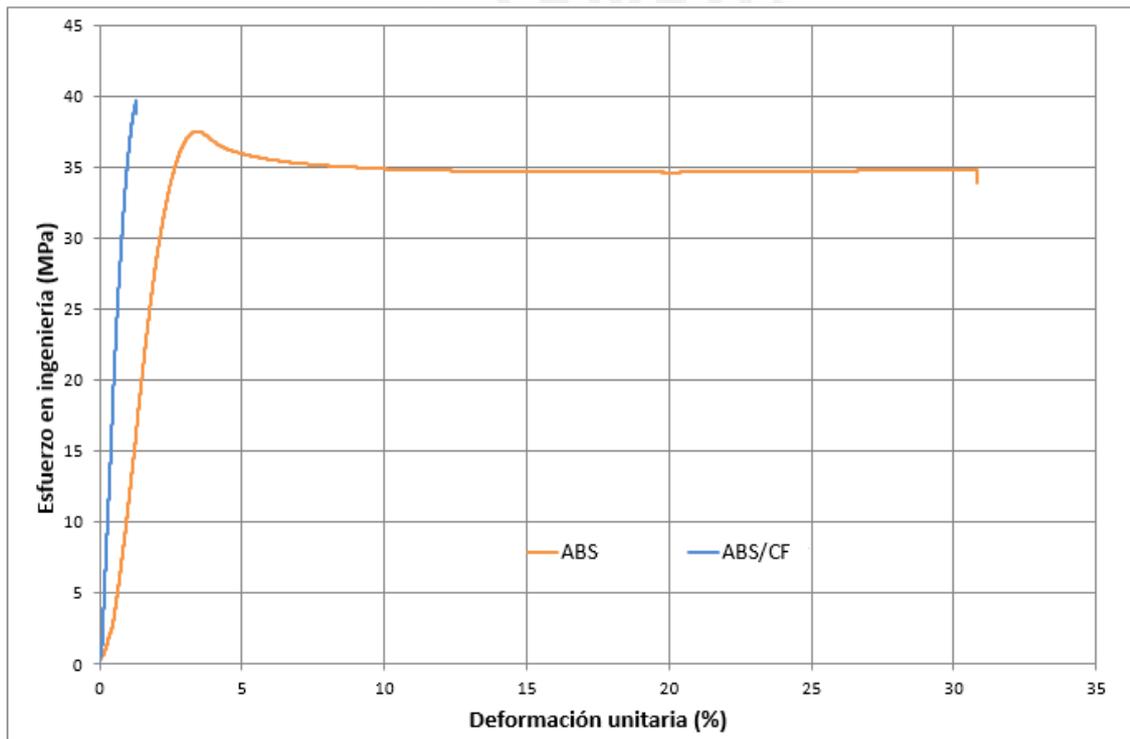
### **Resultados y discusión**

En este capítulo se presentará los resultados de los ensayos realizados a los filamentos comerciales que fueron usados como material de investigación para este proyecto, así como las probetas elaboradas a partir de dichos filamentos bajo las configuraciones del diseño factorial L9. Respecto a estas últimas, se discutirá acerca de cómo se ve influenciada la resistencia a la tracción y módulo debido a los parámetros de estudio: altura de capa, patrón de relleno, temperatura de impresión y velocidad de movimiento de cabezal. A partir de estos resultados se elaborarán probetas con la mejor configuración para su evaluación y validación teórica. Finalizaremos el capítulo estudiando la influencia que tiene el porcentaje de relleno sobre dichas configuraciones.

### 3.1. Caracterización de filamentos

#### 3.1.1. Ensayo de tracción de filamentos

Se comenzó realizando los ensayos de tracción según la norma ISO 527 a una velocidad de 1 mm/min hasta obtener el punto de máximo esfuerzo a la tracción y finalizando el ensayo a una velocidad de 5 mm/min para llegar a la rotura de los filamentos de los polímeros. A partir de estos como se aprecia en la **Figura 39**, se obtuvieron las siguientes curvas de esfuerzo versus deformación unitaria representativas para el ABS y su refuerzo.



*Figura 39 Curva de esfuerzo versus deformación unitaria para el ABS y ABS/CF*

A partir de las curvas presentadas se calculó las propiedades mecánicas de los filamentos, las cuales se aprecian en las **Tabla 17** y **Tabla 18**.

Tabla 17 Propiedades mecánicas determinadas para el filamento de ABS

Propiedad	Unidad	Media	D.E	C.V.
<b>Resistencia a la tracción (<math>\sigma_t</math>)</b>	MPa	37.9	0.7	1.9%
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	MPa	1895.7	66.7	3.5%
<b>Deformación unitaria (<math>\epsilon_B</math>)</b>	%	29.9%	3.9%	13.0%

Tabla 18 Propiedades mecánicas determinadas para el filamento de ABS/CF

Propiedad	Unidad	Media	D.E	C.V.
<b>Resistencia a la tracción (<math>\sigma_t</math>)</b>	MPa	39.6	0.6	1.6%
<b>Módulo de elasticidad (E)</b>	MPa	3818.0	371.4	9.7%
<b>Deformación unitaria (<math>\epsilon_B</math>)</b>	%	1.3%	0.1%	6.5%

Para el filamento de ABS se registró un valor aproximado de 38 MPa de resistencia a la tracción y un módulo cercano a 1896 MPa. Mientras que para el filamento con refuerzo se obtuvo un valor de resistencia próximo a 40 MPa y módulo de 3818 MPa.

El efecto del refuerzo de fibras de carbono aumentó alrededor del doble el valor del módulo elástico del filamento de ABS; mientras que el valor de resistencia aumento muy discretamente cerca de 1 MPa.

A diferencia de las propiedades anterior, la presencia de refuerzo en la matriz de ABS disminuyó la ductilidad significativamente de 30% hasta 1.3%, lo que equivale al 4% de la ductilidad del material puro.

### 3.1.2. Análisis térmico

El análisis térmico realizado comprendió de dos ensayos en simultaneo, lo cuales fueron calorimetría diferencia de barrido (DSC) y el análisis termogravimétrico (TGA) para los filamentos usados. A continuación, se presentan las graficas generadas a partir de los ensayos.

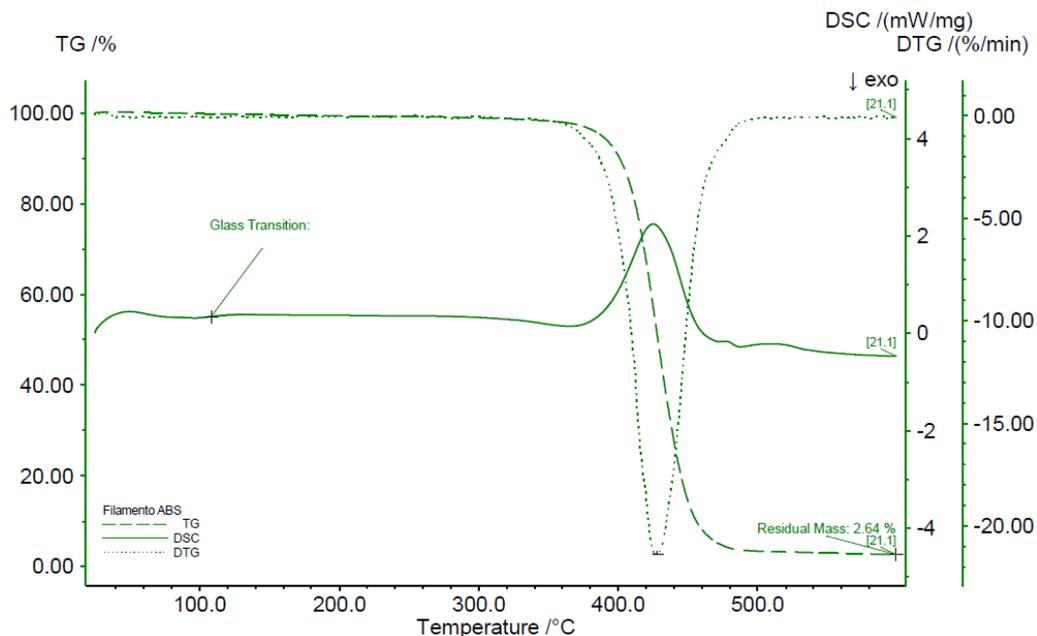


Figura 40 Curvas de análisis térmico para el ABS

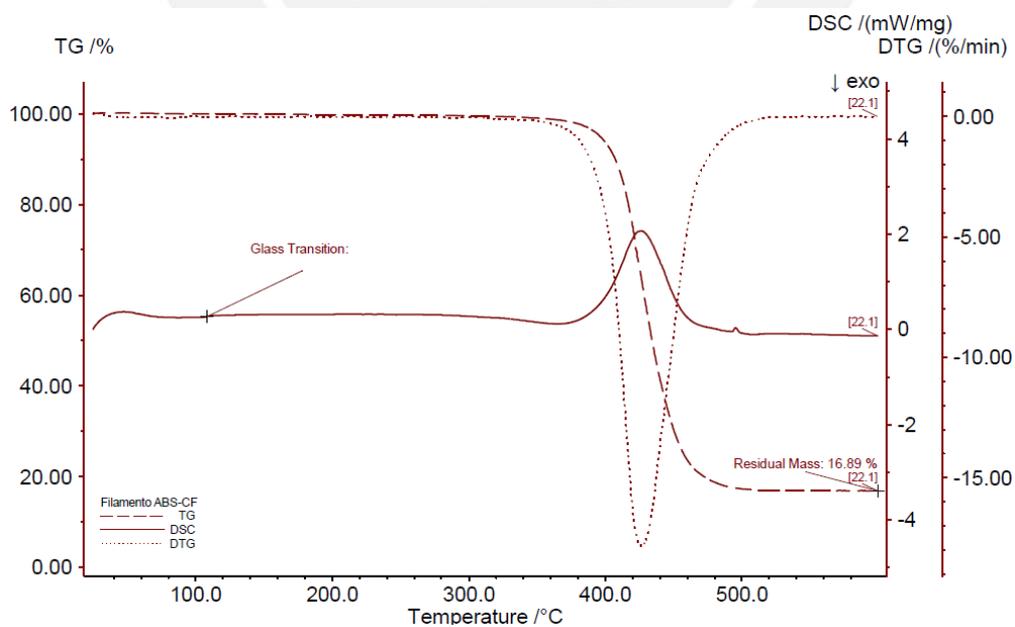


Figura 41 Curvas de análisis térmico para el ABS/CF

Las líneas continuas de la **Figura 40** representan el resultado del ensayo DSC para el material ABS y en la **Figura 41** se muestra para el ABS/CF. En ambas figuras se pudo visualizar un marcado pico que representa la máxima temperatura de degradación con un valor cercano a 427 °C, también se corroboró la naturaleza amorfa de los polímeros debido a la ausencia de algún otro pico en la zona, el cual se esperaría fuera el correspondiente a la temperatura de fusión.

Por otra parte, las líneas interrumpidas representan las curvas del TGA, donde para la matriz pura se identificó un porcentaje de masa residual de 2.64% y para el ABS/CF 16.89%. De esta manera se corrobora que el porcentaje de refuerzo de fibras es de al menos el 15% como indicó el fabricante. Además, para ambos materiales se evidencia un salto en la masa porcentual en el rango aproximado de 400 °C a 500°C, siendo esto un indicador de que las temperaturas de degradación de los polímeros se encuentran en ese rango.

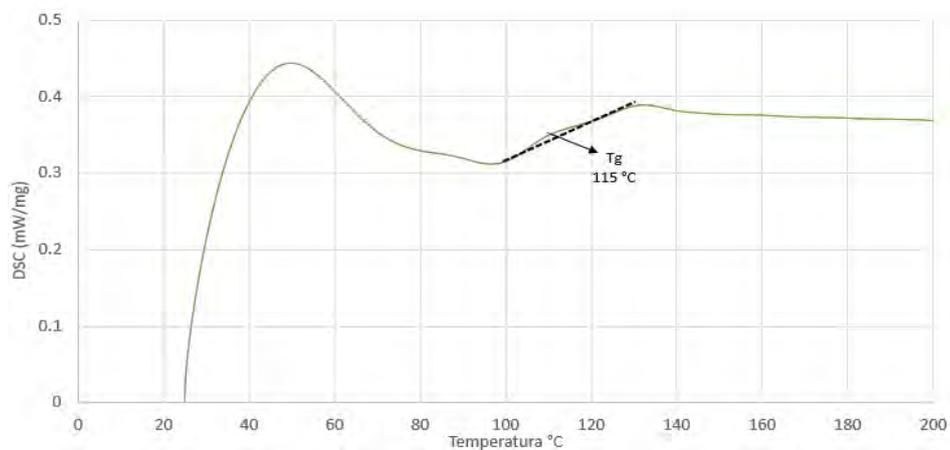
Para poder determinar el inicio y fin de la degradación se usó la gráfica de líneas punteadas, la cual representa la derivada de la TGA también conocida como “DTG”. Donde para el ABS se determinó en 370°C el inicio de la degradación y el fin de esta en 490°C. De manera análoga para el filamento con refuerzo se obtuvo los valores de inició en 360°C y fin de la degradación en 510°C

Como el ABS no presenta una temperatura de fusión, el rango de temperaturas de impresión de las probetas de ABS será determinado teniendo como criterio la viscosidad que presente éste en función de la temperatura para evitar posibles obstrucciones durante el proceso de impresión.

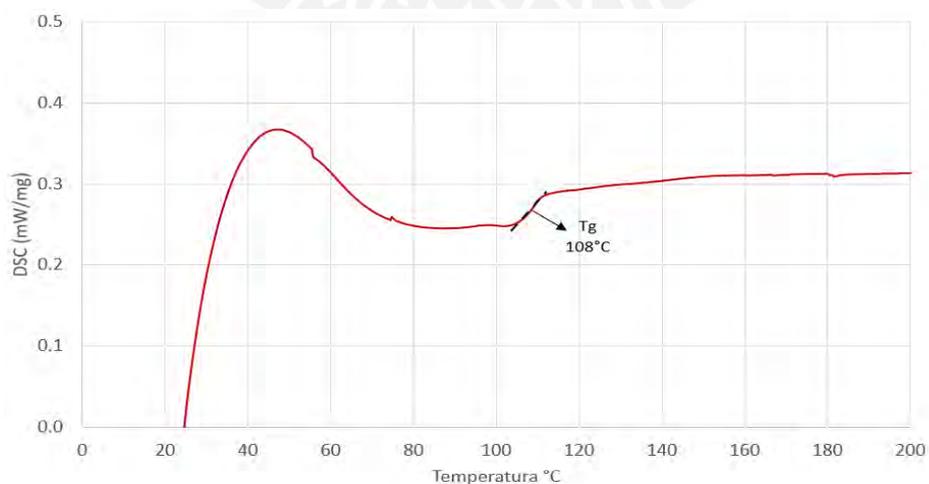
Debido a que la temperatura del inicio de la degradación es superior a la temperatura límite del equipo de impresión (280 °C), el valor superior del rango de temperaturas de impresión quedara

definido como aquella que permita un adecuado proceso de impresión, considerando además los valores de los otros parámetros de impresión en estudio.

Luego para poder determinar la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) de los polímeros se realizó una ampliación sobre la gráfica de DSC de cada material. En la figura **Figura 42** correspondiente al ABS, se identificó la pendiente característica de la  $T_g$  indicando un valor de  $115^\circ\text{C}$ . Sobre la **Figura 43**, se apreció la  $T_g$  para el caso de ABS/CF con un valor de  $108^\circ\text{C}$ . Estas temperaturas son ligeramente superiores a las reportadas en la ficha técnica del fabricante, siendo  $105^\circ\text{C}$  para ambos polímeros.



*Figura 42 Ampliación para determinar  $T_g$  para el ABS*



*Figura 43 Ampliación para determinar  $T_g$  para el ABS/CF*

A continuación, se presenta la tabla resumen de los valores hallados luego del análisis térmico a los filamentos.

*Tabla 19 Datos obtenidos del análisis térmico*

<b>Material</b>	<b>T g (°C)</b>	<b>T f (°C)</b>	<b>T inicio de degradación (°C)</b>	<b>% Pureza</b>
<b>ABS</b>	115	-	370	97,36
<b>ABS/CF</b>	108	-	360	83,11

### 3.1.3. Índice de fluidez

Los resultados de la medición del índice de fluidez para el ABS y ABS/CF pueden ser observados en la **Tabla 20**. El ensayo se realizó a 3 diferentes temperaturas por material, las cuales están comprendidas en los rangos definidos gracias a las pruebas de impresión y los ensayos DSC y TGA.

*Tabla 20 Índice de fluidez a distintas temperaturas de impresión para los materiales.*

<b>Material</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b><math>\Delta t</math> (s)</b>	<b>Temp. (°C)</b>	<b>MFI (g/10min)</b>		
				<b>Prom.</b>	<b>D.E.</b>	<b>CV</b>
<b>ABS</b>	5	10	240	4,96	0,14	2,74
		10	260	9,41	0,15	1,61
		10	280	14,38	0,58	4,03
<b>ABS/CF</b>	5	10	240	6,44	0,2	3,12
		10	260	10,83	0,16	1,46
		10	280	20,17	0,16	0,78

En la **Figura 44** se aprecia una comparación gráfica entre el material puro y el reforzado a distintas temperaturas de ensayo. Se observa que el material reforzado presenta un ligero índice de fluidez mayor respecto al puro en el rango de estudio; es decir que al introducir refuerzos en forma de fibras de carbono en la matriz polimérica de ABS la viscosidad de éstas disminuye.

Esto quiere decir que el ABS/CF fluirá con mayor facilidad a través de la boquilla de extrusión comparado con el ABS puro con especial énfasis a altas temperatura como 280 °C.

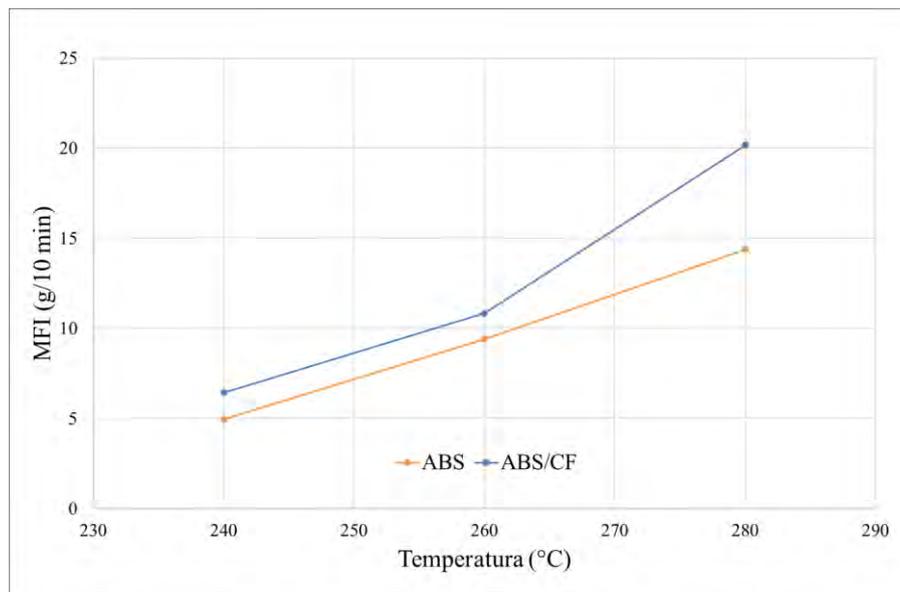


Figura 44 Medición del índice de fluidez del ABS y ABS/CF

### 3.2. Ensayo de tracción a las probetas impresas

Se realizaron los ensayos de tracción según la norma ISO 527 sobre las probetas impresas bajo la configuración determinada, ver **Tabla 14**, por el diseño factorial fraccionado elegido para los materiales con 100% de relleno. Se obtuvieron los resultados de resistencia y modulo elástico para cada material en estudio mostrados en las **Tabla 21** y **Tabla 22**. Estos fueron determinados a partir de la media de 5 ensayos válidos para cada configuración, sin superar 5% de coeficiente de variación con lo cual se aseguró una buena precisión.

Tabla 21 Media de resistencia a la tracción y módulo para ABS

L9-ABS										
N° corrida	Parámetros				Resistencia (MPa)			Módulo elástico (MPa)		
	H	P	T	V	Media	D.E.	C.V.	Media	D.E.	C.V.
1	0.1	T	240	30	18.9	0.4	2.1%	1,779.2	27.5	1.5%
2	0.1	R	260	40	23.7	0.3	1.3%	1,845.2	22.2	1.2%
3	0.1	L	280	50	32.0	0.7	2.1%	1,817.6	64.5	3.5%
4	0.2	T	260	50	24.2	0.5	2.2%	1,947.6	29.4	1.5%
5	0.2	R	280	30	19.1	0.4	2.0%	1,423.0	52.3	3.7%
6	0.2	L	240	40	33.9	0.6	1.7%	1,934.2	64.4	3.3%
7	0.3	T	280	40	24.6	0.3	1.4%	1,801.4	54.4	3.0%
8	0.3	R	240	50	16.4	0.4	2.3%	1,279.6	43.5	3.4%
9	0.3	L	260	30	31.6	0.3	0.9%	1,829.0	47.9	2.6%

Tabla 22 Media de resistencia a la tracción y módulo para ABS/CF

L9-ABS/CF										
N° corrida	Parámetros				Resistencia (MPa)			Módulo elástico (MPa)		
	H	P	T	V	Media	D.E.	C.V.	Media	D.E.	C.V.
1	0.1	T	240	30	14.7	0.3	2.3%	2,742.2	84.6	3.1%
2	0.1	R	260	40	21.2	0.4	2.0%	2,749.6	93.2	3.4%
3	0.1	L	280	50	35.4	0.4	1.2%	3,349.6	119.1	3.6%
4	0.2	T	260	50	16.7	0.7	4.1%	2,379.8	47.9	2.0%
5	0.2	R	280	30	22.5	0.5	2.3%	2,729.2	104.6	3.8%
6	0.2	L	240	40	21.3	0.9	4.4%	2,921.4	97.5	3.3%
7	0.3	T	280	40	18.7	0.5	2.7%	2,424.0	52.1	2.1%
8	0.3	R	240	50	8.6	0.3	3.0%	1,164.6	43.6	3.7%
9	0.3	L	260	30	28.4	1.2	4.2%	2,879.0	84.8	2.9%

De la **Tabla 21** correspondiente a los resultados del ABS se observó en la corrida N° 6 el mayor valor de resistencia 33.9 Mpa y módulo 1,934 Mpa, siendo los niveles 0.2mm de altura, patrón de líneas, temperatura de 240°C y 40 mm/s. Mientras para el polímero reforzado de la **Tabla 22**, se registró la corrida N°3 como la de mayores propiedades mecánicas con 35 Mpa y 3,350 Mpa, con lo niveles de 0.1mm de altura, patrón de líneas, temperatura de 280°C y 50 mm/s. De las configuraciones en mención estas solo tienen en común el parámetro de patrón de impresión con el valor de líneas, el resto de parámetros presentan diferencias en los niveles. Por ello se hizo uso de herramientas estadísticas para un análisis más profundo.

### 3.3. Influencia de los parámetros sobre las propiedades mecánicas

A partir de los resultados experimentales presentados se realizaron tres tipos de análisis: efectos principales, relación señal-ruido y el análisis de varianza (ANOVA). El primero, efectos principales, nos permitió conocer los valores de los parámetros que maximizan las propiedades mecánicas y su respectivo orden de influencia. Luego se realizó el análisis sobre la relación señal-ruido para poder medir la sensibilidad de los factores en estudio frente a los factores no controlados. (Lee, Abdullah, & Khan, 2005) y cuantificar el porcentaje de contribución de cada parámetro sobre las propiedades mecánicas en estudio. Finalmente, el ANOVA, nos servirá para corroborar los resultados anteriores.

#### 3.3.1. Efectos principales

A partir de los resultados obtenidos en las **Tabla 21** y **Tabla 22** se procedió a graficar los efectos principales para las medias de cada corrida del diseño experimental L9. De esta manera se pudo identificar el valor que maximizará las propiedades mecánicas para cada parámetro de estudio según el material. Este valor fue el punto mayor de cada gráfica.

Luego para tener noción de la importancia de cada parámetro se calculó el delta o la diferencia entre los valores promedios máximos y mínimos para cada parámetro, con ellos se procedió a asignarle un orden de importancia decreciente.

En la **Figura 45** se puede apreciar los efectos principales para la resistencia del ABS. La configuración de 0.2 mm de altura de capa, patrón de líneas, temperatura de extrusión de 260 °C y velocidad de impresión de 40 mm/s supone ser la más adecuada para el objetivo de estudio.

En cuanto al orden de importancia como se ve en **Tabla 23** que el patrón de impresión es el más influyente por mucho respecto a los demás. Le siguen la velocidad y temperatura de impresión ambos cercanos entre sí y finaliza con la altura de capa.

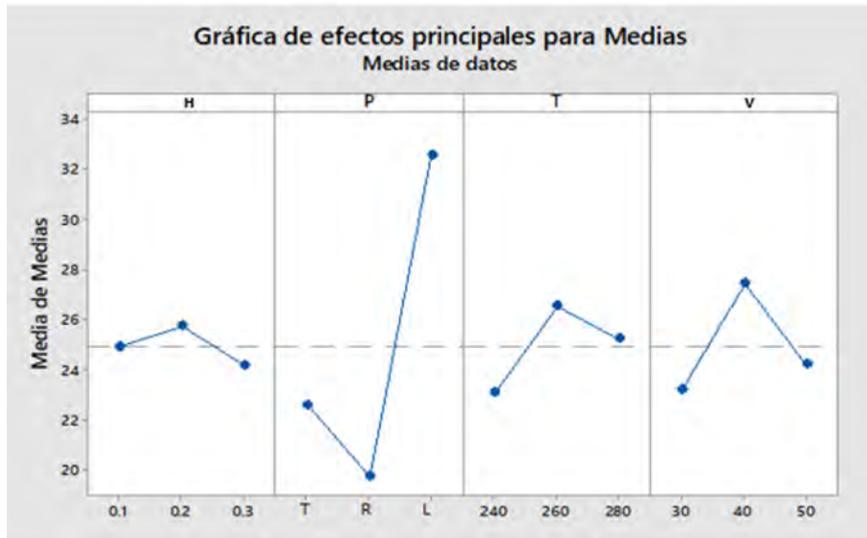


Figura 45 Efectos principales de las medias de resistencia para ABS

Tabla 23 Resultados de efectos principales para resistencia a la tracción de probetas de ABS

Parámetros	Nivel			Delta	Importancia
	1	2	3		
H Altura de capa	24.9	25.7	24.2	1.6	4
P Patrón	22.6	19.7	32.5	12.8	1
T Temperatura	23.1	26.5	25.2	3.5	3
V Velocidad	23.2	27.4	24.2	4.2	2

Respeto al módulo de ABS se tiene el mismo análisis en la **Figura 46** y la **Tabla 24**. Ello proyecta la combinación muy similar a la anterior exceptuando la altura de capa, donde esta vez se tomará el valor de 0.1mm. Respecto a la importancia de los parámetros también se tiene un ordenamiento muy similar al de la resistencia a la tracción en los parámetros extremos, es decir el más influyente y menos influyente. Sin embargo, como segundo factor se tiene esta vez a la temperatura seguido de la velocidad. Y en esta ocasión la diferencia de importancia no es tan marcada como en el delta de la resistencia del ABS.

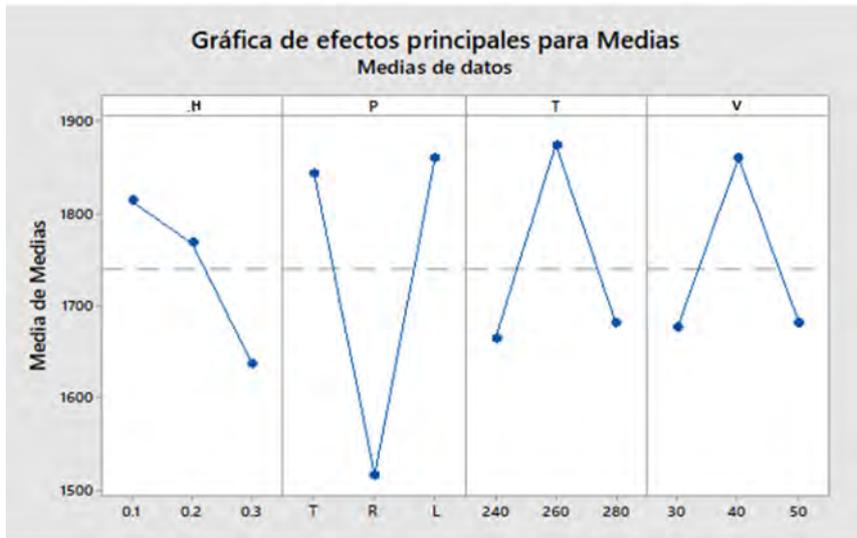


Figura 46 Efectos principales de las medias de módulo para ABS

Tabla 24 Resultados de efectos principales para módulo de probetas de ABS

Parámetros	Nivel			Delta	Importancia
	1	2	3		
H Altura de capa	1814	1768	1637	177	4
P Patrón	1843	1516	1860	344	1
T Temperatura	1664	1874	1681	210	2
V Velocidad	1677	1860	1682	183	3

Para el polímero con refuerzo, se tiene los valores de altura de capa de 0.1mm, patrón de líneas, temperatura de 280°C y velocidad de impresión de 30 mm/s con los cuales se maximizarán las propiedades mecánicas como se evidencia en las **Figura 47**. En cuanto al orden de influencia fue el siguiente Patrón, temperatura, altura y velocidad, donde los dos primero fueron los que parecen más influyentes respecto al resto debido al delta calculado.

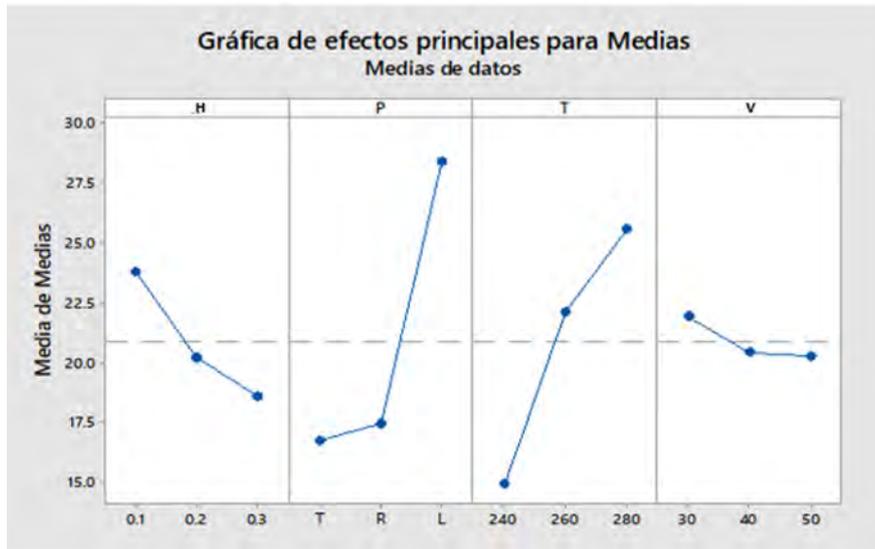


Figura 47 Efectos principales de las medias de resistencia para ABS/CF

Tabla 25 Resultados de efectos principales para resistencia a la tracción de probetas de ABS/CF

Parámetros	Nivel			Delta	Importancia
	1	2	3		
H Altura de capa	23.8	20.2	18.6	5.2	3
P Patrón	16.7	17.5	28.4	11.7	1
T Temperatura	14.9	22.1	25.6	10.7	2
V Velocidad	21.9	20.4	20.3	1.6	4

Por último, en la **Figura 48** y **Tabla 26**, para el módulo de ABS/CF se presentó la combinación de 0.1mm, líneas, 280°C y 30mm/s como la óptima. El cálculo del delta nos indicó la importancia de los parámetros, siendo este patrón, altura de capa, temperatura y velocidad. Para este caso el valor delta se muestra muy cercano entre ellos, lo cual indica una influencia muy homogénea por parte de los cuatro parámetros.

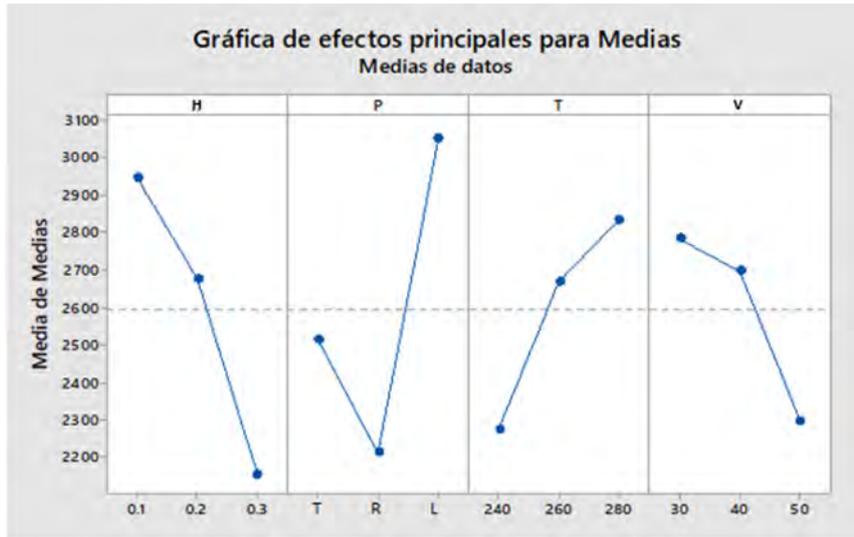


Figura 48 Efectos principales de las medias de modulo para ABS/CF

Tabla 26 Resultados de efectos principales para módulo de probetas de ABS/CF

Parámetros	Nivel			Delta	Importancia
	1	2	3		
H Altura de capa	2947	2677	2156	791	2
P Patrón	2515	2214	3050	836	1
T Temperatura	2276	2669	2834	558	3
V Velocidad	2783	2698	2298	485	4

En los gráficos de efectos principales presentados líneas arriba se evidencia al patrón de impresión como el parámetro más influyente sobre la respuesta de resistencia y módulo de tracción para ambos materiales. Esto debido que visualmente presentó el máximo delta entre su valor máximo y mínimo.

### 3.3.2. Relación señal ruido

Luego a manera de verificación se realizó los mismos cálculos con los valores señal-ruido propios de los datos recopilados. Las tablas de resultados se presentan inmediatamente, siendo la **Tabla 27** los valores del ABS y la **Tabla 28** los valores de para el material reforzado.

Tabla 27 Señal ruido de resistencia y módulo para ABS

L9-ABS						
Nº corrida	Parámetros				S/N para	S/N para
	H	P	T	V	Resistencia	Módulo elástico
1	0.1	T	240	30	25.5	65.0
2	0.1	R	260	40	27.5	65.3
3	0.1	L	280	50	30.1	65.2
4	0.2	T	260	50	27.7	65.8
5	0.2	R	280	30	25.6	63.0
6	0.2	L	240	40	30.6	65.7
7	0.3	T	280	40	27.8	65.1
8	0.3	R	240	50	24.3	62.1
9	0.3	L	260	30	30.0	65.2

Tabla 28 Señal ruido de resistencia y módulo para ABS/CF

L9-ABS/CF						
Nº corrida	Parámetros				S/N para	S/N para
	H	P	T	V	Resistencia	Módulo elástico
1	0.1	T	240	30	23.4	68.8
2	0.1	R	260	40	26.5	68.8
3	0.1	L	280	50	31.0	70.5
4	0.2	T	260	50	24.5	67.5
5	0.2	R	280	30	27.1	68.7
6	0.2	L	240	40	26.6	69.3
7	0.3	T	280	40	25.4	67.7
8	0.3	R	240	50	18.7	61.3
9	0.3	L	260	30	29.1	69.2

Al igual que las tablas de medias, **Tabla 21** y **Tabla 22**, se obtuvo los mayores valores del señal-ruido para las configuraciones L6 correspondiente al ABS proveniente de la **Tabla 27** y para el ABS/CF se tiene la configuración L3 proveniente de la **Tabla 28**. Entonces a partir de estas tablas se pudo generar las gráficas de efectos principales para la relación señal-ruido de ambos materiales y propiedades, donde también guardan similitud en tendencia la **Figura 45** con la **Figura 49**. De manera que se aprecia los niveles de 0.2mm, patrón de líneas, 260°C y velocidad de 40 mm/s serán los que nos conducirán a obtener la mejor resistencia para el polímero puro ABS.

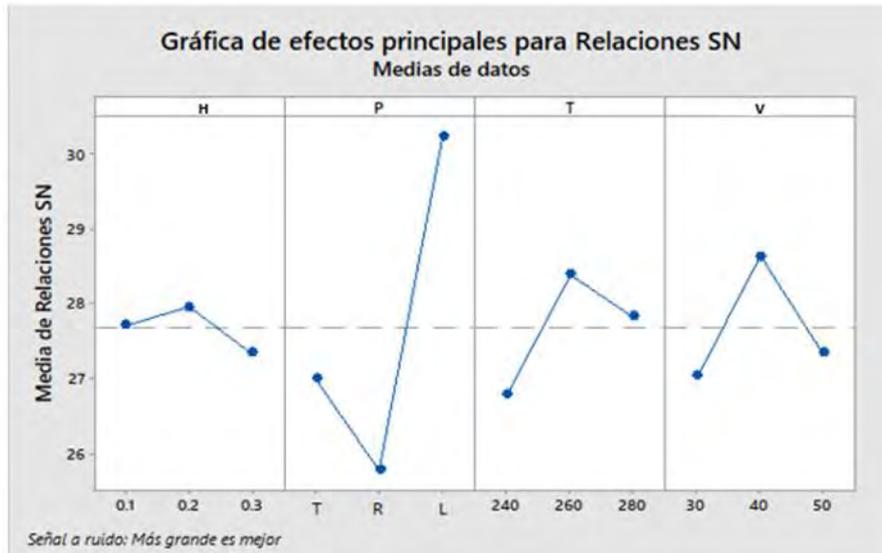


Figura 49 Efectos principales de la señal ruido de resistencia para ABS

En la **Tabla 29** se muestra el porcentaje de influencia que tuvieron los parámetros en estudio sobre la resistencia de la probeta de ABS. Para este caso el patrón de impresión aportó más del 50%, seguido de la velocidad y la temperatura aproximadamente ambos aproximadamente al 20% de contribución. La altura de capa mostró ser la de menor aporte con 7.4%.

Tabla 29 Porcentaje de contribución de Relación señal ruido para resistencia de ABS

Nivel	Parámetro	Relación S/N			Promedio S/N	Delta	Contribución	Nivel de importancia
H	1	0.1	25.5	27.5	30.1	27.7		
	2	0.2	27.7	25.6	30.6	28.0	0.61	7.4%
	3	0.3	27.8	24.3	30.0	27.4		
P	1	T	25.5	27.7	27.8	27.0		
	2	R	27.5	25.6	24.3	25.8	4.45	53.9%
	3	L	30.1	30.6	30.0	30.2		
T	1	240	25.5	30.6	24.3	26.8		
	2	260	27.5	27.7	30.0	28.4	1.59	19.3%
	3	280	30.1	25.6	27.8	27.8		
V	1	30	25.5	25.6	30.0	27.0		
	2	40	27.5	30.6	27.8	28.6	1.60	19.4%
	3	50	30.1	27.7	24.3	27.4		

De igual manera con el módulo de ABS, donde la **Figura 50** encuentra su símil con la **Figura 46**. La configuración que maximizará el módulo de ABS será 0.1mm, patrón de líneas, 260 °C y 40 mm/s.

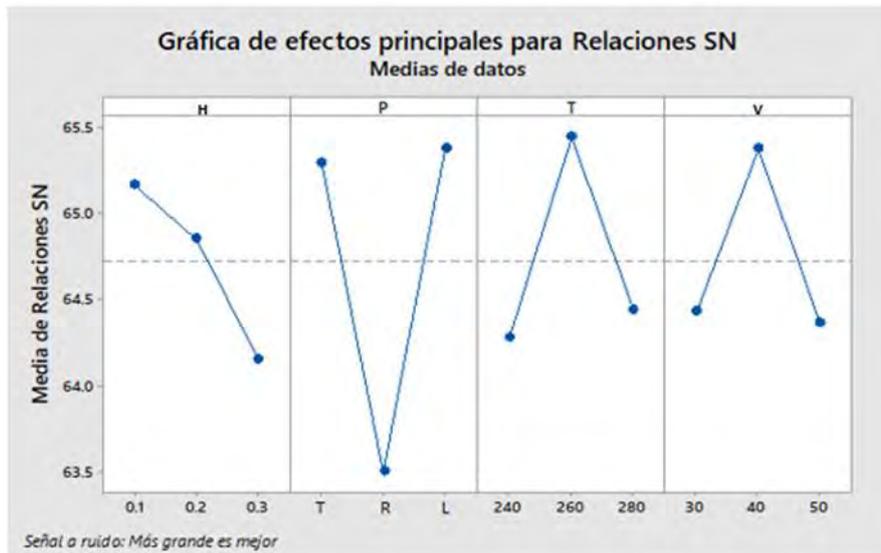


Figura 50 Efectos principales de la señal ruido de módulo para ABS

En cuanto a la influencia de los parámetros, el patrón también es el principal aportante con 37%. Esta vez el porcentaje es muy parejo para los tres restantes siendo 23%, 20% y 19.9% para la temperatura, velocidad y altura de capa respectivamente.

Tabla 30 Porcentaje de contribución de Relación señal ruido para módulo de ABS

Nivel	Parámetro	Relación S/N			Promedio S/N	Delta	Contribución	Nivel de importancia
H	1	0.1	65.0	65.3	65.2	65.2	19.9%	4
	2	0.2	65.8	63.0	65.7	64.9		
	3	0.3	65.1	62.1	65.2	64.2		
P	1	T	65.0	65.8	65.1	65.3	37.1%	1
	2	R	65.3	63.0	62.1	63.5		
	3	L	65.2	65.7	65.2	65.4		
T	1	240	65.0	65.7	62.1	64.3	23.0%	2
	2	260	65.3	65.8	65.2	65.4		
	3	280	65.2	63.0	65.1	64.4		
V	1	30	65.0	63.0	65.2	64.4	20.0%	3
	2	40	65.3	65.7	65.1	65.4		
	3	50	65.2	65.8	62.1	64.4		

Respecto al ABS/CF se tiene a la **Figura 51** cuya grafica análoga fue la **Figura 47**, donde la resistencia será la mayor cuando fabrique con 0.1mm, líneas, 280°C y 30 mm/s.

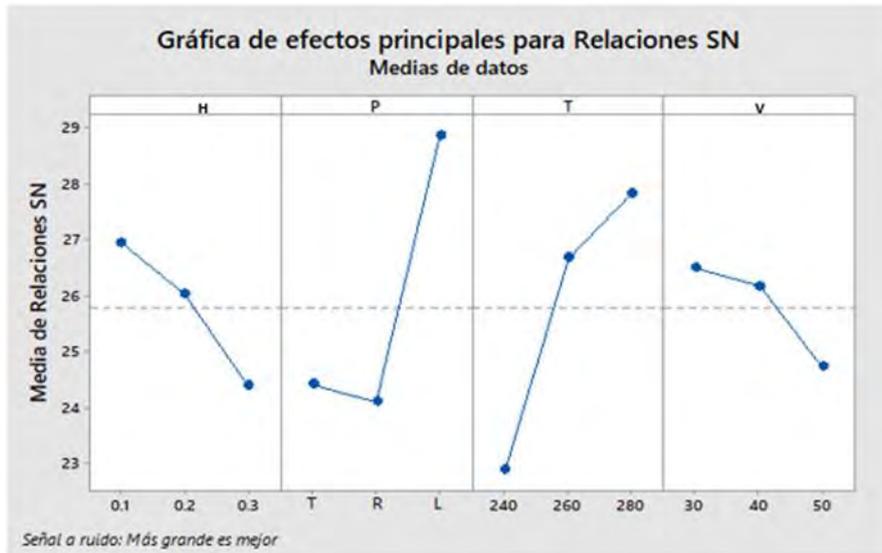


Figura 51 Efectos principales de la señal ruido de resistencia para ABS/CF

En la **Tabla 31**, se observó que los dos parámetros más influyentes fueron el patrón y temperatura con porcentajes de contribución muy cercanos, 35.2% y 34% respectivamente. Para completar, la altura de capa aportó un 18.2% y la velocidad solo un 12.6%.

Tabla 31 Porcentaje de contribución de Relación señal ruido para resistencia de ABS/CF

Nivel	Parámetro	Relación S/N			Promedio S/N	Delta	Contribución	Nivel de importancia
H	1	0.1	23.4	26.5	31.0	27.0	18.2%	3
	2	0.2	24.5	27.1	26.6	26.0		
	3	0.3	25.4	18.7	29.1	24.4		
P	1	T	23.4	26.6	18.7	22.9	35.2%	1
	2	R	26.5	24.5	29.1	26.7		
	3	L	31.0	27.1	25.4	27.8		
T	1	240	23.4	24.5	25.4	24.4	34.0%	2
	2	260	26.5	27.1	18.7	24.1		
	3	280	31.0	26.6	29.1	28.9		
V	1	30	23.4	27.1	29.1	26.5	12.6%	4
	2	40	26.5	26.6	25.4	26.2		
	3	50	31.0	24.5	18.7	24.7		

Finalizaremos con el módulo elástico para el polímero reforzado, donde se determinó la combinación idónea con 0.1mm de capa con patrón lineal, impreso a 280°C y una velocidad de 30 mm/s. La **Figura 52** se refleja lo previsto antes en la **Figura 48**.

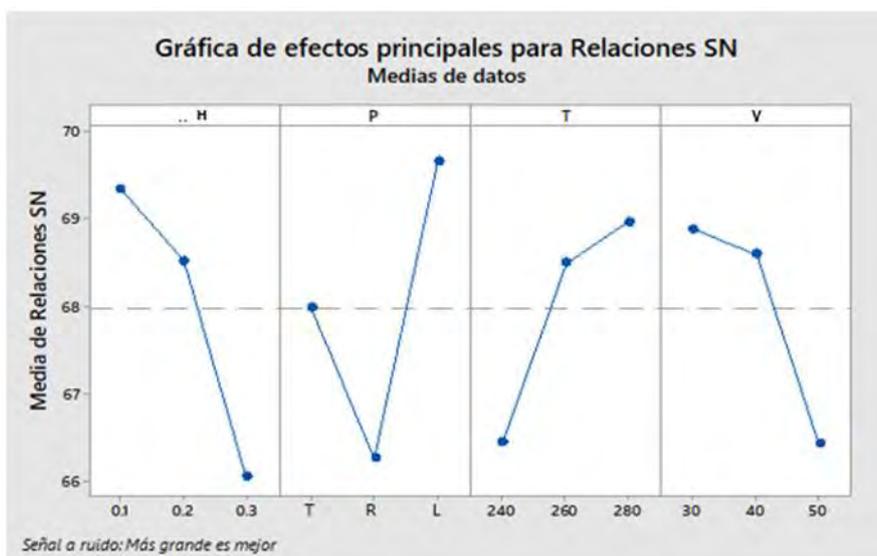


Figura 52 Efectos principales de la señal ruido de módulo para ABS/CF

Dicho modulo recibió los principales aportes del patrón con 29.2% y la altura de capa con 28.2%. Lo completan la temperatura y velocidad con 21.6% y 21% respectivamente, como se precia en la **Tabla 32**.

Tabla 32 Porcentaje de contribución de Relación señal ruido para módulo de ABS/CF

Nivel	Parámetro	Relación S/N			Promedio S/N	Delta	Contribución	Nivel de importancia	
H	1	0.1	68.8	68.8	70.5	69.3			
	2	0.2	67.5	68.7	69.3	68.5	3.28	28.2%	2
	3	0.3	67.7	61.3	69.2	66.1			
P	1	T	68.8	67.5	67.7	68.0			
	2	R	68.8	68.7	61.3	66.3	3.39	29.2%	1
	3	L	70.5	69.3	69.2	69.7			
T	1	240	68.8	69.3	61.3	66.5			
	2	260	68.8	67.5	69.2	68.5	2.51	21.6%	3
	3	280	70.5	68.7	67.7	69.0			
V	1	30	68.8	68.7	69.2	68.9			
	2	40	68.8	69.3	67.7	68.6	2.44	21.0%	4
	3	50	70.5	67.5	61.3	66.4			

Es así como con el análisis de Señal-ruido pudimos validar los valores de niveles que maximizaran cada parámetro obtenido en el análisis de efectos principales.

### 3.3.3. Análisis de varianza (ANOVA)

Para poder analizar a detalle la influencia de cada parámetro, poder cuantificarlos y establecer su nivel de importancia es necesario incorporar el análisis de varianza, conocido como ANOVA, para cada material de estudio.

El análisis ANOVA, analiza la existencia de cambios sobre la variable de respuesta, en este caso la resistencia a la tracción, correspondiente a las muestras del experimento L9. Como se mencionó en el capítulo anterior se tomó un nivel de significancia del 99.5%, con lo cual se tendrá un valor límite de rechazo a la hipótesis nula, también llamada  $H_0$ , de 0.005. Entonces si el valor P es inferior a ese valor se aceptará la hipótesis uno, conocida como  $H_1$ . Por lo cual se aceptará el cambio como significativo.

En la **Tabla 33** se aprecian los resultados para la resistencia del ABS, a partir de esta se ordenó los parámetros de mayor a menor influencia. Siendo el patrón, velocidad, temperatura y altura de capa los parámetros que más influyen sobre la resistencia. Se evidenció que la influencia del patrón de impresión superó el 80% del total, lo cual concuerda con la **Figura 45**, gráfico de efectos principales, donde se evidenció predominancia de este parámetro.

*Tabla 33 ANOVA sobre las medias de resistencia de ABS*

Parámetros	GL	SC	CM	$F_0$	Valor-P	Contribución	Nivel de importancia
Altura de capa	2	18.5	9.2	45.7	1.3E-10	1.1%	4
Patrón	2	1,355.4	677.7	3,353.5	1.2E-41	83.8%	1
Temperatura	2	91.0	45.5	225.2	4.4E-21	5.6%	3
Velocidad	2	145.8	72.9	360.8	1.5E-24	9.0%	2
Error	36	7.3	0.2			0.4%	
Total	44	1,618.0					

Respecto al módulo del ABS, se presentó el análisis en la **Tabla 34**. Donde al igual que el caso anterior el patrón es el más influyente, aunque esta vez con un 51.3%. En cuanto a la

temperatura, velocidad y altura de capa obtuvieron porcentajes medianamente próximos siendo estos 18.5%, 14.9% y 11.6%, respectivamente.

Tabla 34 ANOVA sobre las medias de módulo de ABS

Parámetros	GL	SC	CM	F <sub>0</sub>	Valor-P	Contribución	Nivel de importancia
Altura de capa	2	2.5E+05	1.3E+05	56.3	8.2E-12	11.6%	4
Patrón	2	1.1E+06	5.6E+05	250.0	7.7E-22	51.3%	1
Temperatura	2	4.1E+05	2.0E+05	90.4	9.3E-15	18.5%	2
Velocidad	2	3.3E+05	1.6E+05	72.6	2.3E-13	14.9%	3
Error	36	8.1E+04	2.3E+03			3.7%	
Total	44	2.2E+06					

A continuación, se presenta el resultado para la resistencia del material reforzado en la **Tabla 35**. Donde el orden de importancia fue el siguiente patrón, temperatura, altura de capa y velocidad. Al igual que en el caso anterior el patrón de impresión fue el mayor responsable del cambio en las variables de respuesta. Sin embargo, su contribución no fue tan dominante como en el caso de la resistencia del ABS, esta vez fue solo de 52.9%. En segundo lugar, tuvimos la temperatura con 36.6%. En cuanto al resto de parámetros no resultaron influir notablemente.

Tabla 35 ANOVA sobre las medias de resistencia de ABS/CF

Parámetros	GL	SC	CM	F <sub>0</sub>	Valor-P	Contribución	Nivel de importancia
Altura de capa	2	212.2	106.1	251.2	7.1E-22	8.8%	3
Patrón	2	1,282.0	641.0	1,518.0	1.7E-35	52.9%	1
Temperatura	2	887.2	443.6	1,050.6	1.2E-32	36.6%	2
Velocidad	2	24.9	12.4	29.4	2.7E-08	1.0%	4
Error	36	15.2	0.4			0.6%	
Total	44	2,421.4					

Por último tuvimos el cálculo sobre el módulo del ABS/CF en la **Tabla 36**. Para este caso los dos parámetros marcadamente de mayor aporte fueron el patrón y altura de capa con 35.9% y 32.4%. En segunda instancia de tuvo a los parámetros restantes cerca de si con la temperatura aportando el 16.5% y la velocidad aportando el 13.5%.

Tabla 36 ANOVA sobre las medias de módulo de ABS/CF

Parámetros	GL	SC	CM	F <sub>0</sub>	Valor-P	Contribución	Nivel de importancia
Altura de capa	2	4.9E+06	2.4E+06	338.1	4.6E-24	32.4%	2
Patrón	2	5.4E+06	2.7E+06	374.3	8.1E-25	35.9%	1
Temperatura	2	2.5E+06	1.2E+06	171.9	3.8E-19	16.5%	3
Velocidad	2	2.0E+06	1.0E+06	140.5	9.9E-18	13.5%	4
Error	36	2.6E+05	7.2E+03			1.7%	
Total	44	1.5E+07					

Se resalta la tendencia para los tres análisis presentados guardan concordancia y superan ampliamente el factor de error posible con lo cual se garantizó resultados confiables.

En resumen, se tuvo como principal parámetro influyente al patrón de impresión para los cuatros casos presentados.

### 3.3.4. Validación teórica para la resistencia

Una vez culminado los tres tipos de análisis anteriores se pudo identificar los niveles para cada parámetro que nos conducirán a la mejora en la resistencia a la tracción sobre los materiales, estos fueron los presentados en la **Tabla 37**. De esta tabla, para el ABS se obtendrán los mejores resultados para la configuración de 0.2mm de altura de capa, patrón de líneas, temperatura de 260°C y velocidad e impresión de 40mm/s. Por otra parte, para el polímero reforzado se conseguirán las mejores propiedades para la configuración de 0.1mm de altura de capa, patrón de líneas, temperatura de 280°C y velocidad e impresión de 30mm/s.

Tabla 37 Configuración óptima para maximizar la resistencia del ABS y ABS/CF

Configuración Óptima				
Material	Altura de capa (mm)	Patrón	Temperatura(°C)	Velocidad (mm/s)
ABS	0.20	Líneas	260	40
ABS/CF	0.10	Líneas	280	30

El tema de optimización de resistencia a la tracción para polímeros fue antes estudiado por científicos como Phadke en 1989, donde presentó su ecuación para el análisis de medias de datos como los calculados en las **Tablas 23 y 25**. Dicha ecuación para halla el valor óptimo predicho se presenta a continuación:

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

Donde:

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

***mA<sub>opt</sub>***: Valor óptimo para el parámetro A.

***mB<sub>opt</sub>***: Valor óptimo para el parámetro B.

***mC<sub>opt</sub>***: Valor óptimo para el parámetro C.

***mD<sub>opt</sub>***: Valor óptimo para el parámetro D.

Entonces aplicando los valores de la media de datos para ambos polímeros en la ecuación de Phadke y fabricando las probetas bajo las configuraciones óptimas de la **Tabla 37**, se halló los siguientes valores:

*Tabla 38 Valores óptimos y experimentales para el ABS y ABS/CF*

<b>Material:</b>	<b>Valor predicho</b>	<b>Experimental</b>	<b>Diferencia</b>
ABS	37.40 MPa	35.50 MPa	5%
ABS/CF	37.10 MPa	35.20 MPa	5%

El valor estimado para ambos materiales ronda los 37 MPa y solo difiere respecto al valor experimental en 5%, lo cual es más que aceptable para una estimación que podría ser usada en casos donde se requiera una aproximación rápida o no se tenga acceso a el proceso de fabricación. También se corrobora la tendencia de los resultados experimentales donde la resistencia a la tracción se ve ligeramente mermada al incorporar refuerzo de fibras al polímero base.

### **3.4. Estudio del porcentaje de relleno**

Adicionalmente, se realizaron ensayos sobre la configuración óptima para cada material variando el porcentaje de relleno para poder analizar su comportamiento. Esto principalmente debido a que como en cualquier otro proceso siempre se buscará reducir su tiempo de fabricación y material, es por ello que requerimos conocer en qué medida se verán afectadas

sus propiedades mecánicas al usar menos relleno sobre las probetas impresas con la configuración óptima para cada material.

En la **Tabla 39** se muestra los resultados correspondientes al ABS donde se registró un valor de resistencia a la tracción de 35.5 MPa con un módulo de 2,105MPa como máximos valores para el porcentaje de relleno al 100%. En este caso la impresión bajo la configuración optima superó las propiedades de los arreglos ortogonales para este material como fue el L6 con valores de 34 MPa con 1,934 MPa, de esta manera se corroboró que el método estadístico usado conlleva a la maximización de las propiedades en estudio.

*Tabla 39 Ensayos a diferentes porcentajes de relleno para ABS*

<b>Relleno</b> <b>(%)</b>	<b>Resistencia a la tracción</b> <b>(Mpa)</b>			<b>Módulo de elasticidad</b> <b>(Mpa)</b>		
	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>CV(%)</b>	<b>Media</b>	<b>Desv. Est.</b>	<b>CV(%)</b>
50	14.3	0.3	2.1%	1,042.8	28.5	2.7%
60	16.3	0.2	1.4%	1,066.8	50.5	4.7%
70	19.5	0.5	2.7%	1,313.4	59.5	4.5%
80	24.4	0.5	2.1%	1,655.8	33.5	2.0%
90	29.5	0.5	1.8%	1,767.2	82.6	4.7%
100	35.5	0.2	0.7%	2,105.2	92.5	4.4%

En la **Tabla 40** se aprecian los resultados correspondientes al material ABS/CF, donde se registró como máximo valor 35.2 MPa con 3,461 MPa para el relleno del 100%. En este caso al compararlo con el máximo valor proveniente del arreglo ortogonal L3, prácticamente se igualó la resistencia a la tracción y se superó el valor del módulo de 3,350 MPa. De esta manera se puede afirmar nuevamente que el diseño factorial contribuyó a maximizar las variables de respuesta en estudio.

Tabla 40 Ensayos a diferentes porcentajes de relleno para ABS/CF

Relleno (%)	Resistencia a la tracción (Mpa)			Módulo de elasticidad (Mpa)		
	Media	Desv. Est.	CV(%)	Media	Desv. Est.	CV(%)
50	12.6	0.6	5.0%	1,436.8	30.4	2.1%
60	16.2	0.7	4.3%	1,745.1	28.0	1.6%
70	18.6	0.5	2.6%	1,960.7	25.5	1.3%
80	26.0	0.8	3.0%	2,726.0	95.5	3.5%
90	30.5	1.2	3.8%	3,153.9	79.0	2.5%
100	35.2	0.7	1.9%	3,460.6	34.9	1.0%

También se procedió a graficar los resultados de la variación del porcentaje de relleno para cada propiedad mecánica. Se analizó la **Figura 53**, donde se aprecia la tendencia lineal y de valores muy próximos para la resistencia a la tracción de ambos materiales. Esta figura indica que el polímero puro y el reforzado serán capaces de soportar prácticamente las mismas cargas de tracción a igualdad de porcentaje de relleno.

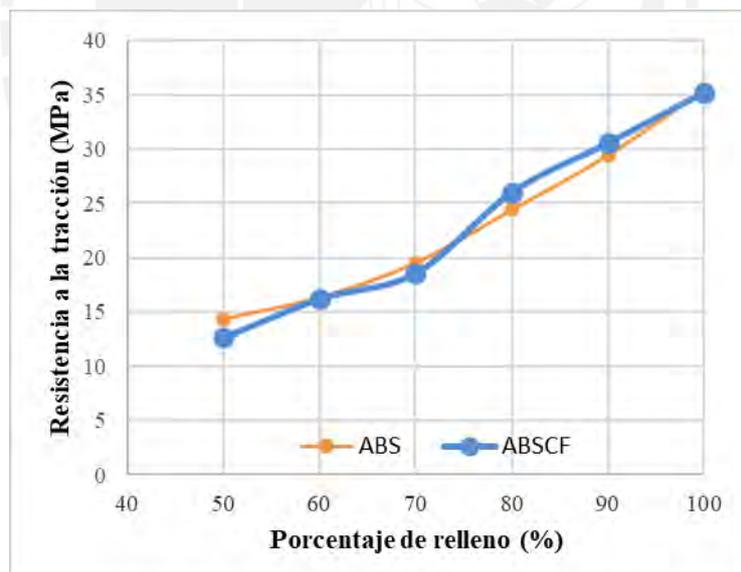


Figura 53 Comparación de resistencia para distintos porcentajes de relleno

Para analizar el módulo elástico se usó la **Figura 54**, donde se evidencia mayores valores de módulo para el ABS/CF respecto a la matriz pura. Para el caso del 100% de relleno, el refuerzo de fibras de carbono aumentó casi en un 70% respecto al ABS.

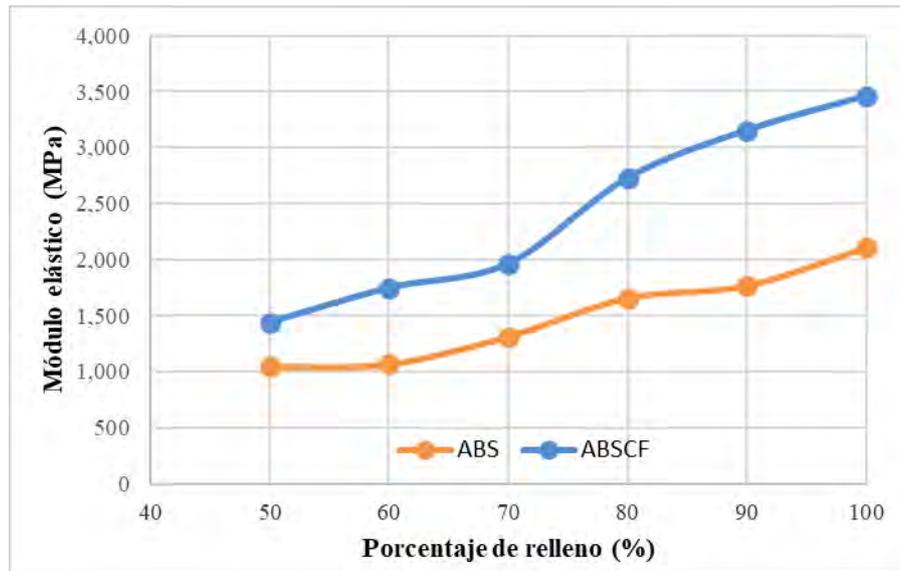


Figura 54 Comparación de módulo para distintos porcentajes de relleno

Estas figuras evidencian que el efecto principal del uso de refuerzos de fibra de carbono en el ABS fue aumentar el módulo elástico a diferencia de la resistencia a la tracción, el cual no se ve marcadamente afectado.

También, se analizó la medida en que se ven reducidas las propiedades mecánicas en función del porcentaje de relleno. Para ellos se calculó la razón entre la propiedad mecánica y el valor de dicha propiedad al 100% de relleno, cuyos resultados se ven en la **Tabla 41** para las probetas de ABS y en la **Tabla 42** para las probetas de ABS/CF.

Tabla 41 Reducción de las propiedades mecánicas en función del porcentaje de relleno para ABS

% Relleno	Resistencia (MPa)	Razón	Módulo (MPa)	Razón
50	14.3	40%	1,042.8	50%
60	16.3	46%	1,066.8	51%
70	19.5	55%	1,313.4	62%
80	24.4	69%	1,655.8	79%
90	29.5	83%	1,767.2	84%
100	35.5	100%	2,105.2	100%

Tabla 42 Reducción de las propiedades mecanizas en función del porcentaje de relleno para ABS/CF

% Relleno	Resistencia (MPa)	Razón	Módulo (MPa)	Razón
50	12.6	36%	1,436.8	42%
60	16.2	46%	1,745.1	50%
70	18.6	53%	1,960.7	57%
80	26.0	74%	2,726.0	79%
90	30.6	87%	3,153.9	91%
100	35.2	100%	3,460.6	100%

En estas tablas se aprecia que a partir del 70% hasta el 50% de relleno, las propiedades mecánicas se verán afectadas en una reducción de hasta 10% menos que el porcentaje de relleno usado. Esto indica que las propiedades mecánicas no necesariamente se comportan a la par que el porcentaje de relleno seleccionado al momento de la fabricación.

Por último, se evaluó las propiedades mecánicas en estudio respecto al peso correspondiente de cada probeta. Ya que dicha relación es de los puntos más solicitados por los consumidores en el rubro de manufactura aditiva. Como se aprecia en la **Tabla 43**, se tomó el valor promedio del peso de las probetas de ABS impresas con cierto porcentaje de relleno y se realizó los cálculos respecto a la resistencia y módulo de la configuración, presentándose en las últimas columnas de la tabla. Es así como se registró un máximo de 17.4 MPa/g de resistencia y 1,034 MPa/g de módulo para la probeta de 100% de relleno. De manera análoga se procedió con el ABS/CF presentado en la **Tabla 44**, donde se obtuvo 17 MPa/g de resistencia y 1,674 MPa/g de módulo para la probeta de 100% de relleno.

Tabla 43 Esfuerzo y módulo respecto al peso para probetas de ABS

<b>% Relleno</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Módulo (MPa)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Res./peso (MPa/g)</b>	<b>Mod./peso (MPa/g)</b>
50	14.3	1,042.8	1.209	11.8	862.4
60	16.3	1,066.8	1.398	11.7	762.8
70	19.5	1,313.4	1.581	12.3	830.6
80	24.4	1,655.8	1.738	14.0	952.8
90	29.5	1,767.2	1.975	14.9	894.9
100	35.5	2,105.2	2.034	17.4	1,034.8

Tabla 44 Esfuerzo y módulo respecto al peso para probetas de ABS/CF

<b>% Relleno</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Módulo (MPa)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Res./peso (MPa/g)</b>	<b>Mod./peso (MPa/g)</b>
50	12.6	1,436.8	1.226	10.3	1,172.2
60	16.2	1,745.1	1.421	11.4	1,228.4
70	18.6	1,960.7	1.627	11.4	1,204.9
80	26.0	2,726.0	1.807	14.4	1,508.2
90	30.6	3,153.9	1.944	15.7	1,622.3
100	35.2	3,460.6	2.067	17.0	1,674.1

También, se procedió a graficar los valores calculados para identificar tendencias sobre el estudio. En la **Figura 55** correspondiente al comparativo de la resistencia por unidad de masa, donde se observó una tendencia creciente para el rango de 80% a 100% de relleno de ambos polímeros. A diferencia de los menores valores de relleno, donde para el ABS se será conveniente optar por un relleno al 50% y para el ABS/CF por uno del 60%. Esta tendencia no lineal es similar a los estudios realizado por autores como Alvares en el 2016 y Kumar en el 2019.

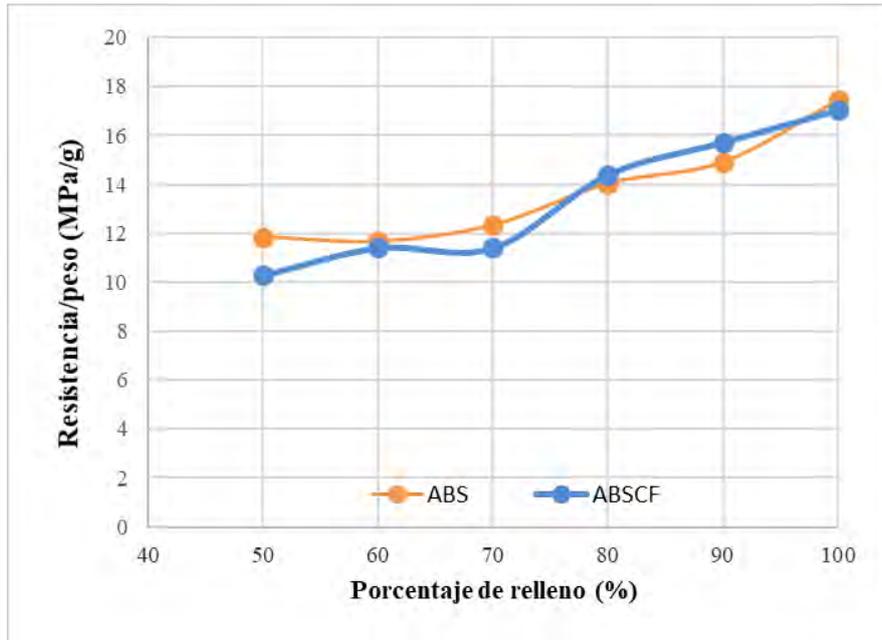


Figura 55 Comparación de resistencia respecto al peso para distintos porcentajes de relleno

Para analizar el caso del módulo respecto al peso se tiene la **Figura 56**, donde se hace evidente los mayores valores de modulo por unidad de masa para el polímero ABS/CF comparado con el polímero puro. Dicha figura en mención está en concordancia con la **Figura 54**, lo cual se explica debido que los pesos de las probetas son relativamente cercanos para ambos materiales. Debido a ello la tendencia se esperaba que se mantenga como fue el caso del ABS/CF; sin embargo, para el ABS a 90% y 60% de relleno se registraron mínimos respecto a sus valores aleatorios. Esto se debe a que el valor del módulo para el ABS a dichos porcentajes de relleno no se incrementó en la misma media que la masa de la probeta.

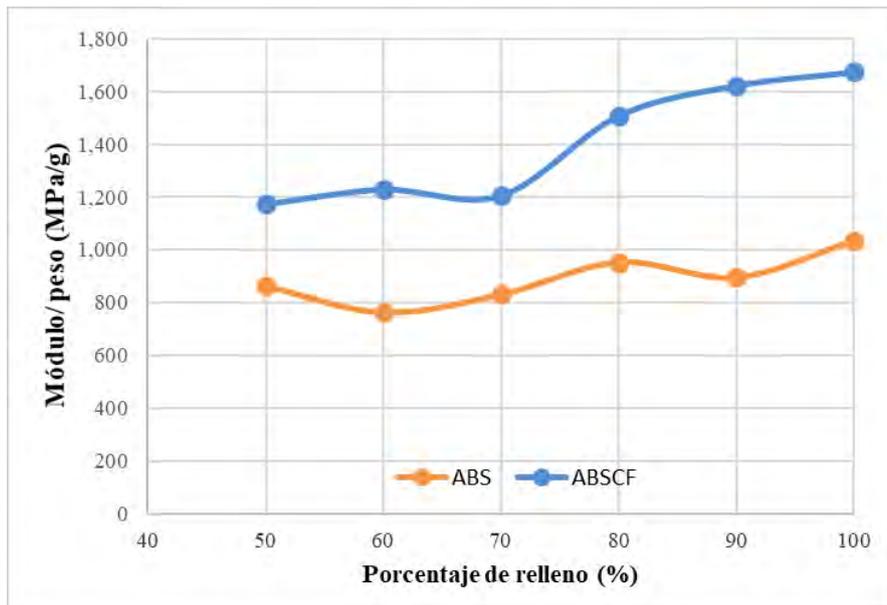


Figura 56 Comparación de módulo respecto al peso para distintos porcentajes de relleno

Desde el punto de vista estrictamente de la relación propiedades respecto al peso, el cual es muy apreciado en áreas como la aeronáutica o prótesis médicas, se visualizó que la probeta impresa al 80% de relleno para ambos polímeros es la que presentará mejores valores de resistencia a la tracción y módulo elástico. Siendo para el ABS 24.4 MPa con 1,655 MPa de modulo y para el ABS/CF 26 MPa con 2,726 MPa de modulo.

# Conclusiones

Los parámetros de fabricación más importantes del proceso FDM utilizando filamentos de ABS y ABS/CF son: altura de capa, patrón de impresión, temperatura de impresión y velocidad de impresión. Los parámetros y los niveles estudiados fueron: altura de capa: 0.1 mm, 0.2 mm y 0.3 mm; patrón de impresión: líneas, triángulo y rejilla; velocidad de impresión: 30 mm/s, 40 mm/s y 50 mm/s y temperatura de impresión: 240°C, 260°C y 280°C.

La grafica de efectos principales permitió visualizar los niveles que generarán las mejores configuraciones de parámetros para cada material del estudio. Siendo para el ABS 0.2mm de altura de capa, patrón de líneas, temperatura de impresión 260°C y velocidad de impresión 40 mm/s. Bajo esta combinación de parámetros se logró obtener una resistencia mayor que cualquier otra registrada en el arreglo L9 para el ABS, cuyo valor máximo es de 35.5 MPa con 2,105 MPa de modulo elástico. Análogamente, para el ABS/CF los parámetros que optimizan las propiedades en tracción son: de 0.1 mm de altura, patrón de líneas, una temperatura de impresión de 280 °C y 30 mm/s. Logrando de esta manera una resistencia a la tracción de 35.2 MPa para el material reforzado con un módulo de 3,460 MPa. Los resultados mencionados fueron corroborados mediante el cálculo del valor señal-ruido, donde se apreciaron las mismas tendencias y valores que maximizaron las propiedades mecánicas de los materiales en estudio.

El parámetro de mayor influencia para imprimir con ABS y ABS/CF es el patrón con el cual se forman las capas. Para el ABS puro se obtuvo un porcentaje de contribución cerca del 84% y para el material reforzado uno de 53 % aproximadamente.

Las propiedades mecánicas que se obtuvieron con las mejores configuraciones de impresión fueron menores que las medidas sobre los filamentos ensayados. Esto se debe principalmente a que las fuerzas de cohesión involucradas en el proceso de fabricación de los filamentos son mayores que en el proceso de impresión 3D, principalmente por la homogeneidad del calor

aportado sobre la formación del filamento y mayores temperaturas usadas. La probeta de ABS presentó una resistencia a la tracción máxima de 35.5 MPa correspondiente al 93% de la resistencia del filamento (37.9 MPa). De manera análoga, para el material reforzado la resistencia de la probeta impresa fue 35.2MPa que representa el 89% valor del filamento (39.6 MPa).

La variación del porcentaje de relleno no afecta en la misma medida sobre las propiedades mecánicas de las probetas en todo el rango de estudio. Para los polímeros en estudio, entre el 100% de relleno y el 80% la correlación es similar al porcentaje seleccionado. En cambio, a partir de 70% hasta el 50% se pueden apreciar reducciones de hasta 20% sobre las propiedades por debajo de porcentaje de relleno seleccionado. Al evaluar las propiedades respecto al peso de las probetas se obtuvo las mejores relaciones para impresiones al 80% de porcentaje de relleno para ambos materiales. Siendo para el ABS 24.4 MPa con 1,655 MPa de módulo y para el ABS/CF 26 MPa con 2,726 MPa de módulo.

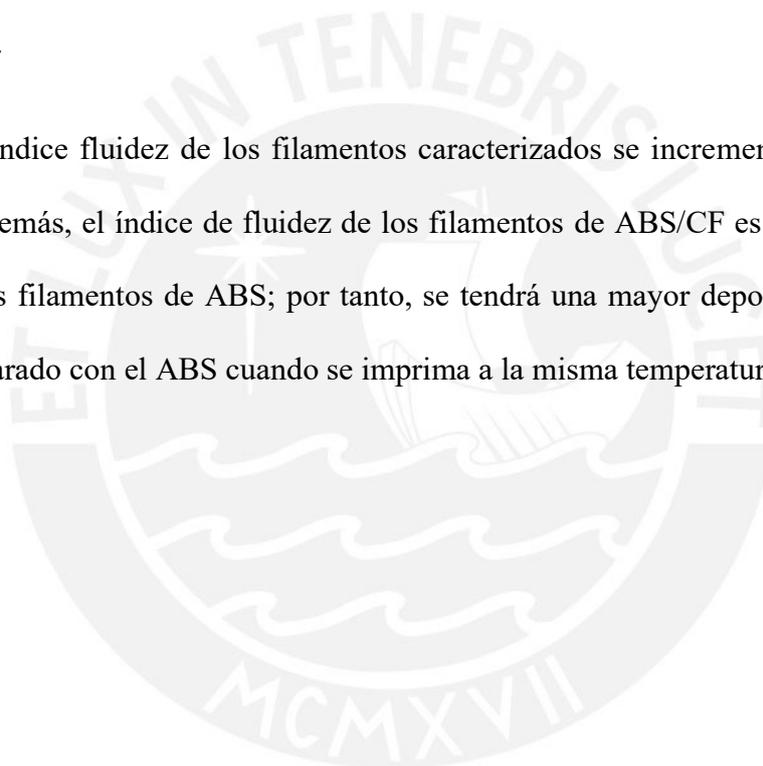
Las propiedades más importantes que se requieren conocer de un filamento de ABS para determinar los parámetros de manufactura usando el proceso de modelado por deposición fundido son: resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, temperatura de transición vítrea, temperatura del inicio de la degradación e índice de fluidez.

De los ensayos de tracción sobre los distintos filamentos se pudo apreciar un aumento muy discreto en cuanto a la resistencia a la tracción debido al refuerzo de fibras de carbono respecto al filamento de ABS. El filamento de ABS/CF tuvo una resistencia a la tracción de casi 40 MPa, esto fue un 5% mayor que su par de ABS el cual fue de 38 MPa. En cambio, se tuvo un aumento muy considerable sobre el módulo de elasticidad de ABS/CF respecto al de ABS, este incremento fue cercano al doble. Se obtuvo 1,896 MPa para el ABS, mientras que se alcanzó el valor de 3,818 MPa para el ABS/CF. Las fibras de carbono redujeron drásticamente el

alargamiento de rotura del filamento de ABS, donde se obtuvo una reducción del 96% para el material reforzado respecto al ABS puro. Los principales efectos del refuerzo de fibras de carbono sobre la matriz de ABS fueron aumentar la rigidez del material y disminuir su deformación unitaria.

La temperatura de inicio de la degradación es de 370 °C para los filamentos de ABS y 360 °C para los de ABS/CF; lo que asegura que no se presentarán problemas de degradación del material durante el proceso de impresión, en tanto que no se superará la capacidad máxima del equipo (280 °C).

La medida del índice de fluidez de los filamentos caracterizados se incrementó al aumentar la temperatura. Además, el índice de fluidez de los filamentos de ABS/CF es superior al índice de fluidez de los filamentos de ABS; por tanto, se tendrá una mayor deposición de material reforzado comparado con el ABS cuando se imprima a la misma temperatura.



# Bibliografía

- 3D sourced (2022). 3D Prints Warping or Curling?-Why it happens and how to prevent it. Octubre 2022. <https://www.3dsourced.com/rigid-ink/3d-prints-warping-curling-how-to-prevent/>
- ASTM International. (2013). F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. *Rapid Manufacturing Association*. <https://doi.org/10.1520/F2792-12A.2>
- Babu, S. S., & Goodridge, R. (2015). Additive manufacturing. *Materials Science and Technology*, 31(8), 881–883. <https://doi.org/10.1179/0267083615Z.000000000929>
- CONADIS (2020). Registro Nacional de la Persona con Discapacidad. Marzo 2020. <https://conadisperu.gob.pe/observatorio/estadisticas/inscripciones-en-el-registro-nacional-de-la-persona-con-discapacidad-a-marzo-2020/>
- Contreras, Lucia (2018). La impresión 3D médica, una herramienta para salvar nuestras vidas. 3D Natives. <https://www.3dnatives.com/es/la-impresion-3d-170720182/#!>
- Dodziuk, H. (2016). Applications of 3D printing in healthcare. *Kardiochirurgia i Torakochirurgia Polska/Polish Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 13(3), 283-293. <https://doi.org/10.5114/kitp.2016.62625>
- Gibbons, George (2017) Renishaw colabora en el proyecto Futuralve para la nueva generación de turbinas de alta velocidad para la industria aeroespacial. <https://www.renishaw.es/es/renishaw-colabora-en-el-proyecto-futuralve-para-la-nueva-generacion-de-turbinas-de-alta-velocidad--42391>
- Gutiérrez Pullido, Humberto. De La Vara Salazar, R. (2008). *www.FreeLibros.org*. (M. Á. Toledo Castellano, Ed.) (Segunda ed). México, D.F.: Mc Graw-Hill Interamericana.
- Halidi, S. N. A. M., & Abdullah, J. (2012). Moisture effects on the ABS used for Fused Deposition Modeling rapid prototyping machine. *SHUSER 2012 - 2012 IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research*. <https://doi.org/10.1109/SHUSER.2012.6268999>
- Hannah Bensoussan. (2016). The History of 3D Printing: From the 80s to Today. Retrieved August 23, 2018, from <https://www.sculpteo.com/blog/2016/12/14/the-history-of-3d-printing-3d-printing-technologies-from-the-80s-to-today/>

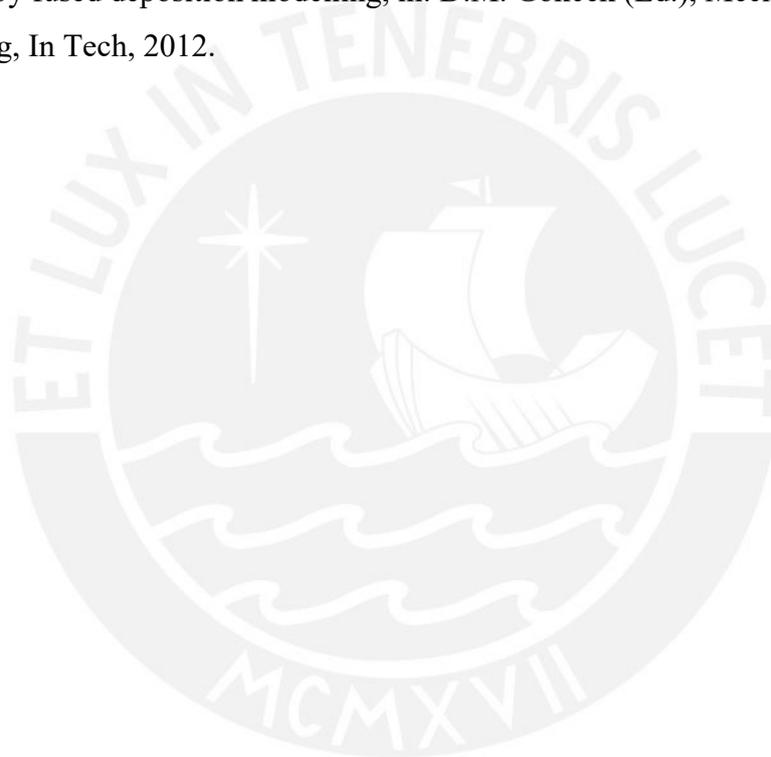
- Kim, G. B., Lee, S., Kim, H., Yang, D. H., Kim, Y. H., Kyung, Y. S., ... Kim, N. (2016). Three-dimensional printing: Basic principles and applications in medicine and radiology. *Korean Journal of Radiology*, 17(2), 182–197. <https://doi.org/10.3348/kjr.2016.17.2.182>
- Kumar, V., Srivastava, R., Dev, S. (2019). Experimental and FEA studies of ABS parts produced by FDM process. *International Journal of Science and Research (IJSR)*
- Lee, B. H., Abdullah, J., & Khan, Z. A. (2005). Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object, 169, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259>
- Letcher, T., Rankouhi, B., Javadpour, S. (2015). Experimental study of mechanical properties of additively manufactured ABS plastic as a function of layer parameters, in: Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2015, Houston, 2015.
- Lucas, K., Palomino, L., Arribasplata, A., Acosta, J. (2016). Caracterización del producto comercial KRION de la empresa porcelanosa-España. Proyecto:165-2015 FONDECYT-DE.
- 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>
- Nizam, A., Gopal, R. N., Naing, L., Hakim, a B., & Samsudin, a R. (2006). Dimensional Accuracy of the Skull Models Produced by Rapid Prototyping Technology Using Stereolithography Apparatus. *Archives of Orofacial Sciences*, 1, 60–66.
- Rankouhi, B., Javadpour, S., Delfanian, F., Letcher, T. (2016) Failure analysis and mechanical characterization of 3D printed ABS with respect to layer thickness and orientation, *J. Fail. Anal. Prev.* 16 (3) (2016) 467–481.
- Sanjairaj, V., Wei-Cheng, Y., Wen, F., Chi-Hwa, W., Jerry, Y. (2018). 3D bioprinting of tissues and organs for regenerative medicine. *Advanced drug delivery reviews*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169409X18301686>
- Shilo, D., Emodi, O., Blanc, O., Noy, D., & Rachmiel, A. (2018). Printing the Future—Updates in 3D Printing for Surgical Applications. *Rambam Maimonides Medical Journal*, 9(3), e0020. <https://doi.org/10.5041/RMMJ.10343>

Tim Taylor (2020). Types of joints. Mayo 2020:  
<https://www.innerbody.com/image/skel07.html>

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>

Zhe Mei (2015). An aproach for development of low cost prosthetic limbs with 3D printing technology. Marzo 2020. <http://etd.auburn.edu/handle/10415/4762>

Ziemian, C., Sharma, M., Ziemian, S. (2012) Anisotropic mechanical properties of ABS parts fabricated by fused deposition modelling, in: D.M. Gokcek (Ed.), *Mechanical Engineering, In Tech*, 2012.



## **Anexo 1: Ficha técnica de filamentos**





**3DXTECH® ABS**

EFFECTIVE DATE: 08 / 01 / 2017

REVISION NUMBER: V1.0

**1 PRODUCT AND SUPPLIER INFORMATION**

**Product Identification:**

Product Name: 3DXTECH® ABS

Chemical Name: Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)

Recommended Use: Additive manufacturing

**Supplier Information:**

3DXTECH

571 Gordon Industrial Court, Suite E

Byron Center, MI 49315 (USA)

Phone (616) 970-2702

Email: INFO@3DXTECH

Emergency Phone Number: (616) 970-2702

**2 HAZARDS IDENTIFICATION**

Regulation (EC) NO 1272/2008: Not classified as a dangerous product

Physical Hazards: None

OSHA Regulatory Status: This product is not considered hazardous by the 2012 OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200)

**3 COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS**

Components	CAS No.	Concentration Range (%)
ABS Resin	9003-56-9	100

**4 EMERGENCY FIRST AID**

Eyes: Flush with water. Consult physician if symptoms persist.

Skin Contact: Wash with soap and water. For thermal burns from molten polymer, immediately flush with cold water. Do not attempt to remove cooled polymer from skin. Obtain medical attention.

Inhalation: Leave exposed area and seek fresh air. If irritation persists seek medical attention.

Ingestion: Not likely due to nature of product. If ingested, drink plenty of water. Do not induce vomiting. Consult a physician if symptoms persist.

**5 FIRE AND EXPLOSION HAZARD**

Extinguishing Media: Water spray, dry powder, and foam. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)

Safety Precautions for Persons exposed to products of combustion should wear NIOSH approved self contained breathing apparatus and full protective equipment.



## CarbonX™ Carbon Fiber Reinforced ABS 3D Filament

CarbonX™ Carbon Fiber Reinforced ABS (acrylonitrile butadiene styrene terpolymer) is a high-performance carbon fiber reinforced 3D printing filament. This grade was formulated utilizing high-modulus carbon fiber and premium ABS – making it ideal for applications that require superior stiffness, improved dimensional stability and greater thermal resistance than traditional unfilled materials. 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%
- Extrusion temp: 230°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	1.11

Mechanical Property	Unit	Standard	Typical Value
Tensile Strength	MPa	ISO 527	44
Tensile Modulus	MPa	ISO 527	4018
Tensile Elongation, Break	%	ISO 527	1.8
Flexural Modulus	MPa	ISO 178	5260
Flexural Strength	MPa	ISO 178	76

Thermal Property	Unit	Standard	Typical Value
Glass Transition Temperature (Tg)	°C	DSC	105
Heat Distortion Temperature (HDT) @ 0.45MPa	°C	ISO 75	102.5

Electrical Property	Unit	Standard	Typical Value
Surface Resistivity	Ohm/sq	IEC 60093	>10 <sup>8</sup>

Printing Recommendation	Typical Range
Extruder Temperature	220 - 240°C
Bed Temperature	100 - 110°C
Print Speed	50 - 70 mm/sec

## CarbonX™ Carbon Fiber ABS

EFFECTIVE DATE: 08 / 01 / 2017

REVISION NUMBER: V1.0

### 1 PRODUCT AND SUPPLIER INFORMATION

**Product Identification:**

Product Name: CarbonX™ CF-ABS

Chemical Name: ABS

Recommended Use: Additive manufacturing

**Supplier Information:**

3DXTECH

571 Gordon Industrial Court, Suite E

Byron Center, MI 49315 (USA)

Phone (616) 970-2702

Email: INFO@3DXTECH

Emergency Phone Number: (616) 970-2702

### 2 HAZARDS IDENTIFICATION

Regulation (EC) NO 1272/2008: Not classified as a dangerous product

Physical Hazards: None

OSHA Regulatory Status: This product is not considered hazardous by the 2012 OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200)

### 3 COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

Components	CAS No.	Concentration Range (%)
ABS Resin	9003-56-9	>80
Carbon Fiber	308063-67-4	<20

### 4 EMERGENCY FIRST AID

Eyes: Flush with water. Consult physician if symptoms persist.

Skin Contact: Wash with soap and water. For thermal burns from molten polymer, immediately flush with cold water. Do not attempt to remove cooled polymer from skin. Obtain medical attention.

Inhalation: Leave exposed area and seek fresh air. If irritation persists seek medical attention.

Ingestion: Not likely due to nature of product. If ingested, drink plenty of water. Do not induce vomiting. Consult a physician if symptoms persist.

### 5 FIRE AND EXPLOSION HAZARD

 Extinguishing Media: Water spray, dry powder, and foam. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)

Safety Precautions for Persons exposed to products of combustion should wear NIOSH approved self contained breathing apparatus and full protective equipment.