

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ANISOTRÓPICO
EN ESPECÍMENES DE ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO
(ABS) Y POLIAMIDA 6 (PA6) REFORZADOS CON FIBRAS DE
CARBONO FABRICADOS MEDIANTE EL PROCESO
DE MANUFACTURA ADITIVA**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico

AUTOR:

Dante Aaron Ramirez Mestanza

ASESOR:

Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán

Lima, mayo, 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 **“CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ANISOTRÓPICO EN ESPECÍMENES DE ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO (ABS) Y POLIAMIDA 6 (PA6) REFORZADOS CON FIBRAS DE CARBONO FABRICADOS MEDIANTE EL PROCESO DE MANUFACTURA ADITIVA”**, del autor Dante Aaron Ramirez Mestanza.

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: <u>Acosta Sullcahuamán, Julio Arnaldo</u>	
DNI: 07960574	Firma: 
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1518-4282	

RESUMEN

En el área de la medicina moderna, la manufactura aditiva es uno de los procesos de fabricación más empleados debido a la versatilidad que brindan para adaptar componentes médicos a la necesidad de cada paciente, así como el uso de diversos materiales. Sin embargo, la información referente al comportamiento mecánico de estos componentes frente a la aplicación de cargas en distintas direcciones no es suficiente para su uso efectivo en algunas aplicaciones de esta área, debido a que presentan un comportamiento anisotrópico y en consecuencia existen direcciones críticas donde la pieza fabricada podría fallar; como es el caso del diseño y la fabricación de prótesis. De esta forma, este trabajo permitirá cumplir con los objetivos del proyecto: “Optimización del uso de polímeros sintéticos en procesos de manufactura aditiva mediante modelos de simulación computacional y técnicas de caracterización de materiales. Caso de estudio: aplicaciones médicas prótesis de mano”.

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar, mediante ensayos de tracción, el comportamiento anisotrópico de especímenes fabricados mediante manufactura aditiva, a partir de filamentos de acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), poliamida 6 (PA6) y estos mismos reforzados con fibras de carbono (CF): ABS/CF y PA/CF.

Para ello, se realizaron ensayos de tracción y análisis termogravimétrico a los materiales iniciales para la fabricación (filamentos) y se seleccionaron los parámetros óptimos de impresión para los 4 materiales obtenidos en una investigación anterior: velocidad de deposición, temperatura de impresión, altura de capa y patrón de impresión. Posteriormente, se definieron las 6 orientaciones de impresión que permitirán obtener las 9 constantes elásticas que rigen el comportamiento anisotrópico de los especímenes. Por último, se fabricaron probetas de los 4 materiales en las distintas orientaciones definidas y se procedió a realizar los ensayos de tracción correspondientes a cada espécimen fabricado.

Como resultado del trabajo, se concluyó que la adición de fibras de carbono en la matriz polimérica incrementa el valor del módulo elástico en las direcciones donde la carga y la orientación de impresión son paralelas. Sin embargo, en direcciones donde la carga es perpendicular a orientación de impresión, el módulo disminuye. Además, la adición de estas fibras presentó un mayor incremento del módulo para la PA (3.9 veces) a comparación del ABS (1.5 veces).

AGRADECIMENTOS

En primer lugar, agradezco a PROCENCIA por el financiamiento del presente trabajo de investigación de acuerdo con el Contrato N° 163-2017-FONDECYT.

Agradezco a mi asesor y mentor Dr. Ing. Julio Acosta por permitirme pertenecer a su grupo de Investigación de Ingeniería de Polímeros y Materiales Compuestos. Además, por guiarme y apoyarme durante este camino inicial en la investigación.

Al Dr. Ing Quino Valverde quién confió en mí desde el primer momento para la ejecución de esta investigación cuyos resultados permitirán un gran avance en el área de prótesis de la medicina moderna.

Deseo agradecer a mi familia quienes desde un inicio me brindaron su apoyo incondicional a pesar de los momentos complicados que se presentaron durante estos años.

Un agradecimiento especial a mi profesor Damián Alfaro Cotrina por guiarme, enseñarme y motivarme a elegir esta carrera universitaria.

Al laboratorio de Investigación de la sección de Ingeniería Mecánica número 4 “Investigación de Ingeniería de Polímeros y Materiales Compuestos” por tantos momentos agradables y por el conocimiento brindado. En especial, a mi gran amigo Miguel Vilca con quien he compartido distintas experiencias entre académicas y de ocio.

Agradezco al laboratorio de Materiales PUCP por el apoyo brindado con los ensayos mecánicos, térmicos y por la asesoría brindada durante el proyecto. Además, a sala VEO 3D-PUCP por el apoyo en el uso y mantenimiento de los equipos de impresión 3D.

Índice

Introducción	1
Capítulo 1: Fundamentos teóricos	6
1.1. Procesos de fabricación tradicionales de polímeros	7
1.1.1. Proceso de moldeo por inyección	7
1.1.2. Fabricación por moldeo rotacional	9
1.1.3. Moldeo por compresión	10
1.2. Manufactura Aditiva	12
1.2.1. Estereolitografía (SLA)	17
1.2.2. Fabricación por filamento fundido (FFF)	19
1.3. Polímeros reforzados con fibras de carbono en manufactura aditiva	28
Capítulo 2: Metodología experimental	32
2.1. Materiales	33
2.1.1. Filamentos comerciales de ABS y PLA	33
2.2. Equipos	34
2.2.1. Impresora 3D	34
2.2.2. Secador de filamento	35
2.2.3. Horno de convección forzada	37
2.2.4. Balanza analítica	37
2.2.5. Calibrador Mitutoyo digimatic ABSOLUTE	38
2.3. Procedimiento experimental	38
2.3.1. Diseño experimental	39

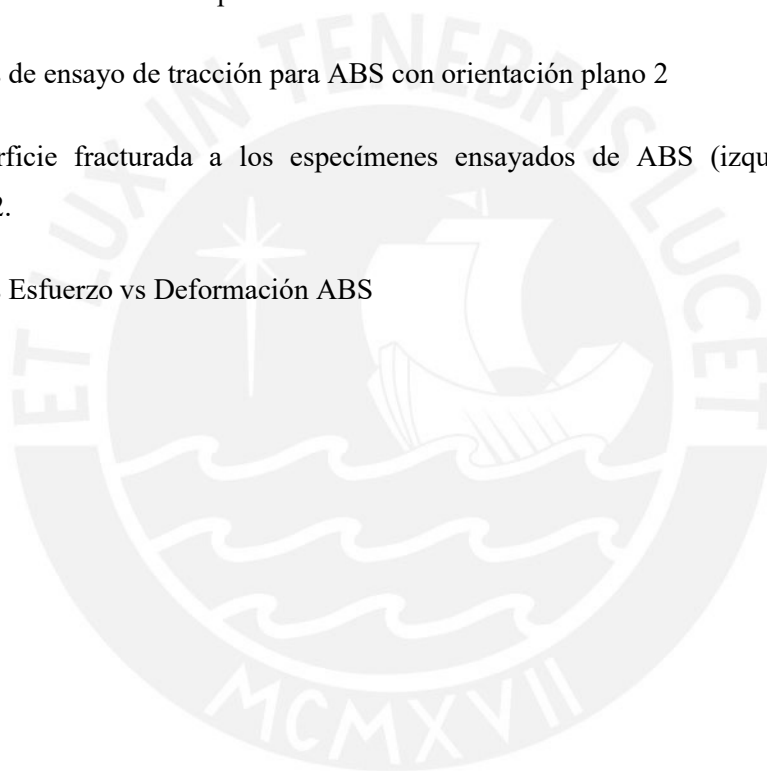
2.3.2. Caracterización de filamentos	43
2.3.3. Fabricación de probetas	46
2.3.4. Ensayo de tracción de especímenes	50
Capítulo 3: Resultados y discusión	52
3.1. Caracterización del filamento	53
3.1.1. Ensayo de tracción	53
3.1.2. Análisis térmico	56
3.1.3. Índice de fluidez	59
3.2. Ensayo de tracción de especímenes	63
Conclusiones	71
Observaciones y recomendaciones	75
Bibliografía	77
Anexo A Resultados de los ensayos	84
Anexo B Código de Matlab empleado	97
Anexo C Materiales	103

Índice de figuras

Figura 1. Componentes del proceso de inyección [Svečko, 2013].	8
Figura 2. Diagrama causa/efecto en el proceso de inyección [Bharti, 2010].	9
Figura 3. Proceso de moldeo rotacional [Nugent, 2016]	10
Figura 4. Proceso de moldeo por compresión [Tarata, 2011].	11
Figura 5. Interfaz de software Cura [All3DP, 2020].	12
Figura 6. Costo en función de la cantidad de unidades de manufactura aditiva y tradicional [Handal, 2017].	14
Figura 7. Categorías y procesos de manufactura aditiva [Wong, 2012].	15
Figura 8. Propiedades mecánicas para cada proceso de fabricación [Wong, 2012]	16
Figura 9: Proceso de fabricación SLA [Wong, 2012].	17
Figura 10. Dentadura impresa en SLA [Barone, 2019]	19
Figura 11. Proceso de extrusión del filamento [Bellini, 2003].	20
Figura 12. Representación del proceso de impresión mediante FDM [Tuan,2018].	20
Figura 13. Comparaciones materiales FFF [Matmach, 2020].	21
Figura 14. Comparación tecnología Jam-Free™ [Polymaker, 2020].	22
Figura 15. Parámetros de proceso de fabricación por filamento fundido (FFF) [Popescu, 2018].	23
Figura 16. Aplicación de la carga perpendicular y paralela respecto a las capas de material depositado [3d hubs, 2019].	24
Figura 17. Unión entre los hilos del filamento entre el proceso de fabricación por deposición de filamento fundido [Martí, 2018].	25
Figura 18. Error de calibración [Pick 3D Printer 2020].	27
Figura 19. Incremento del uso de los materiales compuestos en el tiempo [Acosta, 2020].	28

Figura 20. Distribución de carga en un refuerzo de fibra [Hasan, 2020].	29
Figura 21. Ensayos de estabilidad térmica para filamentos de ABS y ABS/CF [Kazi & Billah, 2019].	31
Figura 22. Filamentos de ABS, PA, ABS/CF y PA/CF de la marca 3DXTECH [3DXTECH, 2020].	33
Figura 23. Impresora Ultimaker® 3 Extend [Ultimaker, 2020].	35
Figura 24. Secador de filamento PrintDry [PrintDry® 2020].	36
Figura 25. Horno de convección forzada (lado derecho) y balanza analítica (lado izquierdo).	37
Figura 26. Mitutoyo 500-193 [Mitutoyo, 2020].	38
Figura 27. Cubo general de esfuerzos [Adams, 1974].	40
Figura 28. Orientaciones de impresión [Domingo, 2015].	42
Figura 29. Equipo Zwick/Roell Z0	44
Figura 30. Equipo para TGA y DSC NETZSCH STA 449 F1 Jupiter®	45
Figura 31. Medidor de índice de fluidez Zwick/Roell Cflow Extrusion Plastometer	46
Figura 32. Geometría probeta ISO 527-2	46
Figura 33. Interfaz software Ultimaker Cura ®	48
Figura 34. Proceso de impresión de probetas ABS con soporte de impresión	48
Figura 35. error en la fabricación de la probeta de PA/CF debido a soportes insuficientes	49
Figura 36. Probeta fabricada de PA plano 3 (Vertical)	49
Figura 37. Máquina de ensayo de tracción universal Zwick/Roell Z050	50
Figura 38. Curvas esfuerzo-deformación de una muestra representativa de ABS y ABS/CF [Cam, 2021].	54
Figura 39. Curvas esfuerzo-deformación de una muestra representativa de Nylon y Nylon/CF [Cam, 2021].	55

Figura 40. Curvas de análisis térmico para ABS [Cam, 2021].	56
Figura 41. Curvas de análisis térmico para ABS/CF [Cam, 2021].	57
Figura 42. Curvas de análisis térmico para PA [Cam, 2021].	57
Figura 43. Curvas de análisis térmico para PA/CF [Cam, 2021].	58
Figura 44. Gráfico de ensayo MFI para ABS y ABS/CF [Cam, 2021].	61
Figura 45. Gráfico de ensayo MFI para PA y PA/CF [Cam, 2021].	61
Figura 46. Cura probeta orientación plano 2	64
Figura 47. Curvas de ensayo de tracción para ABS con orientación plano 2	65
Figura 48. Superficie fracturada a los especímenes ensayados de ABS (izquierda) y PA (derecha) Plano 2.	67
Figura 49. Curvas Esfuerzo vs Deformación ABS	68



Índice de tablas

Tabla 1. Ventajas de la manufactura aditiva respecto a la tradicional [Modificado, Attaran, 2017].	14
Tabla 2. Propiedades mecánicas especímenes FFF y SLA [Szykiedans, 2020]	18
Tabla 3. Influencia de la orientación de impresión para cada proceso de manufactura aditiva [3D hubs, 2019].	24
Tabla 4. Módulo elástico de especímenes fabricados con PLA y PLA/CF [Ferreira, 2016].	30
Tabla 5. Propiedades de los filamentos empleados [3DXTECH, 2020].	34
Tabla 6. Especificaciones técnicas Ultimaker 3 Extended [Ultimaker, 2020].	35
Tabla 7. Parámetros de secado de filamento [MatterHackers 2020].	36
Tabla 8. Especificaciones técnicas Mitutoyo 500-193 [Mitutoyo, 2020].	38
Tabla 9. Parámetros óptimos de impresión [Cam, 2021].	39
Tabla 10. Probetas a fabricar para cada material	43
Tabla 11. Medidas geométricas probeta ISO 527-2	47
Tabla 12. Propiedades mecánicas del filamento de ABS [Cam, 2021].	54
Tabla 13. Propiedades mecánicas del filamento de ABS/CF [Cam, 2021].	54
Tabla 14. Propiedades mecánicas del filamento de PA [Cam, 2021].	55
Tabla 15. Propiedades del filamento de PA/CF [Cam, 2021].	55
Tabla 16. Resultados de análisis térmico(DSG y TGA) [Cam, 2021].	58
Tabla 17. Temperaturas de impresión para cada material	59
Tabla 18. Resultados obtenidos del ensayo de índice de fluidez para ABS y ABS/CF [Cam, 2021]	60
Tabla 19. Resultados obtenidos del ensayo de índice de fluidez para PA y PA/CF [Cam, 2021]	60

Tabla 20. Propiedades mecánicas de los filamentos 3DXTECH de ABS,PA, ABS/CF y PA/CF [Cam, 2021].	62
Tabla 21. Propiedades térmicas de los filamentos 3DXTECH de ABS,PA, ABS/CF y PA/CF [Cam, 2021].	62
Tabla 22. Módulos elásticos promedios de las probetas ensayadas	65
Tabla 23. Coeficientes de Poisson de los 4 materiales	69



Introducción

En los últimos años, el uso de la tecnología de manufactura aditiva (*Additive Manufacturing*) se ha incrementado en distintas aplicaciones como: ingeniería, medicina, arte, etc. Esto se debe a que una de sus principales ventajas es la versatilidad de fabricación de piezas en comparación a los métodos tradicionales ya que no se requiere de la fabricación de un molde para crear una pieza. Por ello, esta tecnología es ampliamente usada en prototipos y piezas personalizadas como prótesis médicas. Inicialmente, la manufactura aditiva se limitaba a emplear termoplásticos como material de aporte debido a su facilidad de uso. Sin embargo, en la última década se han empleado metales y cerámicos con excelentes propiedades mecánicas similares a los otros procesos. Por ejemplo, la empresa XtreeE logró fabricar un muro de geometría compleja optimizado para la insolación térmica con concreto de alta calidad en 12 horas empleando un robot con 6 ejes de libertad [Paolini, 2019]. El empleo de nuevos materiales en los procesos de manufactura aditiva significa nuevas posibilidades en la industria de reemplazar técnicas tradicionales por procesos más versátiles de fabricación y solucionar problemas en un menor tiempo. No obstante, los equipos que emplean materiales distintos al plástico en la manufactura aditiva aún son de un costo elevado y poca rentabilidad en comparación a otros métodos. Por ejemplo, el equipo más asequible del mercado que emplea metal como material de aporte tiene un valor de USD \$65,000 con un volumen de trabajo de 40 cm³ [Aurora Labs, 2020].

En la manufactura aditiva existen distintos métodos de fabricación que se dividen según del material de aporte: sólido, líquido o en polvo. El método más empleado actualmente es el de fabricación por filamento fundido (FFF) ya que es un proceso más sencillo que los demás. Básicamente, Este proceso consiste en calentar un polímero en forma de filamento y depositarlo mediante una boquilla de sección reducida formando el objeto final. Los equipos

empleados para FFF se denominan comercialmente impresoras 3D y en los últimos años sus costos han disminuido abismalmente hasta conseguir equipos desde USD \$ 200 [Crealty, 2020].

La implementación de estas tecnologías ha significado un gran avance en la medicina moderna. Anteriormente, la radiología en la medicina se encontraba limitada a la visualización de imágenes 3D de los pacientes en imágenes 2D reproducidas en pantallas. Sin embargo, el empleo de tecnologías como el escaneo 3D e impresión 3D ha permitido producir objetos tridimensionales en base a la información radiológica obtenida del paciente. Este proceso consiste en 3 partes principales: En primer lugar, se adquiere la información gráfica del miembro a reproducir el cual debe realizarse con una excelente resolución (400 – 600 micrones) y una buena calidad de contraste. Posteriormente, esta información es procesada por softwares CAD que crean un enmallado 3D del objeto a reproducir con excelente acabado. Por último, se realiza un prototipado rápido de la imagen empleando manufactura aditiva para obtener la reproducción final del miembro [Rengier, 2010].

Como se mencionó anteriormente, la impresión 3D se encuentra limitado al uso de termoplásticos debido a su rentabilidad. Entre los materiales más usados en impresión 3D se encuentran el ácido poliláctico (PLA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), Policarbonato (PC) y Poliamida (PA). Estos termoplásticos tienen menor resistencia que los aceros o cerámicos, pero en los últimos años se han empleado nuevos materiales reforzados con fibras cortas de carbono o fibra de vidrio con el fin de mejorar la durabilidad de las piezas fabricadas. La combinación de las fibras de alta rigidez con la matriz de plástico permite mejorar la rigidez final y aumenta la precisión dimensional de la pieza resultante [Kumar, 2010].

En la actualidad, la investigación de nuevos materiales compuestos ha permitido emplear con satisfacción la impresión 3D en la fabricación de prótesis personalizadas para personas con discapacidad parcial o total de algún miembro. Por ejemplo, en el año 2019, 3D Hubs fabricó

una prótesis de miembro inferior empleando un compuesto de fibra de carbono mediante el moldeo por inyección e impresión 3D. La manufactura aditiva se empleó en piezas que mediante mecanizado hubieran sido imposibles de fabricar, pero mediante impresión 3D solo necesitó pocas horas para ser fabricada. [2019, 3D Hubs]. No obstante, la información referente al comportamiento de algunos materiales compuestos de impresión 3D frente a la aplicación de cargas en distintas direcciones aún es insuficiente para su aplicación efectiva en esta área.

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar mediante ensayos de tracción el comportamiento anisotrópico de especímenes fabricados mediante manufactura aditiva, específicamente por el proceso denominado Fabricación por Filamento Fundido (FFF), a partir de filamentos de ABS, PA y estos mismos reforzados con fibras de carbono: ABS/CF y PA/CF.

Para alcanzar este objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Definir el diseño experimental para la caracterización de especímenes de ABS, PA, ABS/CF y PA/CF fabricados por filamento fundido (FFF) para distintas orientaciones de impresión.
- Seleccionar los principales parámetros y sus valores óptimos para la fabricación de probetas de PA, ABS; ABS/CF y PA/CF.
- Fabricar probetas de PA, ABS, ABS/CF y PA/CF según el diseño experimental.
- Realizar ensayos de tracción según el diseño experimental para determinar las constantes elásticas de los materiales

En resumen, se busca determinar las constantes elásticas del PA, ABS y sus reforzados fabricados mediante impresión 3D que rigen el comportamiento del material ante la aplicación de cargas en cualquier dirección.

El presente trabajo se ha estructurado de la siguiente manera:

Capítulo 1. En este capítulo se presenta una explicación referente a los procesos de fabricación tradicionales para plásticos. Específicamente, el método más usado en la industria actualmente: Moldeo por inyección. Posterior a ello, se presentan los procesos más comunes de manufactura aditiva divididos en 3 partes en base al estado del material aportante y con un énfasis en las ventajas y desventajas de la tecnología de fabricación por filamento fundido (FFF) en comparación al modelo por inyección. Después, se realiza una breve explicación de los principales parámetros de impresión y su influencia en las propiedades mecánicas y acabado superficial de los especímenes.

Capítulo 2. En este capítulo tiene como objetivo mostrar la metodología experimental planteada para cumplir con los objetivos mencionados anteriormente. En primer lugar, se presentan los materiales y equipos empleados para la fabricación de los especímenes. Posteriormente, se realiza una breve explicación referente a los parámetros óptimos elegidos para la fabricación de los especímenes mediante manufactura aditiva. Después, se desarrolla el fundamento científico en base a la teoría de materiales compuestos y estado tridimensional de esfuerzos para determinar las 6 orientaciones de impresión que nos permitirán obtener las 9 constantes elásticas que rigen el comportamiento anisotrópico de los especímenes. Por último, se explica el proceso de fabricación de los especímenes, geometría de los especímenes según la norma elegida y los ensayos termogravimétricos y de tracción que se realizarán a los especímenes

Capítulo 3. En esta sección se muestran los resultados obtenidos de los ensayos termogravimétricos y de tracción a los filamentos de ABS, PA, PA/CF y ABS/CF. Posterior a ello, se presentan los resultados de los ensayos de tracción realizados a los especímenes impresos mediante el proceso de FFF en las 6 direcciones definidas en el capítulo 2. Además, se realiza una breve explicación del procesamiento realizado a las curvas obtenidas de los

ensayados para obtener los módulos elásticos en cada dirección. Por último, se presentan los resultados obtenidos y el procesamiento de datos realizado para obtener los coeficientes de Poisson.

Finalmente, el presente trabajo presentará las principales conclusiones obtenidas en análisis de los diversos ensayos realizados a los especímenes de ABS, PA, PA/CF y ABS/CF. Además, se presentará la bibliografía consultada para el desarrollo del presente trabajo.



Capítulo 1: Fundamentos teóricos

En esta sección se realiza una breve introducción a las técnicas de fabricación tradicionales para plásticos y proceso de manufactura aditiva haciendo un énfasis en los procesos de modelo por inyección y FFF. Esta información permitirá una adecuada comparación entre ambas tecnologías que actualmente son las más empleadas para la fabricación de piezas finales de plástico. Posterior a ello, se explica los parámetros más importantes en el proceso de FFF resaltando la influencia de estos en el acabado superficial y comportamiento mecánico del material.

1.1. Procesos de fabricación tradicionales de polímeros

Actualmente, existen varios métodos de fabricación en serie empleados en la industria, pero los más comunes son: moldeo por inyección, extrusión, rotacional y compresión. Estos 4 métodos consisten básicamente en el proceso de calentar el termoplástico hasta el punto de transición vítrea y aplicar presión ya sea directamente en el plástico o en el molde. Este proceso permite la fabricación de geometrías complejas las cuales tardaría mucho tiempo en realizarse mediante otros procesos. Sin embargo, presentan una desventaja crucial ya que se requiere de un nuevo molde para fabricar un nuevo componente lo cual aumenta los costos de producción. Además, para que este método sea rentable se requiere una producción de una gran cantidad de objetos (producción en serie)

1.1.1. Proceso de moldeo por inyección

El método más usado en distintos sectores de la industria es el de inyección. Este proceso se inventó en 1920 y se basó en la técnica empleada en la fundición de metales aplicando presión para fabricar las piezas. Como se observa en la **Figura 1**, este proceso inicia con la adición de un termoplástico en forma de polvo o granza y se calienta mientras atraviesa el tornillo sin fin hasta que se encuentre estado viscoso que permita su procesamiento. Posterior a ello, se introduce a una alta presión a través de una boquilla de diámetro pequeño a un molde cerrado en el cual el polímero se enfría hasta solidificar completamente. [Crawford, 1981].

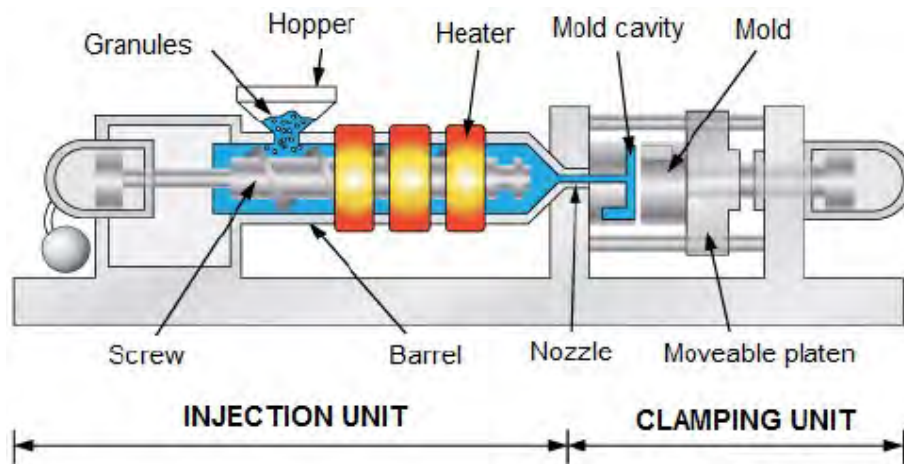


Figura 1. Componentes del proceso de inyección [Svečko, 2013].

El proceso de fabricación por inyección se ha extendido al uso de materiales compuestos para la fabricación de diversos productos, en especial carcasas. El material más empleado actualmente para esta aplicación es una matriz de poliamida con refuerzo de fibra de vidrio la cual aporta un incremento de resistencia en la pieza final. Aunque es el método más empleado para la fabricación de distintas piezas plásticas en la industria, el modelo por inyección tiene una serie de elementos que desencadenan imperfecciones en la pieza final. Estos factores se pueden clasificar en 4 distintas categorías: diseño de la pieza, diseño del molde, rendimiento del equipo de inyección y condiciones del proceso. Las investigaciones realizadas en esta área se han enfocado en la optimización del último punto mencionado debido a que es el parámetro que depende, en su mayoría, del termoplástico empleado. En la **Figura 2** se observa los distintos factores que influyen en los defectos de las piezas fabricadas por el moldeo de inyección clasificados según su origen [Kumar, 2010].

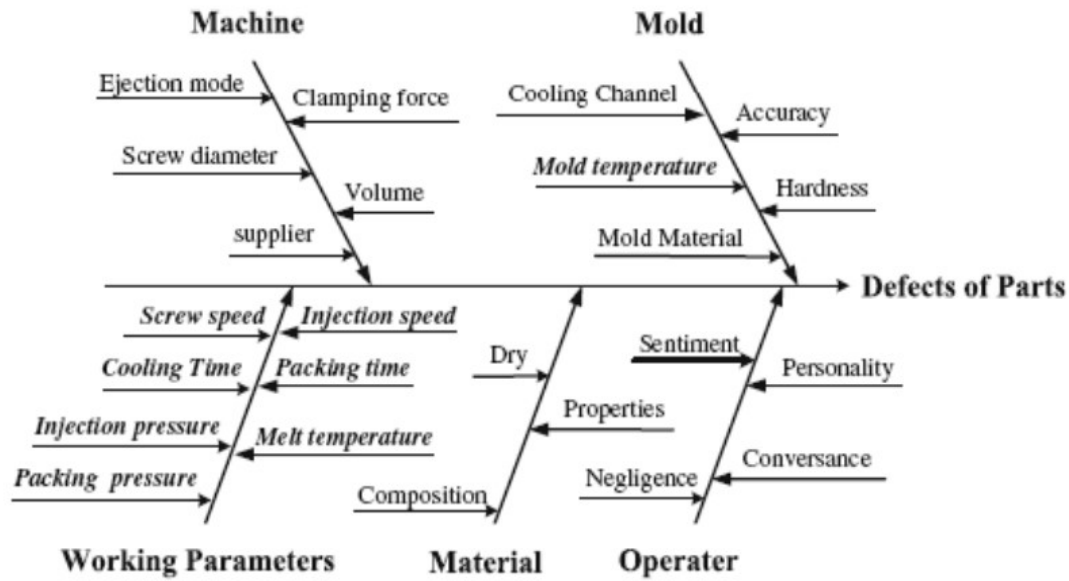


Figura 2. Diagrama causa/efecto en el proceso de inyección [Kumar, 2010].

1.1.2. Fabricación por moldeo rotacional

La fabricación por moldeo rotacional (*RM: Rotational Molding*) es una técnica de procesamiento de polímeros que en 4 pasos. Como se observa en la **Figura 3**, este proceso inicia con la adición del polímero (polvo, pellets o líquido viscoso) en una de las dos particiones del molde. El segundo paso consiste en cerrar el molde e introducir en un horno con la temperatura (200-400°C) controlada la cual depende del material que se vaya a emplear. Posteriormente, el molde rota en dos ejes perpendiculares entre sí a bajas revoluciones controladas. Una vez que el material se haya fundido y sinterizado formando el producto final, se retira el molde enfriándolo mediante agua pulverizada o aire. Finalmente, se retira la pieza del molde y se inicia otro ciclo [Ezzahra, 2015].

Este tipo de fabricación tiene diversas ventajas, entre ellas se encuentra la capacidad de fabricar piezas con geometrías complejas de distintos tamaños, el costo del molde no es elevado y que las piezas fabricadas no presentan tensiones residuales del proceso porque no se aplica una presión significativa [Ogila, 2017]. El moldeo rotacional es ampliamente usado en industrias

que requieran de la fabricación de tanques de almacenamiento como: agricultura, automotriz, eléctrica, marítima, médica, etc.

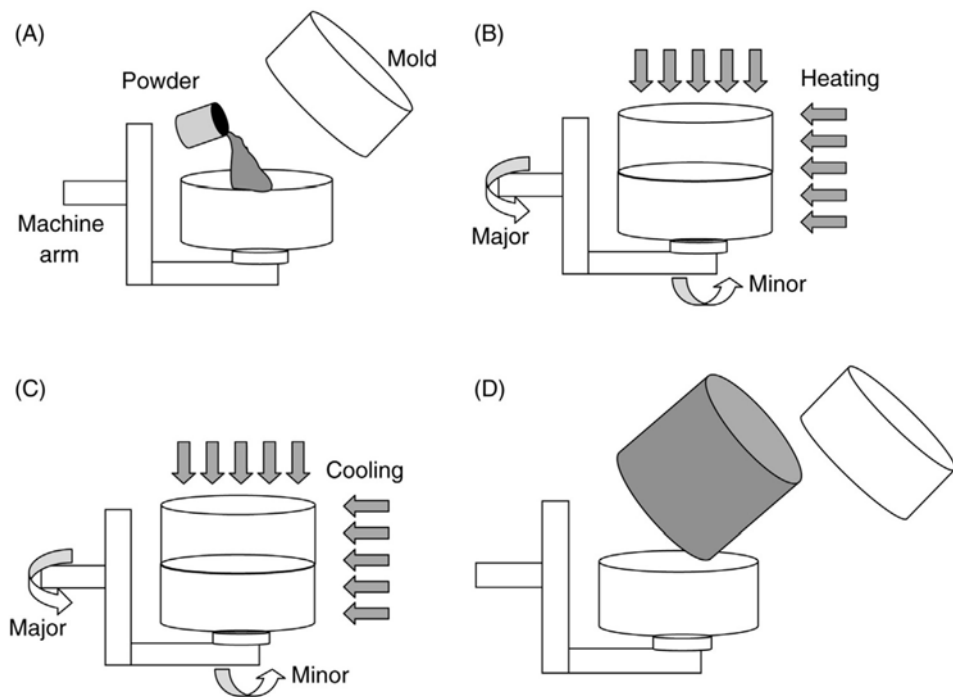


Figura 3. Proceso de moldeo rotacional [Nugent, 2016]

1.1.3. Modelo por compresión

El moldeo por compresión es una de las primeras técnicas en emplearse para la fabricación de polímeros. Este proceso consiste en dos moldes: macho y hembra (**Figura 4**). En el molde hembra se agrega el polímero en forma de pellets, polvo o líquido viscoso. Posterior a ello, se aplica calor durante un tiempo determinado el cual depende del material que se va a emplear. Una vez que el calentamiento haya culminado se aplica presión durante un cierto tiempo en el molde macho para dar la forma final de la pieza. Una vez terminado el proceso se procede a enfriar el molde y a retirar la pieza final del molde. En su mayoría, se aplica a los termoestables debido al proceso de calentamiento el cual permite curar a la resina mediante un entrelazado entre las cadenas poliméricas, pero también es un proceso que se puede aplicar a termoplásticos [Tarata, 2011].

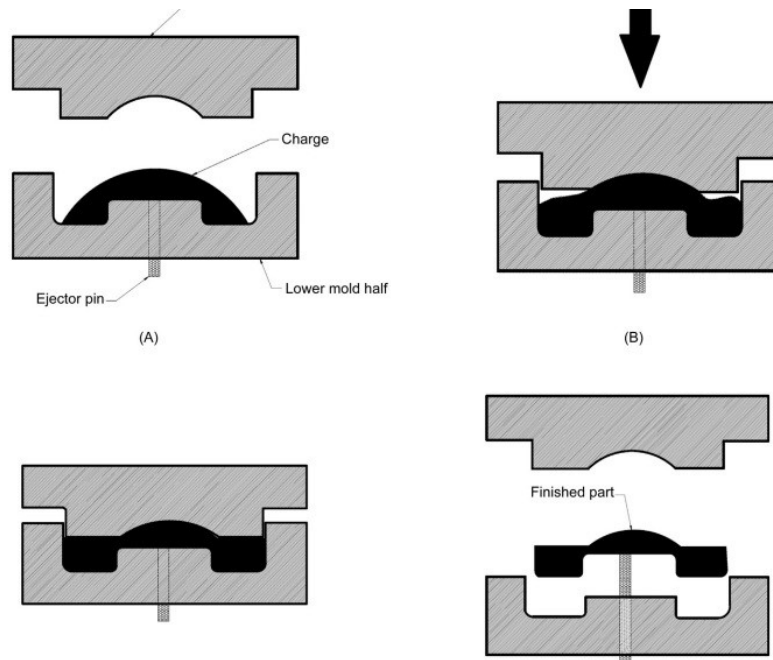


Figura 4. Proceso de moldeo por compresión [Tarata, 2011].

Las ventajas de este tipo de manufactura son el costo y la facilidad de aplicación en la mayoría de productos a fabricar. Esto se debe a que para emplear este método solo se requiere del molde, una prensa hidráulica y un horno para calentar el molde. Es por esta razón que la fabricación de moldeo por compresión es ampliamente usada para la fabricación de materiales compuestos por una matriz polimérica reforzados con fibras cortas. Por ejemplo, Sreekumar realizó un estudio de las propiedades mecánicas de un compuesto fabricado con una matriz de polyester con refuerzo de fibras naturales de sisal en el cual se eligió el moldeo por compresión debido a que este método permite controlar fácilmente variables como la longitud de fibras, porcentaje de fibras y carga en el molde. En este estudio se comprobó que para un 30% fracción volumétrica de fibras, una longitud de fibra de 30 mm presenta las mejores propiedades mecánicas del material debido a que una mayor longitud de fibras la transferencia de carga de las fibras a la matriz no se realiza de forma efectiva ya que aparece el efecto del doblado de las fibras y rizado [Sreekumar, 2009].

1.2. Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva (*AM. Additive manufacturing*) o también llamado impresión 3D se basa, a diferencia de los procesos tradicionales, en la adición de material para fabricar el objeto final [Singh, 2017]. Este tipo de manufactura permite crear objetos de compleja geometría y un amplio rango de estructuras de una manera rápida la cual se realiza mediante la adición de material en generalmente capa por capa [Bellini, 2003]. Para la fabricación de los objetos, el proceso toma la información necesaria de un diseño tridimensional computacional (CAD) y, posteriormente, convierte este archivo a uno de estereolitografía (STL). En este proceso, el diseño CAD se aproxima a una matriz triangular y es seccionado conteniendo la información geométrica necesaria de cada capa que será impresa. Posteriormente, se emplea un software propio de cada equipo de manufactura aditiva en el cual se ingresan los parámetros necesarios para la fabricación y este programa convierte esta información en un archivo G-code el cual será analizado por la para fabricar la pieza final. En la **Figura 5** se puede observar el software de conversión de STL a G-code denominado “*Ultimaker Cura*” donde se incluyen los parámetros necesarios para su fabricación en la impresora 3D.

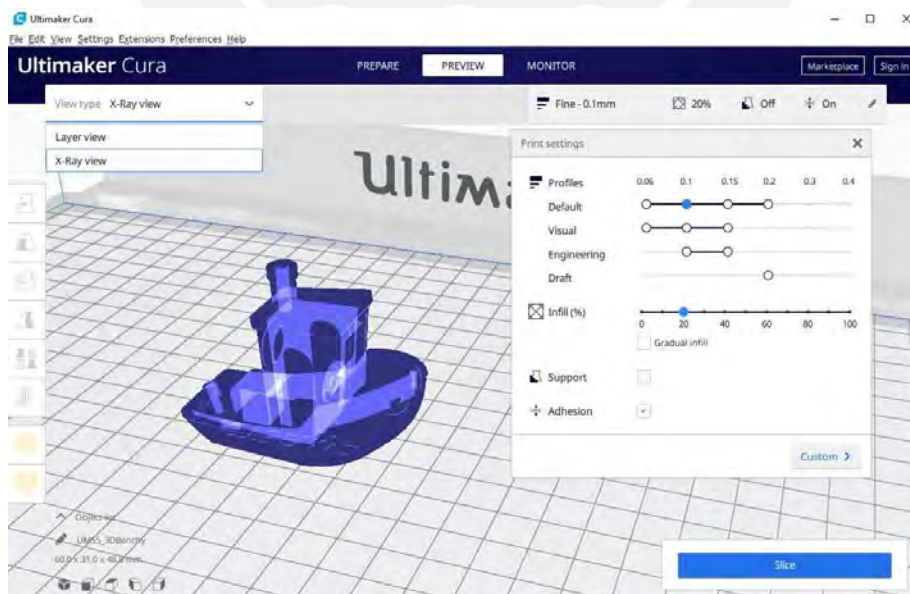


Figura 5. Interfaz de software Cura [All3DP, 2020].

La manufactura aditiva presenta una serie de ventajas en distintas áreas respecto a la manufactura tradicional como se muestra en la **Tabla 1**. Entre las más importantes se puede resaltar que este tipo de manufactura permite fabricar prototipos en un menor tiempo, empleando una menor cantidad de recursos y permitiendo su fácil modificación en comparación a la tradicional. En segundo lugar, permite la solución de remplazo de piezas plásticas en equipos en un corto tiempo y disminuyendo los costos de transporte y almacenamiento de esta pieza [Attaran, 2017]. Sin embargo, aún existen algunas características de la manufactura aditiva que no permiten su masificación en todas las industrias como la relación costo/beneficio en equipos de manufactura aditiva de grandes dimensiones. Comúnmente en equipos de metales y plásticos, el tamaño máximo de los equipos de manufactura aditiva más común es 30x30x30cm Existen equipos con la capacidad de 1x1x1m, pero tienen un costo es muy elevado debido a la cantidad de elementos que requiere para mantener su estabilidad durante la fabricación. Otra característica importante a considerar es la brecha que existe entre la manufactura tradicional y aditiva cuando se procede a producir una pieza en masa debido a los mayores costos y tiempos de fabricación que requiere la manufactura aditiva. Por ejemplo, para fabricar una pieza es más factible emplear la manufactura aditiva, pero a medida que aumenta la cantidad de piezas a producir los costos por unidad del método tradicional se vuelven menores [Handal 2017]. En la **Figura 6** se observa el comportamiento del costo de ambos métodos en función a la cantidad de piezas a fabricar.

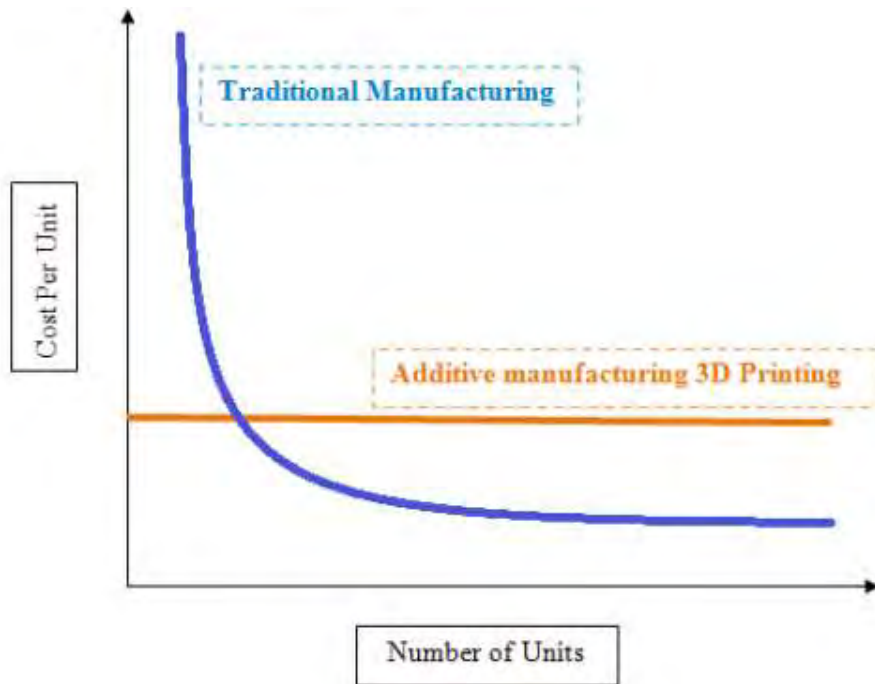


Figura 6. Costo en función de la cantidad de unidades de manufactura aditiva y tradicional [Handal, 2017].

Tabla 1. Ventajas de la manufactura aditiva respecto a la tradicional [Modificado, Attaran, 2017].

Áreas de aplicación	Ventajas
Prototipado rápido	<ul style="list-style-type: none"> • Acelera el lanzamiento del producto reduciendo el tiempo del prototipo • Reduce los costos de investigación del producto • Aumenta la competitividad de las empresas en el sector de innovación
Producción de piezas de repuesto	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce el tiempo de reparación • Reduce los recursos invertidos a la reparación • Elimina el costo de almacenes
Manufactura en bajos volúmenes de producción	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce el costo de producción de bajos volúmenes • Elimina el costo de inversión en herramientas
Piezas personalizadas únicas	<ul style="list-style-type: none"> • Permite modificar la pieza sin que signifique un gran costo • Rápida producción de piezas personalizadas • Elimina el costo por el rediseño del objeto
Piezas muy complejas de fabricar	<ul style="list-style-type: none"> • Permite fabricar piezas de alta complejidad por un bajo costo

Fabricación de máquinas herramienta	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce el costo de personal • Elimina el costo de almacenes
Manufactura rápida	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricación directa de piezas finales • Producción no costosa para un pequeño número de piezas
Manufactura de componentes	<ul style="list-style-type: none"> • Permite la modificación masiva a bajo costo • Mejora la calidad • Reduce la cadena de suministro • Reduce la merma
Piezas de repuesto personalizadas con alta demanda	<ul style="list-style-type: none"> • Elimina los costos de transporte y almacenaje • Reduce el costo de tiempos muertos • Reduce los costos de reparación • Requiere de un menor inventario
Reparación rápida	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce significativamente el costo de reparación • Permite actualizar los diseños de las piezas de reparación

Como se muestra en la **Figura 7**, la manufactura aditiva se puede clasificar en 3 secciones en función del estado del material de aporte: base líquida, base sólida o en base particulada [Wong, 2012]. En el grupo de base líquida se puede observar los procesos fundido y polimerización. En base de polvo se observa los procesos de fundido y de unión. Algunos de estos procesos como Prometal, SLS o LENS pueden emplear como material de aporte a los metales. Los demás procesos como FDM y SL utilizan termoplásticos como PLA o ABS para la fabricación de objetos.

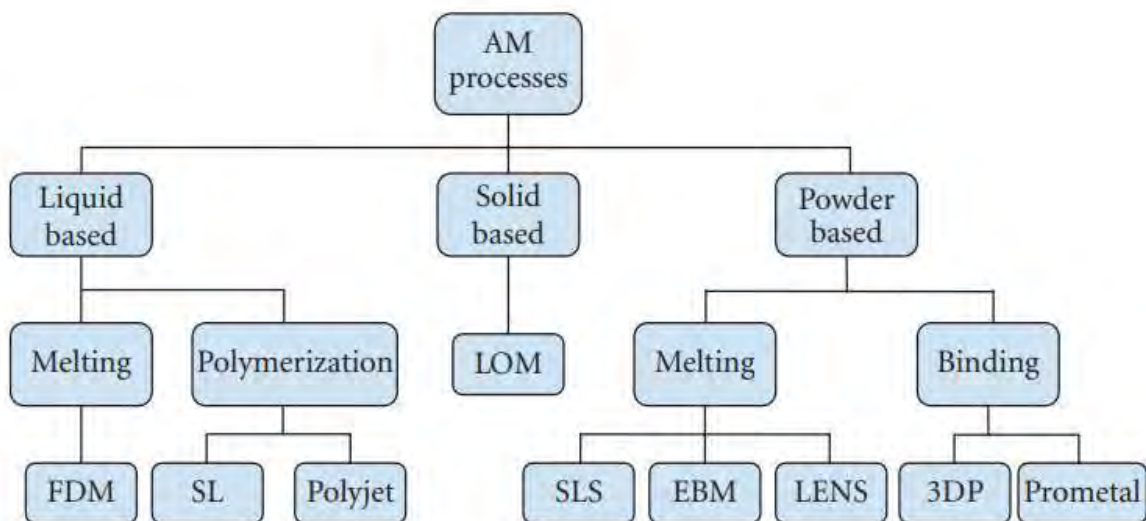


Figura 7. Categorías y procesos de manufactura aditiva [Wong, 2012].

Otra diferencia entre los distintos procesos de manufactura aditiva es las propiedades mecánicas que se logran obtener en distinta orientación de fabricación. Esta diferencia se aprecia en el siguiente gráfico comparativo. En la **Figura 8**, se observa que en una orientación horizontal del proceso de manufactura de objeto laminado (*LOM: Laminate object manufacturing*) presenta el mayor valor. Sin embargo, en la otra orientación se aprecia una mayor diferencia. Este efecto es menor en el proceso de fabricación por filamento fundido (FFF o FDM) con una reducción de aproximadamente el 40% en la resistencia de la pieza fabricada.

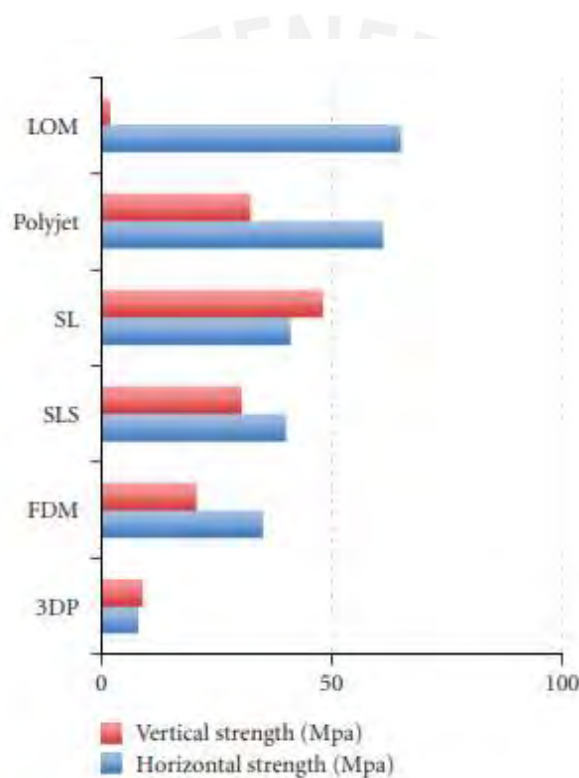


Figura 8. Propiedades mecánicas para cada proceso de fabricación [Wong, 2012].

En la actualidad, el proceso de FFF (*Fused filament fabrication*) y SLA (*Stereolithography*) son los más empleados en distintas áreas como medicina e ingeniería. Este fenómeno se debe a la ventaja de que estos procesos son fáciles de operar y a los bajos costos de las máquinas que emplean estos métodos. Sin embargo, la aplicación del proceso de SLA es limitada a algunos campos debido a que las piezas fabricadas son más frágiles, pero presentan un mejor acabado superficial que el método de FFF.

1.2.1. Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía fue descubierta en 1986 por 3D Systems Inc. y es uno de los primeros métodos existentes de la manufactura aditiva. Emplea como material de aporte una resina polimérica líquida la cual se solidifica mediante el uso de una luz UV la cual inicia una reacción en cadena en el material formando una cadena polimérica. En el proceso de SLA el proceso de fabricación se realiza punto por punto y la resina restante se queda en la parte inferior del molde para ser reutilizada (**Figura 9**). Una de las ventajas de este tipo de manufactura respecto a otras es el excelente acabado superficial que posee (una resolución muy fina de 10 micras) [Wong, 2012].

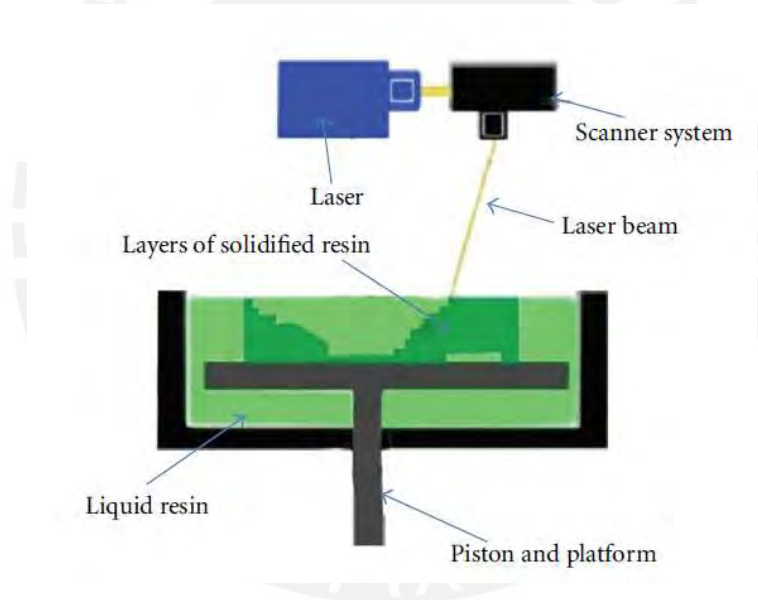


Figura 9: Proceso de fabricación SLA [Wong, 2012].

Los equipos de fabricación de SLA se denominan comercialmente “impresoras de resina” debido al material de aporte y suelen tener un mayor costo en comparación a los equipos de FFF. Por ejemplo, un equipo XYZ Printing Nobel 1.0 tiene un costo aproximado de USD \$1000 y una impresora XYZ Printing Da Vinci 1.0 Pro tiene un costo aproximado de USD \$900 [XYZ Printing, 2020]. Sin embargo, el volumen de impresión de la impresora de resina es de 128x128x200mm y el equipo de FFF tiene un volumen de 200x200x200. Una desventaja

adicional del proceso de fabricación de SLA son las bajas propiedades mecánicas de las piezas finales. Hubo un estudio realizado en 2015 [Szykiedans, 2020], en el cual se comparó las propiedades mecánicas de objetos fabricados mediante FFF y SLA de bajo costo, se determinó que el espécimen fabricado mediante SLA posee los menores valores de módulo elástico y resistencia a la tracción (**Tabla 2**). En la cual, el método de SLA tiene un valor de módulo elástico de 246 MPa inferior a los demás.

Como se observa en la Figura 10, una de las aplicaciones más comunes del método de SLA es en la estomatología. Los doctores realizan un proceso de escaneo 3D bucal al paciente adquiriendo todos los datos geométricos necesarios de la dentadura del paciente y lo almacena en un archivo CAD. Posterior a ello, se reproduce el archivo 3D en una impresora SLA obteniendo así una réplica de excelente acabado con toda la información necesaria del paciente para analizar y tratar.

Tabla 2. Propiedades mecánicas especímenes FFF y SLA [Szykiedans, 2020].

Material Name, Company	Mean value of tensile modulus (MPa)	Experimental values of tensile modulus		Tensile modulus according to manufacturers data (MPa)
		minimum (MPa)	maximum (MPa)	
Z-ABS white, Zortrax; Flat printed	1125	1091	1142	565
Z-Glass, Zortrax; Flat printed	734	721	764	no data available
Z-Glass, Zortrax; Upright printed	1436	1378	1477	(Flexural Modulus 4.12 GPa)
Z-Ultrat, Zortrax; Flat printed	1348	1296	1413	1950
Nobel 1.0 Photopolymer Resin XYZ Printing	246	152	321	no data available



Figura 10. Dentadura impresa en SLA [Barone, 2019]

1.2.2. Fabricación por filamento fundido (FFF)

El proceso de FFF emplea un filamento de plástico como material de aporte el cual es empujado por dos rodillos accionados por un motor eléctrico que extruyen el filamento mediante una boquilla calentada a una temperatura característica del plástico a emplear. Esta boquilla va depositando el material capa por capa en la plataforma moviéndose en los ejes X-Y-Z y fabricando la pieza deseada [Bellini, 2003]. Existen dos tipos de extrusión en este tipo de fabricación: directa o *bowden*. El primero, consiste en colocar el motor extrusor muy cercano a la boquilla caliente y el segundo dispone el motor en la parte posterior del equipo alejado de la boquilla. La diferencia entre ambos es que el método de extrusión directa permite una mejor distribución de la fuerza de empuje en el filamento y, por lo tanto, es adecuado para filamentos frágiles. Sin embargo, esto significa una mayor vibración en equipo debido al peso adicional del motor en el cabezal. Las nuevas mejoras en el diseño y materiales de la extrusión *bowden* que permiten una mejor distribución del empuje han permitido que este tipo de extrusión sea la más usada actualmente en las impresoras 3D del mercado.

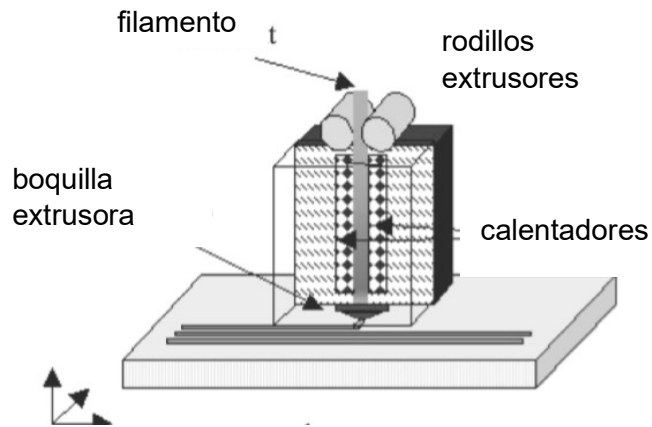


Figura 11. Proceso de extrusión del filamento [Bellini, 2003].

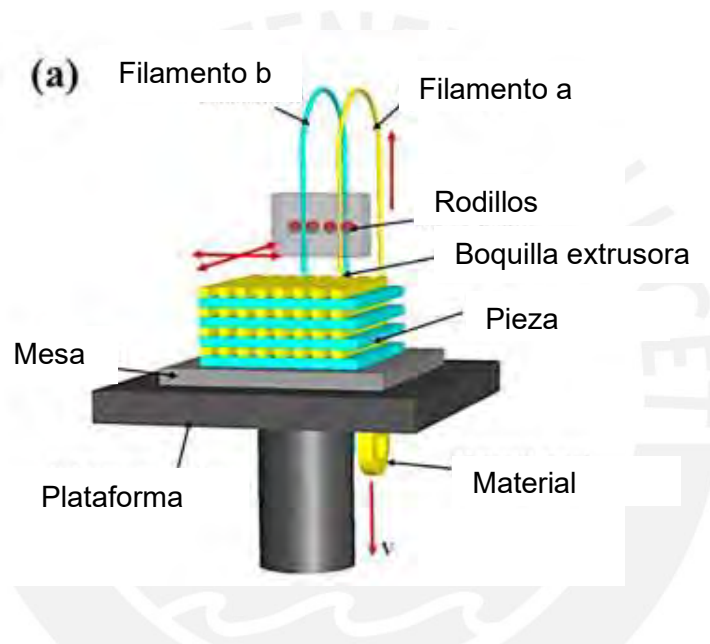


Figura 12. Representación del proceso de impresión mediante FDM [Ngo, 2018].

En la **Figura 11** se puede observar el esquema del proceso anteriormente mencionado y sus partes respectivas. Se puede observar que el diámetro inicial del filamento disminuye al momento de pasar por la boquilla debido al proceso de extrusión.

En la **Figura 12** se observa la fabricación de un objeto complejo el cual requiere dos filamentos. Uno de ellos es el filamento de soporte el cual puede el mismo material base o un material distinto. En algunos casos el material de soporte es PVA (Acetato de polivinilo) debido a que es soluble en agua y así se obtiene un mejor acabado superficial.

A) Materiales empleados en fabricación por filamento fundido

El material más empleado en este proceso es PLA (ácido poli láctico) debido a la facilidad de impresión que tiene respecto a otros materiales, pero posee menores propiedades mecánicas que otros plásticos. No obstante, materiales como PA (poliamida), ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno) y plásticos reforzados con fibras cortas de carbono o vidrio también son empleados en aplicaciones donde se requieran mejores propiedades mecánicas. En la **Figura 13** se observa un comparativo entre los materiales más empleados en FFF considerando la facilidad de impresión y sus propiedades mecánicas.

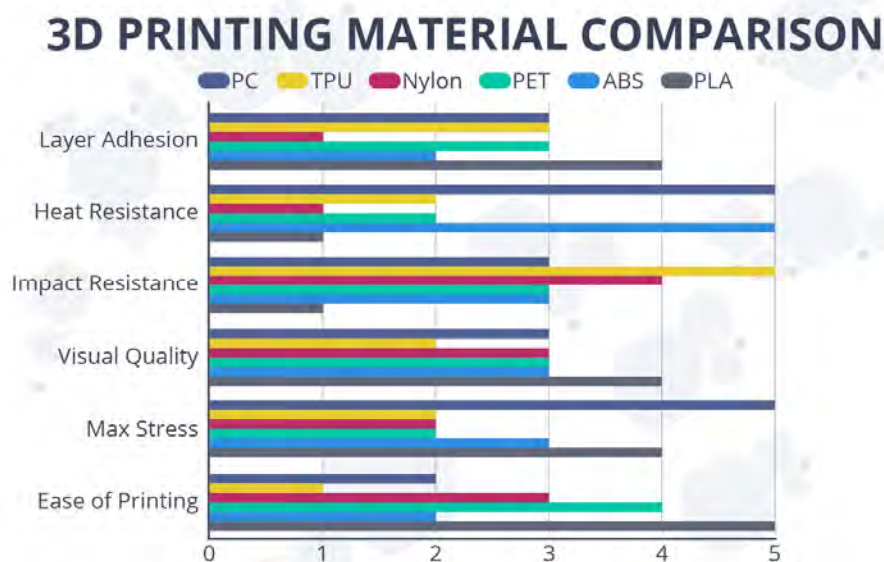


Figura 13. Comparaciones materiales FFF [Matmach, 2019].

El material de aporte en FFF viene en presentación de una bobina enrollada de filamento sólido de plástico de dos diámetros distintos: 2.85 mm y 1.75 mm. La presentación varía según el comerciante siendo los más comunes las bobinas de 500 g, 600 g y 1 kg. El precio de los insumos es inferior a otros procesos de manufactura aditiva y es proporcional a la calidad del producto. La calidad del material de aporte considera las tolerancias geométricas del filamento, estabilidad térmica y comportamiento del material cuando se encuentra en el proceso de extrusión. Por ejemplo, la marca de impresoras Anycubic ofrece filamentos de PLA con un precio de 25\$ con tolerancias dimensionales de 0.02 mm. Es decir, el diámetro del filamento

se encontrará dentro del rango de 1.73 y 1.77 mm. Sin embargo, durante el proceso de impresión, la elevada temperatura en la boquilla de la impresora calienta la parte superior del filamento (**Figura 14**) produciendo un atasco de este material en los conductos de la boquilla. En cambio, otra empresa Polymaker ofrece filamento de PLA denominado PolyLite con una tolerancia de 0.02 pero con una tecnología *Jam-Free™* que evita que la temperatura en el extremo del filamento caliente otra sección y obstruya la boquilla de la impresora.

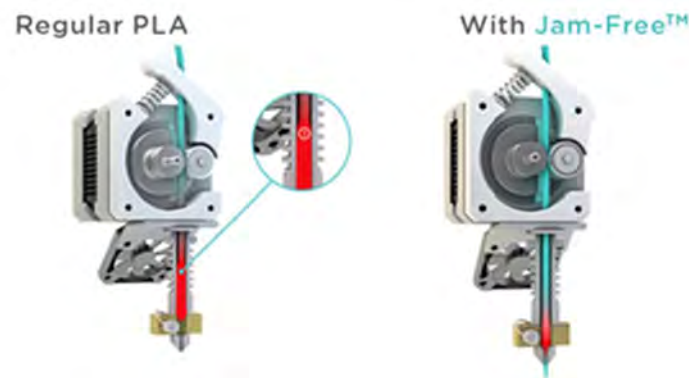


Figura 14. Comparación tecnología Jam-Free™ [Polymaker, 2020].

B) Parámetros de fabricación por filamento fundido

En el proceso de fabricación por filamento fundido (FFF) existen parámetros de los cuales algunos influyen de manera directa en el comportamiento mecánico del objeto a fabricar. Según **Popescu [2018]**, estos parámetros se pueden clasificar en 3 principales grupos:

- **Parámetros de extrusión:** altura de capa, diámetro de boquilla, flujo de deposición, velocidad de deposición, porcentaje de relleno, orientación del filamento, patrón de relleno, porcentaje de vacío en relleno, número de contornos y espesor de contorno.
- **Orientación de impresión:** normalmente los especímenes son orientados de manera vertical o horizontal. Sin embargo, se pueden utilizar otros ángulos de orientación.
- **Condiciones de temperatura:** Temperatura del ambiente, temperatura de extrusión y temperatura de la plataforma de impresión.

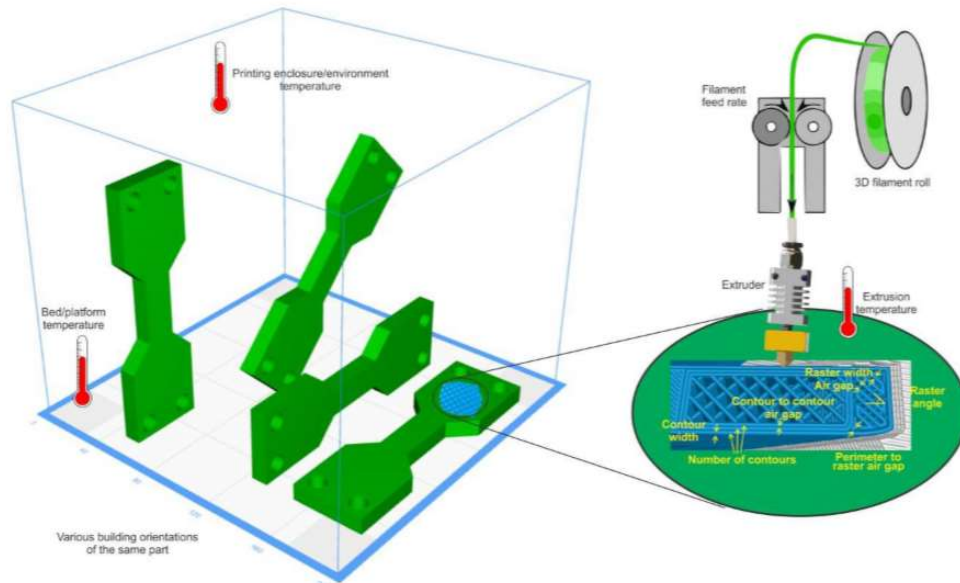


Figura 15. *Parámetros de proceso de fabricación por filamento fundido (FFF) [Popescu, 2018].*

La **Figura 15** se es una representación gráfica de la mayoría de los parámetros involucrados en el proceso de fabricación por filamento fundido. Se observa que algunas de estas propiedades están relacionadas entre sí. Por ejemplo, el ángulo de deposición y relleno determinan el porcentaje de vacío presente en el interior del patrón dibujado.

Cada parámetro anteriormente mencionado influye de distinta manera en el comportamiento mecánico del material. Los dos parámetros más influyentes son el porcentaje de relleno y la orientación de impresión del objeto [Rodríguez, 2017].

El parámetro de orientación de impresión se puede observar en la **Figura 15** mediante la variación de la posición de impresión de la probeta. La variación de este parámetro repercute de distintas maneras en la fabricación de la probeta: Tolerancia geométrica, acabado superficial, tiempo de fabricación y resistencia mecánica [3Dhubs, 2019].

La influencia la orientación de impresión en el comportamiento mecánico dependerá fundamentalmente de tres factores: La dirección de la carga dinámica o estática, el método de manufactura aditiva a utilizar y el material empleado.

En la **Tabla 3** se puede observar que para FFF (deposición por filamento fundido) el parámetro de la orientación es muy importante en el comportamiento mecánico del material. Esto se debe a que, para una distinta dirección de fuerza (perpendicular o paralelo a las capas de impresión), la carga aplicada es soportada por las fibras del material o por la fuerza de adhesión entre capa y capa.

Tabla 3. *Influencia de la orientación de impresión para cada proceso de manufactura aditiva [adaptado de 3D Hubs, 2019].*

Proceso de manufactura aditiva	Influencia de la orientación de impresión
FFF (fabricación por filamento fundido)	Muy importante
SLA y DLP	Muy importante
SLS	Importante
Material Jetting	Importante
Binder Jetting	No importante
DMLS/SLM	Muy importante

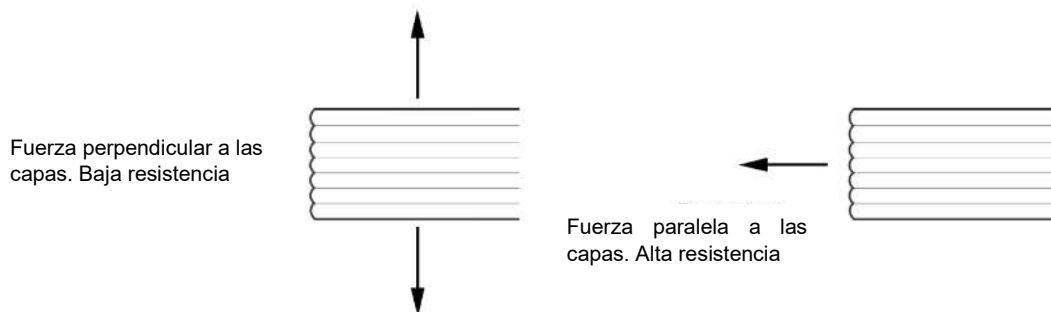


Figura 16. *Aplicación de la carga perpendicular y paralela respecto a las capas de material depositado [3d Hubs, 2019].*

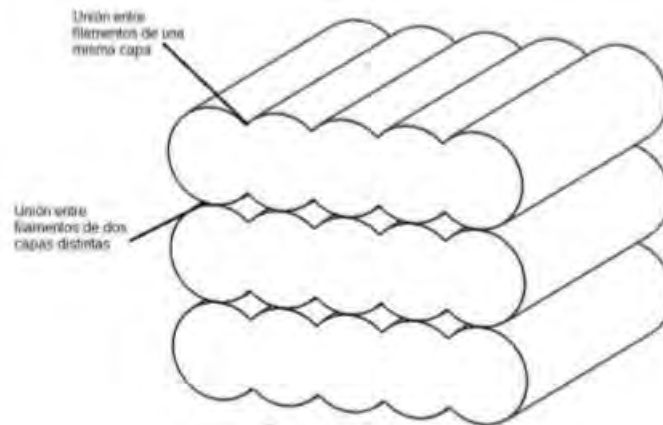


Figura 17. Unión entre los hilos del filamento entre el proceso de fabricación por deposición de filamento fundido [Rodríguez, 2018].

En la **Figura 16** se observa que el comportamiento del espécimen dependerá del ángulo relativo entre la fuerza aplicada y la capa depositada del material. Cuando la fuerza aplicada se encuentra perpendicular a la capa de material, la fuerza es soportada por la adhesión entre capas distintas. Se observa en la **Figura 17** que la adhesión del filamento para una misma capa es mayor que la unión entre dos distintas capas y por ello existe un cambio entre la resistencia del material para distintas orientaciones.

C) Errores comunes en fabricación por filamento fundido

En el proceso de fabricación por filamento fundido existen errores los cuales se deben, en su mayoría, a la calidad del equipo de manufactura (impresora 3D). En algunos casos, los errores son producidos por el impedimento del paso de filamento en el cabezal extrusor debido a una falta de limpieza en este elemento. Los defectos de impresión se pueden agrupar de la siguiente manera:

Plataforma de impresión no calibrada: La fabricación de la pieza se realiza mediante la disposición de capa y capa de material moviéndose en el eje Z. La altura de esta capa está relacionada con la calibración de la plataforma de impresión y una incorrecta calibración puede ocasionar una mala adhesión entre capa y capa depositada disminuyendo las propiedades

mecánicas de la pieza final. Si la boquilla de la impresión se encuentra muy separado de la plataforma, existirá el fenómeno de *wrapping* y si la boquilla se encuentra muy pegada, la altura de capa no será la correcta al imprimir.

Extrusor no calibrado: Para depositar el material y fabricar la pieza, el extrusor se desplaza gracias a los motores eléctricos que se rigen el movimiento en los ejes X, Y y Z. Estos motores eléctricos transmiten el movimiento mediante fajas síncronas, poleas y ejes sin fin. Si estos elementos no se encuentran en óptimo estado, no se podrá reproducir de manera efectiva el modelado realizado en CAD debido a los deslizamientos, falta de lubricación o desalineamiento del equipo. Como resultado final, la pieza presentará malas tolerancias dimensionales y un mal acabado (**Figura 18**).

Flujo de material no constante o falta de material: Se conoce que la manufactura aditiva consiste en la adición de material ya sea polimérico, metálico o cerámico. Si el aporte de este material es interrumpido o insuficiente, la pieza tendrá partes vacías y eso significará una disminución en la resistencia final o no se logrará fabricar la pieza en su totalidad. Este problema se puede prevenir seleccionando filamentos de calidad y realizando mantenimiento preventivo de limpieza al cabezal extrusor.

Falta de adhesión en la plataforma de impresión: Cuando se fabrica con ciertos materiales la adhesión en la plataforma, en algunos casos, no es la adecuada y la pieza no se fabrica de manera correcta. Otra razón es una calibración incorrecta de la plataforma y el extrusor debido a que se encuentran muy separados. Para solucionar este problema se realiza una correcta calibración, se emplea cinta adhesiva para aumentar la rugosidad de la plataforma o se emplea pegamento en barra.

Vibraciones: La vibración en el proceso de calibración tiene como consecuencias un mal acabado en la pieza final. Este fenómeno está relacionado con la rigidez de la estructura de la impresora 3D, la velocidad de impresión y aceleración en la impresión. Existen impresoras cuya estructura son perfiles de aluminio de espesor delgado cuya vibración es excesiva y otros equipos cuya rigidez es mayor y permite fabricar piezas con un excelente acabado. También influye el tipo de extrusor ya que un extrusor directo significa un cabezal con mayor inercia y, por ende, con mayor vibración. Las soluciones para disminuir las vibraciones son colocar los equipos en una mesa sólida rígida, disminuir la velocidad de impresión y la aceleración con la que se mueve el cabezal.

Parámetros de impresión inadecuados: La manufactura aditiva comprende una gran cantidad de parámetros modificables que influyen en la calidad final de la pieza. Entre los parámetros más importantes a seleccionar son: flujo de material, velocidad de impresión, altura de capa, temperatura de extrusión, temperatura de plataforma, densidad de relleno, soportes y velocidad de ventilador. Una inadecuada selección de parámetros significa que la fabricación se realizará de manera incorrecta y no se alcanzará el resultado deseado [Gunaydin, 2018].



Figura 18. Error de calibración [Pick 3D Printer, 2020].

1.3. Polímeros reforzados con fibras de carbono en manufactura aditiva

En la última década, se han investigado nuevos materiales para su aplicación en la manufactura aditiva de plásticos que aumenten la resistencia de las piezas finales fabricadas. Por ello, se han empleado exitosamente filamentos compuestos con fibras cortas de carbono o vidrio para la fabricación de estos objetos que requieren mejores propiedades mecánicas. Los materiales compuestos han sido investigados desde hace décadas y a través de los años han ido reemplazando otro material como el aluminio o titanio en distintas aplicaciones. Por ejemplo, en el área aeroespacial, al comienzo el Avión BOEING 747 consistía en su mayoría de aluminio y solo un 1% de materiales compuestos y el modelo BOEING 787 en el año 2007 empleaba una menor cantidad de aluminio el cual fue reemplazado por materiales compuestos en su estructura (**Figura 19**).

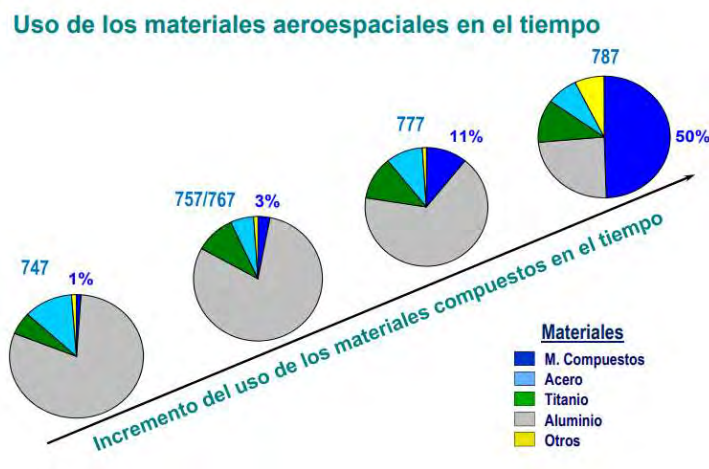


Figura 19. Incremento del uso de los materiales compuestos en el tiempo [Acosta, 2020].

Los filamentos compuestos de matriz termoplástica y fibras de carbono ofrecen altas propiedades mecánicas en direcciones determinadas las cuales en adición con la capacidad de impresión 3D ofrecen amplias posibilidades en su aplicación a la industria. La razón de sus buenas propiedades mecánicas se debe fundamentalmente a la transferencia de la carga de la matriz a la fibra a través de la superficie entre ambos materiales. Para comprender este

fenómeno es importante conocer la distribución de carga alrededor de la fibra la cual en los extremos tiene un esfuerzo de tensión nulo y en el centro ocurre el máximo valor de esfuerzo como se muestra en la **Figura 20**. El máximo refuerzo ocurrirá cuando las fibras son lo suficientemente largas para que exista una efectiva transferencia de la carga a la fibra. La longitud mínima de las fibras obedece a la siguiente expresión matemática [Aliotta, 1896]:

$$L_c = \frac{d \sigma_f}{2 \tau_y} \quad (1)$$

Donde D es el diámetro de la fibra, L es la longitud de la fibra, E_f es el módulo elástico de la fibra, G_m es el módulo de corte y v_f es la fracción volumétrica de la fibra en el compuesto

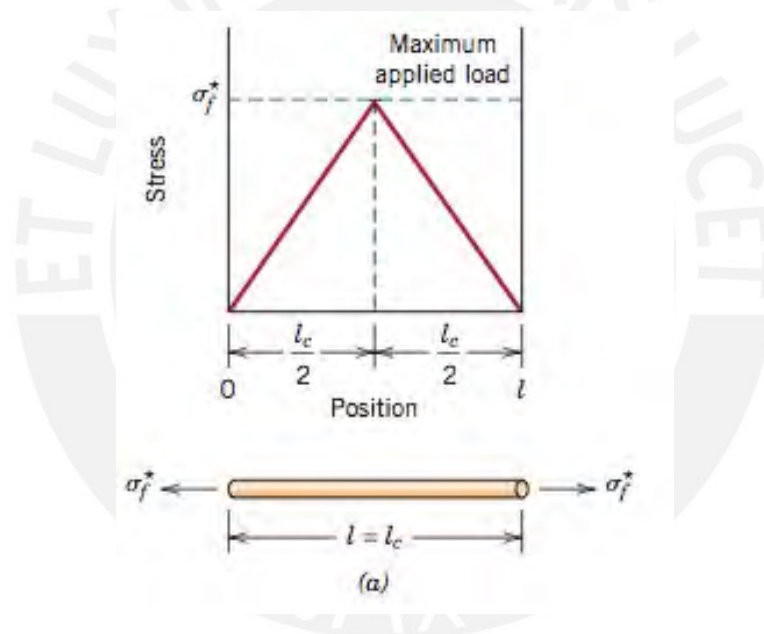


Figura 20. Distribución de carga en un refuerzo de fibra [Hasan, 2020].

En fabricación por filamento fundido se emplea comúnmente a los filamentos compuestos de matriz polimérica (ABS, PLA o PA y refuerzos de fibras cortas de carbono y vidrio. Este último es el menos empleado debido a la dificultad que implica el proceso de fabricación. El uso de filamentos de materiales compuestos en la impresión 3D requiere de un cuidado especial en el proceso debido a que estos materiales necesitan una mayor temperatura para poder ablandar el material y depositar de forma efectiva en la plataforma. Además, estos filamentos requieren

del intercambio de la boquilla de bronce por una de acero bonificado debido a la mayor abrasión en el proceso de extrusión del material.

Existen diversos estudios respecto a la mejora en las propiedades mecánicas en propiedades mecánicas al emplear refuerzos de fibras de carbono de alto modulo. En 2016 se realizó una caracterización a especímenes de PLA y PLA reforzado con fibras cortas de carbono empleando manufactura aditiva. Los experimentos realizados dieron como resultado un aumento mayor a dos veces del valor del módulo elástico para el material reforzado en comparación al material puro como se observa en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Módulo elástico de especímenes fabricados con PLA y PLA/CF [Ferreira, 2016].

Property	Direction	PLA			PLA+CF			ASTM Standard
		Max.	Avg.	Dev.	Max.	Avg.	Dev.	
Tensile Modulus (MPa)	0° (E_1)	3596	3376	212	7665	7541	96	D638
	90° (E_2)	3340	3125	148	4145	3920	167	
In-plane Shear Modulus (MPa)	±45° (G_{12})	1140	1092	36	1270	1268	5	D3518

La adición de fibras cortas de carbono en los termoplásticos, específicamente para la fabricación de filamentos, también modifican las propiedades de estabilidad térmica. Un análisis térmico realizado a filamentos de ABS y ABS reforzados en el 2019 demostró una mejora en los 3 ensayos realizados: análisis termogravimétrico, escaneo diferencial de calorimetría y análisis termo mecánico (**Figura 21**). En el primer ensayo, se analizó la pérdida porcentual de la masa del material ante un aumento de temperatura. En este ensayo se observó que para temperaturas mayores a 475°C el ABS presenta una reducción del 100% del peso y el ABS/CF presenta una reducción del 75% el cual se mantiene estable hasta los 775°C. En el segundo ensayo se determinó los valores de temperatura de transición vítrea cuyos valores fueron 110°C y 105°C para el ABS y ABS/CF respectivamente. Según la investigación realizada, el menor valor del material reforzado es debido a la adición de fibra cortas que favorece la movilidad térmica en la cadena polimérica del material compuesto. El último

ensayo se analizó la expansión térmica de ambos materiales cuando son sometidos a temperaturas desde 25 a 125°C. Este proceso es importante ya que el proceso de impresión 3D requiere un cambio de temperatura repentino en el filamento que se va a extruir por la boquilla y un menor coeficiente de expansión significa un proceso de impresión más eficiente.

En este ensayo se determinó que, posterior a la temperatura de transición vítrea, el filamento de ABS/CF tiene un menor valor de coeficiente térmica que el filamento de ABS. Este fenómeno se debe a que el material compuesto posee una mejor conductividad térmica a lo largo de la cadena polimérica debido a los insertos de fibras en la matriz [Kazi & Billah, 2019].

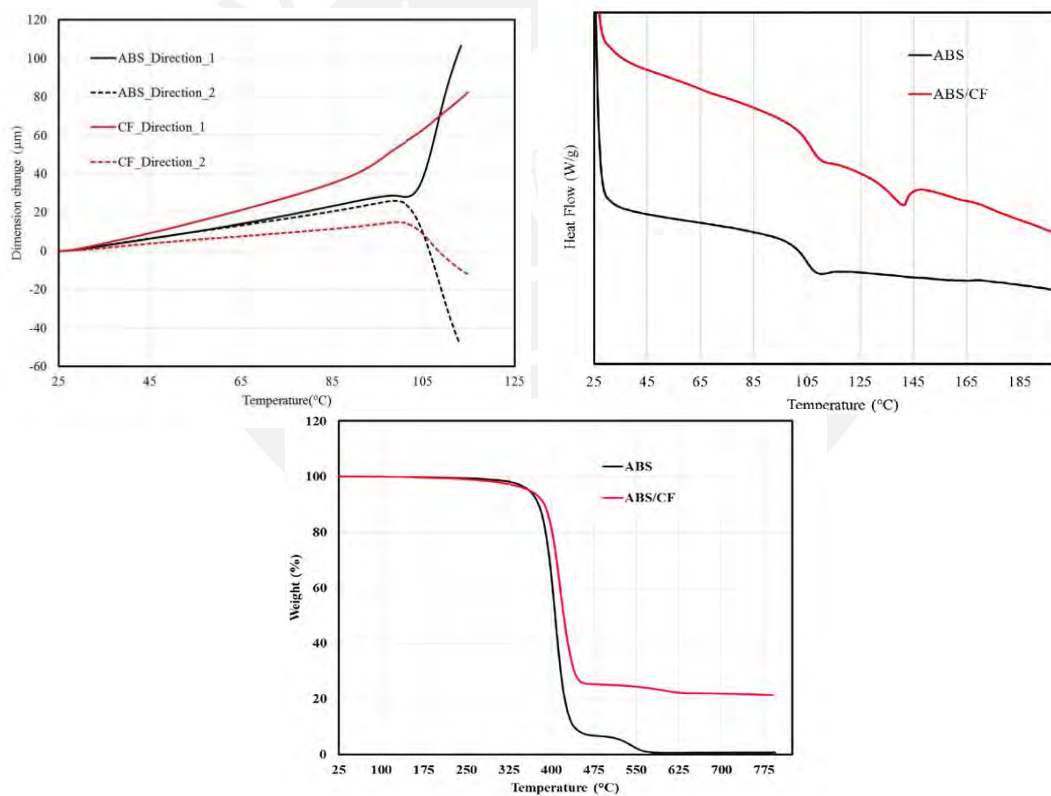


Figura 21. Ensayos de estabilidad térmica para filamentos de ABS y ABS/CF [Kazi & Billah, 2019].

Capítulo 2: Metodología experimental

En esta sección se detallarán los materiales empleados en la fabricación por filamento fundido de los especímenes anteriormente mencionados, así como los equipos a utilizar en el desarrollo del experimento resaltando sus principales especificaciones técnicas para cada objeto. Además, se explicará el diseño experimental necesario para cumplir con los objetivos del presente trabajo.

2.1. Materiales

Para el desarrollo de este trabajo se emplearán filamentos con un diámetro de 3mm de ABS, PA, PA/CF y ABS/CF de la marca 3DXTECH. Esta empresa se especializa en la fabricación de firmamentos de alta calidad con buenas tolerancias dimensionales y una excelente distribución del calor en el filamento.

2.1.1. Filamentos comerciales de ABS y PLA

En el presente trabajo se realizará la fabricación de especímenes fabricados mediante manufactura aditiva específicamente fabricación por filamento fundido en los cuales se emplearán filamentos de ABS, PA, PA/CF y ABS/CF en sus colores naturales. La presentación de los filamentos es de 1 kg y 0.5 kg para los polímeros puros y de 2 kg para los filamentos compuestos con un diámetro de 2.85 mm (**Figura 22**). Ambos suministrados por 3DXTECH y las características de estos filamentos se muestran en la **Tabla 5**.



Figura 22. Filamentos de ABS, PA, ABS/CF y PA/CF de la marca 3DXTECH [3DXTECH, 2020].

Tabla 5. Propiedades de los filamentos empleados [3DXTECH, 2020].

Material	Diámetro	Tolerancia	Resistencia a la tracción	Temperatura de extrusión(C°)	Temperatura de mesa (C°)
PA	2.85mm	+/- 0.05	45 MPa	260-270	100-110
ABS	2.85mm	+/- 0.05		220-240	100-110
ABS/CF	2.85mm	+/- 0.05		220-240	100-110
PA/CF	2.85mm	+/- 0.05	63.9 MPa	240-270	100-100

2.2. Equipos

2.2.1. Impresora 3D

Para la fabricación de probetas para ensayo de tracción, se empleará una impresora 3D Ultimaker® 3 extended de la compañía Ultimaker (**Figura 23**). Este equipo se basa en el proceso de manufactura aditiva de fabricación por filamento fundido con un volumen máximo de impresión de 215 x 215 x 300 mm y la temperatura máxima de extrusión de 300°C lo cual permite el uso de filamentos compuestos. Para el uso de filamentos compuestos fue necesario el replazo de la boquilla original de bronce por una boquilla de acero bonificado debido a que la abrasión del filamento desgastaría la original rápidamente aumentando el diámetro de salida y afectando el resultado final. En la **Tabla 6** se presentan las características técnicas de este equipo de manufactura.



Figura 23. Impresora Ultimaker® 3 Extend [Ultimaker, 2020].

Tabla 6. Especificaciones técnicas Ultimaker 3 Extended [Ultimaker, 2020].

Extrusores	2 extrusores con sistema de ajuste automático e intercambio de extrusor
Diámetro de boquilla	0.4 mm
Diámetro de filamento	2.85mm
Dimensiones	342mm x 380mm x 489mm
Volumen máximo de impresión	Simple: 215mm x 215mm x 300mm Dual: 197mm x 215mm x 300mm
Resolución del eje Z	20 – 200 micrones
Precisión eje X, Y, Z	12.5, 12.5, 2.5 micrones
Temperatura de extrusión	180°C a 280 °C
Peso	11.3kg
Plataforma de impresión	Vidrio caliente 20 – 100°C
Velocidad de impresión	30 – 300 mm/s
Software de impresión	Cura

2.2.2. Secador de filamento

En un ambiente con una humedad relativa elevada como Lima, los filamentos de impresión 3D adquieren humedad de forma muy rápida. La humedad en los filamentos causa que el proceso de impresión no sea efectivo debido al vapor de agua que se genera al extruir el

filamento por la boquilla. Este fenómeno es mayor en los filamentos de PA y en los reforzados en el cual se debe mantener en un equipo que elimine la humedad. Como se observa en la **Tabla 7**, cada polímero presenta distinto tiempo de secado ya que adquieren humedad en distintas velocidades. El secador de filamento PrintDry® (**Figura 24**) disminuye la humedad absorbida por los filamentos mediante convección forzada y tiene una temperatura máxima de 70°C con un tiempo de trabajo máximo de 40 horas continuas.



Figura 24. Secador de filamento PrintDry [PrintDry®, 2020].

Tabla 7. Parámetros de secado de filamento [MatterHackers, 2020].

Parámetros de secado de filamentos		
Material	Temperatura	Tiempo
PLA	45°C	>4h
ABS	60°C	>2h
PETG	65°C	>2h
Nylon	70°C	>12h
PVA	45°C	>4h
TPU/TPE	50°C	>4h
ASA	60°C	>4h
PP	55°C	>6h

2.2.3. Horno de convección forzada

Los especímenes fabricados para el ensayo de tracción serán secados en un horno de convección forzada debido a que estos materiales absorben la humedad del ambiente y, con ello, cambia sus propiedades mecánicas. Este horno de convección tiene una capacidad de 300°C como temperatura máxima y emplea un voltaje de 220V para su funcionamiento (**Figura 25**).



Figura 25. Horno de convección forzada (lado derecho) y balanza analítica (lado izquierdo).

2.2.4. Balanza analítica

Para pesar los trozos de filamentos que se analizarán posteriormente en ensayos de estabilidad térmica será necesario emplear una balanza digital METTLER TOLEDO con una precisión de 0.1 mg y capacidad máxima de 200g (**Figura 25**).

Tabla 8. Especificaciones técnicas de la balanza Mettler Toledo [Mettler Toledo, 2020]

Balanza digital Mettler Toledo	
Precisión	0.1 mg
Máxima capacidad	200 g
Mínima capacidad	52 g

2.2.5. Calibrador Mitutoyo digimatic ABSOLUTE

En los ensayos de tracción se requiere el valor de la sección transversal del espécimen para realizar los cálculos. El Calibrador ABSOLUTE de la marca Mitutoyo ofrece una medición con una resolución de 0.01mm ideal para medición de las probetas (**Figura 26**).

Tabla 9. Especificaciones técnicas Mitutoyo 500-193 [Mitutoyo, 2020].

Mitutoyo 500-193	
Error de indicación	+/- 0.02mm
Resolución	0.01 mm
Repetibilidad	0.01 mm



Figura 26. Mitutoyo 500-193 [Mitutoyo, 2020].

2.3. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental del presente trabajo se divide en dos partes principales. En primer lugar, se definirá el diseño experimental para la caracterización de los filamentos empleados en la fabricación de las probetas. Estos ensayos serán los siguientes: ensayo de tracción, análisis térmico y medición del índice de fluidez. Los resultados nos permitirán una mejor comprensión del comportamiento de los filamentos en el proceso de fabricación por filamento fundido. En segundo lugar, se definirá el diseño experimental para realizar los

ensayos de tracción correspondientes indicando los principales parámetros a emplear en la fabricación de las probetas y la geometría.

2.3.1. Diseño experimental

En la fabricación por filamento fundido (FFF) existen distintos parámetros los cuales influyen en el comportamiento mecánico del material. Estos parámetros son: Altura de capa, dirección de deposición de filamento, temperatura de extrusión y velocidad de deposición.

Según la investigación previa realizada en el proyecto por Luis Felipe Cam, se encontró como resultado los parámetros óptimos para obtener las mejores propiedades mecánicas de los materiales: ABS, PA, ABS/CF y PA/CF.

Tabla 10. Parámetros óptimos de impresión [Cam, 2021].

Material	Parámetros de impresión óptimos				
	Altura de capa(mm)	Dirección de deposición (°)	Temperatura de extrusión(C°)	Velocidad de deposición(mm/s)	Número de contornos
ABS	0.2	[0, 45, 90, 135]	260	40	1
PA	0.1	[0, 45, 90, 135]	280	30	1
ABS/CF	0.1	[0, 45, 90, 135]	280	30	1
PA/CF	0.1	[0, 45, 90, 135]	280	30	1

Para la fabricación de los especímenes se utilizará la misma configuración presentada en la **Tabla 10**. Sin embargo, el parámetro a modificar en la fabricación será la orientación de impresión de la probeta. De esta manera se podrá conocer el comportamiento anisotrópico de los especímenes fabricados mediante filamento fundido de ABS, PA, ABS/CF y PA/CF.

Para la caracterización del comportamiento anisotrópico de los especímenes fabricados mediante filamento fundido se parte desde el cubo diferencial de esfuerzos el cual se observa en la **Figura 27**.

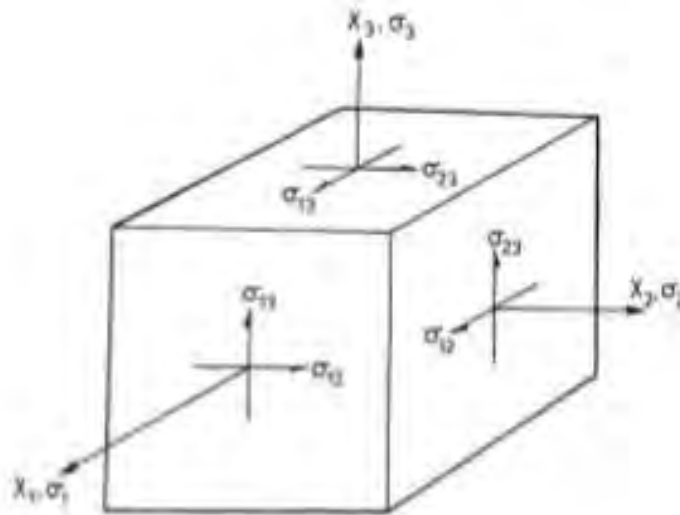


Figura 27. Cubo general de esfuerzos [Adams, 1974].

Las deformaciones unitarias se calculan mediante la ley de Hooke ($\epsilon = S \cdot \sigma$). Cada componente σ_{ij} corresponde a un esfuerzo donde “i” representa la dirección normal al plano sobre el que actúa el esfuerzo y “j” es la dirección en la que actúa el esfuerzo. La expresión general se muestra de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix}$$

La cual nos da como resultado las siguientes expresiones:

$$\epsilon_1 = S_{11}\sigma_1 + S_{12}\sigma_2 + S_{13}\sigma_3 + S_{14}\sigma_{12} + S_{15}\sigma_{13} + S_{16}\sigma_{23}$$

$$\epsilon_2 = S_{21}\sigma_1 + S_{22}\sigma_2 + S_{23}\sigma_3 + S_{24}\sigma_{12} + S_{25}\sigma_{13} + S_{26}\sigma_{23}$$

$$\epsilon_3 = S_{31}\sigma_1 + S_{32}\sigma_2 + S_{33}\sigma_3 + S_{34}\sigma_{12} + S_{35}\sigma_{13} + S_{36}\sigma_{23}$$

$$\gamma_{12} = S_{41}\sigma_1 + S_{42}\sigma_2 + S_{43}\sigma_3 + S_{44}\sigma_{12} + S_{45}\sigma_{13} + S_{46}\sigma_{23}$$

$$\gamma_{13} = S_{51}\sigma_1 + S_{52}\sigma_2 + S_{53}\sigma_3 + S_{54}\sigma_{12} + S_{55}\sigma_{13} + S_{56}\sigma_{23}$$

$$\gamma_{23} = S_{61}\sigma_1 + S_{62}\sigma_2 + S_{63}\sigma_3 + S_{64}\sigma_{12} + S_{65}\sigma_{13} + S_{66}\sigma_{23}$$

Se observa que ϵ_{ij} son deformaciones unitarias y que S_{ij} son componentes de la matriz anteriormente presentada los cuales son la inversa del tensor constitutivo:

$$S=C^{-1}$$

En el caso de un material anisotrópico, la matriz hallada se describe por 21 componentes debido a la simetría que se presenta en la matriz.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ & & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ & & & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ & & & & S_{55} & S_{56} \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix}$$

Debido a que el espécimen presenta una simetría respecto a 3 ejes perpendiculares entre sí, este espécimen se considera como un material ortotrópico. La ortotropía significa que las propiedades del material son únicas e independientes en esas 3 direcciones [Dassault systems, 2010]. Esta característica reduce el número de componentes a 9 parámetros los cuales se hallarán mediante los ensayos de tracción correspondientes.

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & S_{44} & 0 & 0 \\ & & & & S_{55} & 0 \\ & & & & & S_{66} \end{bmatrix}$$

Según la metodología planteada por [Domingo, 2015], para determinar las 9 constantes elásticas que rigen el comportamiento del material ante distintas cargas aplicadas en cualquier dirección se requiere de imprimir probetas en 6 direcciones distintas (Figura 28). Esto se debe a que cada dirección posee una distribución de material característica de este parámetro que nos permitirá determinar las 9 constantes elásticas del espécimen.

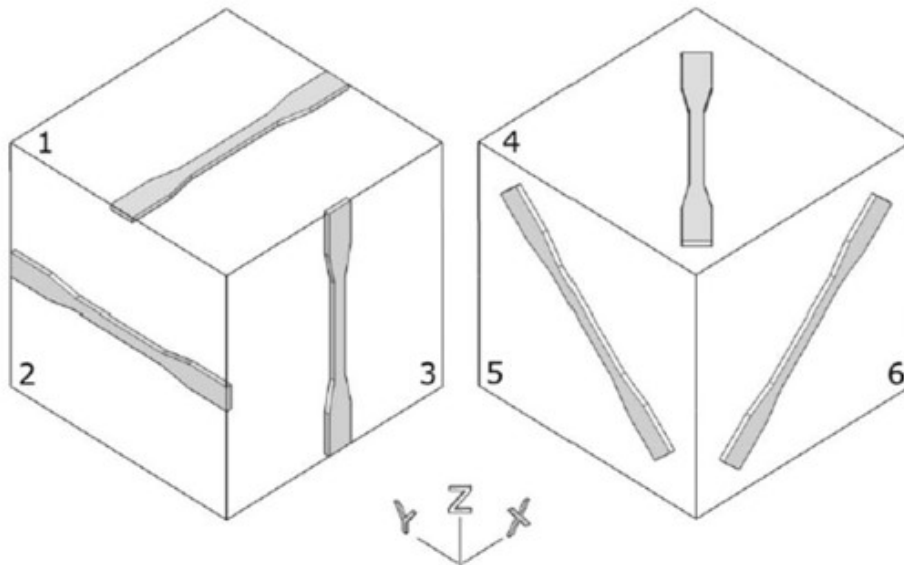


Figura 28. Orientaciones de impresión [Domingo, 2015].

Las orientaciones 1, 2 y 3 corresponden al cálculo del módulo de Young (E) en las direcciones X, Y y Z y los coeficientes de Poisson (ν) en la dirección XY, YZ y ZX respectivamente.

$$E_X = \frac{\sigma_{XX}}{\varepsilon_{XX}} \quad \nu_{XY} = \frac{\varepsilon_{XX}}{\varepsilon_{YY}} \quad (2)$$

$$E_Y = \frac{\sigma_{YY}}{\varepsilon_{YY}} \quad \nu_{YZ} = \frac{\varepsilon_{YY}}{\varepsilon_{ZZ}} \quad (3)$$

$$E_Z = \frac{\sigma_{ZZ}}{\varepsilon_{ZZ}} \quad \nu_{ZX} = \frac{\varepsilon_{XX}}{\varepsilon_{ZZ}} \quad (4)$$

Donde σ_{XX} , σ_{YY} y σ_{ZZ} son los esfuerzos y ε_{XX} , ε_{YY} y ε_{ZZ} son las deformaciones unitarias en las direcciones X, Y y Z respectivamente. Para el cálculo de los módulos de corte se utilizó la ecuación planteada por [Azzi y Tsai, 1965].

$$G_{ij} = \left[\frac{4}{E_{ij}^{45^\circ}} - \frac{1}{E_i} - \frac{1}{E_j} + \frac{2\nu_{ij}}{E_i} \right]^{-1} \quad (5)$$

Donde i , y j son la dirección de la aplicación de la carga y la dirección normal respectivamente.

Además, $E_{ij}^{45^\circ}$ es el módulo elástico de una probeta orientada 45° en el plano "ij".

Para los ensayos de tracción se empleará la norma ISO527-2 “Determinación de las propiedades de tracción”. Esta norma especifica que la cantidad mínima requerida de probetas es 5 las cuales tendrán una longitud calibrada entre mordazas de 75mm. Con ello, nos da el resultado de un total de 120 probetas a fabricar especificadas en la siguiente tabla.

Tabla 11. Probetas a fabricar para cada material

Orientación de impresión	N° de Probetas				Total
	ABS	PA	ABS/CF	PA/CF	
1	5	5	5	5	20
2	5	5	5	5	20
3	5	5	5	5	20
4	5	5	5	5	20
5	5	5	5	5	20
6	5	5	5	5	20
Total	30	30	30	30	120

2.3.2. Caracterización de filamentos

Se realizarán los ensayos de tracción, análisis termogravimétrico, medición del índice de fluidez y un análisis de calorimetría diferencial de barrido para los filamentos 3DXTECH de ABS, PA, ABS/CF y PA/CF producidos por extrusión

A) Ensayo de tracción

En este ensayo se realizará 5 repeticiones a los filamentos de ABS, PA, ABS/CF y PA/CF con una longitud calibrada de 75mm entre mordazas. La velocidad del ensayo será 5mm/min y se tendrá en cuenta la distancia requerida para la sujeción del filamento en la máquina de ensayo de tracción de la marca Zwick/roell modelo Z0 (**Figura 29**).

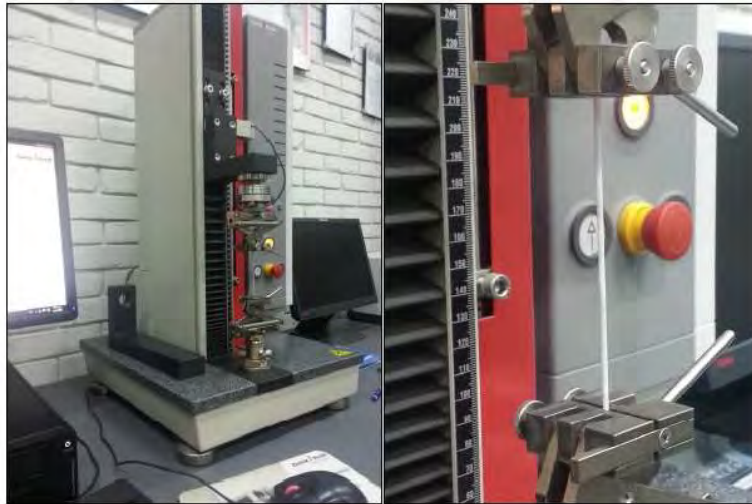


Figura 29. Equipo Zwick/Roell Z0

B) Análisis térmico

Ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC)

El objetivo de este análisis es estudiar la transferencia del calor a través del cuerpo del filamento. Este ensayo nos permite conocer la temperatura de transición vítrea (T_g) y la temperatura del punto de fusión de los filamentos (T_f). El procedimiento se realizará bajo la norma ASTM-D3418-15 y se utilizará el equipo NETZSCH STA 449 F1 Júpiter®. Para este ensayo se emplea una tasa de calentamiento y enfriamiento de 10 k/min y flujo de nitrógeno de 10mk/min. Se realiza en 2 etapas: la etapa de calentamiento de 30°C a 600°C y la segunda etapa de 600°C a 30°C.

Análisis termogravimétrico (TGA)

El objetivo de este análisis es estudiar la pérdida de peso del filamento por degradación al someter el filamento a un incremento de temperatura. Se realiza un análisis a la masa del material en función del tiempo o temperatura para lograr un análisis de la composición del material. Este procedimiento se realizará bajo la norma ASTM E1131-08 y se utilizará el equipo NETZSCH STA 449 F1 Júpiter® (**Figura 30**). Para este análisis se emplea el mismo rango de temperaturas utilizado en el ensayo de DSC.



Figura 30. Equipo para TGA y DSC NETZSCH STA 449 F1 Jupiter®

C) Medición del índice de fluidez (MFI)

En este proceso se realiza una partición del filamento en trozos de 2 y 3 mm aproximadamente. Posterior a ello, se aplicarán dos distintas cargas utilizando pesas de 2.16 kg y 5 kg a una temperatura de 235°C en ambos casos. El ensayo se realizará bajo la norma ASTM D1238-13 y se utilizará el equipo Zwick/roell Cflow Extrusion Plastometer (**Figura 31**). Cada material fue ensayado a 3 distintas temperaturas determinadas de manera experimental mediante la impresión de probetas y a partir del resultado de los ensayos térmicos. En este ensayo se seleccionó intervalos de tiempo para cada material y temperatura que permitan obtener al menos 5 muestras. Previamente, estas muestras fueron pesadas para obtener el índice de fluidez mediante la siguiente ecuación:

Donde:

$$MFI = \frac{m (g)}{\Delta t (s)} \times 600 \left(\frac{s}{10 \text{ min}} \right) \quad (6)$$

m: peso de la muestra.

Δt : intervalo de tiempo para cada muestra.

MFI: índice de fluidez en g/10min.



Figura 31. Medidor de índice de fluidez Zwick/Roell Cflow Extrusion Plastometer

2.3.3. Fabricación de probetas

Para el proceso de fabricación de probetas en las distintas direcciones anteriormente mencionadas se empleó una impresora 3D Ultimaker® 3 Extended. El modelado de la probeta se realizó en el software Autodesk Inventor® según la norma correspondiente al ensayo de tracción en polímeros ISO 527-2 empleando la siguiente geometría:

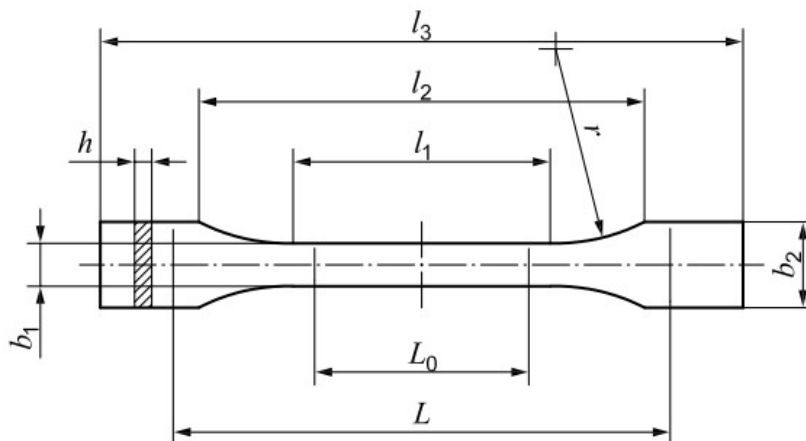


Figura 32. Geometría probeta ISO 527-2

Tabla 12. Medidas geométricas probeta ISO 527-2

Tipo de espécimen	1BA (mm)
Longitud total (l3)	>75
Longitud sección paralela (l1)	30 +/- 5
Radio (r)	>30
Distancia sección reducida (l2)	58 +/- 2
Ancho máximo (b2)	10 +/-0.5
Ancho sección reducida (b1)	5 +/-0.5
Espesor (h)	>2
Longitud calibrada	25 +/- 0.5

El archivo resultante se exportó a un formato STL. Posteriormente, se empleó el software Cura® (**Figura 33**) en el cual se agregó el valor de los parámetros definidos en el diseño experimental y se configuró la orientación de impresión. Para algunas orientaciones de impresión fue necesario agregar soportes debido a la geometría esbelta de la probeta la cual no permitía su adecuada fabricación (**Figuras 34 y 35**). Una vez agregado los parámetros correspondientes, se exportó el archivo a un formato G-code el cual será leído por la impresora. Para todas las impresiones se utilizó *Blue tape* debido a que esta cinta aportaba una mejor adhesión de la impresión a la plataforma. Por otro lado, la temperatura de la plataforma fue de 100°C para los 4 materiales para evitar el fenómeno de *warping* el cual sucede debido a la diferencia de temperatura entre la boquilla y la superficie de impresión. Para la fabricación de probetas con los materiales reforzados fue necesario el cambio de boquilla de bronce por una de acero bonificado debido a la abrasión generado por la dureza de las fibras de carbono en el filamento

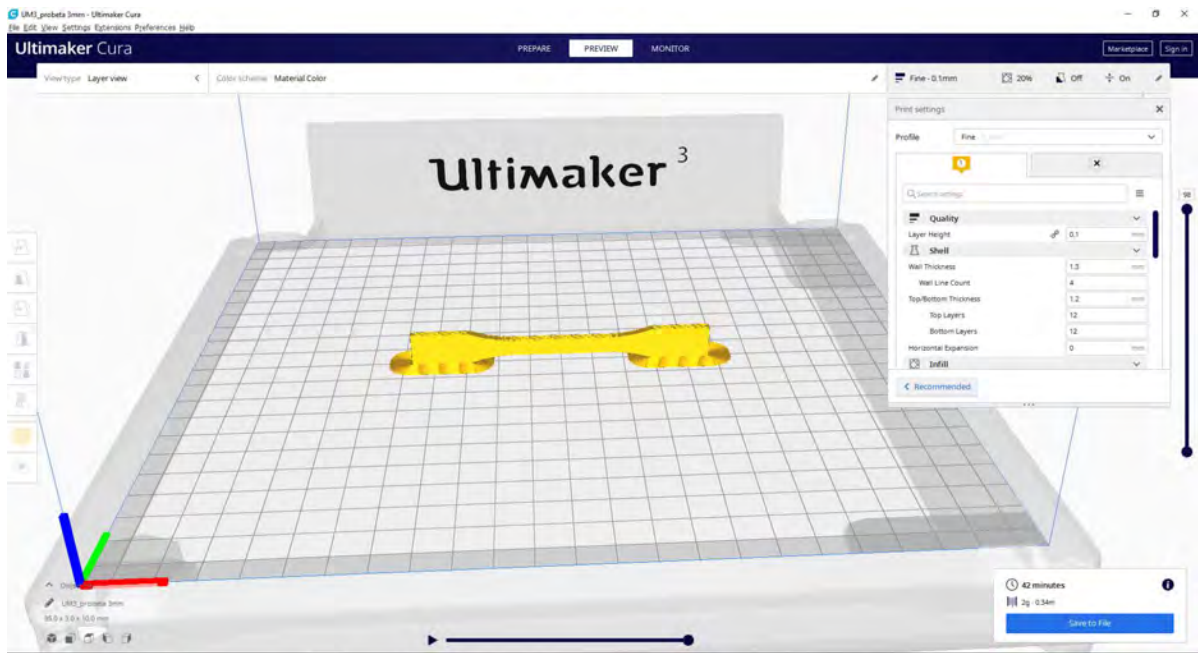


Figura 33. Interfaz software Ultimaker Cura ®

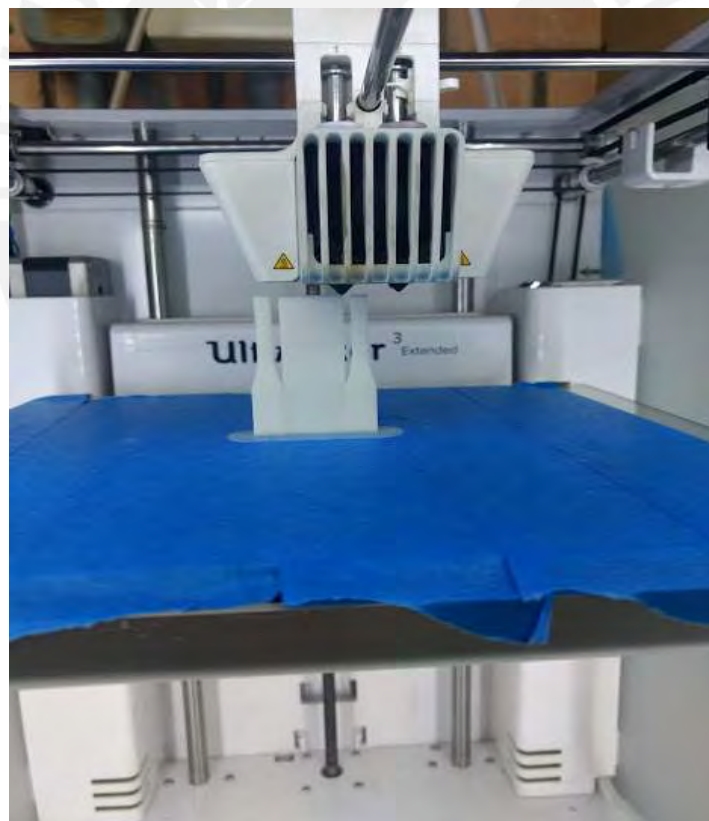


Figura 34. Proceso de impresión de probetas ABS con soporte de impresión



Figura 35. error en la fabricación de la probeta de PA/CF debido a soportes insuficientes y retracción inadecuada



Figura 36. Espécimen fabricado de PA plano 3 (Vertical)

2.3.4. Ensayo de tracción de especímenes

Este procedimiento se realizará de acuerdo a la norma ISO527-2 “Determinación de las propiedades de tracción”. Esta norma especifica que la cantidad mínima requerida de probetas es 5 las cuales tendrán una longitud calibrada entre mordazas de 75mm. Además, el ensayo se realizará a una velocidad de 5 mm/min. La longitud calibrada se tendrá en cuenta para la sujeción del espécimen con las mordazas correspondientes. Para este ensayo se utilizará el equipo de ensayo de materiales Zwick/Roell Z050 (**Figura 37**) además de una celda de precarga de 1kN y un extensómetro modelo multiXtens. Para los especímenes fabricados con filamentos compuestos en los planos 1, 2 y 4 no se utilizó la celda de precarga debido a que los valores de fuerza aplicados fueron mayores a 1kN.

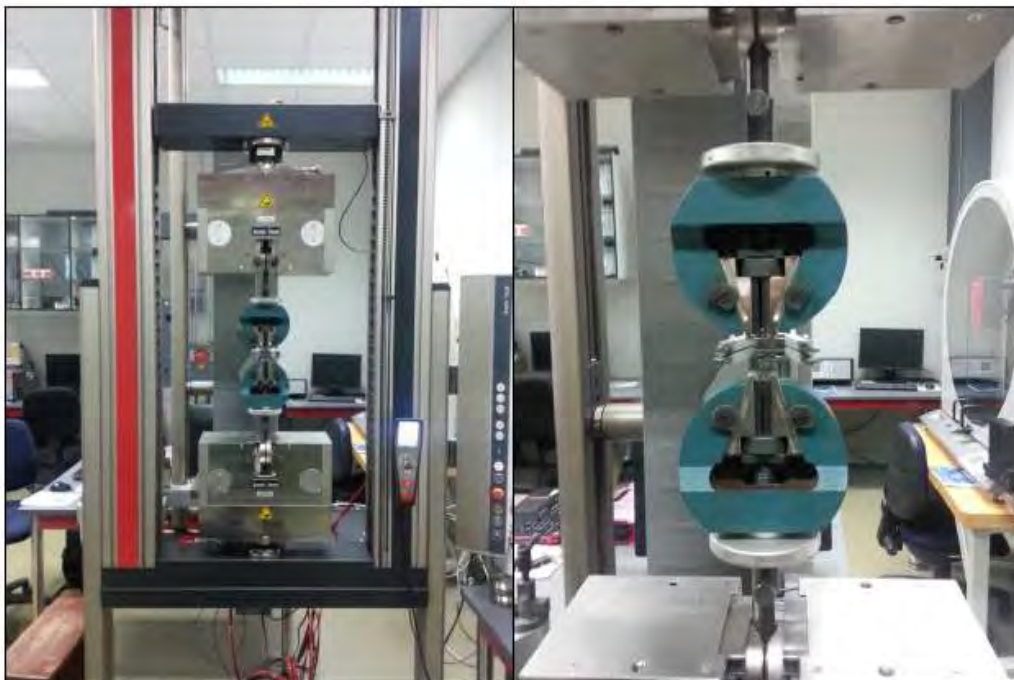


Figura 37. Máquina de ensayo de tracción universal Zwick/Roell Z050

Para obtener los valores del coeficiente de Poisson para los especímenes mencionados se emplearán galgas extensiométricas (*strain gauges*) en un arreglo de cruz adheridos mediante un pegamento especial (**Figura 38**) cuya data se almacenará en un equipo multifunción de *National Instruments*.

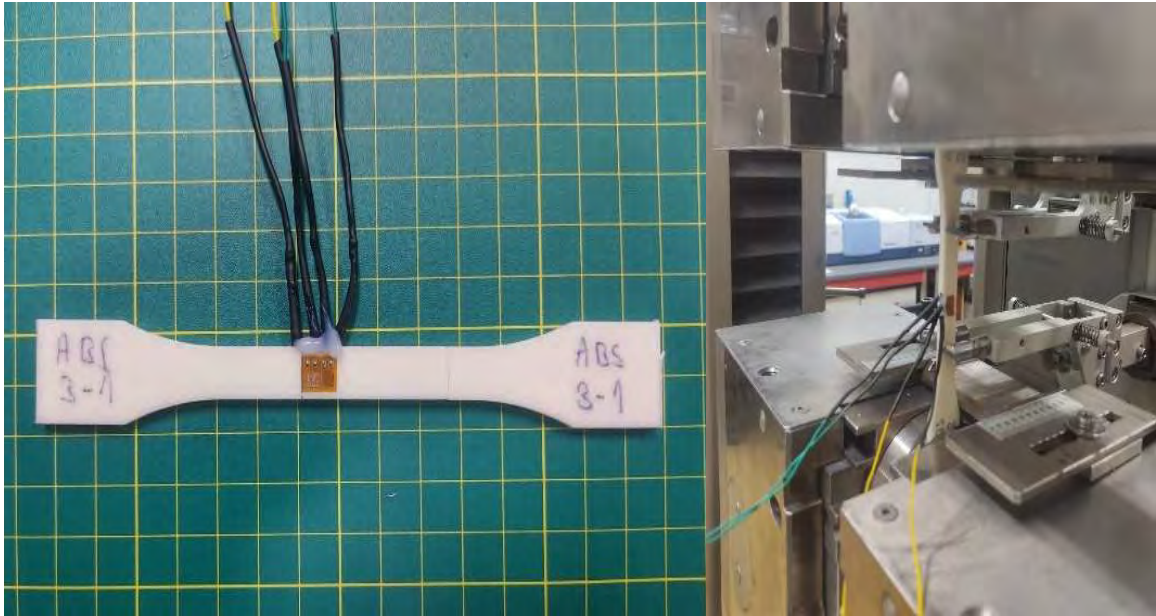


Figura 38. Galgas extensiométricas adicionadas al espécimen de ABS previo al ensayo de tracción (izquierda) y ensayo de tracción de un espécimen de ABS (derecha)

Capítulo 3: Resultados y discusión

En el presente capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de los distintos ensayos realizados en el trabajo. En primer lugar, se abordarán los resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de los filamentos de ABS, PA y sus reforzados; empezando por el ensayo de tracción a los distintos filamentos; seguido de los resultados obtenidos en el análisis térmico: Análisis termogravimétrico (TGA) y Ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC); e índice de fluidez (MFI). Luego, estos ensayos son analizados tomando en consideración la influencia del refuerzo de fibras de carbono en el comportamiento mecánico y térmico del material. Finalmente, se presentarán y analizan los resultados obtenidos de los ensayos de tracción de los especímenes fabricados y se hallarán las constantes elásticas que definirán el comportamiento anisotrópico de los 4 materiales.

3.1. Caracterización del filamento

3.1.1. Ensayo de tracción

Se realizó los ensayos de tracción a los 4 filamentos de ABS, PA y reforzados según la norma ISO 527. Se obtuvieron las curvas esfuerzo-deformación correspondientes a estos ensayos los cuales se representan en las **Figuras 39 y 40**; a partir de los cuales se obtienen las propiedades resumidas para los 4 materiales en las **Tablas,13, 14, 15 y 16**.

Haciendo un análisis a estos resultados se puede observar que el refuerzo de fibras cortas de carbono en los materiales de ABS y PA incrementan los valores de módulo elástico y de resistencia a la tracción. Para el ABS, este incremento es de 254% y 105% respectivamente. Además, el comportamiento del filamento compuesto ante la carga axial es de tipo frágil como se puede observar en la **Figura 39** en el final de la curva la cual no presenta mayor deformación. Este aumento en las propiedades es similar a un estudio realizado por [**Love, 2014**] donde se analizó la influencia de las fibras de carbono en filamentos poliméricos para distintas propiedades tanto mecánicas y geométricas. En este estudio se encontró que para la misma dirección la fibra de carbono aumentó en 400% el valor de módulo elástico en ABS con una fracción volumétrica de 13% de fibras de carbono. En el caso de la poliamida se observa en el gráfico un mayor incremento en el valor de la resistencia a la tracción cuando se emplea refuerzo de fibra de carbono (219.8%) y el incremento en el valor del módulo elástico también presenta un aumento notorio (242.7%) en comparación al emplear refuerzo de fibra de carbono en el ABS. También, se pudo observar el comportamiento frágil del material compuesto de PA y fibras de carbono al igual que en el ABS.

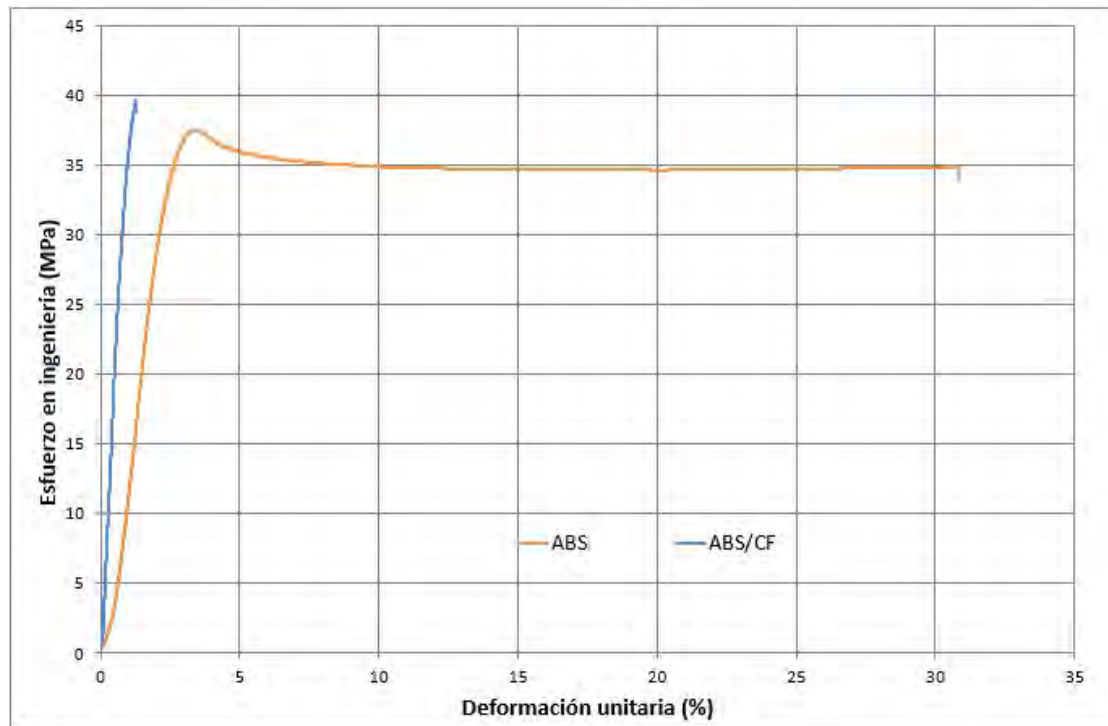


Figura 39. Curvas esfuerzo-deformación de una muestra representativa de ABS y ABS/CF [Cam, 2021].

Tabla 13. Propiedades mecánicas del filamento de ABS [Cam, 2021].

Propiedad	Unidad	Media	D.S.	C.V. (%)
Resistencia a la tracción	MPa	37,94	0,72	1,9
Módulo de elasticidad	MPa	1758,9	125,23	7,1
Deformación unitaria a la rotura	%	29,55	9,28	3,4

Tabla 14. Propiedades mecánicas del filamento de ABS/CF [Cam, 2021].

Propiedad	Unidad	Media	D.S.	C.V. (%)
Resistencia a la tracción	MPa	39,91	0,47	1,18
Módulo de elasticidad	MPa	4464,36	80,30	1,8
Deformación unitaria a la rotura	%	1,30	0,1	7,36

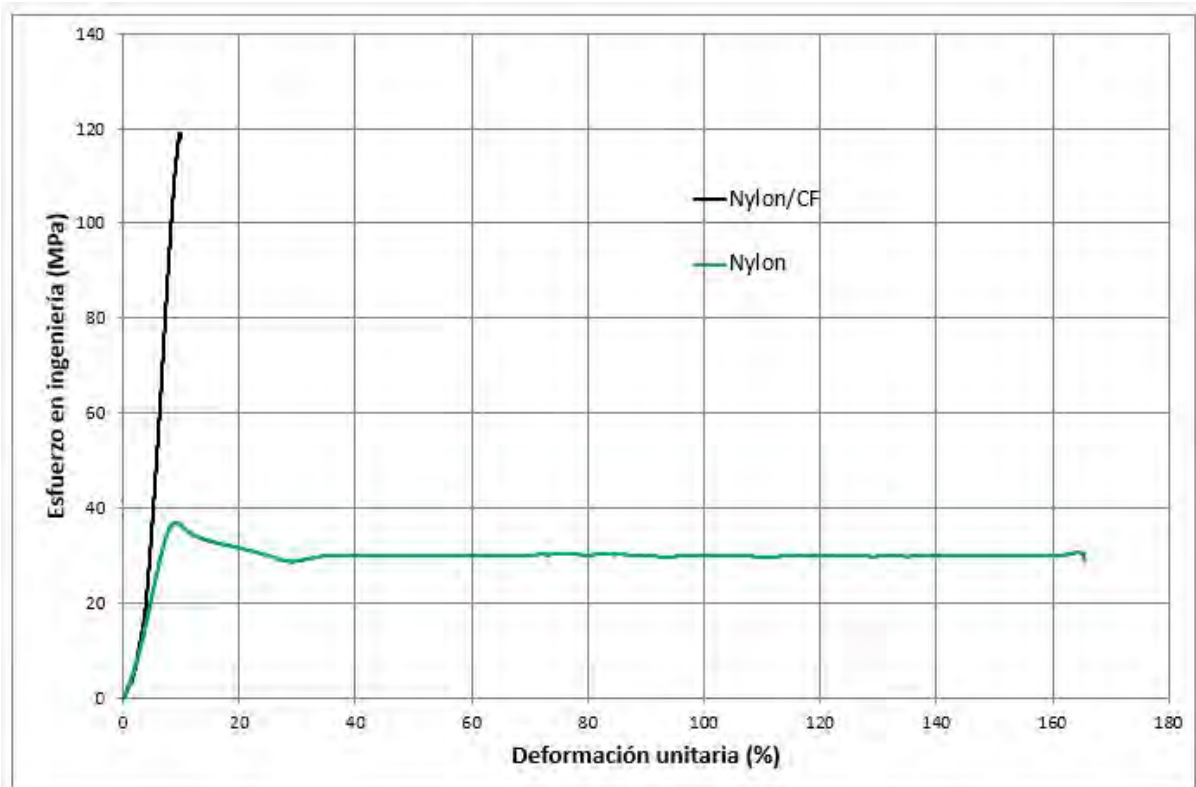


Figura 40. Curvas esfuerzo-deformación de una muestra representativa de Nylon y Nylon/CF [Cam 2021].

Tabla 15. Propiedades mecánicas del filamento de PA [Cam, 2021].

Propiedad	Unidad	Media	D.S.	C.V. (%)
Resistencia a la tracción	MPa	36,93	0,67	1,8
Módulo de elasticidad	MPa	593,3	27,95	4,7
Deformación unitaria a la rotura	%	186,18	62,63	33,6

Tabla 16. Propiedades del filamento de PA/CF [Cam, 2021].

Propiedad	Unidad	Media	D.S.	C.V. (%)
Resistencia a la tracción	MPa	118,10	0,62	0,5
Módulo de elasticidad	MPa	2043,5	70,73	3,5
Deformación unitaria a la rotura	%	9,54	0,4	4,2

3.1.2. Análisis térmico

Para el análisis térmico a los filamentos de ABS, ABS/CF, PA y PA/CF se realizaron los ensayos de DSC y TGA cuyos resultados se muestran en las **Figuras 41, 42, 43 y 44**. En estas figuras se puede determinar la temperatura de transición vítrea y punto de fusión de los filamentos en base a la curva de línea continua que representa el ensayo DSC. La pérdida de masa de los materiales se determina de las curvas de línea discontinua que representan los ensayos TGA realizados. Por otro lado, el valor de la temperatura de degradación promedio se obtiene de la derivada de la curva de TG del gráfico y superponiendo a las demás. En la **Tabla 17**, se tiene un resumen de las propiedades obtenidas en base a los gráficos presentados para los 4 materiales.

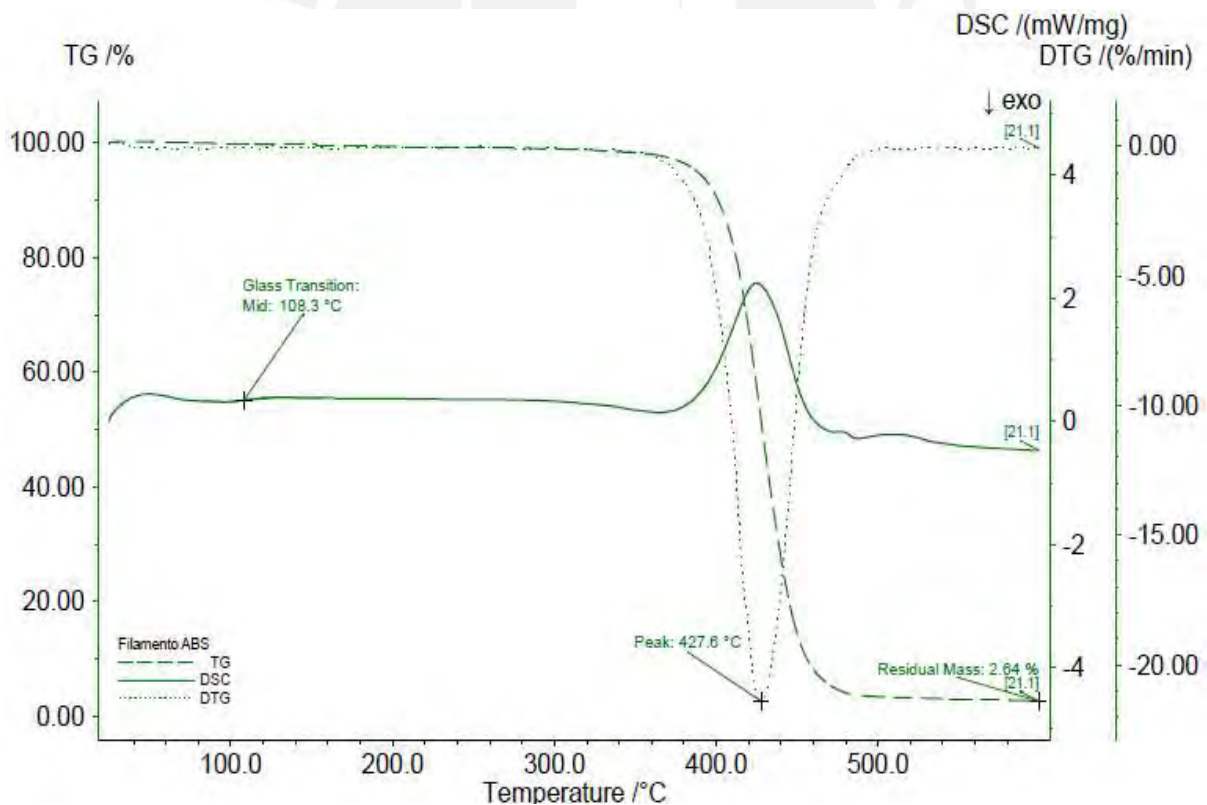
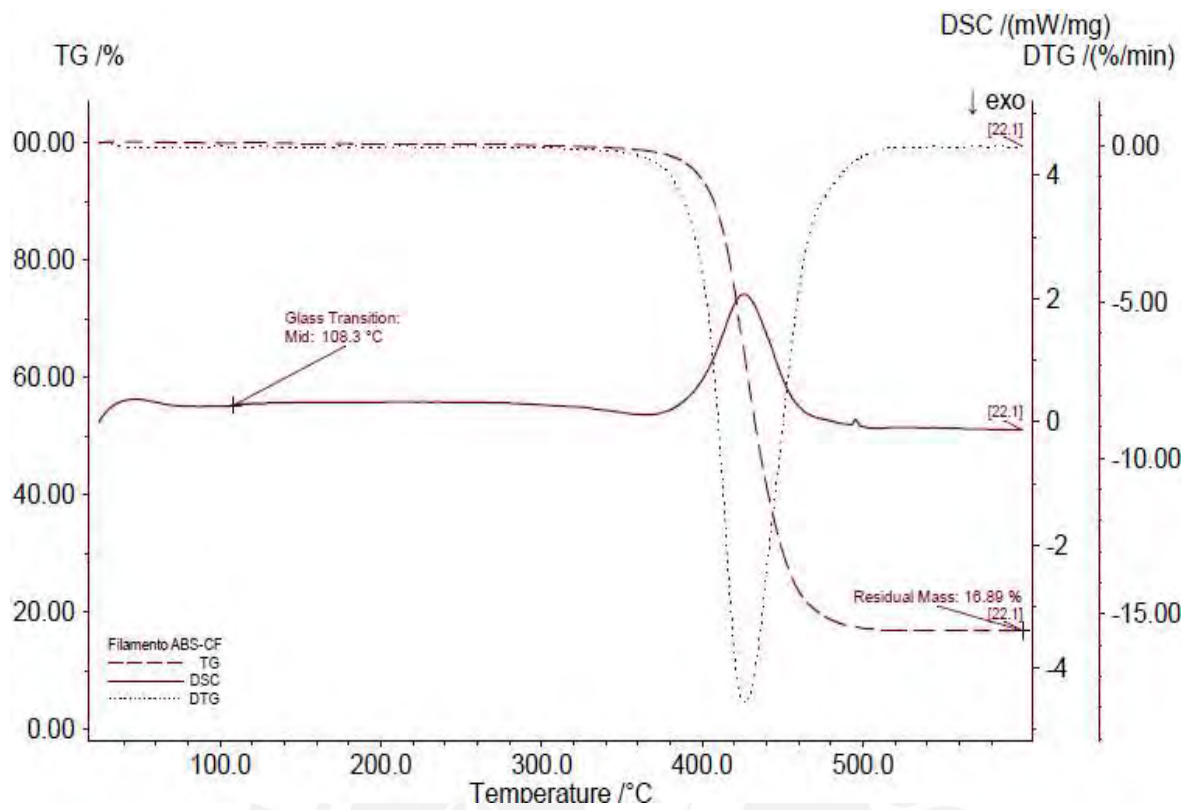


Figura 41. Curvas de análisis térmico para ABS [Cam, 2021].



3Figura 42. Curvas de análisis térmico para ABS/CF [Cam, 2021].

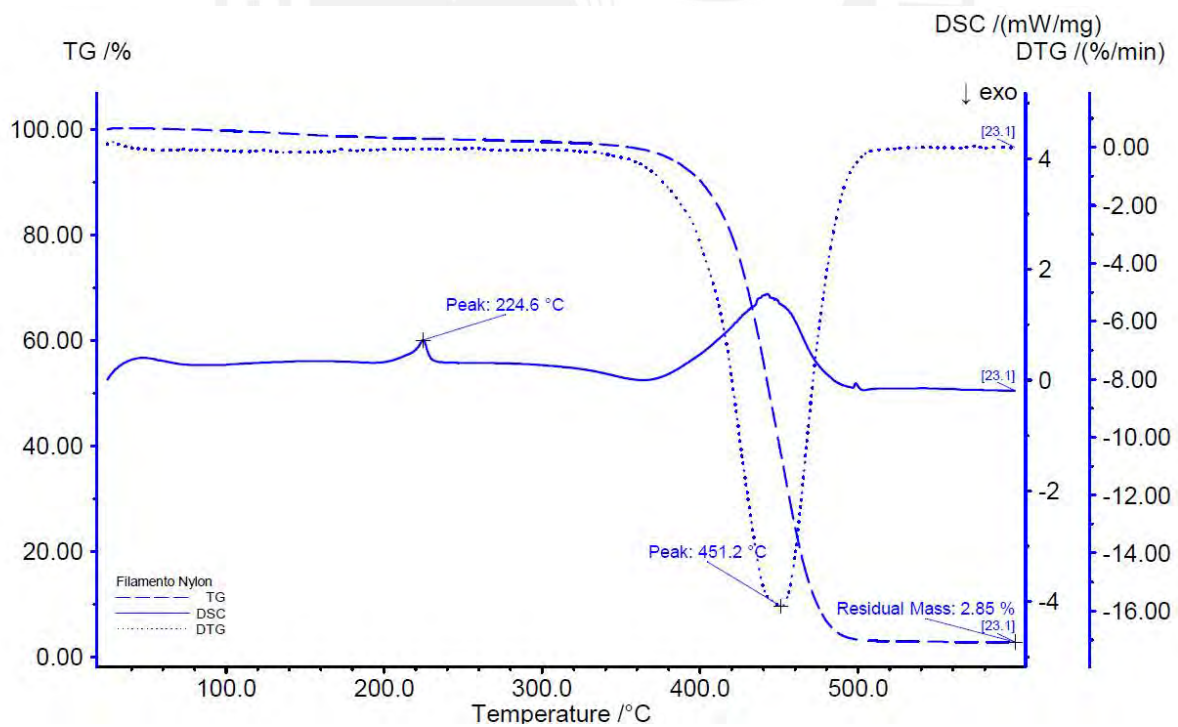


Figura 43. Curvas de análisis térmico para PA [Cam, 2021].

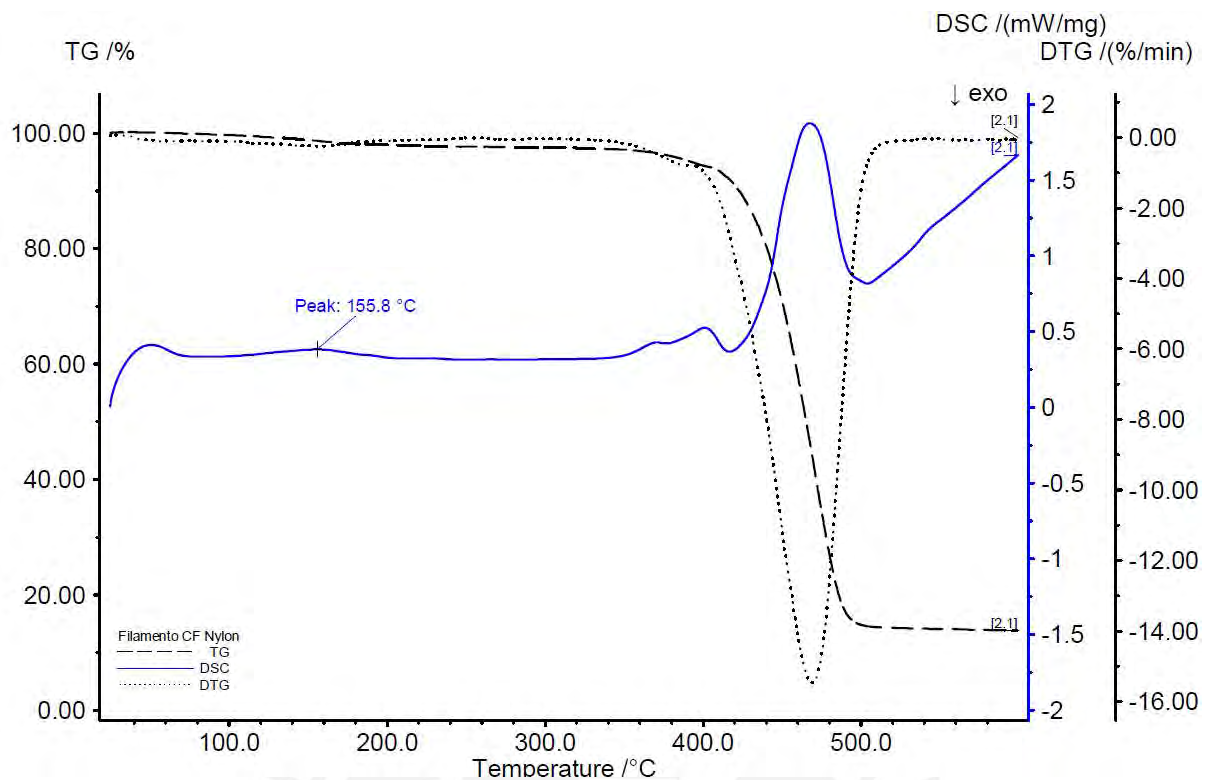


Figura 44. Curvas de análisis térmico para PA/CF [Cam, 2021].

Tabla 17. Resultados de análisis térmico(DSG y TGA) [Cam, 2021].

Material	Tg (°C)	Tf (°C)	Inicio de la degradación (°C)	Temperatura de degradación (°C)
ABS	108,3	-	340	427,6
ABS/CF	108,3	-	340	422,5
PA	105	224,6	360	451,2
PA/CF	105	155,8	360	470

De la tabla de resultados (**Tabla 16**) se deduce que la adición de fibras cortas de carbono en los materiales de ABS y PA no influye en la temperatura de transición del filamento debido a que no existe variación alguna en su valor entre el material sin refuerzo y con refuerzo. Sin embargo, se observa que existe una disminución de la temperatura de fusión del PA cuando se agrega el refuerzo de fibras. Como se explicó en el capítulo 2 del presente trabajo, esta disminución se debe a que las fibras de carbono permiten una mejor transferencia del calor en el material favoreciendo al movimiento de las cadenas poliméricas y por ello tiene una menor temperatura. En el caso del ABS, este filamento no tiene temperatura de fusión ya que tiene

una naturaleza amorfa. El resultado obtenido fue contradictorio en comparación a un ensayo realizado por Kazi en 2019, la adición de fibras de carbono en los polímeros de ABS y PA disminuyen la temperatura de transición vítrea debido a que este refuerzo aumenta la conductividad térmica de los polímeros y contribuyen a la disminución del valor de temperatura de transición vítrea en los compuestos. Sin embargo, esta diferencia se debe al porcentaje volumétrico de refuerzo de fibras de carbono que poseen los materiales empleados en ambos ensayos. [Kazi & Billah, 2019]

Por encima de las temperaturas de transición vítrea (ABS 108°C y PA 105°C) los materiales tendrán un comportamiento plástico (cauchoso) lo cual permitirá una mayor maleabilidad de estos elementos. Para la temperatura de impresión de los 4 materiales se deben considerar temperaturas por encima de la temperatura de fusión y menores a la temperatura de degradación. Para el ABS en el cual no existe una temperatura de fusión se considerará su comportamiento viscoso en función a la temperatura. En nuestro caso estos valores son los siguientes:

Tabla 18. Temperaturas de impresión seleccionadas para cada material

ABS	260°C
ABS/CF	280°C
PA	280°C
PA/CF	280°C

3.1.3. Índice de fluidez

Se procedió con los ensayos de índice de fluidez para el ABS, PA, ABS/CF y PA/CF cuyos resultados se muestran en las **Tablas 19 y 20**. En este ensayo se empleó los resultados obtenidos en los ensayos de DSC y TGA para determinar las 3 temperaturas a las cuales se ensayará el filamento. El análisis de este ensayo se realizó en función a la influencia de la adición de fibras de carbono en los materiales de ABS y PA en las propiedades de fluidez del

material. La comparación gráfica del material puro y reforzado se muestra en las **Figuras 45** (PA y PA/CF) y **46** (ABS y ABS/CF).

El análisis de los gráficos y tablas presentadas dan como resultado que la adición de refuerzo de fibra de carbono en los materiales presenta una mejora en el valor de índice de fluidez de los filamentos. Es decir, estos materiales compuestos disminuyen la viscosidad conforme aumenta la temperatura. Esta mejora es importante debido a que significa que el material compuesto fluirá con mayor facilidad en el proceso de impresión, por ende; se puede aumentar la velocidad de deposición del material para disminuir el tiempo de fabricación de piezas finales.

Tabla 19. Resultados obtenidos del ensayo de índice de fluidez para ABS y ABS/CF [Cam, 2021]

Material	Peso (kg)	Temperatura (°C).	Δt (s)	MFI		
				Prom.	D.E.	C.V. (%)
ABS	5	210	60	3,48	0,084	2,4
		230	30	9,25	0,213	2,3
		250	15	19,73	1061	5,4
ABS/CF	5	240	20	20,84	0,159	0,8
		260	10	37,36	1520	4,1
		280	8	66,27	0,697	1,0

Tabla 20. Resultados obtenidos del ensayo de índice de fluidez para PA y PA/CF [Cam, 2021]

Material	Peso (kg)	Temperatura (°C)	Δt (s)	MFI		
				Prom.	D.E.	C.V. (%)
PA	5	240	30	5,82	0,132	2,3
		260	20	6,97	0,119	1,7
		280	15	9,71	0,645	6,6
PA/CF	5	250	20	12,82	0,286	2,2
		270	10	30,16	2001	6,6
		290	10	66,60	0,173	0,3

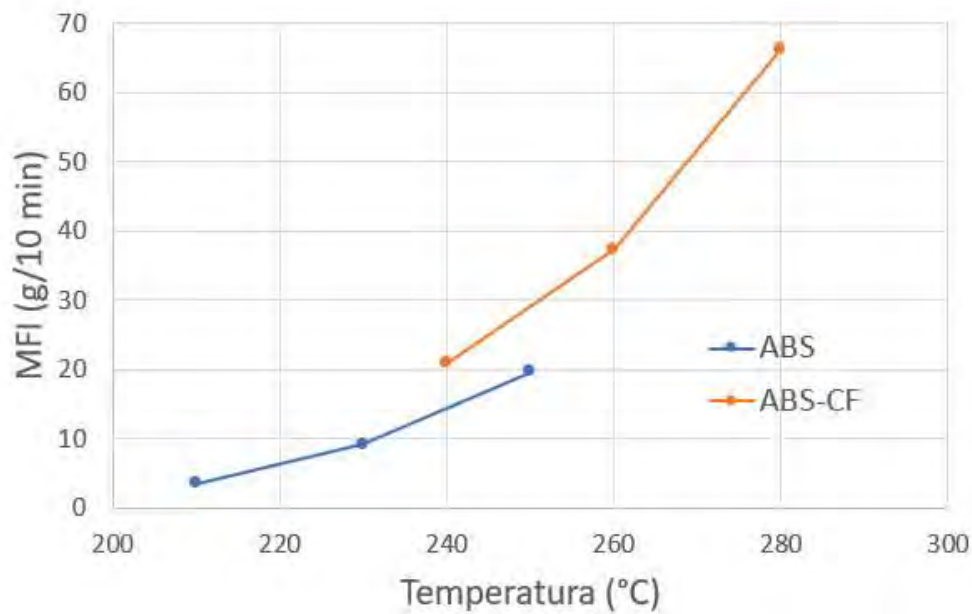


Figura 45. Gráfico de ensayo MFI para ABS y ABS/CF [Cam, 2021].

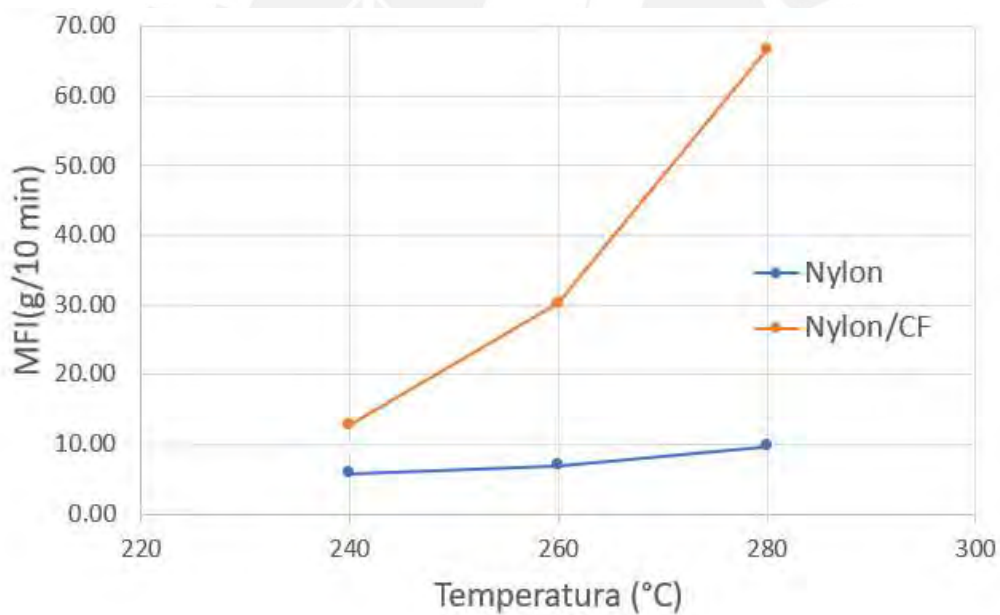


Figura 46. Gráfico de ensayo MFI para PA y PA/CF [Cam, 2021].

En las **Tablas 21** y **22** se presenta un resumen de las propiedades mecánicas y térmicas respectivamente obtenidas para los filamentos de ABS, PA y sus reforzados de la marca 3DXTECH.

Tabla 21. Propiedades mecánicas de los filamentos 3DXTECH de ABS,PA, ABS/CF y PA/CF [Cam, 2021].

Material	Propiedades Mecánicas	Norma	Unidades	Valor
ABS	Resistencia a la tracción	ISO 527	MPa	37,94
	Módulo de elasticidad	ISO 527	MPa	1758,9
	Deformación unitaria a la rotura	ISO 527	%	29,55
ABS/CF	Resistencia a la tracción	ISO 527	MPa	39,91
	Módulo de elasticidad	ISO 527	MPa	4064,36
	Deformación unitaria a la rotura	ISO 527	%	1,30
PA	Resistencia a la tracción	ISO 527	MPa	36,93
	Módulo de elasticidad	ISO 527	MPa	593,3
	Deformación unitaria a la rotura	ISO 527	%	186,18
PA/CF	Resistencia a la tracción	ISO 527	MPa	118,10
	Módulo de elasticidad	ISO 527	MPa	2043,5
	Deformación unitaria a la rotura	ISO 527	%	9,54

Tabla 22. Propiedades térmicas de los filamentos 3DXTECH de ABS,PA, ABS/CF y PA/CF [Cam, 2021].

Material	Propiedades Térmicas	Norma	Unidad	Valor
ABS	Temperatura de transición vítrea	ASTM D3418	°C	108,3
	Temperatura de fusión	ASTM D3418	°C	-
	Temperatura de degradación	ASTM E1131	°C	427,6

	Temperatura de transición vítrea	ASTM D3418	°C	108,3
ABS/CF	Temperatura de fusión	ASTM D3418	°C	-
	Temperatura de degradación	ASTM E1131	°C	422,5
	Temperatura de transición vítrea	ASTM D3418	°C	105
PA	Temperatura de fusión	ASTM D3418	°C	224,6
	Temperatura de degradación	ASTM E1131	°C	451,2
	Temperatura de transición vítrea	ASTM D3418	°C	105
PA/CF	Temperatura de fusión	ASTM D3418	°C	155,8
	Temperatura de degradación	ASTM E1131	°C	470

3.2. Ensayo de tracción de especímenes

Se realizaron los ensayos de tracción para los especímenes fabricados mediante FFF de ABS, PA y sus reforzados con fibras de carbono según el diseño experimental presentado en el anterior capítulo con la finalidad de obtener los gráficos de esfuerzo vs deformación unitaria en ambos ejes. Durante el proceso se observó que los ensayos para las orientaciones 3, 5 y 6 presentan una menor repetibilidad en los resultados a comparación de las orientaciones 1, 2 y 4. Esto se debe a que la carga aplicada solo es soportada por la adhesión entre capas y no el filamento directamente. Por lo tanto, los resultados obtenidos no se asemejarán a las curvas de ensayos de tracción ya conocidas.



Figura 47. Cura probeta orientación plano 2

Se tomará como ejemplo del proceso seguido a los ensayos realizados para ABS impreso en la orientación 2 (**Figura 47**). Los datos obtenidos de los ensayos de tracción fueron procesados a través de un programa realizado en Matlab en el cual se determinó el valor de los módulos elásticos para cada orientación. El código empleado para el procesamiento de la data obtenida se encuentra en el “Anexo 2”. Los gráficos originales obtenidos (**Figura 48 a**) fueron filtrados retirando algunos efectos propios de la instrumentación del ensayo de tracción y se obtuvo el gráfico de la **Figura 48 b**). A partir de estos valores se empleó una interpolación lineal para obtener valores que representen las 5 curvas y se graficó una curva única en la **Figura 48 c**). El valor del módulo elástico será la pendiente obtenida de una recta representativa de la parte lineal de la curva final. El resumen de los valores del módulo elástico para los 4 materiales y distintas orientaciones se presentan en la **Tabla 23**.

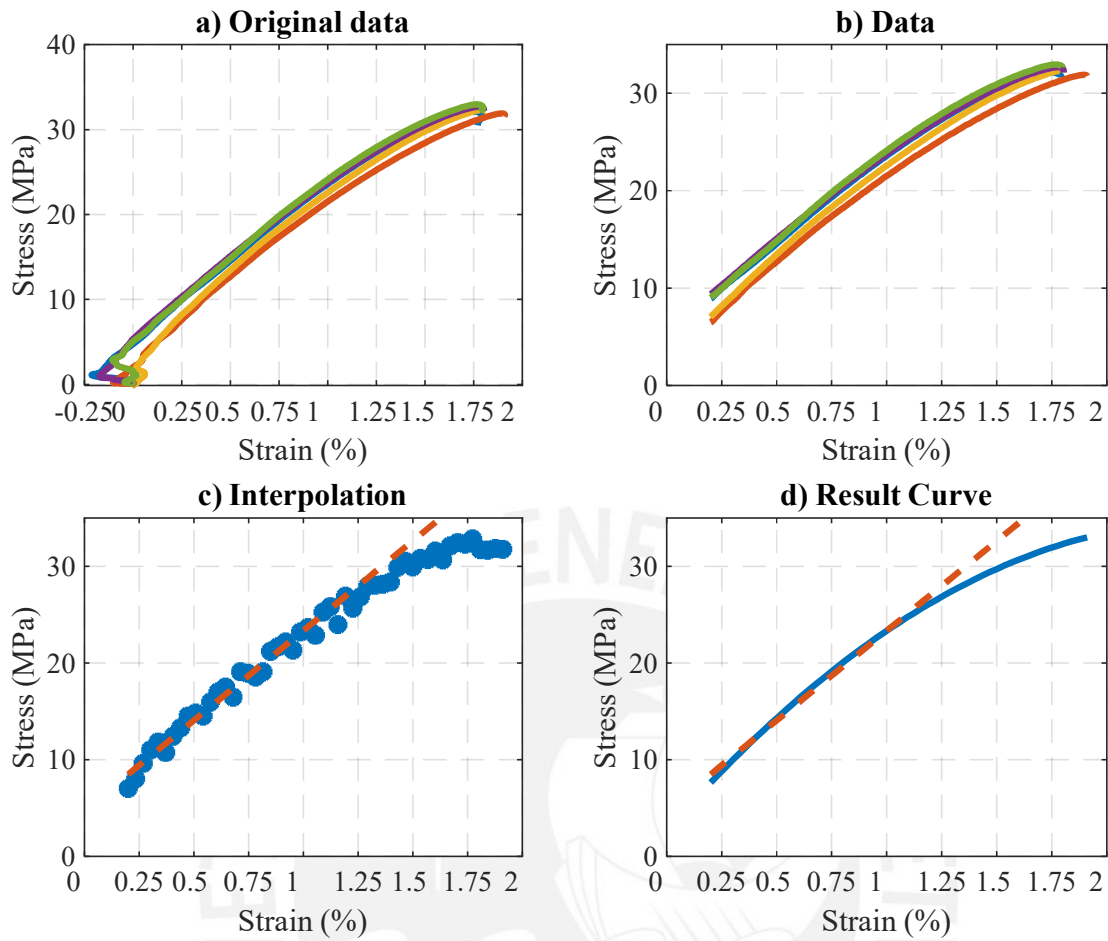


Figura 48. Curvas de ensayo de tracción para ABS con orientación plano 2

Tabla 23. Módulos elásticos promedios de las probetas ensayadas

Módulo elástico promedio de las probetas (MPa)				
Orientación	Materiales			
	PA	PA/CF	ABS	ABS/CF
Plano 1	1239	4204	1925	2834
Plano 2	1150	4483	1845	2705
Plano 3	1141	858	1181	855
Plano 4	1225	3625	1843	2018
Plano 5	930	1312	1009	757
Plano 6	887	1320	1155	1228

En la **Tabla 23** se observa un resumen de los valores obtenidos para los 4 materiales en las distintas orientaciones de impresión. En primer lugar, se observa que los especímenes fabricados con filamento de ABS tienen mayores valores de módulo elástico que los especímenes fabricados con PA. Este análisis es coherente con el análisis de caracterización de filamento realizado para ambos materiales en el cual se observó que el filamento de ABS posee un mayor valor de módulo elástico. Además, en la **Figura 49** se observa que la fractura para el espécimen fabricado con nylon presenta una menor deformación en el interior lo cual significa que la carga fue soportada mayormente por el contorno. Sin embargo, en el ABS se observa una deformación uniforme en la superficie fracturada lo cual significa que tanto el contorno como la parte interna soportaron la fuerza aplicada de manera efectiva.

Por otro lado, los resultados de la **Tabla 23** indica valores similares de módulo elástico para los especímenes de PA para las distintas orientaciones lo cual significa un comportamiento menos anisotrópico que el ABS. Los valores de estas tablas también evidencian que la adición de fibras cortas de carbono mejora la resistencia del material y los valores de módulo elástico para el ABS y PA (hasta 150% y 390% respectivamente). El mayor incremento de este valor se encuentra en los planos 1, 2 y 4 de impresión debido a que la fuerza aplicada a la probeta es soportada directamente por el refuerzo de fibras de carbono. En el plano 3, se observa una disminución del valor de módulo elástico cuando se agrega este refuerzo. Esta disminución es coherente a un estudio realizado por Zhang en 2017 en el cual se determinó que la disminución de la resistencia del material en el plano perpendicular de impresión (plano 3) se debe a que la adición de estas fibras incrementa la porosidad del espécimen fabricado y por lo tanto la resistencia de este. [Zhang, 2017]

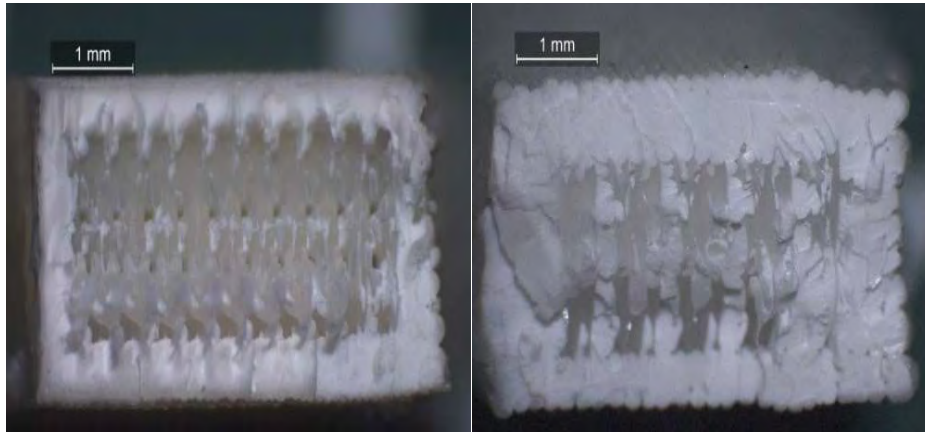
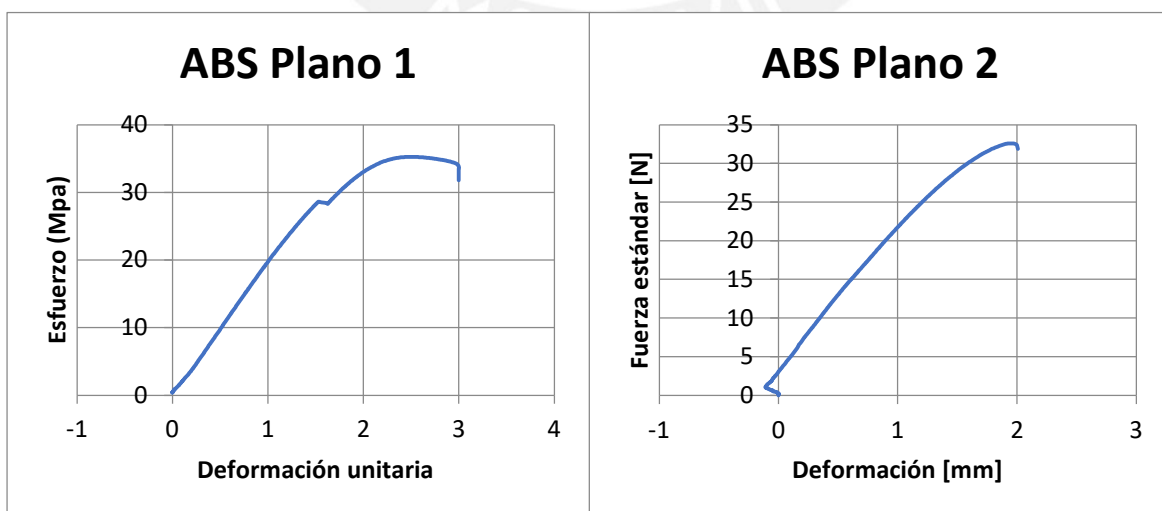


Figura 49. Superficie fracturada a los especímenes ensayados de ABS (izquierda) y PA (derecha) Plano 2.

En la **Figura 50** se muestran las gráficas obtenidas de los ensayos para los especímenes fabricados con ABS para las 6 orientaciones. De estas curvas se deduce que las orientaciones 1, 2 y 4 presentan los mayores valores de máximo esfuerzo debido a que la forma de deposición del filamento en el espécimen permite que la carga aplicada sea soportada directamente el filamento. En cambio, para las orientaciones de 3, 5 y 6 los valores de esfuerzo máximo son menores ya que el filamento no soporta directamente la fuerza de tensión. Además, el espécimen fabricado en la orientación 3 presenta una curva de tendencia lineal que es característica de los materiales frágiles debido a que la deposición del material para esta pieza se realiza de manera perpendicular a la superficie de impresión.



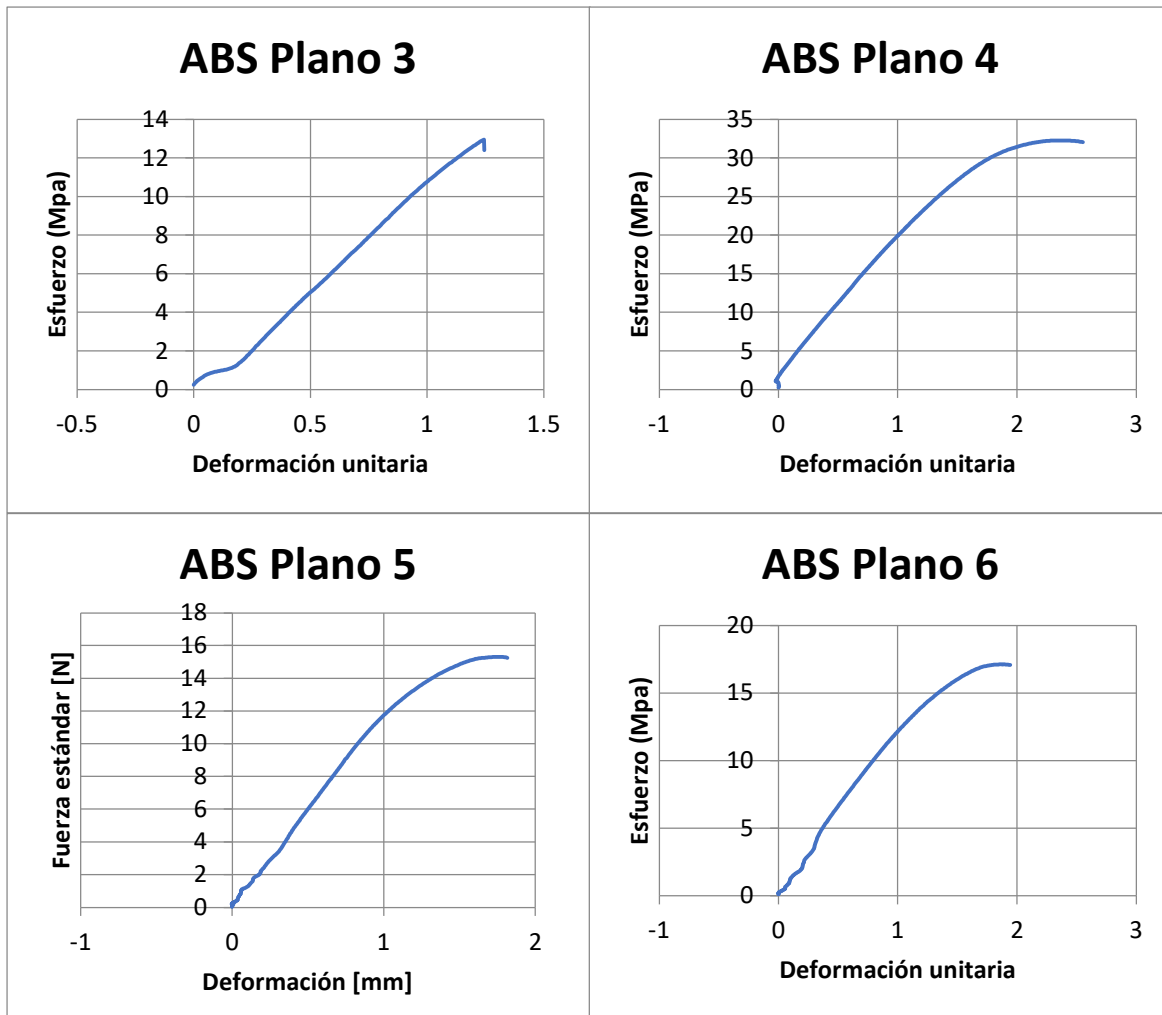


Figura 50. Curvas Esfuerzo vs Deformación ABS

Los coeficientes de Poisson para los 4 materiales se obtendrán a partir de los datos obtenidos de las galgas extensiométricas mencionadas en el anterior capítulo. Como se observa en la **Figura 51**, la data obtenida de cada dirección fue procesada mediante un código de Matlab. Como se observa en la primera y segunda imagen, se redujo el análisis solo al área de interés. En la tercera imagen se filtró la data adicional característica del propio equipo empleado. Por último, se obtuvo la pendiente de las rentas obtenidas cuya división corresponderá a los valores de los coeficientes de Poisson.

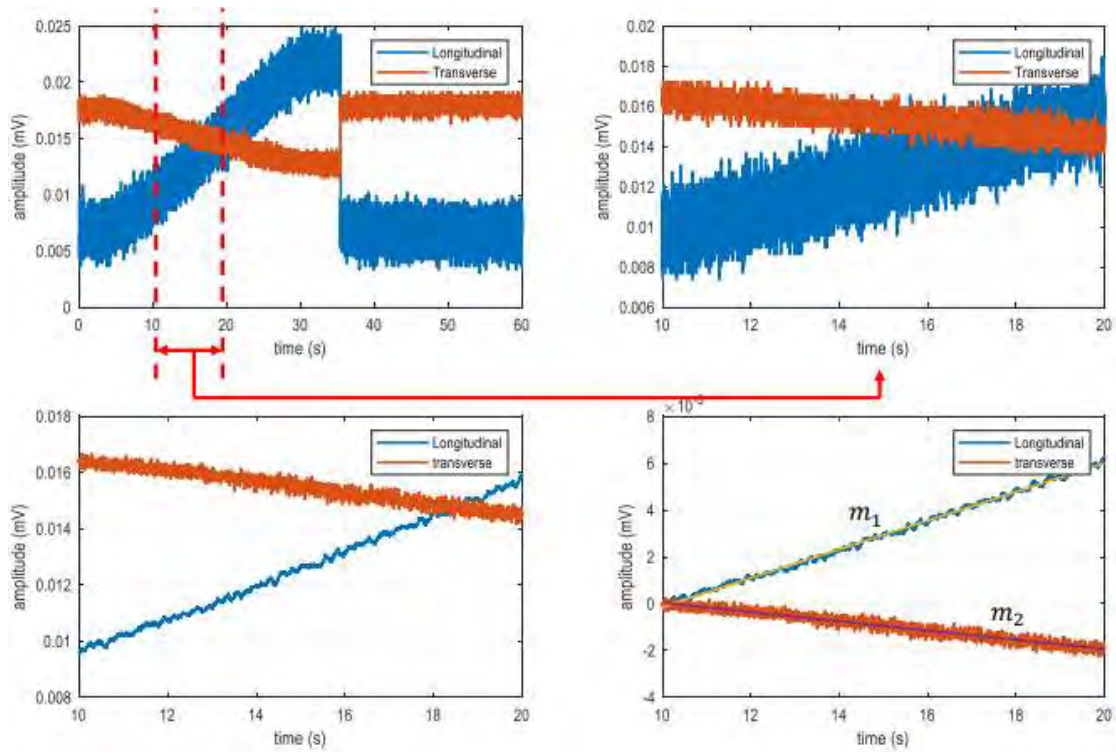


Figura 51. Procesamiento de datos en Matlab para obtener los coeficientes de Poisson del ABS plano 2.

Tabla 24. Coeficientes de Poisson de los 4 materiales

Poisson	Material			
	ABS	ABS/CF	PA	PA/CF
ν_{xy}	0.30	0.37	0.37	0.35
ν_{yz}	0.34	0.39	0.31	0.32
ν_{xz}	0.34	0.22	0.33	0.22

Según la metodología experimenta explicada en el anterior capítulo, se hallarán las siguientes constantes elásticas que definirán el comportamiento anisotrópico de los materiales: módulo elástico (E), coeficiente de Poisson (ν) y módulo de corte (G). El módulo de corte se hallará con siguiente ecuación descrita en el capítulo anterior:

$$G_{ij} = \left[\frac{4}{E_{ij}^{45^\circ}} - \frac{1}{E_i} - \frac{1}{E_j} + \frac{2\nu_{ij}}{E_i} \right]^{-1}$$

Empleando la anterior ecuación, se obtendrán las 9 constantes elásticas para los 4 materiales ensayados que rigen el comportamiento mecánico. Estos valores se presentan en la **Tabla 25.**

Tabla 25. Constantes elásticas FDM

Constante Elástica	Materiales			
	ABS	ABS/CF	PA	PA/CF
Ex (MPa)	1925	2834	1239	4204
Ey (MPa)	1845	2705	1150	4483
Ez (MPa)	1181	855	1141	858
Gxy (MPa)	673	637	457	1236
Gyz (MPa)	338	246	323	554
Gxz (MPa)	374	486	297	577
Vxy	0.30	0.37	0.37	0.35
Vyz	0.34	0.39	0.31	0.32
Vxz	0.34	0.22	0.33	0.22

Los valores de constantes elásticas obtenidas previamente permitirán predecir el comportamiento de los especímenes fabricados mediante FFF de PA, ABS, PA/CF y AB/CF ante la aplicación de cargas en cualquier dirección tridimensional. En base a los resultados obtenidos se deduce que el material más adecuado a emplear en piezas que se encuentren sometidas a cargas mecánicas es el PA/CF. Sin embargo, el diseño y fabricación mediante filamento fundido de la pieza se debe orientar en función a la dirección de aplicación de las cargas ya que, como se observa en la **Tabla 25**, la rigidez de la pieza en el eje z será menor que para las otras direcciones.

Conclusiones



Se han fabricado especímenes mediante fabricación por filamento fundido (FFF) de poliamida (PA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y sus reforzados con fibras cortas de carbono, para distintas orientaciones de impresión a partir de parámetros óptimos para estos 4 materiales: temperatura de impresión, velocidad de deposición, patrón de impresión y altura de capa. Estos especímenes se han caracterizado mediante ensayos de tracción y se ha demostrado que tienen un comportamiento anisotrópico con propiedades resultantes diferentes para cada tipo de material estudiado.

Los filamentos empleados en el presente trabajo poseen un módulo de elasticidad de 1758 MPa y 593 MPa para el ABS y PA respectivamente. Para los filamentos fabricados con matriz polimérica y refuerzo de fibras de carbono, se obtuvo un módulo elástico de 4464 MPa y 2043 MPa para ABS/CF y PA/CF respectivamente. Por ello, se concluye que la adición de fibras cortas de carbono mejora los valores de módulo elástico en 154% para el ABS y 244% para PA.

Los análisis térmicos (DSC y TGA) realizados dan como resultado valores de transición vítrea de 108°C para el ABS y ABS/CF y 105°C para PA y PA/CF. La adición de fibras de carbono en estos materiales no influye en el valor de esta propiedad.

Los ensayos de índice de fluidez determinaron que la adición de fibras de carbono en los filamentos de PA y ABS aumentan el valor de índice de fluidez de estos materiales. Es decir que conforme aumente la temperatura, los filamentos reforzados presentarán un comportamiento menos viscoso que los polímeros sin refuerzo.

Se seleccionaron los principales parámetros y sus valores óptimos para la fabricación de probetas. Para el filamento de: PA, PA/CF y ABS/CF: velocidad de deposición 30mm/s, temperatura de extrusión 280 °C, altura de capa de 0.1 mm; ABS: velocidad de disposición de

40 mm/s, temperatura de extrusión de 260°C, altura de capa de 0.2mm. Para los 4 materiales se empleó el mismo patrón de impresión: [0,45,90,135]°

El ensayo de tracción de los especímenes fabricados mediante filamento fundido de PA, ABS, PA/CF y ABS/CF para distintas orientaciones, dieron como resultado que los especímenes fabricados con ABS poseen mejores propiedades mecánicas a comparación de la PA. Sin embargo, las propiedades mecánicas de la PA presentan una menor variación de propiedades mecánicas en función a la orientación. Estas propiedades se han obtenido a partir de los valores encontrados en los ensayos de tracción realizados a los especímenes. Como resultado se obtuvo los siguientes valores:

Constante Elástica	Materiales			
	ABS	ABS/CF	PA	PA/CF
Ex (MPa)	1925	2834	1239	4204
Ey (MPa)	1845	2705	1150	4483
Ez (MPa)	1181	855	1141	858
Gxy (MPa)	673	637	457	1236
Gyz (MPa)	338	246	323	554
Gxz (MPa)	374	486	297	577
Vxy	0.30	0.37	0.37	0.35
Vyz	0.34	0.39	0.31	0.32
Vxz	0.34	0.22	0.33	0.22

La adición de fibras de carbono en ambos materiales, incrementan el valor de módulo elástico en direcciones donde la carga y la orientación de impresión son paralelas (hasta 3.9 y 1.5 veces para PA y ABS respectivamente). Para los especímenes fabricados en orientaciones donde la adhesión es la principal resistencia a la carga (planos 3, 5 y 6), no se observa un incremento sustancial en el valor de módulo elástico y, en algunos casos, el valor disminuye respecto al termoplástico sin refuerzo (incremento máximo de 1.5 y 1.06 veces para PA y ABS respectivamente).

Los valores hallados de módulo elástico para los especímenes fabricados con los 4 materiales para el plano 3 presentan los mínimos valores de módulo. Por ello, se evidencia que la resistencia de la adhesión entre capa y capa para los materiales evaluados es muy baja.

Los materiales de PA/CF y ABS/CF presentan una disminución de valor de módulo elástico para la orientación 3 (858 y 855 MPa respectivamente) en comparación a los valores de PA y ABS (1141 y 1181 MPa respectivamente). Esta disminución se debe a que la resistencia para estas orientaciones depende de la adhesión entre capa y capa depositada; la cual es probablemente afectada por la formación de poros producto de la adición de fibras cortas de carbono.



Observaciones y recomendaciones



Para la fabricación de piezas las cuales se encuentren sometidas a cargas constantes, se debe emplear los filamentos de PA reforzados con fibras de carbono e imprimir en direcciones tal que los filamentos soporten la carga de manera directa para obtener una mejor resistencia.

El proceso de fabricación de filamento fundido para filamentos compuestos con fibras de carbono requiere de ciertas modificaciones en el equipo a emplear, de una selección más rigurosa de parámetros de impresión y de un ambiente controlado para evitar fallas en las piezas finales que evitarían obtener los valores máximos de propiedades mecánicas.

Emplear un equipo con la plataforma caliente durante el proceso disminuye los errores debido a la contracción volumétrica de los termoplásticos y filamentos reforzados. Sin embargo, conforme la temperatura de impresión aumenta, este fenómeno es más visible debido a la diferencia de temperaturas entre la superficie y la boquilla. Por ello se recomienda emplear un ambiente controlado cuando se empleen materiales que requieren de una alta temperatura como nylon y filamentos reforzados.

El uso de un equipo de fabricación por filamento fundido de grado industrial permitiría fabricar los especímenes con un mejor acabado superficial y una adecuada deposición de las capas, sobre todo, cuando se imprime en orientación vertical o en diagonal.

Bibliografía



- 3D HUBS. (2019). How does part orientation affect a 3D print? Consulta 06 de junio de 2019
<https://www.hubs.com/knowledge-base/how-does-part-orientation-affect-3d-print/>
- 3D Natives. (2019) 3D Hubs helps Fillauer Composites create carbon-fiber prosthetic feet.
 Consulta 26 de abril de 2019. <https://www.3dnatives.com/en/3d-hubs-services-031120195/#>
- 3DXTECH. (2020). Featured 3D Printing Filaments. Consulta 05 de mayo de 2019.
<https://www.3dxtech.com/>
- Aurora Labs. High-Powered 3D Printing Technology for Industrial Applications. Consulta 15 de
 abril de 2019. <https://www.auroralabs3d.com/>
- Abrate, S. (1986). The Mechanics of Short Fiber-Reinforced Composites: A Review. *Rubber
 Chemistry and Technology*. 59. 384-404. <https://doi.org/10.5254/1.3538207>
- Acosta. (2020). *Materiales Compuestos: Introducción*. Consulta 20 de junio de 2019.
- Adams, R. & Peppiatt, N. (1974). Stress Analysis of Adhesive-Bonded Lap Joints. *The Journal of
 Strain Analysis for Engineering Design*. 9. 185-196.
<https://doi.org/10.1243/03093247V093185>
- Advanced Manufacturing Systems and Innovative Product Design. *Lecture Notes in Mechanical
 Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9853-1_41
- Alhashmy, Hasan. (2020). Fabrication of Aluminium Matrix Composites (AMCs) by Squeeze
 Casting Technique Using Carbon Fiber as Reinforcement. <http://dx.doi.org/10.20381/ruor-5290>
- Aliotta, Laura & Lazzeri, Andrea. (2019). A proposal to modify the Kelly-Tyson equation to
 calculate the interfacial shear strength (IFSS) of composites with low aspect ratio fibers.
Composites Science and Technology. 186. 107920.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107920>
- ALL3DP. (2019). What is FDM 3D printing? Consulta 06 de junio de 2019.
<https://all3dp.com/2/fused-deposition-modeling-fdm-3d-printing-simply-explained/>
- ALL3DP. (2019). Ultimaker Cura Software. Consulta 21 de abril de 2019.
<https://all3dp.com/topic/ultimaker-cura-software/>
- Attaran, Mohsen. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over
 traditional manufacturing. *Business Horizons*. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>

- Barone, Sandro & Neri, Paolo & Paoli, Alessandro & Razionale, Armando & Francesco, Tamburrino. (2019). Development of a DLP 3D printer for orthodontic applications. *Procedia Manufacturing*. 38. 1017-1025. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.187>
- Bähr, F., & Westkämper, E. (2018). Correlations between influencing parameters and quality properties of components produced by fused deposition modeling. *Procedia CIRP*, 72(1), 1214-1219. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.048>
- Bellini, A., & Güçeri, S. (2003). Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*, 9(4), 252-264. <https://doi.org/10.1108/13552540310489631>
- Bharti, Prem & Khan, Minhaj & Harbinder, Singh. (2010). Recent methods for optimization of plastic injection molding process—a retrospective and literature review. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2. https://www.researchgate.net/publication/50346402_Recent_methods_for_optimization_of_plastic_injection_molding_process-a_retrospective_and_literature_review
- Burkhardt, C., Freigassner, P., Weber, O., Imgrund, P., & Hampel, S. (2016). Fused filament fabrication (FFF) of 316L Green Parts for the MIM process. In *European Congress and Exhibition on Powder Metallurgy. European PM Conference Proceedings* (pp. 1-7). The European Powder Metallurgy Association. https://www.researchgate.net/publication/348446678_World_PM2016_-AM_-Deposition_Technologies_Fused_Filament_Fabrication_FFF_of_316L_Green_Parts_for_the_MIM_process
- Cam Chiang, Luis Felipe. (2021). Determinación de parámetros de fabricación mediante el proceso de modelado por deposición fundida con poliamida y poliamida reforzada con fibras de carbono según la metodología de Taguchi. Tesis para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/21165>
- Carlos Pérez Berral (2019). Numerical Simulation of the performance of structural components fabricated by AM. Escola de Camins.
- Crawford R.J., (1981) *Plastics Engineering* Capitulo 4 (Edición número 3). Editorial: Elsevier 1998.
- Creality 3D. Fused Filament 3D Printers. Consulta 16 de abril de 2019 <https://www.creality3dofficial.com/>

- Domingo, Miquel & Puigoriol, J.M. & Garcia-Granada, Andres-Amador & Llumà, Jordi & Borrós, Salvador & Reyes, Guillermo. (2015). Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials & design*. 83. 670–677. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.074>
- FABBALOO. (2020). How to: Persistent 3D print failure? Here's What to look for. Consulta 20 de junio de 2019. <https://www.fabbaloo.com/2017/11/how-to-persistent-3d-print-failure-heres-what-to-look-for>
- Ferreira, Rafael & Amatte, Igor & Dutra, Thiago & Bürger, Daniel. (2017). Experimental characterization and micrography of 3D printed PLA and PLA reinforced with short carbon fibers. *Composites Part B: Engineering*. 124. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.05.013>
- Gunaydin, Kadir & Türkmen, Halit. (2018). Common FDM 3D Printing Defects. https://www.researchgate.net/publication/326146283_Common_FDM_3D_Printing_Defects
- Hanana, Fatima Ezzahra & Rodrigue, Denis. (2015). Rotational Molding of Polymer Composites Reinforced with Natural Fibers. *Plastics Engineering*. 71. 28-31. <https://doi.org/10.1002/j.1941-9635.2015.tb01960.x>
- Handal, Raed. (2017). An implementation framework for additive manufacturing in supply chains. *Journal of Operations and Supply Chain Management*. 10. 18. <https://doi.org/10.12660/joscmv10n2p18-31>
- Krishnanand, Taufik, M. (2021). Fused Filament Fabrication (FFF) Based 3D Printer and Its Design: A Review. In: Deepak, B.B.V.L., Parhi, D.R.K., Biswal, B.B. (eds) http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-9853-1_41
- Kumar, S. and Kruth, J. (2010) Composites by Rapid Prototyping Technology. *Materials & Design*, 31, 850-856. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.045>
- Lammens, Nicolas & Kersemans, Mathias & De Baere, Ives & Van Paepegem, Wim. (2016). On the visco-elasto-plastic response of additively manufactured polyamide-12 (PA-12) through selective laser sintering. *Polymer Testing*. 57. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.11.032>

- Love, Lonnie & Kunc, Vlastamil & Rios, Orlando & Duty, Chad & Elliott, Amelia & Post, Brian & Smith, Rachel & Blue, Craig. (2014). The importance of carbon fiber to polymer additive manufacturing. *Journal of Materials Research*. 29. 1893-1898. <https://doi.org/10.1557/jmr.2014.212>
- MatterHackers, PrintDry Filament Drying System. Consulta 15 de mayo de 2019 <https://www.matterhackers.com/store//printdry-filament-drying-system/sk/MNXQRWQC>
- MyMiniFactory. (2020). Ultimate Guide to 3D Printing with MiniFactory Consulta 10 de junio de 2020. <https://www.myminifactory.com/de/stories/ultimate-guide-to-3d-printing-with-myminifactory>
- Martí Rodríguez, B. (2017). Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/106056>
- Md, Kazi & Billah, Kazi & Lorenzana, Fernando & Martinez, Nikki & Chacon, Sarah & Wicker, Ryan & Espalin, David. (2019). Thermal Analysis of Thermoplastic Materials Filled with Chopped Fiber for Large Area 3D Printing. https://www.researchgate.net/publication/341278269_Thermal_Analysis_of_Thermoplastic_Materials_Filled_with_Chopped_Fiber_for_Large_Area_3D_Printing
- Melenka, Garrett & Cheung, Benjamin & Schofield, Jonathon & Dawson, Michael & Carey, Jason. (2016). Evaluation and Prediction of the Tensile Properties of Continuous Fiber-Reinforced 3D Printed Structures. *Composite Structures*. 153. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.018>
- Mettler Toledo. Balanza analítica ME204. Consulta 20 de abril de 2020 https://www.mt.com/es/es/home/products/Laboratory_Weighing_Solutions/analytical-balances/ME204.html
- Mitutoyo. Mitutoyo digital caliper. Consulta 15 de mayo de 2019 <https://www.mitutoyo.com/products/small-tool-instruments-and-data-management/calipers/digimatic-calipers/absolute-digimatic-caliper/>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 143, 172-196 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>

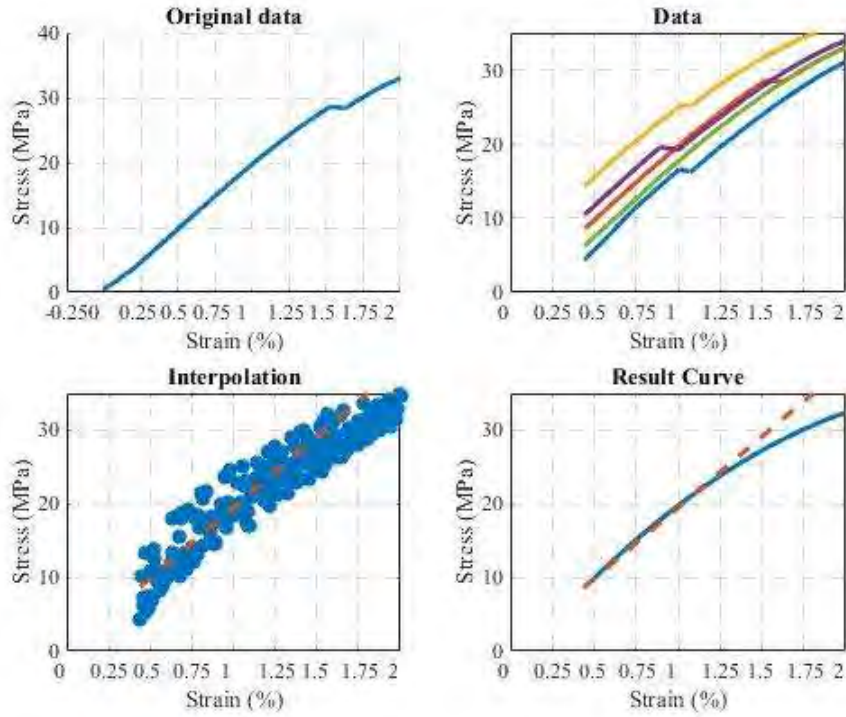
- Nugent, P. (2016). Rotational Molding. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00015-8>.
- Ogila, Kennedy & Shao, M. & Yang, W. & Tan, J... (2017). Rotational molding: A review of the models and materials. *Express Polymer Letters*. 11. 778-798. <http://dx.doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.75>.
- Paolini, Alexander & Kollmannsberger, Stefan & Rank, Ernst. (2019). Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100894>
- P.K, Bharti & Khan, M. & Harbinder, Singh. (2010). Recent methods for optimization of plastic injection molding process—a retrospective and literature review. *International Journal of Engineering Science and Technology*. https://www.researchgate.net/publication/50346402_Recent_methods_for_optimization_of_plastic_injection_molding_process-a_retrospective_and_literature_review
- Polymaker. (2020). PolyMax PLA. Consulta 06 de junio de 2020. <https://polymaker.com/product/polymax-pla/>
- Popescu, D., Zapciu, A., Amza, C., Baci, F., & Marinescu, R. (2018). FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review. *Polymer Testing*, 69, 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.05.020>
- Print dry. Print Dry filament dryer. Consulta 05 de mayo de 2019 <https://www.printdry.com/product/printdry-filament-dryer/>
- Rengier, F. & Mehndiratta, Amit & Von Tengg-Kobligk, Hendrik & Zechmann, Christian & Unterhinninghofen, Roland & Kauczor, Hans-Ulrich & Giesel, Frederik. (2010). 3D printing based on imaging data: Review of medical applications. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 5. 335-341. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11548-010-0476-x>
- Singh, R. & Singh, S. (2017). Additive Manufacturing: An Overview <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.04165-5>
- Sreekumar, P.A. & Thomas, Selvin & Saiter, J. & Joseph, Kuruvilla & Unnikrishnan, G. & Thomas, Sabu. (2009). Effect of fiber surface modification on the mechanical and water absorption characteristics of sisal/polyester composites fabricated by resin transfer molding. *Composites Part: A Applied Science and Manufacturing*. 40. 1777-1784. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.08.013>

- Svečko, Rajko & Kusić, Dragan & Kek, Tomaž & Sarjaš, Andrej & Hančič, Aleš & Grum, Janez. (2013). Acoustic Emission Detection of Macro-Cracks on Engraving Tool Steel Inserts during the Injection Molding Cycle Using PZT Sensors. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 13. 6365-6379. <https://doi.org/10.3390/s130506365>
- Szykiedans, Ksawery & Credo, Wojciech. (2016). Mechanical Properties of FDM and SLA Low-cost 3-D Prints. *Procedia Engineering*. 136. 257-262. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.207>
- Tatara, Robert. (2011). Compression Molding. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-3514-7.10017-0>
- Tatara, R. A. (2017). Compression Molding. *Applied Plastics Engineering Handbook*, 291–320. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00014-6>
- ULTIMAKER.(2019) Ultimaker 3 printer. Consulta 05 de mayo de 2019 <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-3>
- V.D. Azzi, S.W. Tsai, Anisotropic strength of composites, *Exp. Mech.* 5 (9) (1965) 283–288. <https://doi.org/10.1007/BF02326292>
- Volpato, N., Aguiomar Foggiatto, J., & Coradini Schwarz, D. (2014). The influence of support base on FDM accuracy in *Z. Rapid prototyping journal*, 20(3), 182-191. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2012-0116>
- Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering, 2012*. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>
- XYZ printing. (2020). Ultimaker Cura Software. Consulta 30 de mayo de 2019. <https://www.xyzprinting.com/es-ES/home>
- Zhang, Wei & Cotton, Chase & Sun, Jessica & Heider, Dirk & Gu, Bohong & Sun, Baozhong & Chou, Tsu-Wei. (2017). Interfacial bonding strength of short carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene composites fabricated by fused deposition modeling. *Composites Part B: Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.018>

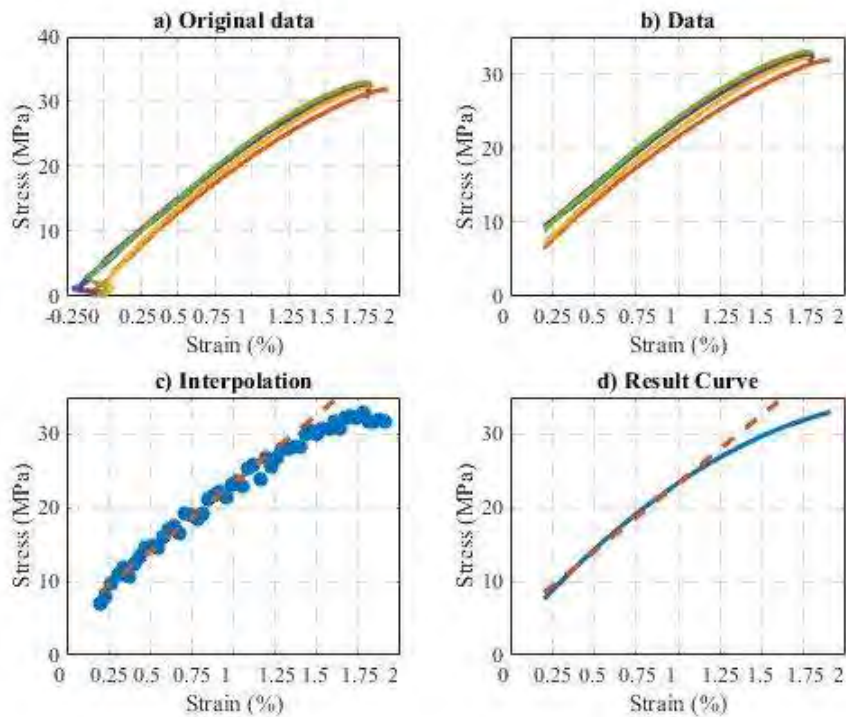
Anexo A
Resultados de los ensayos



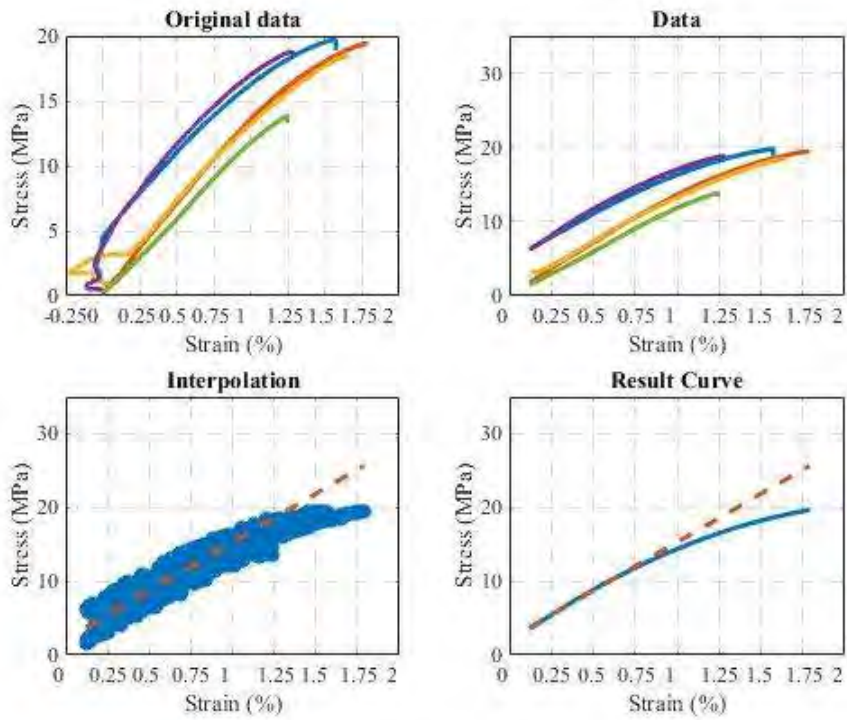
ABS-D1



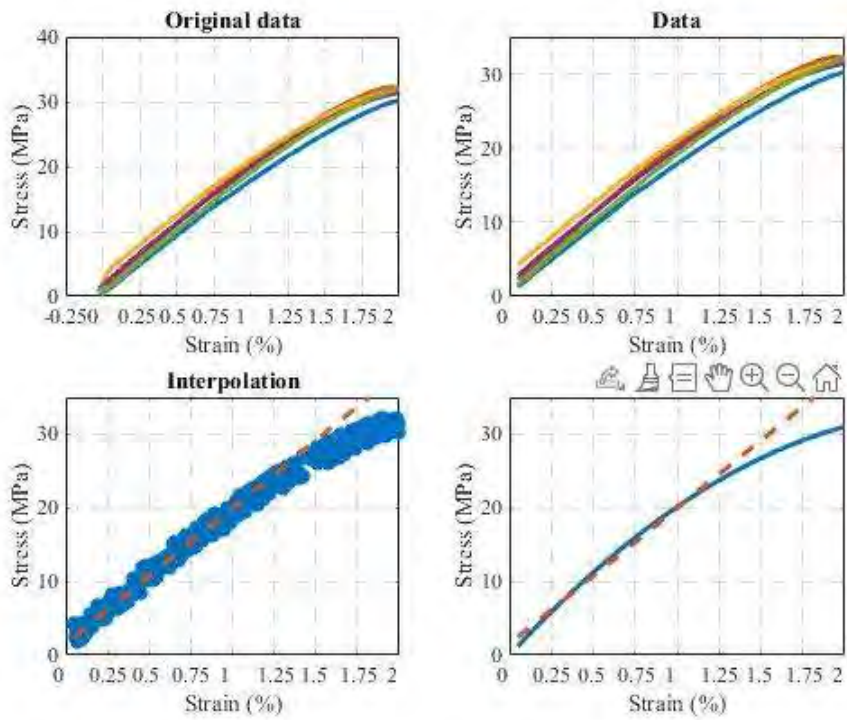
ABS-D2



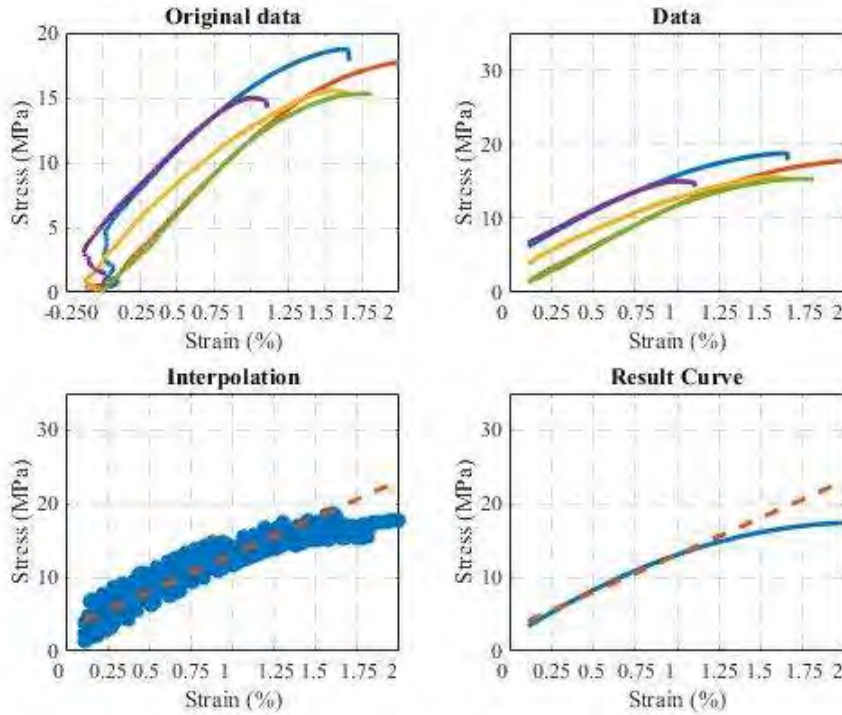
ABS-D3



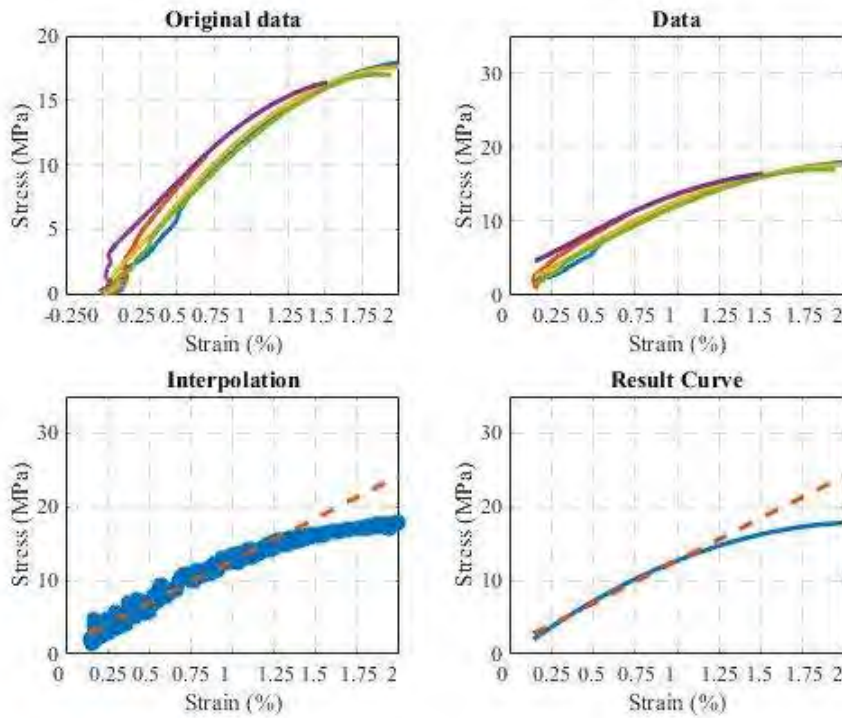
ABS-D4



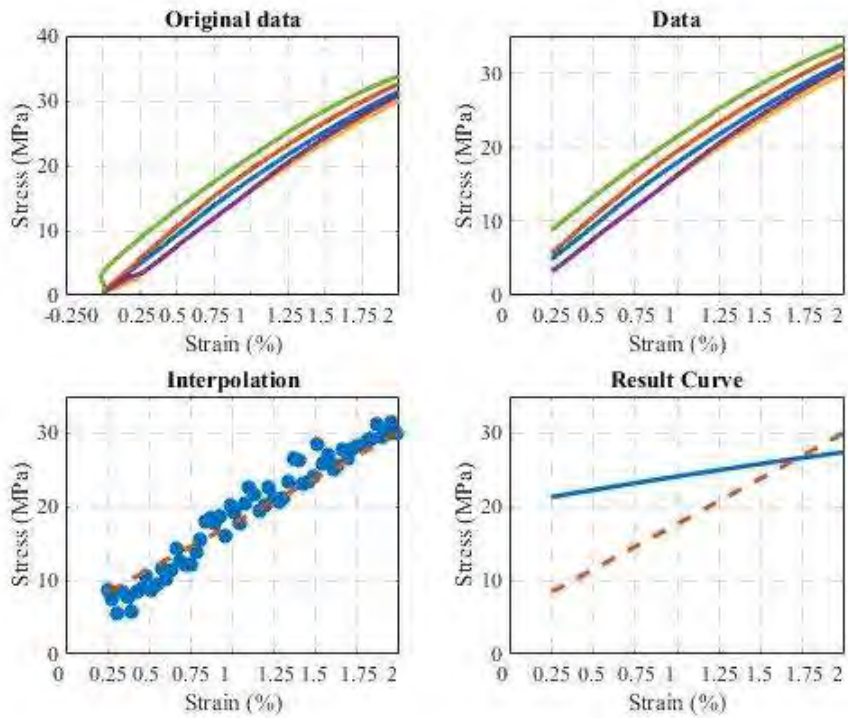
ABS-D5



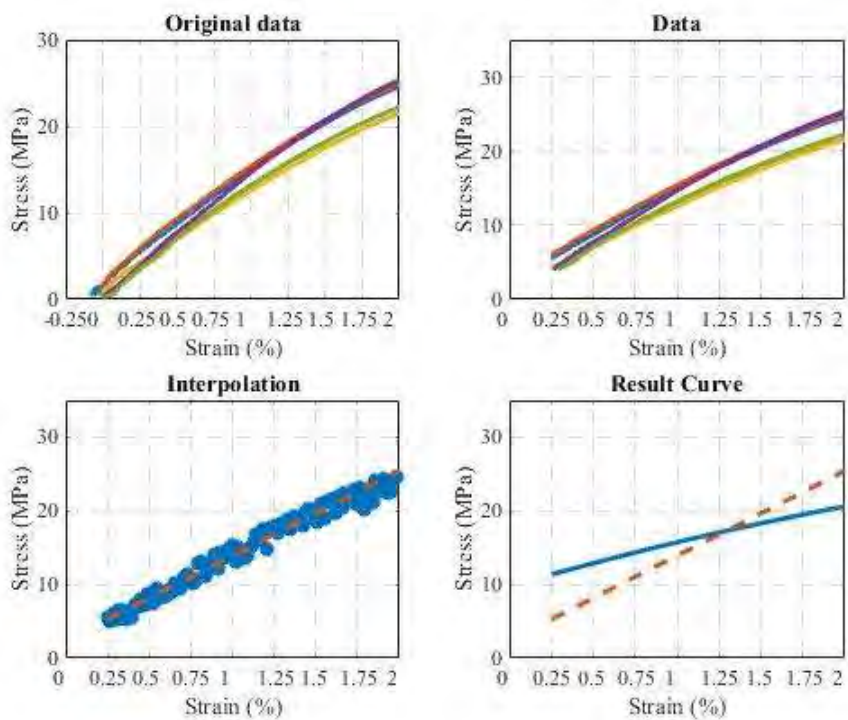
ABS-D6



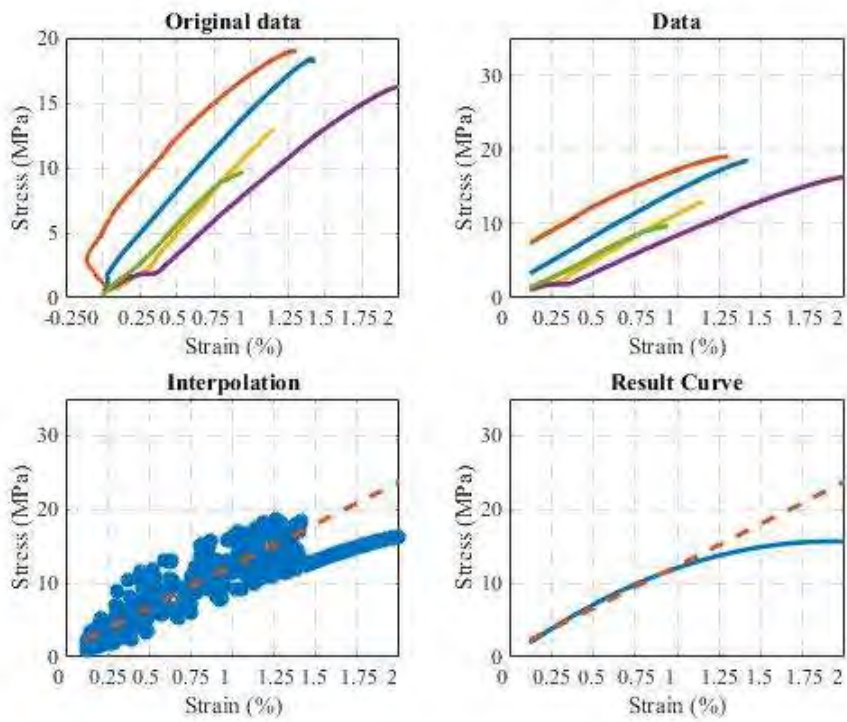
PA-D1



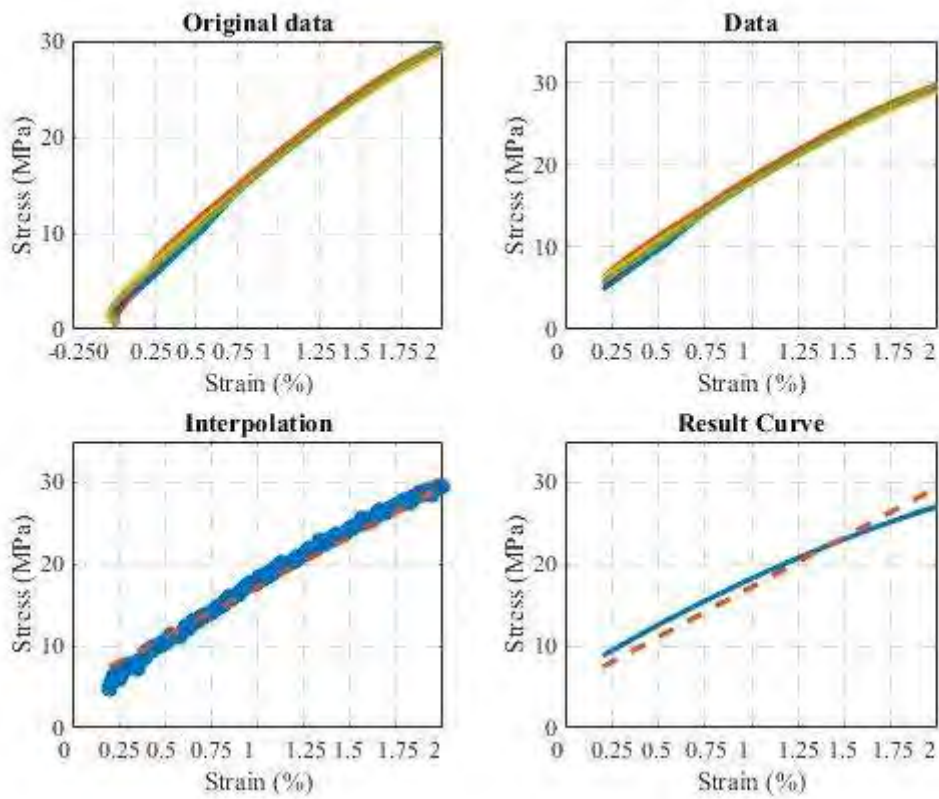
PA-D2



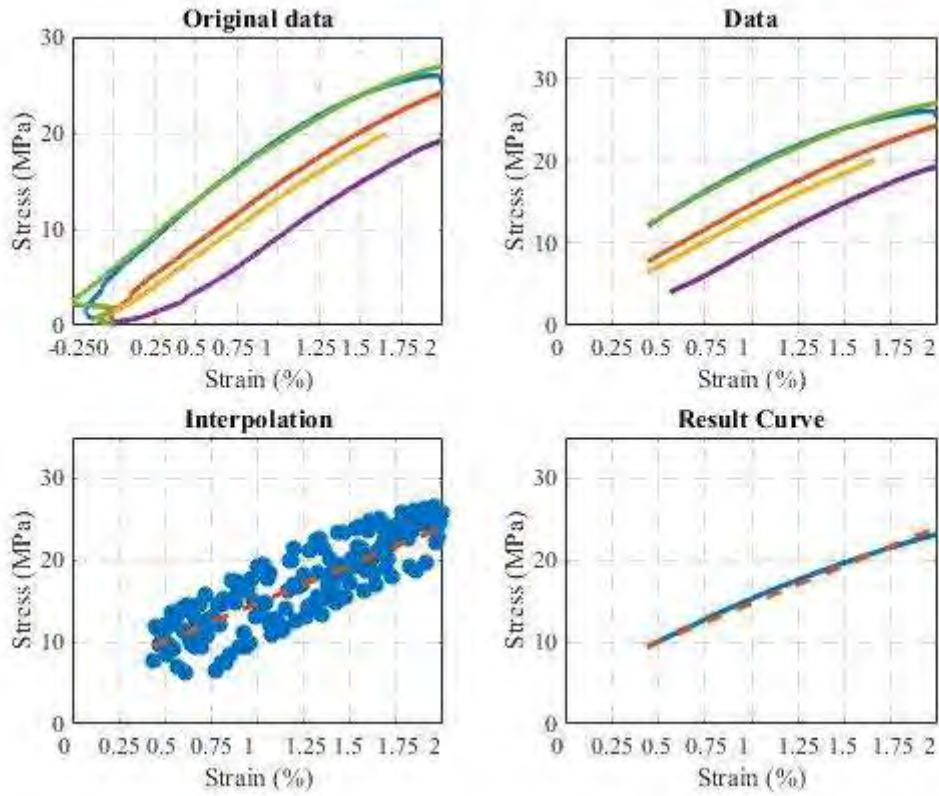
PA-D3



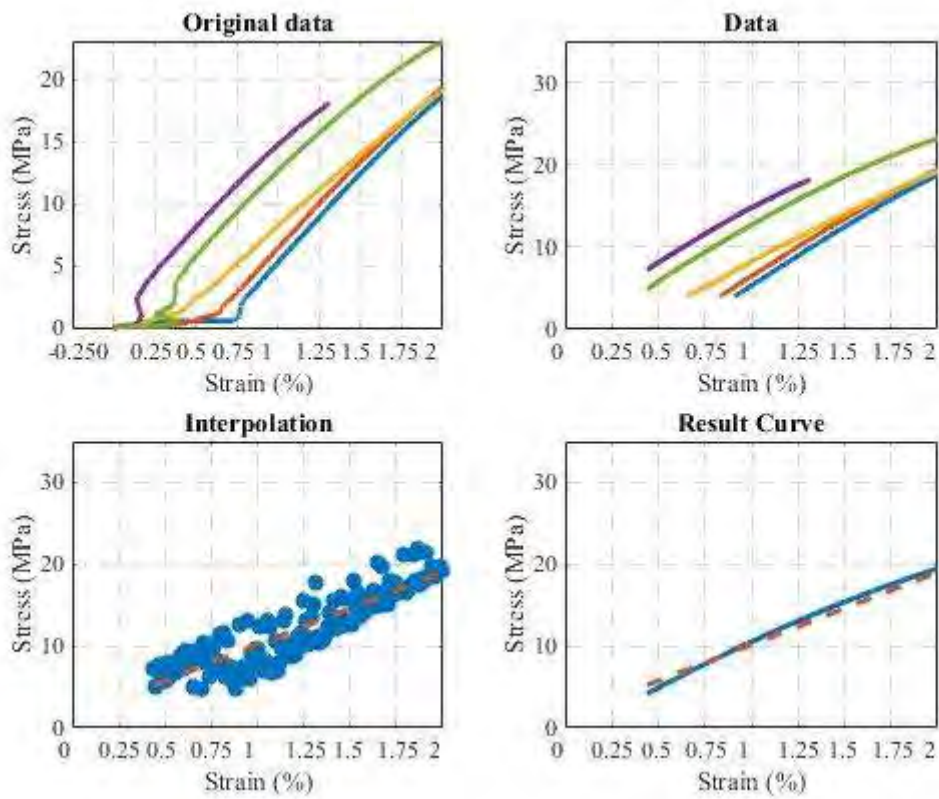
PA-D4



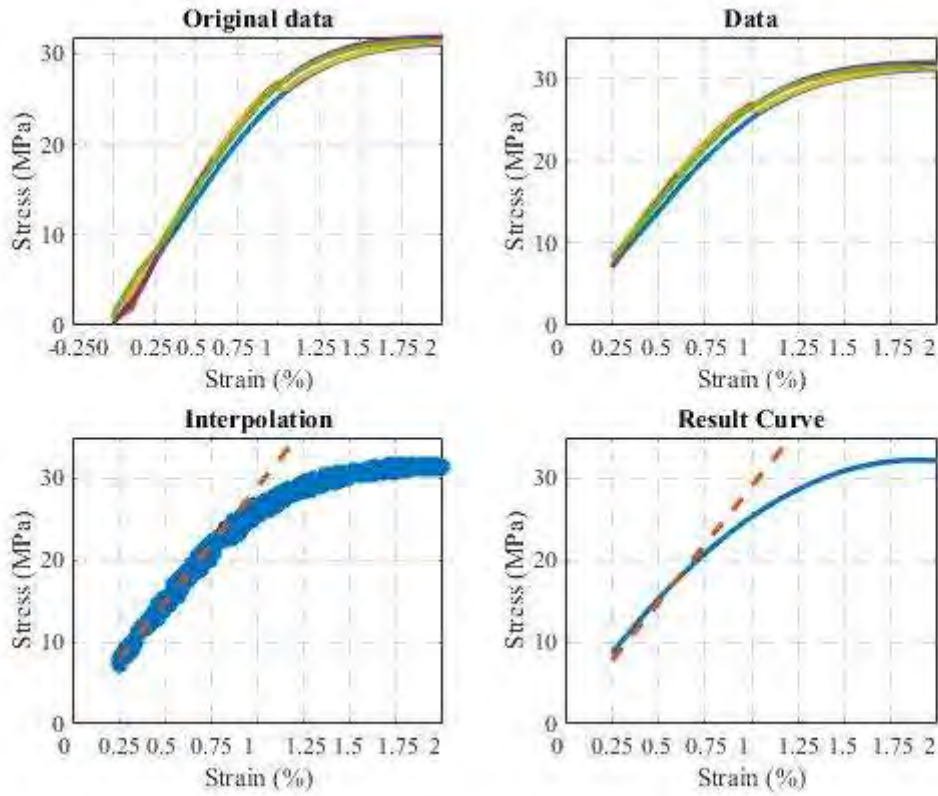
PA-D5



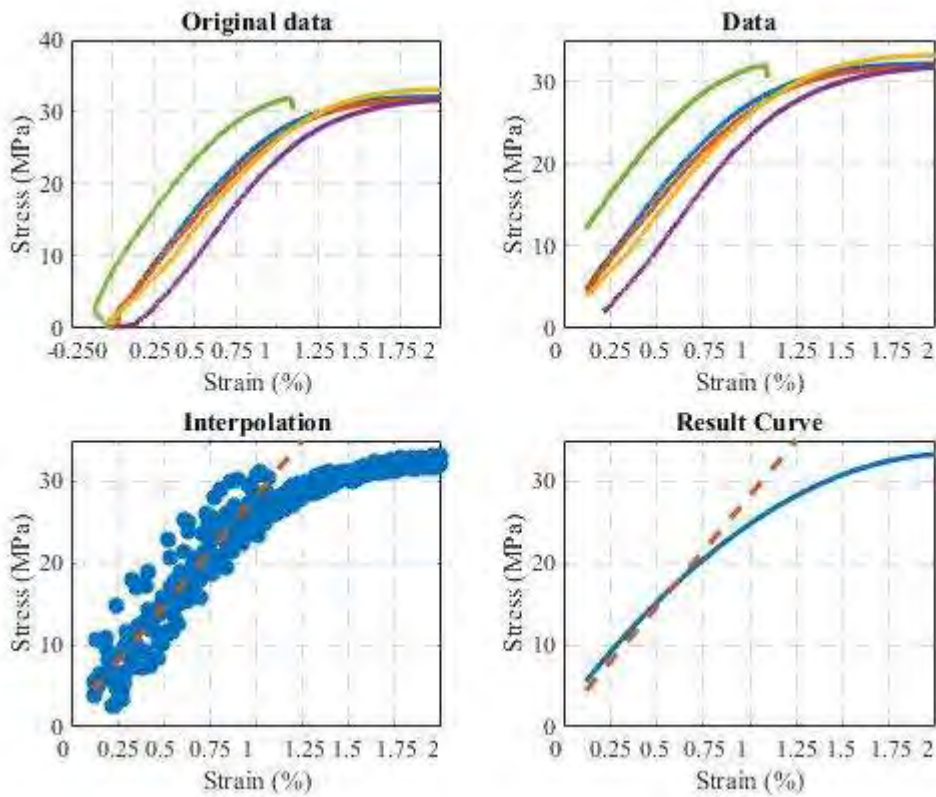
PA-D6



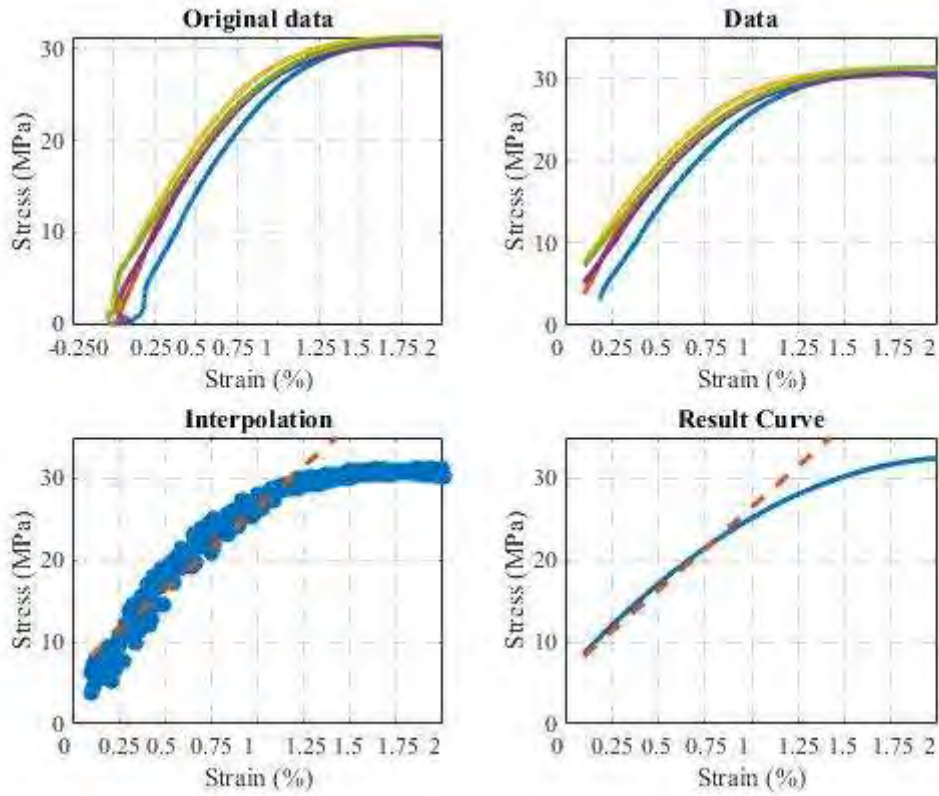
ABS/CF-D1



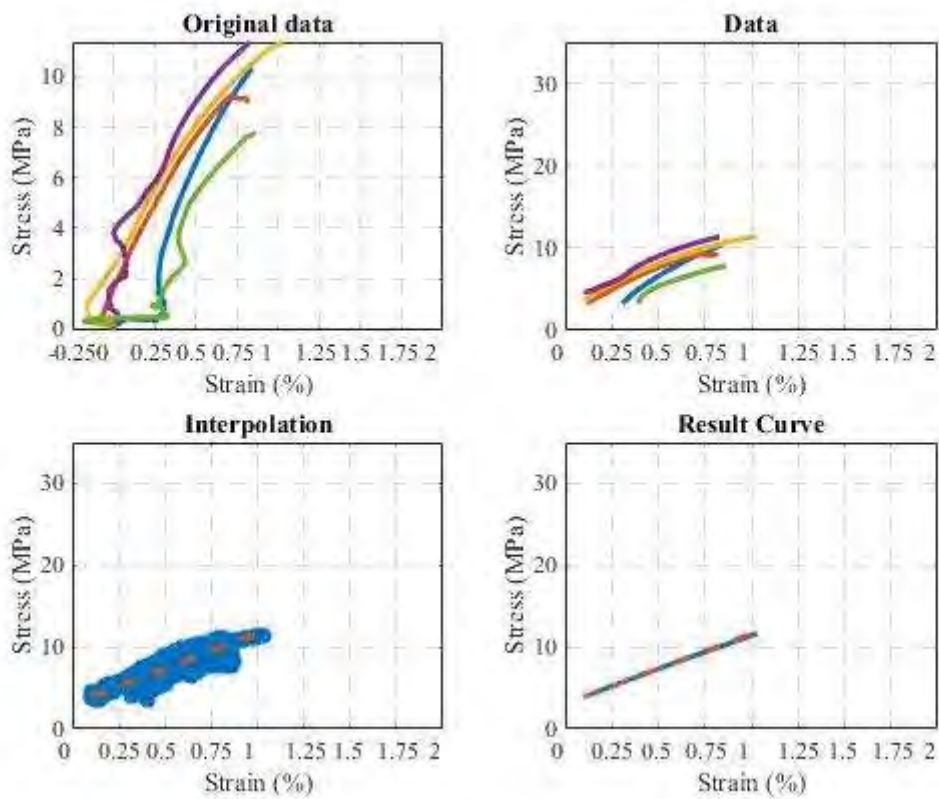
ABS/CF-D2



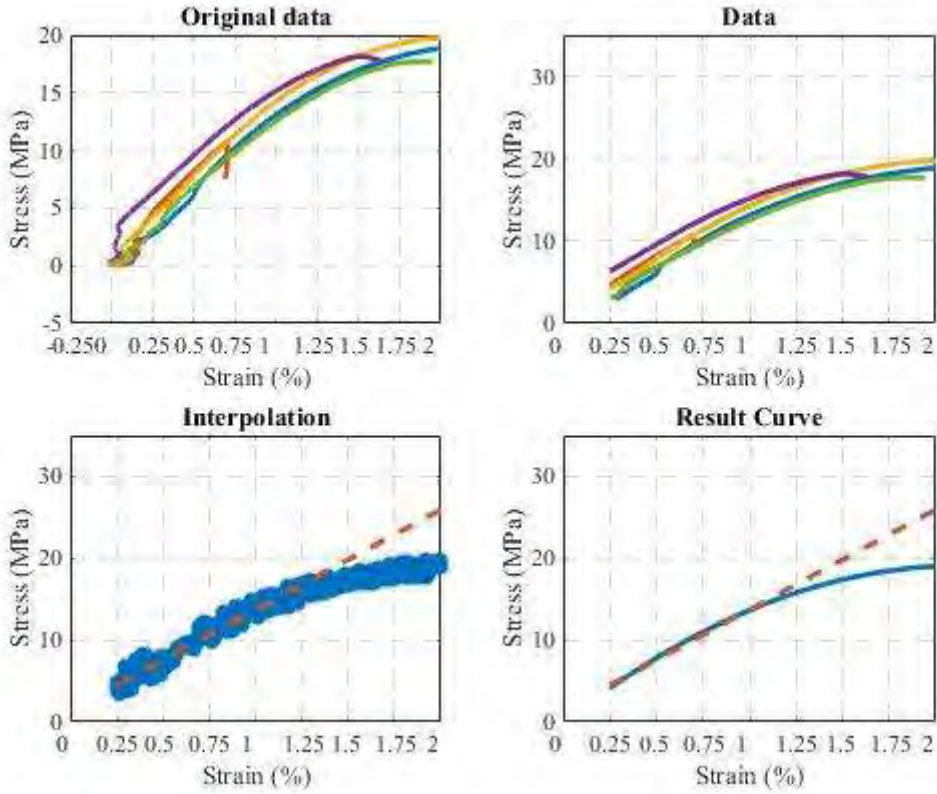
ABS/CF-D3



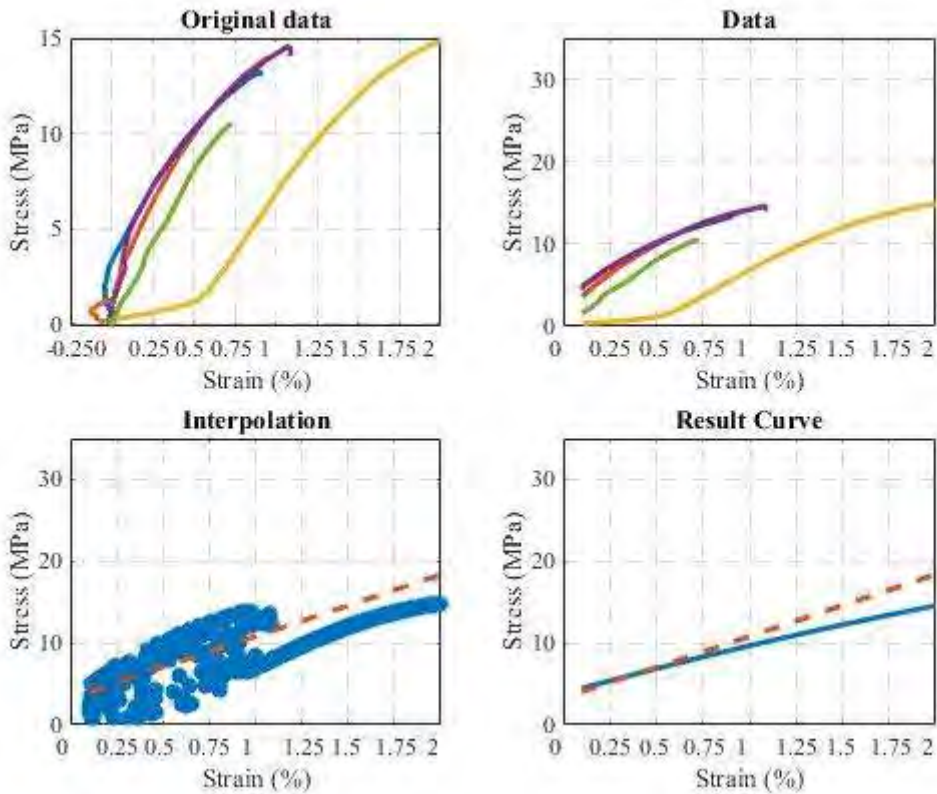
ABS/CF-D4



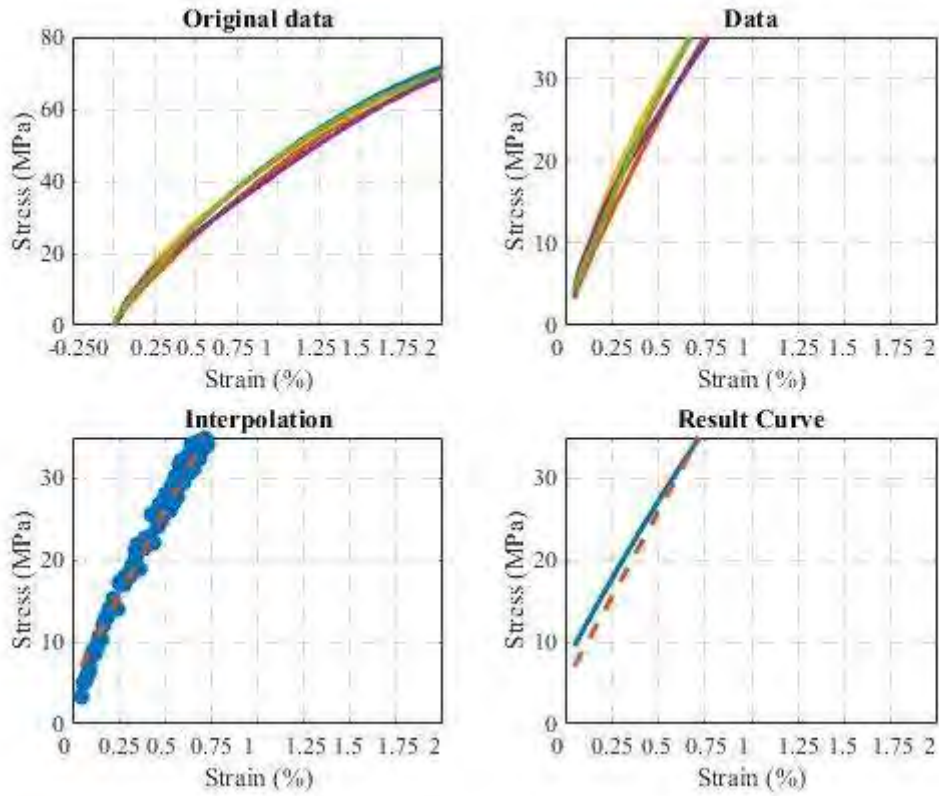
ABS/CF-D5



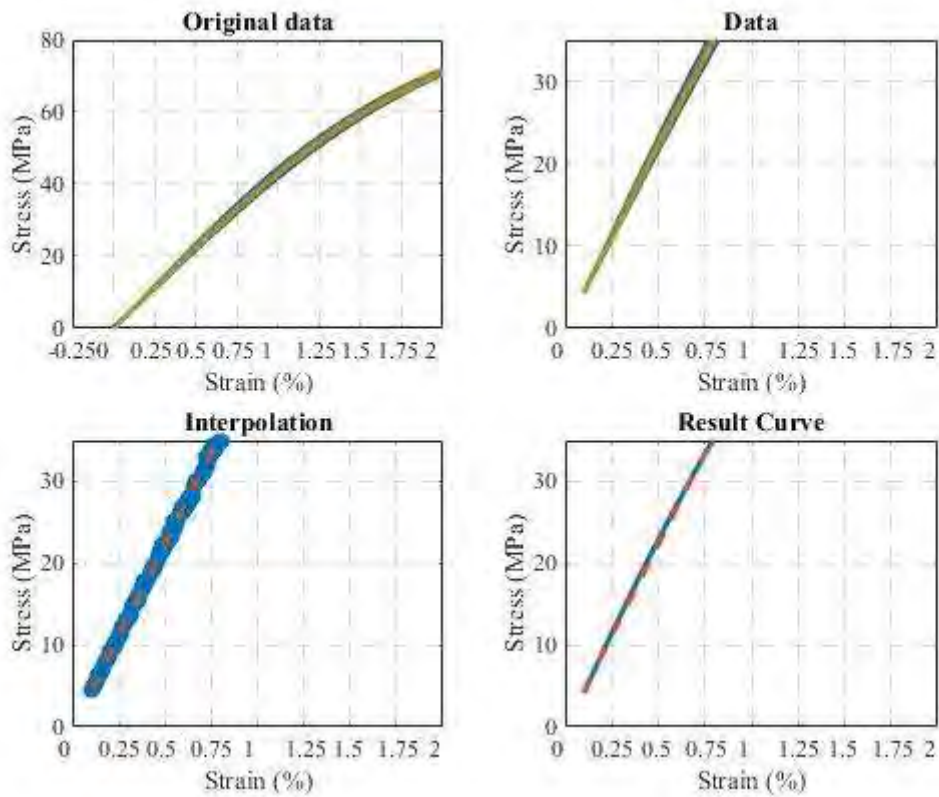
ABS/CF-D6



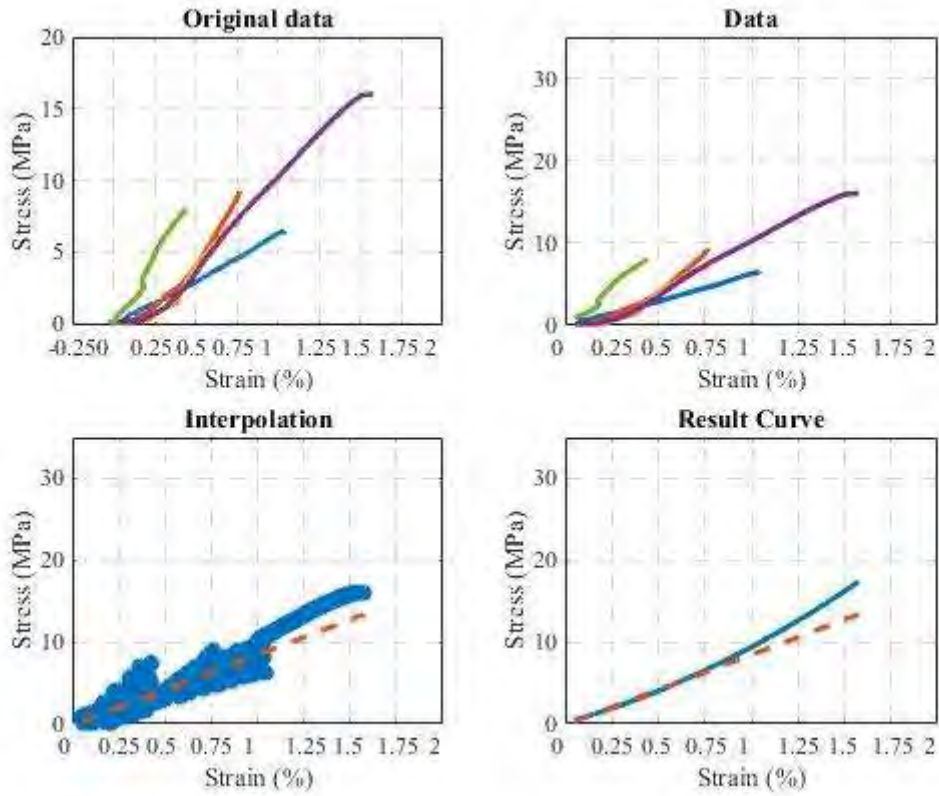
PA/CF-D1



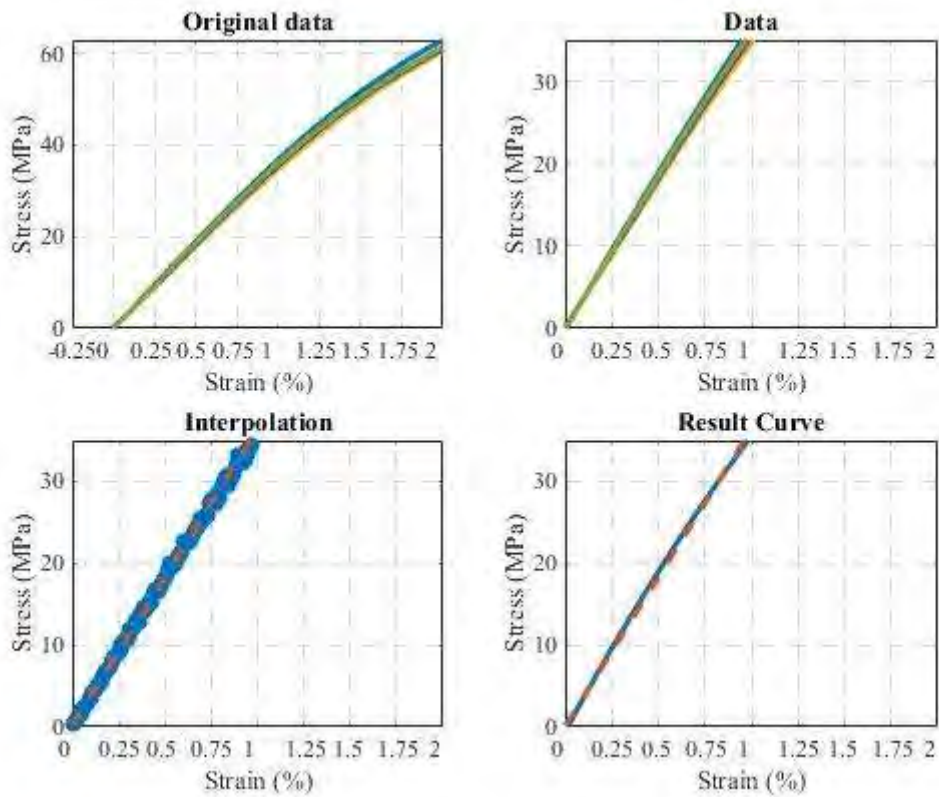
PA/CF-D2



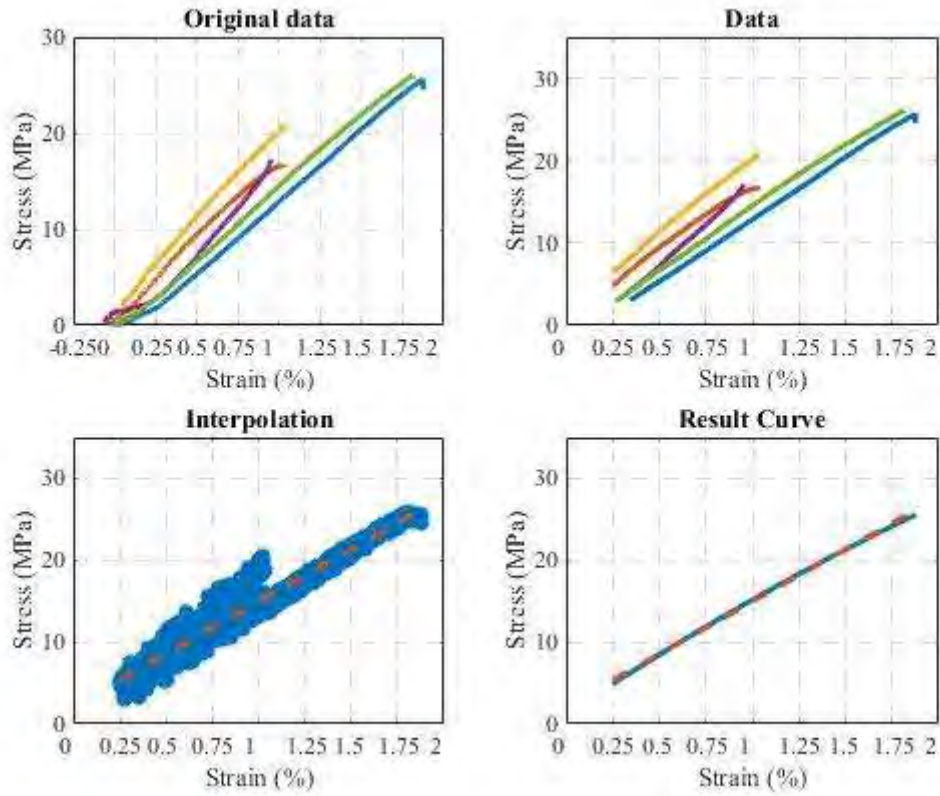
PA/CF-D3



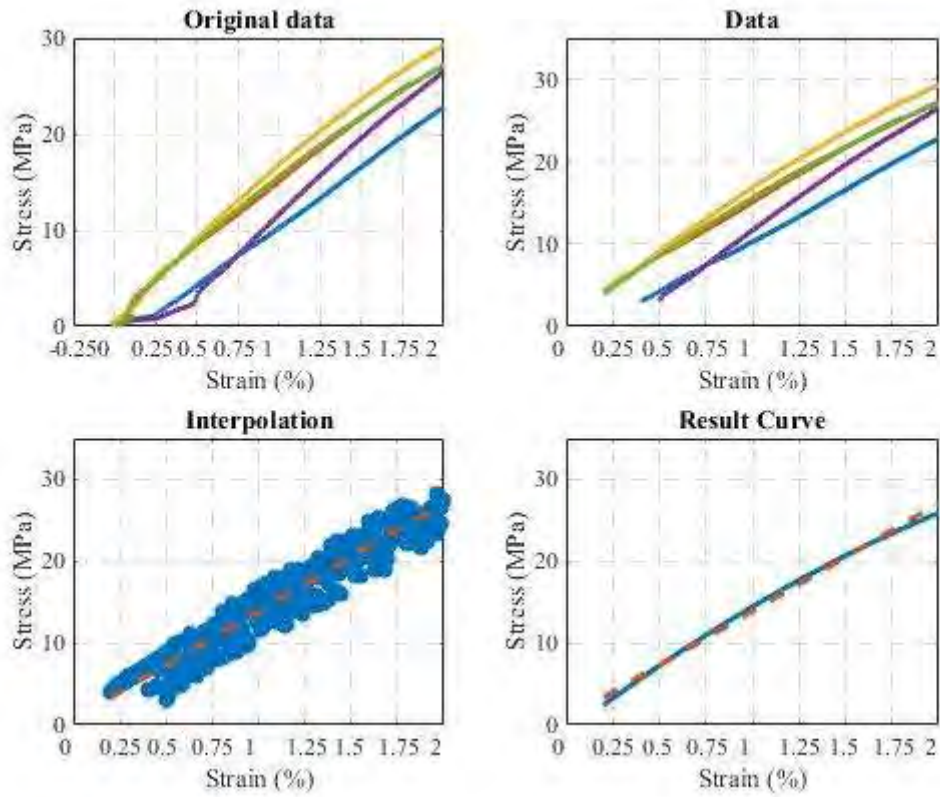
PA/CF-D4



PA/CF-D5



PA/CF-D6



Anexo B Código de Matlab empleado

En la siguiente sección se presenta el código de Matlab utilizado para procesar la data obtenida de los ensayos de tracción realizado a los especímenes de PA, ABS, PA/CF y ABS/CF. El siguiente código pertenece al ejemplo utilizado para el ABS impreso en la orientación 2 según la metodología experimental.

```

%% CODE FOR CALCULATING ELASTIC CONSTANTS
set(0,'DefaultFontname','Times New Roman', ...
'DefaultFontWeight','bold', ...
'DefaultAxesFontname','Times New Roman', ...
'DefaultLineLineWidth', 2)
clc
clear

A=xlsread('C:\Users\ABS-D2','Stress-Strain Data');%Read data
[a,b]=size(A);
n=(b+1)/3;% number of specimens
s0=6; %% prestress in MPa
e0=0.2; %% prestress in MPa
for i=1:n
    K(:,2*i-1:2*i)=A(:,3*i-2:3*i-1);

    if i==1
        A1(:,1:2)=K(:,2*i-1:2*i);
        T1=A1(all(~isnan(A1),2),:);
        T1=delete_end(T1);
        T1=pre_stress(T1,s0);
        T1=pre_strain(T1,e0);
    end
    if i==2
        A2(:,1:2)=K(:,2*i-1:2*i);
        T2=A2(all(~isnan(A2),2),:);
        T2=delete_end(T2);
        T2=pre_stress(T2,s0);
        T2=pre_strain(T2,e0);
    end
    if i==3
        A3(:,1:2)=K(:,2*i-1:2*i);
        T3=A3(all(~isnan(A3),2),:);
        T3=delete_end(T3);
        T3=pre_stress(T3,s0);
        T3=pre_strain(T3,e0);
    end
    if i==4
        A4(:,1:2)=K(:,2*i-1:2*i);
        T4=A4(all(~isnan(A4),2),:);
        T4=delete_end(T4);
        T4=pre_stress(T4,s0);
        T4=pre_strain(T4,e0);
    end
    if i==5
        A5(:,1:2)=K(:,2*i-1:2*i);
        T5=A5(all(~isnan(A5),2),:);
        T5=delete_end(T5);
    end
end

```

```

    T5=pre_stress(T5,s0);
    T5=pre_strain(T5,e0);
end
end

%Quantity of data s-e, T1=[strain(%), stress(MPa)]
n1=length(T1);
n2=length(T2);
n3=length(T3);
n4=length(T4);
n5=length(T5);

%Joint all data in a 2 column matrix
Btot(1:n1,:)=T1;
Btot(n1+1:n1+n2,:)=T2;
Btot(n1+n2+1:n1+n2+n3,:)=T3;
Btot(n1+n2+n3+1:n1+n2+n3+n4,:)=T4;
Btot(n1+n2+n3+n4+1:n1+n2+n3+n4+n5,:)=T5;

%Sort data in ascending order
Atot=ordenar_agrupar(Btot);

% data x for interpolating
e2=max(Atot(:,1));
e1=min(Atot(:,1));
n=50;
en=(e2-e1)/n;
egraf=[e1:en:e2]';

%Interpolation
mode='linear';
Ctot=interpolar(Atot,egraf,mode);

%Polynomial curve fitting
p1=polyfit(Ctot(:,1),Ctot(:,2),2);

%Curve data
s=polyval(p1,Ctot(:,1));

%Elastic Constant of Material
%%percent=30;
%%syield=max(s)*(1-percent/100);
syield=25;
inds=find(s>=syield);
format long
%MatRes=resultats(Ctot,inds(1))
xgraf=e2;
%E
p=polyfit(Ctot(1:inds(1),1),Ctot(1:inds(1),2),1);
E2=p(1)*100

```

```

s2=polyval(p,Ctot(:,1));
%v
%p2=polyfit(Ctot(1:ind,1),-Ctot(1:ind,2),1);
%MatRes(2)=p2(1);
%yield
%MatRes(3)=Ctot(inds(1),2);
%eyield
%MatRes(4)=Ctot(inds(1),1);

%%%%%%%%%%%%% GRAPHS
%%%%%%%%%%%%%
figure('Name','Direction 2','NumberTitle','off');
subplot(2,2,1)
plot(A1(:,1),A1(:,2));
hold on;
plot(A2(:,1),A2(:,2));
plot(A3(:,1),A3(:,2));
plot(A4(:,1),A4(:,2));
plot(A5(:,1),A5(:,2));
grid on;
xlabel('Strain (%)');

ylabel('Stress (MPa)');
set(gca,'GridLineStyle','--')
set(gca, 'XLim', [-0.25, 2], 'XTick', -0.25:0.25:2,'XTickLabel', -0.25:0.25:2);
title('a) Original data')

subplot(2,2,2)
plot(T1(:,1),T1(:,2));
hold on;
plot(T2(:,1),T2(:,2));
plot(T3(:,1),T3(:,2));
plot(T4(:,1),T4(:,2));
plot(T5(:,1),T5(:,2));
grid on;
xlabel('Strain (%)');
ylabel('Stress (MPa)');
set(gca,'GridLineStyle','--')
set(gca, 'XLim', [0, 2], 'XTick', 0:0.25:2,'XTickLabel', 0:0.25:2);
ylim([0 35])
title('b) Data')

subplot(2,2,3)
plot(Ctot(:,1),Ctot(:,2),'*',Ctot(:,1),s2,'--')
grid on;
xlabel('Strain (%)');
ylabel('Stress (MPa)');
set(gca,'GridLineStyle','--')
set(gca, 'XLim', [0, 2], 'XTick', 0:0.25:2,'XTickLabel', 0:0.25:2);
ylim([0 35])

```

```

title('c) Interpolation')

subplot(2,2,4)
plot(Ctot(:,1),s,'-',Ctot(:,1),s2,'--')
grid on;
xlabel('Strain (%)');
ylabel('Stress (MPa)');
set(gca,'GridLineStyle','--')
set(gca, 'XLim', [0, 2], 'XTick', 0:0.25:2,'XTickLabel', 0:0.25:2);
ylim([0 35])
title('d) Result Curve')

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% FUNCTIONS
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
function A=delete_end(M) % Delete a retraction of the curve at final stage
emax=max(M(:,1));
ind=find(M(:,1)>=emax);
A=M(1:ind(1),:);
end
function A=pre_stress(M,x) % Initial of stress
ind=find(M(:,2)>=x);
A=M(ind(1):end,:);
end
function A=pre_strain(M,x) % Initial of strain
ind=find(M(:,1)>=x);
A=M(ind(1):end,:);
end
function M=ordenar_agrupar(A)
%ordeno la matriu per columnes
[C,IX] = sort(A(:,1));
B=A(IX,:);
%trobo els elements que son iguals en la primera columna (X=e1)
a=find(B(1:end-1,1)==B(2:end,1));
%dels que s'Ûn iguals faig la mitja dels dos valors i poso NaN a la fila
%repetida
for i=1:length(a)
B(a(i),2)=mean(B(a(i):a(i)+1,2));
B(a(i)+1,:)=NaN; %%Not a Number
end
%esborro els NaNs
M=B(all(~isnan(B),2),:);
end
function C=interpolar(A,e,mode)
C(:,1)=e;
C(:,2)=interp1(A(:,1),A(:,2),e,mode);%% interpolation of x=A(:,1) and evaluation in e
end
function z=sol(x,p1,p2)
y1=abs(polyval(p1,x));
y2=abs(polyval(p2,x));

```



```

z=y1-y2;
end
function MatRes=resultats(Ctot,ind)
%E
p=polyfit(Ctot(1:ind,1),Ctot(1:ind,2),1);
MatRes(1)=p(1)*100;
%v
%p2=polyfit(Ctot(1:ind,1),-Ctot(1:ind,2),1);
%MatRes(2)=p2(1);
%syield
MatRes(3)=Ctot(ind,2);
%eyield
MatRes(4)=Ctot(ind,1);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%5%%%%%%%%

```



Anexo C Materiales





Technical Data Sheet: CarbonX™ Carbon Fiber Nylon (Gen3) 3D Printing Filament

Physical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Density	ISO 1183	g/cc	1.17

Mechanical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Tensile Strength, Break	ISO 527	MPa	63
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	3800
Tensile Elongation, Break	ISO 527	%	3
Flexural Strength	ISO 178	MPa	84
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	3750

Thermal Properties	Standard	Unit	Typical Value
Glass Transition Temperature (Tg)	DSC	°C	70
Deflection Temperature at 0.45 MPa (66psi)	ISO 75	°C	147

Electrical Property	Standard	Unit	Typical Value
Surface Resistance	ASTM D257	Ohm/sq	>10 ⁹

Printed Specimen Conditions
Printer: Open Source FDM/FFF
Nozzle: 0.4mm
Layer Height: 0.25mm
Infill: 100%, +/- 45°
Extrusion Temp: 275°C
Bed Temp: 80°C
Specimen Orientation: XY Flat

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.



CarbonX™ Carbon Fiber Nylon

EFFECTIVE DATE: 08/01/2017

REVISION NUMBER: V1.0

1 PRODUCT AND SUPPLIER INFORMATION

Product Identification:

Product Name: CarbonX™ CF-Nylon
Chemical Name: Polyamide (PA)

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 (%)
Polyamide Resin	25038-54-4	>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 HAZARDExtinguishing Media: Water spray, dry powder, and foam. Carbon dioxide (CO₂)

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

1 ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Spill or release: Clean up by vacuuming or sweeping to prevent falls. If molten, allow material to cool and place into an appropriate container for disposal.

2 HANDLING AND STORAGE CONDITIONS

Precautions to be taken in handling and storage: Store in a dry, sprinkler equipped warehouse. Product as shipped is not a combustible dust. Mechanical handling can cause the formation of dusts. To reduce the risk for dust explosion do not permit dust to accumulate.

Waste Disposal: Dispose in accordance with applicable federal, state and local regulations.

3 EXPOSURE AND PROTECTION INFORMATION

Exposure Limits: This product does not contain any hazardous materials with occupational exposure limits established by the region specific regulatory bodies.

Respiratory Protection: A NIOSH approved respirator is recommended for protection against processing polymeric fumes, or from dust generated from grinding, sanding, or sawing operations.

Ventilation: Local exhaust is preferred.

Protection Gloves: : Canvas or cotton gloves are recommended.

Eye Protection: Safety glasses with side shields are recommended.

Other: No protective equipment is needed under normal use conditions.

4 PHYSICAL/CHEMICAL DATA

Form: Solid

Appearance: Black Filament

Odor: Slight

Freezing Point: N/A

Solubility in Water: Insoluble

Specific Gravity: >1

% Volatile: N/A

Boiling Range: N/A

Vapor Pressure (MM HG): Negligible

Melting Point: This product does not possess a specific melting point. It softens gradually over a wide temperature range.

Note: Those physical data are typical values based on material tested but may vary from sample to sample. Typical values should not be construed as a guaranteed analysis of any specific lot or as specifications for the product.

5 STABILITY AND REACTIVITY

Polymerization conditions to avoid: None

Chemical Stability: Stable under normal conditions

Conditions to avoid: Incompatible materials, including strong oxidizing agents

Hazardous decomposition byproducts: Thermal decomposition can yield intense heat, dense smoke, phenols, hydrogen cyanide, carbon dioxide, and carbon monoxide.

6 TOXICOLOGICAL INFORMATION

No specific toxicological information is available.

7 ECOLOGICAL INFORMATION

No specific ecological information is available.

1 DISPOSAL

Waste Disposal: Waste or unused product may be discarded in accordance with state, federal, and local regulations.

2 TRANSPORT INFORMATION

Land Transport (DOT): Non-Regulated
Sea Transport (IMDG): Non-Regulated
Air Transport (ICAO/IATA): Non-Regulated

3 REGULATORY INFORMATION

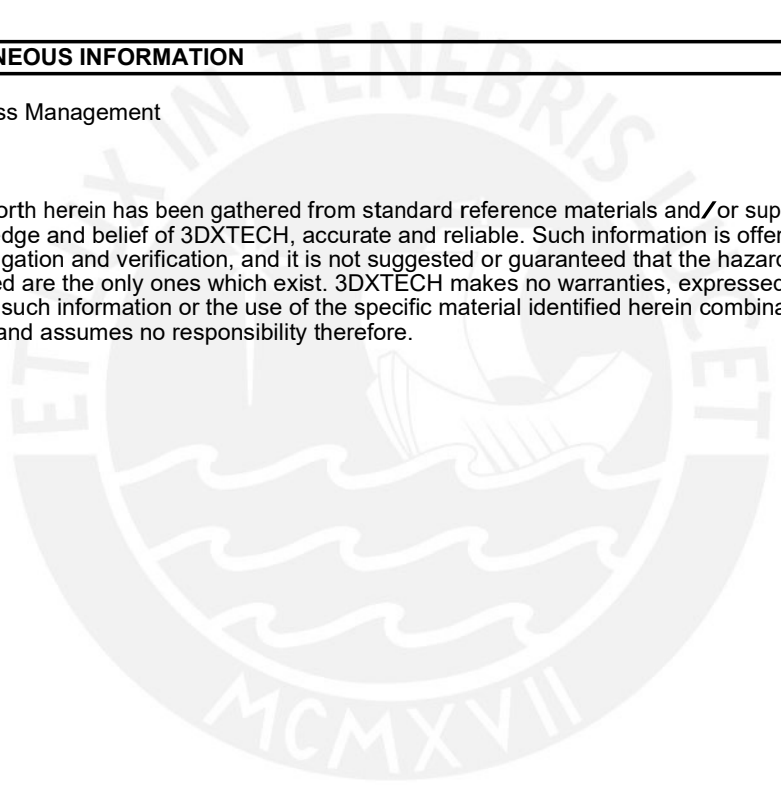
TSCA: Complies
EINECS/ELINCS: N/A
DSL/NDSL: Complies
PICCS: N/A
ENCS: Complies
IECSC: Complies
AICS: Complies
KECL: Complies

4 MISCELLANEOUS INFORMATION

Prepared by: Business Management
Issued: 08/01/2017
Supersedes: N/A

This information set forth herein has been gathered from standard reference materials and/or supplier test data and is, to the best knowledge and belief of 3DXTECH, accurate and reliable. Such information is offered solely for your consideration, investigation and verification, and it is not suggested or guaranteed that the hazard precautions or procedures mentioned are the only ones which exist. 3DXTECH makes no warranties, expressed or implied, with respect to the use of such information or the use of the specific material identified herein combination with any other material or process, and assumes no responsibility therefore.

END OF SDS





Technical Data Sheet: CarbonX™ Carbon Fiber ABS 3D Printing Filament

Physical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Density	ISO 1183	g/cc	1.11

Mechanical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Tensile Strength, Break	ISO 527	MPa	46
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	5210
Tensile Elongation, Break	ISO 527	%	2
Flexural Strength	ISO 178	MPa	76
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	5260

Thermal Properties	Standard	Unit	Typical Value
Glass Transition Temperature (T _g)	DSC	°C	105
Deflection Temperature at 0.45 MPa (66psi)	ISO 75	°C	76

Electrical Property	Standard	Unit	Typical Value
Surface Resistance	ASTM D257	Ohm/sq	>10 ⁹

Printed Specimen Conditions

Printer: Open Source FDM/FFF

Nozzle: 0.4mm

Layer Height: 0.25mm

1 ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Spill or release: Clean up by vacuuming or sweeping to prevent falls. If molten, allow material to cool and place into an appropriate container for disposal.

2 HANDLING AND STORAGE CONDITIONS

Precautions to be taken in handling and storage: Store in a dry, sprinkler equipped warehouse. Product as shipped is not a combustible dust. Mechanical handling can cause the formation of dusts. To reduce the risk for dust explosion do not permit dust to accumulate.

Waste Disposal: Dispose in accordance with applicable federal, state and local regulations.

3 EXPOSURE AND PROTECTION INFORMATION

Exposure Limits: This product does not contain any hazardous materials with occupational exposure limits established by the region specific regulatory bodies.

Respiratory Protection: A NIOSH approved respirator is recommended for protection against processing polymeric fumes, or from dust generated from grinding, sanding, or sawing operations.

Ventilation: Local exhaust is preferred.

Protection Gloves: : Canvas or cotton gloves are recommended.

Eye Protection: Safety glasses with side shields are recommended.

Other: No protective equipment is needed under normal use conditions.

4 PHYSICAL/CHEMICAL DATA

Form: Solid

Appearance: Black Filament

Odor: Slight

Freezing Point: N/A

Solubility in Water: Insoluble

Specific Gravity: >1

% Volatile: N/A

Boiling Range: N/A

Vapor Pressure (MM HG): Negligible

Melting Point: This product does not possess a specific melting point. It softens gradually over a wide temperature range.

Note: Those physical data are typical values based on material tested but may vary from sample to sample. Typical values should not be construed as a guaranteed analysis of any specific lot or as specifications for the product.

5 STABILITY AND REACTIVITY

Polymerization conditions to avoid: None

Chemical Stability: Stable under normal conditions

Conditions to avoid: Incompatible materials, including strong oxidizing agents

Hazardous decomposition byproducts: Thermal decomposition can yield intense heat, dense smoke, phenols, hydrogen cyanide, carbon dioxide, and carbon monoxide.

6 TOXICOLOGICAL INFORMATION

No specific toxicological information is available.

7 ECOLOGICAL INFORMATION

No specific ecological information is available.

Infill: 100%, +/- 45°

Extrusion Temp: 230°C

Bed Temp: 110°C

Specimen Orientation: XY Flat

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.





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 (CO₂)

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

1 DISPOSAL

Waste Disposal: Waste or unused product may be discarded in accordance with state, federal, and local regulations.

2 TRANSPORT INFORMATION

Land Transport (DOT): Non-Regulated
Sea Transport (IMDG): Non-Regulated
Air Transport (ICAO/IATA): Non-Regulated

3 REGULATORY INFORMATION

TSCA: Complies
EINECS/ELINCS: N/A
DSL/NDSL: Complies
PICCS: N/A
ENCS: Complies
IECSC: Complies
AICS: Complies
KECL: Complies

4 MISCELLANEOUS INFORMATION

Prepared by: Business Management
Issued: 08/01/2017
Supersedes: N/A

This information set forth herein has been gathered from standard reference materials and/or supplier test data and is, to the best knowledge and belief of 3DXTECH, accurate and reliable. Such information is offered solely for your consideration, investigation and verification, and it is not suggested or guaranteed that the hazard precautions or procedures mentioned are the only ones which exist. 3DXTECH makes no warranties, expressed or implied, with respect to the use of such information or the use of the specific material identified herein combination with any other material or process, and assumes no responsibility therefore.

END OF SDS



Technical Data Sheet: 3DXSTAT™ ESD-ABS 3D Printing Filament

Physical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Density	ISO 1183	g/cc	1.09

Mechanical Properties	Standard	Unit	Typical Value
Tensile Strength, Break	ISO 527	MPa	58
Tensile Modulus	ISO 527	MPa	2130
Tensile Elongation, Break	ISO 527	%	4
Flexural Strength	ISO 178	MPa	80
Flexural Modulus	ISO 178	MPa	2275

Thermal Properties	Standard	Unit	Typical Value
Glass Transition Temperature (Tg)	DSC	°C	105
Deflection Temperature at 0.45 MPa (66psi)	ISO 75	°C	97

Electrical Property	Standard	Unit	Typical Value
Surface Resistance	ASTM D257	Ohm/sq	>10 ⁷ - 10 ⁹ <

Printed Specimen Conditions
Printer: Open Source FDM/FFF
Nozzle: 0.4mm
Layer Height: 0.25mm
Infill: 100%, +/- 45°
Extrusion Temp: 230°C
Bed Temp: 110°C
Specimen Orientation: XY Flat

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.



SAFETY DATA SHEET

3DXSTAT™ ESD-ABS

EFFECTIVE DATE: 08/01/2017

REVISION NUMBER: V1.0

1 PRODUCT AND SUPPLIER INFORMATION

Product Identification:

Product Name: 3DXSTAT™ ESD-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	>90
Carbon Additives	1333-86-4	<10

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 (CO₂)

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

1 ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

Spill or release: Clean up by vacuuming or sweeping to prevent falls. If molten, allow material to cool and place into an appropriate container for disposal.

2 HANDLING AND STORAGE CONDITIONS

Precautions to be taken in handling and storage: Store in a dry, sprinkler equipped warehouse. Product as shipped is not a combustible dust. Mechanical handling can cause the formation of dusts. To reduce the risk for dust explosion do not permit dust to accumulate.

Waste Disposal: Dispose in accordance with applicable federal, state and local regulations.

3 EXPOSURE AND PROTECTION INFORMATION

Exposure Limits: This product does not contain any hazardous materials with occupational exposure limits established by the region specific regulatory bodies.

Respiratory Protection: A NIOSH approved respirator is recommended for protection against processing polymeric fumes, or from dust generated from grinding, sanding, or sawing operations.

Ventilation: Local exhaust is preferred.

Protection Gloves: : Canvas or cotton gloves are recommended.

Eye Protection: Safety glasses with side shields are recommended.

Other: No protective equipment is needed under normal use conditions.

4 PHYSICAL/CHEMICAL DATA

Form: Solid

Appearance: Black Filament

Odor: Slight

Freezing Point: N/A

Solubility in Water: Insoluble

Specific Gravity: >1

% Volatile: N/A

Boiling Range: N/A

Vapor Pressure (MM HG): Negligible

Melting Point: This product does not possess a specific melting point. It softens gradually over a wide temperature range.

Note: Those physical data are typical values based on material tested but may vary from sample to sample. Typical values should not be construed as a guaranteed analysis of any specific lot or as specifications for the product.

5 STABILITY AND REACTIVITY

Polymerization conditions to avoid: None

Chemical Stability: Stable under normal conditions

Conditions to avoid: Incompatible materials, including strong oxidizing agents

Hazardous decomposition byproducts: Thermal decomposition can yield intense heat, dense smoke, phenols, hydrogen cyanide, carbon dioxide, and carbon monoxide.

6 TOXICOLOGICAL INFORMATION

No specific toxicological information is available.

7 ECOLOGICAL INFORMATION

No specific ecological information is available.

1 DISPOSAL

Waste Disposal: Waste or unused product may be discarded in accordance with state, federal, and local regulations.

2 TRANSPORT INFORMATION

Land Transport (DOT): Non-Regulated
Sea Transport (IMDG): Non-Regulated
Air Transport (ICAO/IATA): Non-Regulated

3 REGULATORY INFORMATION

TSCA: Complies
EINECS/ELINCS: N/A
DSL/NDSL: Complies
PICCS: N/A
ENCS: Complies
IECSC: Complies
AICS: Complies
KECL: Complies

4 MISCELLANEOUS INFORMATION

Prepared by: Business Management
Issued: 08/01/2017
Supersedes: N/A

This information set forth herein has been gathered from standard reference materials and/or supplier test data and is, to the best knowledge and belief of 3DXTECH, accurate and reliable. Such information is offered solely for your consideration, investigation and verification, and it is not suggested or guaranteed that the hazard precautions or procedures mentioned are the only ones which exist. 3DXTECH makes no warranties, expressed or implied, with respect to the use of such information or the use of the specific material identified herein combination with any other material or process, and assumes no responsibility therefore.

END OF SDS