

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
ESCUELA DE POSGRADO**

**MAESTRIA EN INGENIERÍA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES**



**DESARROLLO DE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ  
TERMOPLÁSTICA REFORZADOS CON NANOPARTICULAS  
UTILIZANDO LA TÉCNICA DE MODELADO POR DEPOSICIÓN  
FUNDIDA EMPLEADA EN MANUFACTURA ADITIVA**

**Tesis para optar el grado académico de:  
Magister en Ingeniería y Ciencia de los Materiales**

**Presentado por:  
Andoni Royer Molina Saqui**

**Asesor:  
Dr. Ing. Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán**

**Jurado:  
Dr. Fernando Gilberto Torres García  
Mg. Julio Roberto Lazarte Gamero**

**Lima-Perú  
2016**

## Resumen

Hoy en día la manufactura aditiva está teniendo una gran acogida tanto en el campo académico como industrial, ya que con ella se pueden fabricar piezas con geometrías complicadas sin la necesidad de usar moldes o los clásicos procesos de manufactura por remoción de material, donde un gran porcentaje del material es desperdiciado sin la opción en muchos casos a poder reciclarlos. En cambio con la manufactura aditiva se pueden obtener piezas de manera directa partiendo de un modelo tridimensional hecho por un programa de diseño asistido por computador (CAD). Sin embargo el limitado uso de materiales y la anisotropía de las propiedades mecánicas de piezas obtenidas por manufactura aditiva, no la hacen muy llamativa en ciertas aplicaciones donde se requiera una alta exigencia mecánica.

En ese sentido el objetivo del presente trabajo es desarrollar materiales compuestos de matriz termoplástica: Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) Y Poliláctico (PLA), reforzadas con nanoarcillas, utilizando la técnica de modelado por deposición fundida (*FDM: Fused deposition modeling*) empleada en manufactura aditiva.

La investigación se desarrolló principalmente en dos etapas. Primero, se estudió el efecto de los principales parámetros de impresión sobre las propiedades mecánicas de piezas obtenidas por FDM con el objetivo de seleccionar valores de dichos parámetros que permitan una fácil impresión para generar piezas de ABS y PLA con buenas propiedades mecánicas. Segundo, se evaluaron las propiedades mecánicas de probetas impresas mediante FDM a partir de filamentos de material compuesto de matriz termoplástica (ABS y PLA) reforzado con nanoarcillas.

Se demostró que las propiedades mecánicas de las probetas impresas mediante FDM varían considerablemente con la temperatura de impresión, altura de capa y ángulo de impresión, encontrando resistencias a la tracción desde 28.3 MPa hasta 43.4 MPa para el ABS y desde 52.9 MPa hasta 61.2 MPa para el PLA. Así mismo se logró una adecuada impresión 3D de materiales compuestos, aumentando la resistencia a la tracción del ABS con contenido de nanoarcillas, pero una caída en la resistencia al impacto. Mientras que para el PLA la resistencia a la tracción disminuyó sensiblemente al introducir las nanoarcillas, pero su resistencia al impacto se incrementó con un contenido de 3% de nanoarcillas.

## ***Agradecimiento***

Agradezco profundamente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC) por las oportunidades de estudio que viene brindado a muchos jóvenes como yo, generando así valiosos recursos humanos que de seguro serán un gran aporte al desarrollo de nuestro país. Así mismo al Convenio PUCP – FONDECYT 012-2013 por permitirme realizar estudios de maestría en una de las mejores universidades del Perú.

A la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) por brindarnos los conocimientos entregados por su gran plana docente, así como de los laboratorios e infraestructura que nos han permitido desarrollarnos como alumnos de maestría en estos 2 años de estudios.

A mi asesor, Dr. Julio Acosta por permitirme formar parte de su grupo de investigación del Laboratorio 04, así como de la guía y apoyo brindado en el desarrollo del presente trabajo. Así también a todos mis compañeros del laboratorio 04 por el compañerismo ofrecido.

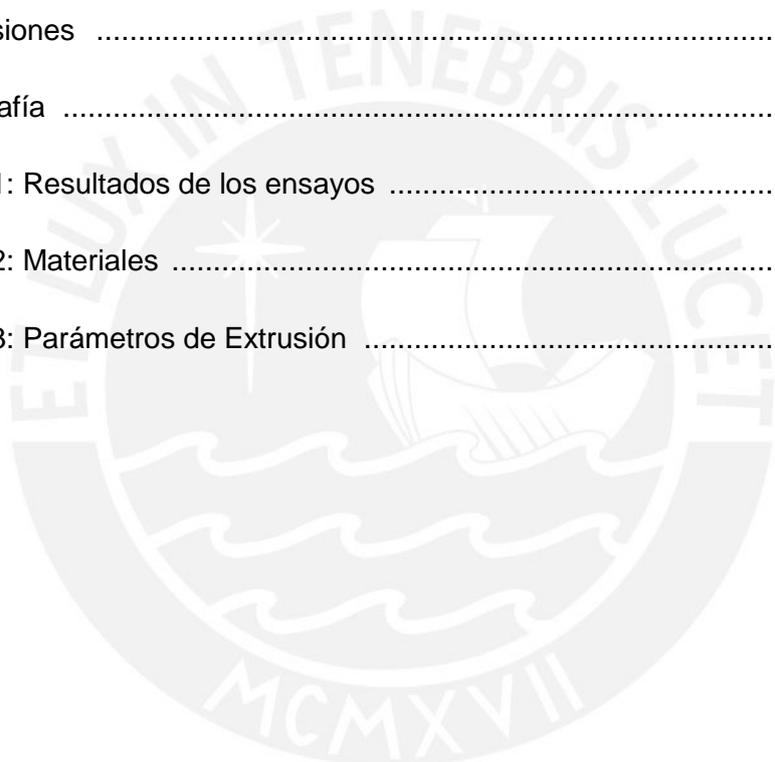
A la sala VEO 3D-PUCP por el asesoramiento concernientes a la tecnología de impresión 3D, permitiéndome usar sus equipos de impresión 3D, y así desarrollar con satisfacción mi trabajo de investigación. Y finalmente expreso mis agradecimiento a todo el personal del CITE- Materiales PUCP por el apoyo brindado concerniente a los ensayos realizados

# Índice

Introducción .....	1
1. Capítulo I: Estado del arte .....	5
1.1 Manufactura aditiva .....	6
1.2 Técnicas de manufactura aditiva .....	7
1.2.1 Estereolitografía .....	8
1.2.2 Polyjet .....	13
1.2.3 Sinterizado selectivo por láser .....	19
1.2.4 Modelado por deposición fundida .....	25
1.3 Materiales compuestos .....	38
1.3.1 Materiales compuestos reforzados con fibras .....	39
1.3.2 Materiales compuestos reforzados con partículas .....	44
2. Capítulo II: Parte experimental .....	51
2.1 Materiales .....	52
2.1.1 Filamentos de ABS y PLA .....	52
2.1.2 Granza de ABS y PLA .....	52
2.1.3 Nanoarcillas .....	53
2.2 Equipos .....	54
2.2.1 Impresora 3D .....	54
2.2.2 Horno de convección .....	54
2.2.3 Balanza analítica .....	55
2.2.4 Balanza digital .....	55
2.2.5 Mezclador de cuchillas .....	56

2.2.6 Extrusora de doble tornillo .....	56
2.2.7 Cubeta de enfriamiento .....	58
2.2.8 Granuladora .....	58
2.3 Diseño experimental .....	60
2.4 Procesamiento del material compuesto .....	62
2.5 Caracterización de los filamentos .....	66
2.5.1 Ensayo de tracción .....	66
2.5.2 Medición del índice de fluidez .....	67
2.5.3 Análisis térmico .....	67
2.6 Fabricación de probetas .....	68
2.7 Ensayos para las probetas impresas .....	75
2.7.1 Ensayo de tracción .....	75
2.7.2 Ensayo de impacto .....	76
2.7.3 Microscopía electrónica de barrido .....	76
3. Capítulo 1: Resultados y discusión .....	78
3.1 Resultado y discusión .....	79
3.1.1 Índice de fluidez .....	79
3.1.2 Calorimetría diferencia de barrido y análisis termo-gravimétrico .....	80
3.1.3 Ensayos de tracción de filamentos comerciales de ABS y PLA .....	83
3.1.4 Ensayos de tracción de probetas impresas a partir de filamentos comerciales de ABS y	

PLA bajo distintos valores de los principales parámetros de impresión .....	84
3.1.5 Ensayos de impacto de probetas impresas de filamentos comerciales de ABS y PLA con distintos ángulos de impresión .....	100
3.1.6 Ensayos de tracción e impacto para probetas impresas de material compuesto .....	103
Conclusiones .....	112
Bibliografía .....	115
Anexo 1: Resultados de los ensayos .....	124
Anexo 2: Materiales .....	139
Anexo 3: Parámetros de Extrusión .....	146



## Introducción

El término de impresión 3-D nace con la idea de sustituir la inyección de tinta de las clásicas impresoras de papel a la de impresión con distintos materiales, aunque la primera impresora solo podía usar polímeros con características especiales, luego con el avance de la tecnología se pudo incrementar la cantidad de materiales, desde metales, polímeros, cerámicos, concreto y otros materiales de fabricación [Stansbury, 2016]. La primera impresora 3-D fue inventada en 1984 por Charles W. Hull quien luego de patentarla con el nombre de “*Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*” fundaría la empresa 3D Systems quien es actualmente una de las más grandes compañías en comercializar la tecnología de impresión 3-D, esta primera impresora se basa en términos generales en un sistema para generar objetos tridimensionales por la formación de láminas sucesivas adyacentes de la sección transversal en la cual dichas laminas serán formadas por el curado de un polímero fotosensitivo al ser expuesto por un láser UV [Hull, 1986], este invento presentó ciertas ventajas respecto a otros aparatos de producción de objetos plásticos de aquel entonces, ya que en esta impresora no se requerían moldes sino que esta podía trabajar directamente de un modelo tridimensional hecho por computador.

En la actualidad se escucha mucho acerca de las impresoras 3-D y que estas ya pueden ser adquiridas por personas comunes y corrientes para uso doméstico debido a la disminución del costo de estas impresoras 3-D, pues la técnica de impresión en la cual se basa dichas impresoras que al día de hoy se han vuelto tan famosas no es la primera técnica de impresión inventada sino que viene a ser la técnica de impresión conocida como “*modelado por deposición de fundido*” u originalmente conocido por sus siglas en inglés como *FDM (fused deposition modeling)* el cual fue inventada en el año 1989 por S. Scott Crump quien sería uno de los fundadores en aquel entonces de la compañía *stratasys*, dicho invento fue patentado con el nombre de “*Apparatus and method for creating three-dimensional objects*” y es así que *stratasys* comercializaría esta nueva técnica de impresión 3-D y sería la principal competencia de 3D Systems.

Si bien hasta el momento se han hablado de las técnicas de impresión 3-D por estereolitografía y modelado por deposición de fundido, existen hasta el día de hoy muchas otras técnicas más, los cuales al igual que las primeras se basan en la adición de material para conseguir objetos tridimensionales, es por ello que existe

un término que engloba todas estas técnicas de impresión 3-D el cual es *additive manufacturing (AM)* que traducido al español sería manufactura aditiva. Como se sabe este tipo de manufactura está teniendo un gran crecimiento, lo cual se debe a que las patentes relacionadas a la manufactura aditiva tales como las anteriormente mencionadas ya han expirado, con lo cual muchas compañías tienen las puertas abiertas a desarrollar dicha tecnología, y es así que hoy en día existen más 300 compañías vendiendo impresoras 3-D, llegando a costar una de estas en algunos casos por debajo de \$1000 [**Stansbury, 2016**].

Así como se han venido desarrollando nuevas técnicas de manufactura aditiva, también se han venido introduciendo nuevos materiales, entre ellos polímeros, metales, cerámicos y materiales compuestos con el fin de incrementar el número de aplicaciones que pueda tener la de impresión 3D, entre algunos ejemplos tenemos a la fibra de vidrio en un resina fotosensitiva impresas mediante la técnica de estereolitografía [**Karalekas, 2003**], así también al reforzar al nylon 6 con arcilla usando la técnica de sinterizado selectivo por láser [**Kim, 2004**].

El empleo de materiales compuestos en la manufactura aditiva ha sido principalmente para incrementar las propiedades mecánicas de las piezas impresas, mientras que su uso en otras disciplinas tales como la óptica o la electrónica no han sido ampliamente investigados [**Kumar, 2010**]. Los materiales compuestos pueden ser definidos como un sistema de materiales constituidos por dos o más materiales, los cuales difieren en sus propiedades químicas y físicas además de no ser solubles entre sí. Los principales constituyentes de un material compuesto son la matriz y el refuerzo, la matriz la cual proporciona una integridad estructural mientras que el refuerzo contribuye en mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto. Tanto la matriz como el refuerzo pueden ser polímeros, cerámicos o metales, por ejemplo el concreto armado es el material compuesto más común usado en la industria de la construcción, el cual tiene al concreto como matriz y al acero como refuerzo.

En la actualidad continúa el desarrollo de los materiales compuestos, llegando incluso a sustituir a los metales en ciertas aplicaciones, por ejemplo en la industria automotriz se usan a materiales compuestos reforzados con fibras, ya que estos poseen una buena resistencia mecánica y sobre todo una baja densidad con lo cual se tendrían autos más ligeros y así se podría reducir el consumo de combustible [**Holbery, 2006**].

En ese sentido, El objetivo del presente trabajo es desarrollar materiales compuestos de matriz termoplástica: Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) Y Poliláctico (PLA), reforzadas con nanoarcillas, utilizando la técnica de modelado por deposición fundida (FDM: *Fused deposition modeling*) empleada en manufactura aditiva, para el cual se tiene los siguientes objetivos específicos.

- Investigar el estado del conocimiento de las tecnologías de manufactura aditiva con polímeros y materiales compuestos.
- Establecer la metodología experimental de la presente investigación.
- Determinar las propiedades de filamentos comerciales de ABS y PLA según el diseño experimental: ensayo de tracción, calorimetría diferencial de barrido (DSC), análisis termo-gravimétrico (TGA), índice de fluidez (MFI).
- Realizar pruebas de impresión 3D por FDM para filamentos comerciales de ABS y PLA.
- Estudiar el efecto de los principales parámetros de impresión 3D, con filamentos comerciales de ABS y PLA, sobre las propiedades mecánicas de piezas obtenidas por FDM, con el fin de determinar los valores adecuados que generen piezas de fácil impresión y con buenas propiedades mecánicas.
- Según el diseño experimental, extruir filamentos de material compuesto con diferentes composiciones de matriz (ABS y PLA) y nanoarcillas. Luego determinar los índices de fluidez (MFI) respectivos.
- Fabricar probetas mediante FDM según las normas de los ensayos mecánicos a realizar, usando los filamentos de material compuesto extruido y partiendo de los parámetros de impresión estudiados anteriormente.
- Determinar las propiedades mecánicas de las probetas fabricadas previamente mediante la técnica FDM utilizada en impresión 3D.

- Analizar y discutir los resultados obtenidos, a partir de los ensayos mecánicos realizados, para evaluar el efecto de las nanoarcillas tanto en el ABS como en el PLA.

En resumen se busca conocer más sobre las propiedades mecánicas de componentes impresos por FDM, así como el uso de materiales compuestos con dicha técnica de manufactura aditiva, con el fin de ampliar las aplicaciones de la tecnología de impresión 3D.

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

**Capítulo 1.** En este capítulo se describirá las técnicas de manufactura aditiva, así como los principales trabajos de investigación relacionados con la impresión 3D. También se hablara sobre materiales compuestos, reportando principalmente las propiedades mecánicas que se obtienen al reforzar las matrices poliméricas con fibras y partículas.

**Capítulo 2.** Este capítulo tiene como finalidad, mostrar la metodología experimental planteada para poder cumplir los objetivos del presente trabajo, donde se describen los distintos equipos y materiales usados, así como el diseño experimental que contempla la cantidad de probetas y los diversos ensayos a realizar.

**Capítulo 3.** En este capítulo se mostraran los resultados de los diversos ensayos realizados, así como la discusión de los mismos, con la finalidad de comprender el comportamiento de las piezas impresas por FDM y la aplicación de materiales compuestos obtenidos por esta técnica de manufactura aditiva.

El presente trabajo de investigación finalizara con una exposición secuencial de las principales conclusiones que se puedan conseguir de los diversos ensayos realizados, así también se presentara la bibliografía consultada para el desarrollo del presente trabajo.



# **Capítulo I**

## **Estado del arte**

## 1.1 Manufactura aditiva

Si hablamos de manera general, la producción de objetos tridimensionales puede estar dividida principalmente en 3 categorías, fabricación por moldeo, fabricación por sustracción o fabricación por adición [Stansbury, 2016]. En la fabricación por moldeo se le da la forma a la pieza de trabajo sin reducir o agregar material, ejemplos clásicos de este tipo de manufactura son el moldeo por compresión y el moldeo por inyección. La fabricación por sustracción como su nombre lo indica se basa en la sustracción de una fracción de material donde usualmente se utiliza herramientas de corte para remover el material no deseado, un ejemplo de este tipo de manufactura la podemos encontrar en un proceso de torneado donde se pueden obtener cuerpos de revolución. La manufactura aditiva comúnmente conocida como impresión 3-D es definida por la ASTM F2792 como proceso de unión de materiales para fabricar objetos a partir de datos obtenidos de un modelo tridimensional, usualmente capa sobre capa a diferencia de las metodologías usadas en la fabricación por sustracción.

En los inicios de la manufactura aditiva a esta se le conocía como prototipado rápido o por sus siglas en inglés como RP (Rapid Prototyping), ya que en los inicios de la manufactura aditiva solo se la usaba para la fabricación de modelos y partes de prototipos, y es con el prototipado rápido que los estudiantes y científicos podían rápidamente construir y analizar modelos para una investigación y comprensión teórica, los investigadores de mercado podían ver lo que los consumidores opinaban acerca de un nuevo producto antes de sacarlo al mercado, así como también los artistas podían explorar su creatividad con la creación de modelos muy complejos, sin embargo con la invención de las nuevas técnicas de manufactura aditiva ya no solo se pueden fabricar partes de prototipos o modelos sino también piezas funcionales [Wong, 2012].

La manufactura aditiva presenta ciertas ventajas frente a los clásicos métodos de procesamiento de plásticos, tales como la disminución de mano obra para el acondicionamiento y puesta en marcha de los equipos de moldeo, otra ventaja puede ser que en la manufactura aditiva no se requieren de moldes sino que esta puede trabajar de manera directa a partir de un modelo tridimensional hecho por un software CAD (*computer aided design*), así también una ventaja de la manufactura aditiva frente a la manufactura sustractiva es que en esta última se producen grandes fracciones de residuos en relación con la pieza resultante, fracciones de hasta un 90% o más, en el cual dichos residuos frecuentemente no son reciclables

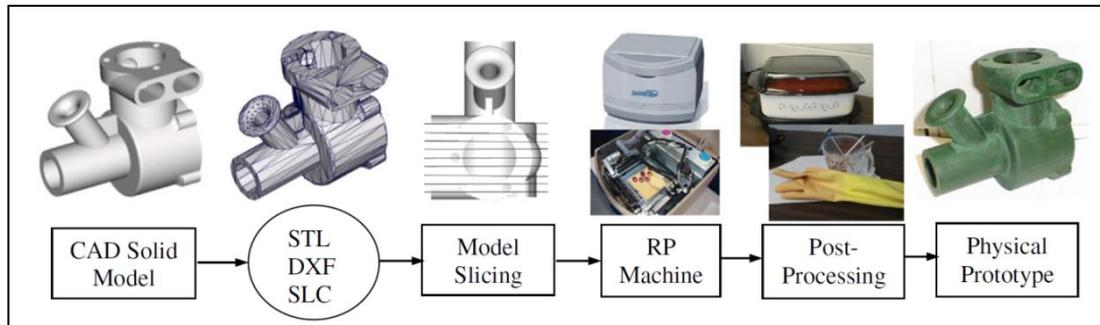
[Murr, 2015]. Sin embargo la manufactura aditiva se continua viendo obstaculizado por la baja productividad, pobre calidad y de la incertidumbre que se tiene en las propiedades mecánicas de los objetos producidos [Bikas, 2015], es por ello que desde la creación de la primera técnica de manufactura aditiva se vienen desarrollando e investigando nuevas técnicas de fabricación que permitan superar dichos inconvenientes [Hull, 1984; Deckard, 1986; Crump, 1986; Gothait, 1999].

## 1.2 Técnicas de manufactura aditiva

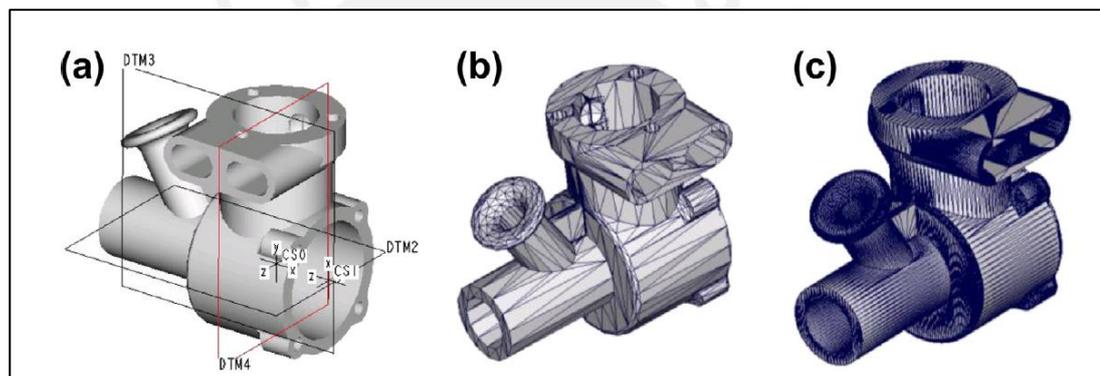
Al día de hoy se cuenta con muchas técnicas de manufactura aditiva que se encuentran disponibles en el mercado, estas técnicas se diferencian en la manera en como son depositadas las capas para la creación de objetos, en algunos casos a partir de material líquido como en la estereolitografía (SL) y en otros casos a partir de la fusión del material como lo es en el modelado por deposición de fundido (FDM). Cada una de estas técnicas presenta sus propias ventajas e inconvenientes que se deberán ser tomadas en cuenta al momento de adquirir algún equipo basadas en algunas de estas técnicas de manufactura aditiva. Las principales consideraciones que se deben tener en cuenta al momento de seleccionar algún equipo de estos son en términos generales la rapidez con la que se pueden producir objetos, el costo que implicaría fabricar estos objetos así como el costo y variedad de los materiales que pueden ser usados [Pham, 2001].

Si bien las diferentes técnicas de manufactura aditiva presentan diferencias como anteriormente se mencionó, estas poseen de manera general un mismo proceso que consta de los pasos mostrados en la **figura 1**, donde todo el proceso parte de un modelo 3-D realizado en un software CAD, que luego será convertido a un modelo STL, donde toda la superficie continua del modelo CAD es convertida de manera aproximada a una superficie formada por triángulos. Este archivo STL contendrá las coordenadas de los vértices de cada triángulo así como la normal a cada una de estas, teniendo una mejor calidad en el modelo STL si esta posee triángulos más pequeños, ya que se tendrá una mejor aproximación al modelo continuo (**Figura 2**). Luego de obtener el modelo STL se procederá a introducir dicho modelo en un software que realizara un rebanado a toda la geometría conformada por triángulos, y así que se obtendrá información de todas las capas que conforman el modelo, dicha información será introducida en el equipo basada en alguna técnica de manufactura aditiva para así obtener el objeto físico, que luego dependiendo de la técnica que se use esta podría pasar por un posproceso para así finalmente obtener el objeto tridimensional deseado.

Con el proceso general descrito anteriormente, es importante conocer el principio de funcionamiento y características de las principales técnicas de manufactura aditiva así como algunos trabajos de investigación que se han venido desarrollando, los cuales son descritas a continuación.



**Figura 1.** Proceso general en el cual se basan las distintas técnicas de manufactura aditiva [Chang, 2013].



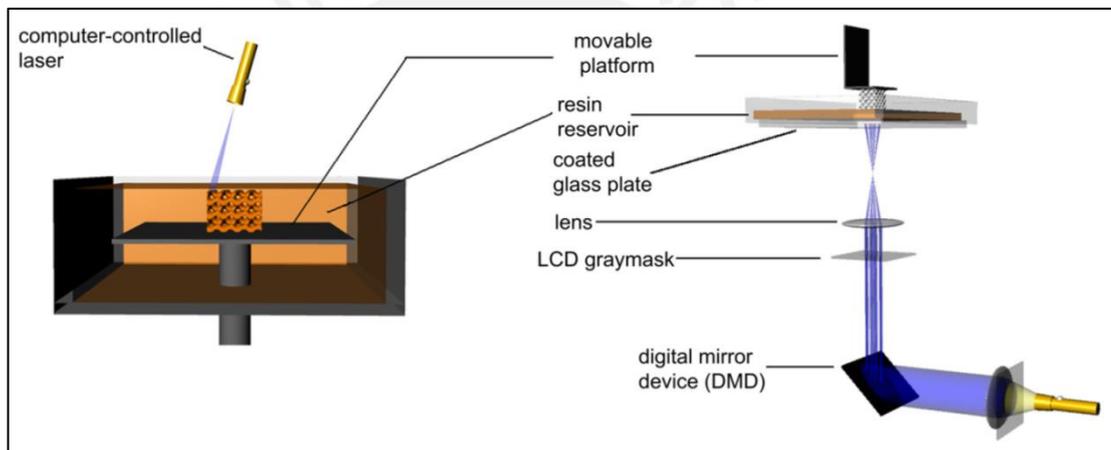
**Figura 2.** (a) Modelo CAD (b) modelo STL con enmallado grueso (c) modelo STL con enmallado fino [Chang, 2013].

### 1.2.1 Estereolitografía (SL)

La estereolitografía fue la primer técnica de manufactura aditiva comercializada, el cual se caracteriza por la conversión de una resina foto sensitiva liquida a un estado sólido por una exposición selectiva de un láser UV [Guo, 2013]. En esta técnica de manufactura aditiva se tiene una plataforma en el interior de una tina llena de resina fotosensitiva, dicha plataforma ira descendiendo capa por capa, es decir que la altura que va descendiendo la plataforma es equivalente al espesor de una capa, cada capa será formada por el barrido de un láser UV en ciertas zonas, definiendo así la geometría de la capa. El espesor típico de estas capas fotoinducidas pueden variar en el rango de 50µm-200µm. Cuando todas las capas del objeto hayan sido completadas, el exceso de resina en la tina es drenado para posteriormente ser reusado, luego el objeto obtenido es lavado con el fin de remover el exceso de resina presente aun en el objeto, y retirar los soportes estructurales para finalmente

colocar el objeto en una cámara donde será expuesta con luz UV para así incrementar el porcentaje de conversión del fotopolímero [Stansbury, 2016].

En la **figura 3** podemos observar diagramas esquemáticos de la manufactura aditiva por SL, al lado izquierdo es el técnica anteriormente explicada, donde la plataforma se mueve de arriba hacia abajo para poder construir un objeto, mientras que al lado derecho podemos observar una variante de la SL conocido como proyección de luz digital o DLP (digital light projection) en el cual la plataforma se mueve de abajo hacia arriba y las capas ya no son expuestas por un barrido de luz UV sino por imágenes proyectadas de luz UV. Esta variante de la SL es barata debido a la eliminación de un caro sistema laser y mucho más rápida ya que una capa completa es expuesta en lugar de un barrido con un solo laser UV [Guo, 2013] .



**Figura 3.** Esquema de 2 tipos de configuraciones de SL. Lado izquierdo: sistema basado en barrido por láser. Lado derecho: sistema basado en proyección de luz digital (DLP) [Melchels, 2010].

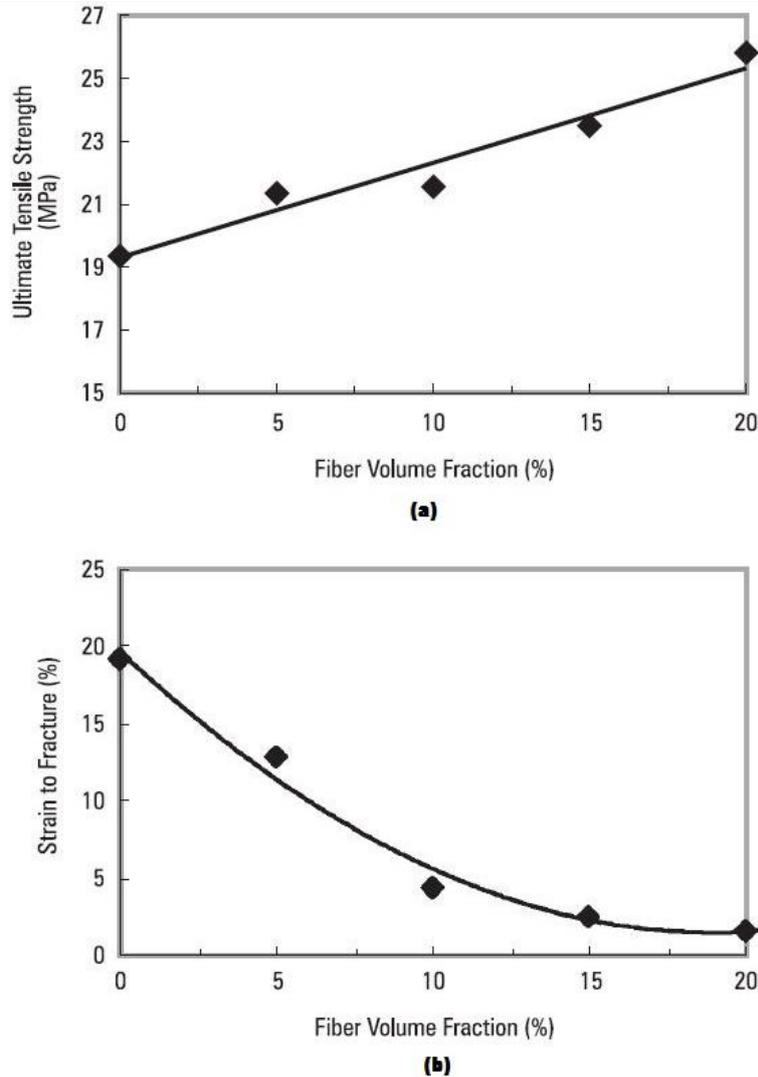
Si bien es cierto la AM basado en fotocurado es atractiva por muchas razones tales como niveles alto de resolución en las piezas impresas, superficies lisas que típicamente no requieren de un proceso de acabado, buena resistencia en el eje Z debido a la buena unión entre capas [Stansbury, 2016]. Sin embargo hay inconvenientes inducidos en las piezas obtenidas por SL, como por ejemplo un sobrecurado, el cual ocurre en las partes que sobresalen del objeto a imprimir ya que estas estas no se unen con ninguna capa inferior, otro inconveniente podría ser la forma de las líneas escaneadas introducido en el proceso de barrido con un luz UV [Wong, 2012].

Gowda et al. Investigó el efecto de los principales parámetros de impresión basadas en SL, en donde utilizó el método Taguchi para encontrar los valores de las

variables que den como resultado óptimas propiedades mecánicas, para el cual el partió de las variables con sus respectivos valores mostradas en la **tabla 1** Encontrando así que para un espesor de capa de 0.125mm, orientación de 90° y una separación entre líneas de barrido de 0.015mm, se obtienen objetos impresos con las mejores resistencias de tracción, flexión e impacto a partir del juego de valores tomados en dicha investigación, así también encontraron que la orientación de impresión y la altura de capa son los parámetros de mayor contribución en la resistencia a la tracción, mientras que la orientación tiene una mayor contribución en la resistencia al impacto [**Gowda,2014**].

*Gupta y Ogale* pudieron producir un material compuesto de una fotoresina reforzada con fibras de carbono, para el cual fue necesaria un doble curado, siendo el primero por luz UV en un proceso de impresión por SL, luego el material compuesto fue térmicamente curado, gracias a que se le agregó un iniciador térmico a la fotoresina, ya que si solo se realizaba un curado por luz UV, existirán zonas cercanas a las fibras de carbono que no abriesen curado, lo cual se debe a que las fibras de carbono son opacas a la luz UV. Y es así como también se pueden producir piezas impresas de material compuesto, siendo en este caso reforzados con fibras de carbono lo cual le conferiría una mejora en las propiedades de conducción térmica y eléctrica [**Gupta, 2002**].

*Cheah et al.* Investigó las propiedades mecánicas de un fotopolímero reforzado con distintos contenidos fibras de vidrio (longitud y diámetro promedio de 1.6mm y 15.8µm respectivamente), para el cual se usó la técnica de impresión basada en SL, así como también el efecto de las fibras de vidrio en la contracción de las piezas impresas. Encontrando que la contracción de las piezas impresas disminuye a mayor contenido de fibras de vidrio, ya que estas fibras restringen el moviendo a las cadenas poliméricas, así también se encontró que las propiedades mecánicas de las piezas impresas pueden mejorar al introducir fibras de vidrio cortas en el fotopolímero usado, y que la resistencia a la tracción de dichos materiales compuestos pueden incrementar con un mayor contenido en fibra de vidrio, sin embargo a mayor contenido de fibras se tiene una menor elongación a la rotura como se puede observar en la **figura 4**. Se sabe también que el incremento de la resistencia mecánica de un material compuesto es una función de la longitud así como de la orientación de las fibras [**Cheah, 1999**].

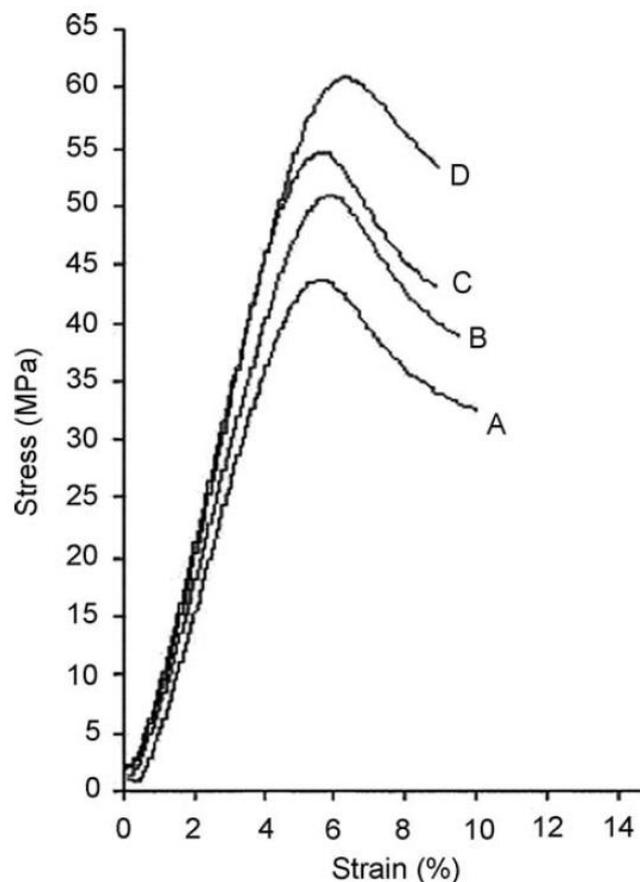


**Figura 4.** Propiedades mecánicas de materiales compuestos obtenidos mediante SL: (a) resistencia a la tracción vs fracción en volumen de fibras de vidrio. (b) elongación a la rotura vs fracción en volumen de fibras [Cheah, 1999].

**Tabla 1.** Principales parámetros de impresión en un sistema basado por SL [Gowda, 2014].

Parámetro de procesamiento	valor 1	valor 2	valor 3
Espesor de capa	0.075mm	0.1mm	0.125mm
Orientación	0°	45°	90°
Espaciamiento entre líneas de barrido	0.01mm	0.015mm	0.02mm

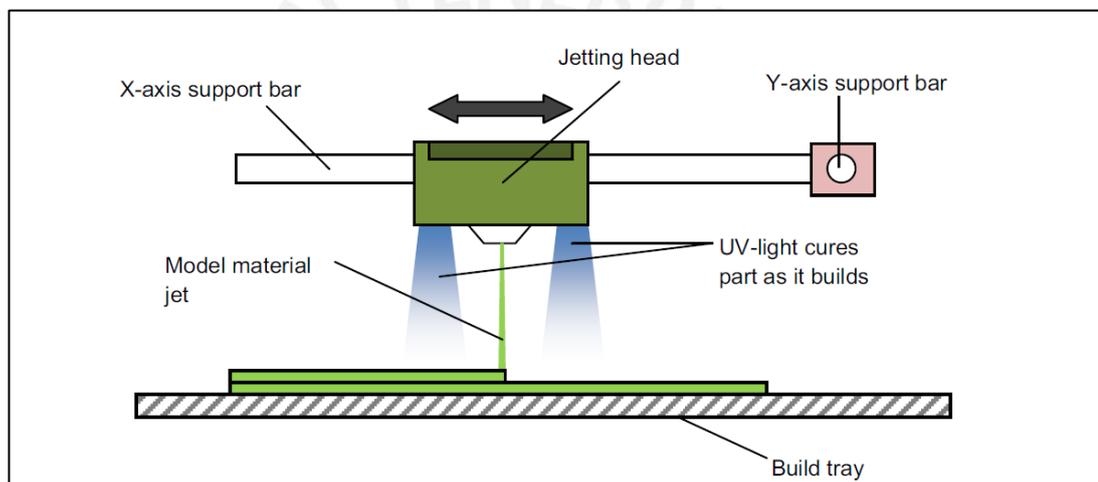
*Salmoria et al.* Estudio las propiedades mecánicas de piezas impresas por SL con diferentes tratamientos de poscurado y sin tratamiento de poscurado. El primer proceso de poscurado las probetas impresas fueron mantenidas en una cámara de luz UV por 60 minutos, otro juego de probetas fueron introducidas en un horno microondas por 4 minutos, y para el tercer proceso de poscurado se mantuvieron un juego probetas en un horno convencional a 125°C por 30 minutos. Los ensayos de tracción fueron llevados a cabo según la norma ISO 527-1 a temperatura ambiente y con una velocidad de 5mm/min. Encontrando que se obtienen mejores valores de resistencia a la tracción y modulo elástico para el proceso de poscurado donde las probetas fueron introducidas en un horno convencional, llegando a incrementar su módulo de elasticidad de 1050 (sin proceso de poscurado) a 1320 MPa, las curvas de esfuerzo vs deformación pueden ser observadas en la **figura 5** donde se obtiene valores intermedios de resistencia a la tracción para las probetas que fueron introducidas en la cámara de luz UV y en un horno microondas [**Salmoria,2005**].



**Figura 5.** Curvas de esfuerzo deformación para las probetas: (A) sin poscurado, y con poscurado en (B) una cámara de luz UV, (C) un horno microondas y (D) un horno convencional [**Salmoria, 2005**].

### 1.2.2 Polyjet

Esta técnica de AM al igual que en la SL se basa en el fotocurado, donde hay un cabezal que se mueve en el eje X y eje Y, que posee orificios ubicados a lo largo del eje Y, por donde se expulsaran chorros de un fotopolímero a una bandeja que irá descendiendo cada vez que una capa haya sido completamente depositada. En el cabezal están instaladas lámparas de luz UV como se observa en la **figura 6**, las cuales harán que curen las capas de fotopolímero depositadas. Los espesores de capa alcanzados con esta técnica son de hasta  $16\mu\text{m}$ , con lo cual se obtienen piezas de alta resolución, superiores a las que se obtienen con la SL, sin embargo las piezas producidas por polyjet son más débiles que las obtenidas por SL [Wong, 2012].

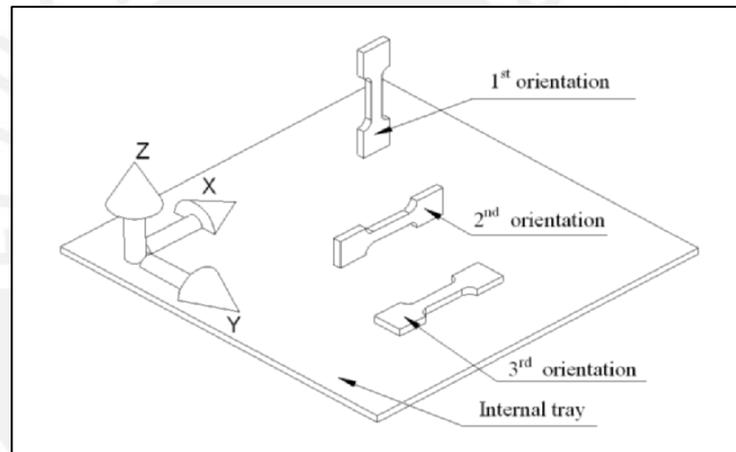


**Figura 6.** Esquema de la técnica de AM por polyjet [Hashmi, 2016].

Kesy y Kotlinski investigaron el efecto de la orientación en la resistencia a la tracción de probetas impresas mediante polyjet, las orientaciones estudiadas son las que se observan en la **figura 7**. La norma usada para las probetas de ensayo de tracción fue la ISO 527-2, a una velocidad de  $5\text{mm}/\text{min}$ . Los resultados de los ensayos muestran que para la primera y segunda orientación ocurre un claro límite elástico, mientras que para la tercera orientación se observa una ruptura frágil (**Figura 8**), con lo cual la resistencia a la tracción se ve influenciada a la orientación que se adopte para las piezas impresas por polyjet, así también esta anisotropía se debe a la heterogénea absorción de luz UV del fotopolímero durante el proceso de impresión [Kesy, 2010].

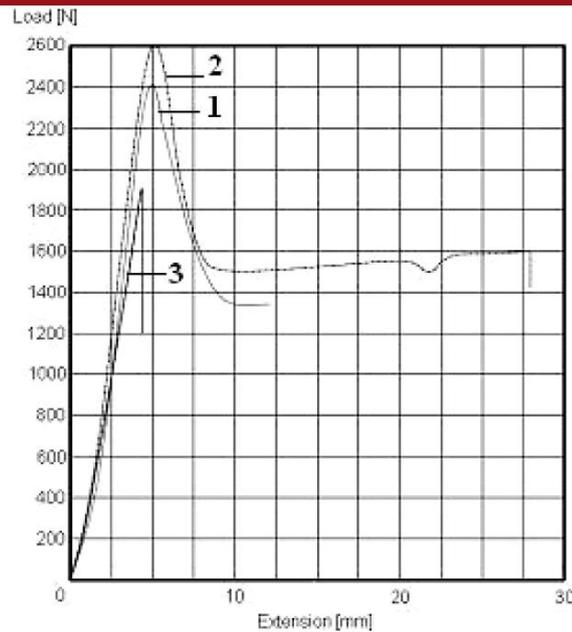
Barclift y Williams investigaron el efecto de 3 parámetros en la resistencia mecánica y módulo de elasticidad de piezas obtenidas mediante polyjet. Dichas variables son las que se pueden observar en la **figura 9**, los cuales son la orientación en el plano

XY, orientación en el eje z (si la probeta esta parada o echada) y el espaciamiento entre las probetas en el proceso de impresión. En dicho estudio se codificaron a las piezas impresas bajo la siguiente nomenclatura “ABC”, donde A es el eje en el cual está la mayor dimensión de la probeta, B es el eje en el cual está la dimensión intermedia de la probeta, y C puede ser igual a T (cuando hay una pequeña separación en las probetas) o F (cuando hay una gran separación entre probetas), una vez dadas estas aclaraciones podemos observar la **figura 10**, donde se muestra un gráfico de barras de la resistencia a la tracción y el módulo elástico de las probetas impresas. La mayor resistencia a la tracción y mayor módulo de elasticidad corresponde a las probetas XZT con valores promedios de 37.8MPa y 1874Mpa respectivamente, así también revelan que la orientación en Z (parado o echado) puede afectar la precisión del espesor y ancho de las piezas impresas [Barclift, 2012].

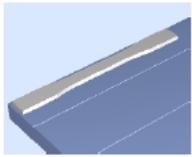
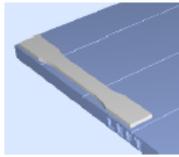
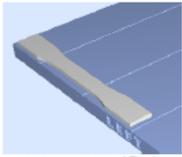
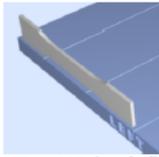
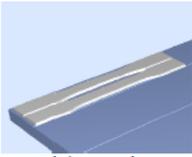
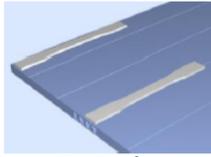


**Figura 7.** Probetas de tracción obtenidas en distintas orientación mediante la técnica de impresión por polyjet [Kesy, 2010].

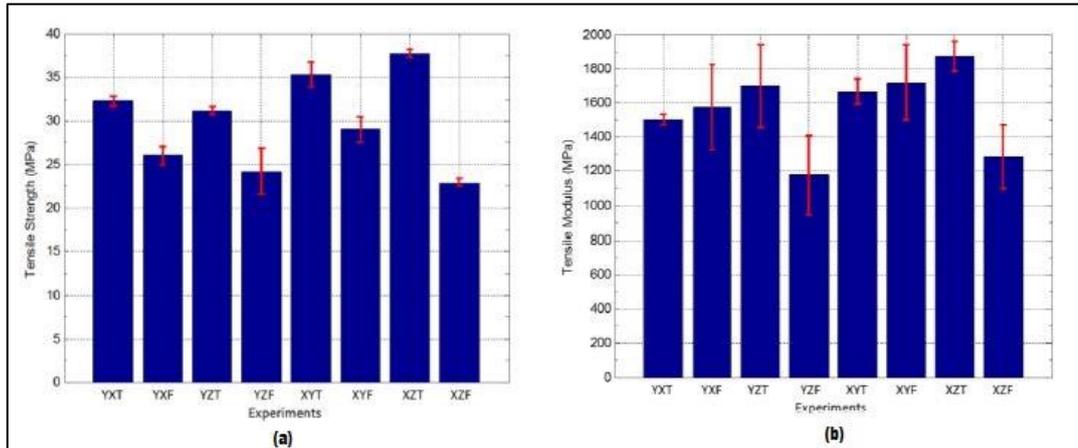
Cazón *et al.* estudio las propiedades mecánicas de probetas impresas mediante polyjet, estas probetas fueron impresas en distintas orientación como se puede ver en la **figura 11**, el material usado para la impresión de las probetas fue el Fullcure 720, el cual es muy comúnmente usado, y para el material de soporte se usó el Fullcure 705. Los ensayos de tracción realizados muestran que la orientación de las piezas impresas tiene un significativo efecto en el módulo de elasticidad y en el esfuerzo de rotura, mientras que no hubo una significancia estadística para la resistencia a la tracción. Las probetas con mayor módulo elástico fueron el juego de probetas conformadas por las probetas 1,2 y 3 (**Figura 11**), es así que se recomienda que se impriman objetos teniendo en cuenta que la dirección de la carga crítica este en el eje X del sistema referencia adoptado en un equipo basado en polyjet [Cazón, 2014].



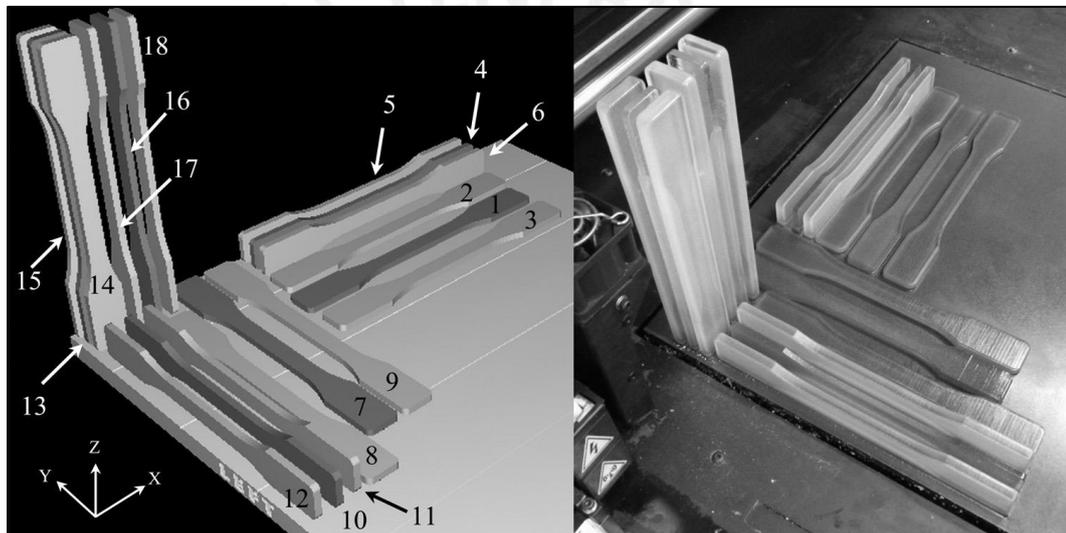
**Figura 8.** Curvas de fuerza vs elongación para las probetas impresas con orientaciones mostradas en la figura 7 [Kesy, 2010].

<i>Parameter: X-Y Orientation</i>	
 XY	 YX
<i>Description:</i> The in-plane build orientation of the part such that its length is parallel or perpendicular with respect to the front of the build tray.	<i>Hypothesis:</i> Orienting parts across print-head paths, may lead to lower mechanical properties due to banding from discretized jetting nozzles.
<i>Parameter: Z-Orientation</i>	
 YX or XY (flat)	 YZ or XZ (angled)
<i>Description:</i> The build direction orientation of the part such that the width, not the length, lays flat or angled with respect to the X-Y plane.	<i>Hypothesis:</i> An increase in the number of layers causes curing "print-through" and thus increased mechanical properties for parts with widths aligned in the Z plane (as noted for SL in [17]).
<i>Parameter: Part Spacing</i>	
 Tight Spacing	 Far Spacing
<i>Description:</i> The overall spacing between parts in X-Y plane of the build-tray.	<i>Hypothesis:</i> Smaller spacing may lead to increased mechanical properties due to potential UV over-cure effect.

**Figura 9.** Parámetros experimentales de probetas impresas mediante polyjet [Barclift, 2012].



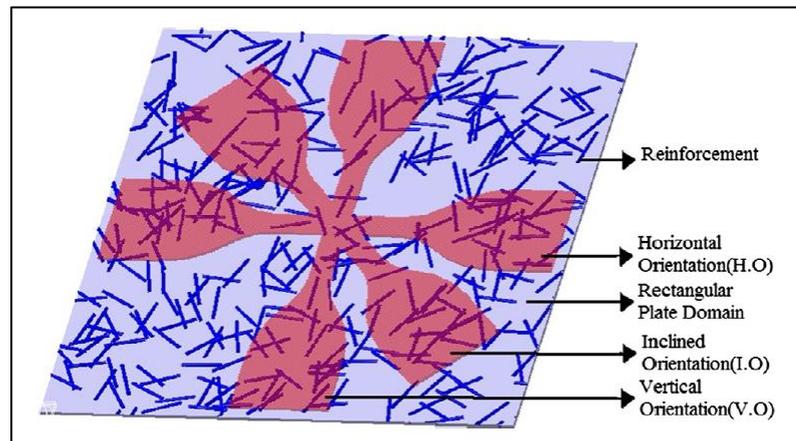
**Figura 10.** Gráficos de barras de (a) resistencia a la tracción y (b) módulo de elasticidad de probetas impresas bajo los parámetros experimentales de la figura 9 [Barclift, 2012].



**Figura 11.** Disposición de las probeta observadas en el software de impresión (a la izquierda) y en el equipo de impresión basado en polyjet (a la derecha) [Cazón, 2014].

Sugavaneswaran y Arumaikkannu desarrollaron un algoritmo que les permitía generar un modelo CAD de un material reforzado con fibras orientadas aleatoriamente, ya que es posible usar dos materiales distintos en un equipo basado por polyjet, pudiendo así definir con el algoritmo el diámetro, longitud y porcentaje en volumen de las fibras, así como las dimensiones de la plancha rectangular que contendrán a las fibras. El material que se usó como matriz fue Tango Plus el cual posee características semejantes a la de un elastómero, y como refuerzo al Vero white el cual es un polímero duro. El porcentaje en volumen de las fibras y la relación de aspecto fue de 10% y 1:10 respectivamente. Una vez definida todas las características del material compuesto se procedió a retirar del modelo solo la sección que correspondía a las probetas de tracción, para el cual se tomaron 3 distintas orientaciones como se puede observar en la **figura 12**, y serian estas las

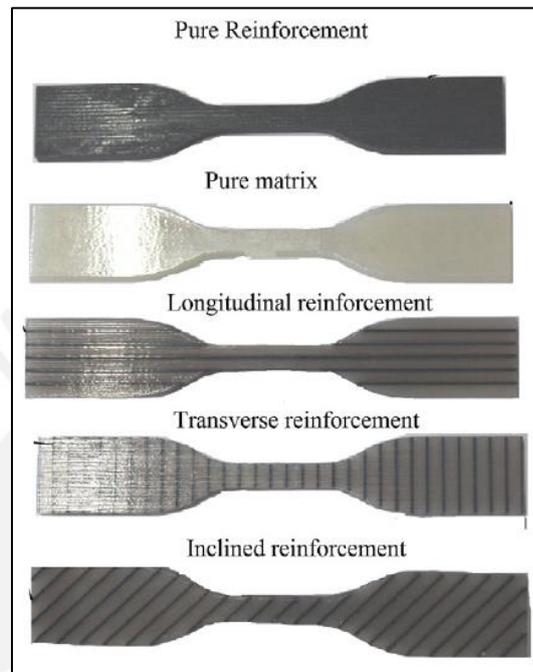
probetas que fueron impresas con el fin de evaluar sus propiedades mecánicas. Se observó de los ensayos de tracción que las probetas con distintas orientaciones poseían valores de resistencia a la tracción muy cercanas, así también se observó que el material compuesto reforzado con fibras orientadas aleatoriamente incrementaron su resistencia a la tracción en 22% y la elongación en 10% respecto a la matriz pura [**Sugavaneswaran, 2014**].



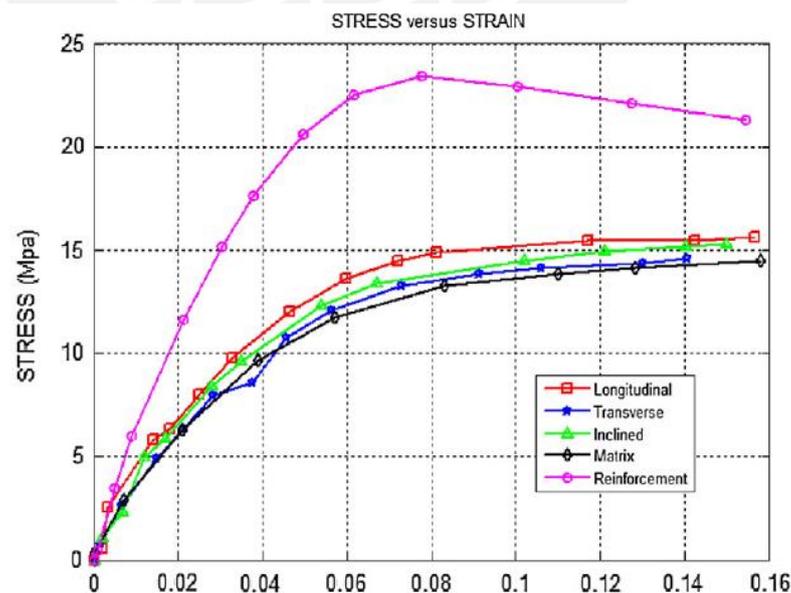
**Figura 12.** Disposición de las fibras en la plancha rectangular, así como también las orientaciones de las probetas de tracción [**Sugavaneswaran, 2014**].

Como se pudo apreciar en el caso anterior se pudo generar materiales compuestos con fibras orientadas aleatoriamente gracias a un algoritmo, en el cual se logró incrementar las propiedades mecánicas de las piezas impresas. Sin embargo se pueden obtener mejores propiedades mecánicas en materiales compuestos con un reforzamiento unidireccional, los cuales fueron desarrollados por *Sugavaneswaran* y *Arumaikkannu*, donde evaluaron las propiedades mecánicas de un material compuesto estructural obtenido mediante impresión por polyjet, así como las propiedades mecánicas del refuerzo y la matriz, teniendo como matriz al fotopolímero conocido como darus white con propiedades similares al del polipropileno (PP), y como refuerzo a otro fotopolímero llamado vero black el cual posee una alta resistencia a la tracción, siendo el porcentaje en volumen de refuerzo de 10%. En dicha investigación lograron orientar al refuerzo en la matriz, estudiando al material compuesto con orientaciones de refuerzo de 0°, 45° y 90° respecto a la aplicación de la carga en las probetas impresas (**Figura 13**). Observando de los ensayos de tracción que las probetas con reforzamiento unidireccional incrementaron su resistencia a la tracción, así como su módulo de elasticidad respecto a la matriz pura (**Figura 14**), siendo estos incrementos de 21.9%, 14.88% y 6.79% para las probetas con orientación de refuerzo de 0°, 45° y 90° respectivamente. Así también en dicha investigación se logró determinar de

manera aproximada las propiedades elásticas del material compuesto estructural impreso mediante un simple método analítico basado en la regla de las mezclas y la ecuación de transformación de propiedades, es así que este simple método puede ser usado para estimar las propiedades elásticas de materiales compuestos estructurales obtenidos por manufactura aditiva [Sugavaneswaran, 2015].



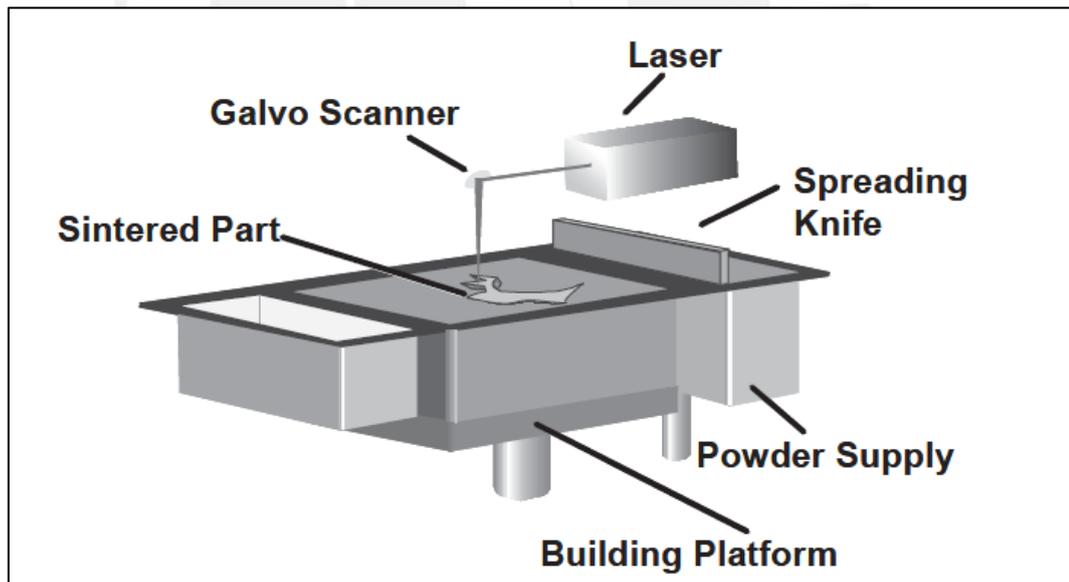
**Figura 13.** Probetas de tracción de material compuesto estructural obtenido por polyjet con distintas orientaciones de refuerzo, así como también las probetas de tracción de la matriz y el refuerzo por separado [Sugavaneswaran, 2015].



**Figura 14.** Curvas de esfuerzo vs deformación de las probetas mostradas en la figura 13 [Sugavaneswaran, 2015].

### 1.2.3 Sinterizado selectivo por láser (SLS)

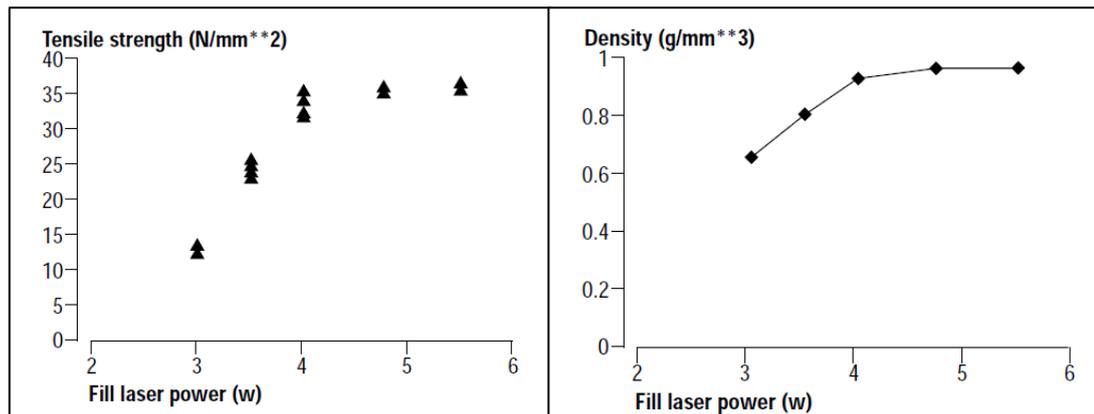
El sinterizado selectivo por láser o también conocido por sus siglas en inglés como SLS (*Selective Laser Sintering*), es una técnica de manufactura aditiva inventada en 1986 por Carl R. Decker, donde se usa un fino polvo, el cual es calentado por la aplicación de un láser de CO<sub>2</sub> de alto poder, permitiendo así que las partículas de polvo se unan (**Figura 15**). Antes que el polvo sea sinterizado por el láser de CO<sub>2</sub>, se debe precalentar dichos polvos para que así solo se aplique la energía necesaria suministrada por el láser para que ocurra el sinterizado de los polvos, y así también evitar grandes diferencias térmicas que podrían conllevar a una distorsión en la geometría de las piezas fabricadas por esta técnica [**Stansbury, 2016**]. La principal ventaja que posee esta de técnica de AM es que se pueden usar distintos materiales, como metales, polímeros, cerámicos y la combinación entre estos [**Tang, 2011; Tan, 2015; Jansson, 2015; Drummer, 2012**]. Sin embargo esta técnica es relativamente lenta, además de presentar problemas como una irregular distribución del campo térmico, el cual podría generar distorsiones térmicas y fisuras en el objeto a imprimir [**Bikas, 2015**].



**Figura 15.** Esquema de la técnica de AM por SLS [**Schmidt, 2007**].

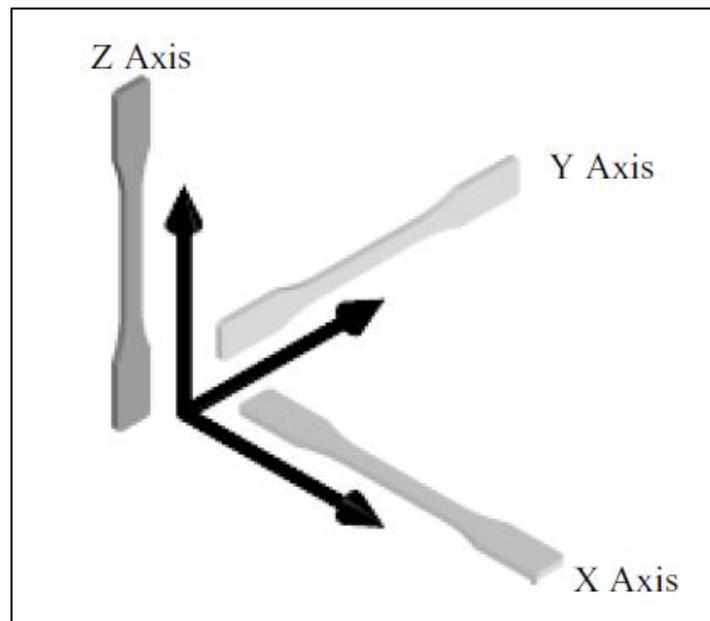
*Gibson y Shi* analizaron la relación entre las propiedades de un fino polvo de nylon, los parámetros de fabricación y las propiedades mecánicas de objetos impresos por SLS, indicando que para polímeros termoplásticos amorfos y semicristalinos se recomienda trabajar con una temperatura de precalentamiento de unos cuantos grados menos de la temperatura de transición vítrea con el fin de reducir la potencia del láser y evitar distorsiones en la geometría por enfriamientos rápidos, ya que si se trabajase con una temperatura de precalentamiento mayor todos los polvos de la

plataforma tenderían a pegarse. De los ensayos realizados se puede observar que tanto la densidad como la resistencia a la tracción se incrementan con una mayor potencia en el láser, sin embargo estas propiedades tienden a limitarse a un valor (**Figura 16**). Así también observaron que un posprocesamiento de las piezas impresas, tales como un recubrimiento y acabado superficial lograron incrementar la dureza, pero la resistencia a la tracción se incrementó muy poco respecto a las piezas sin recubrimiento [**Gibson, 1997**].

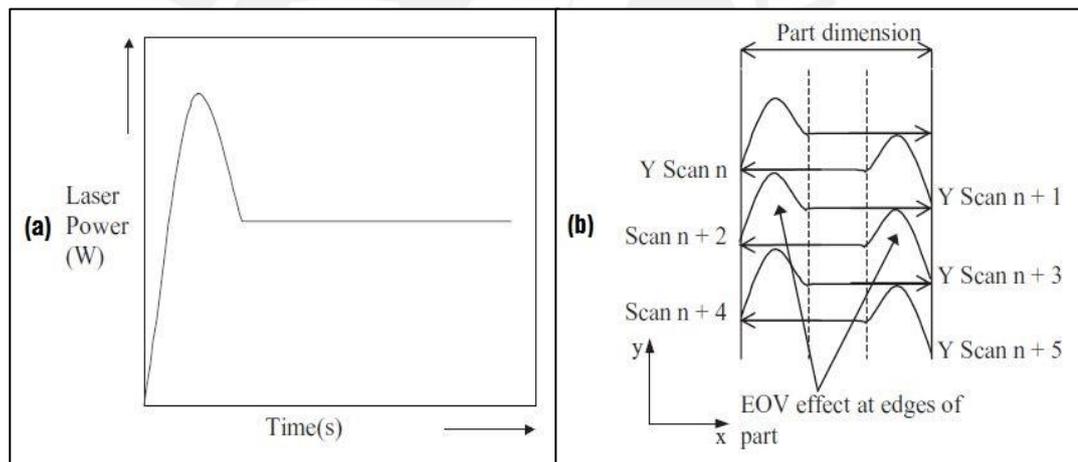


**Figura 16.** Variación de la Resistencia a la tracción y densidad con la potencia del láser para piezas de nylon impresas por SLS [**Gibson, 1997**].

*Ajoku et al.* investigó la anisotropía de piezas impresas mediante SLS, para el cual estudio las propiedades mecánicas de probetas impresas en la dirección de los ejes X, Y y Z como se puede observar en la **figura 17**. Así también estudio el efecto *end-of-vector* (EVO) el cual está presente en todas las piezas obtenidas por SLS. El material usado para dicha investigación fue un nylon-12 o comercialmente conocido como Duraform PA. El efecto EOV ocurre debido al grado de exposición del láser al inicio de cada línea de barrido, ya que es ahí donde ocurre un estallido de energía el cual será estabilizado después de unos pocos milisegundos (**Figura 18.a**). Una representación esquemática del efecto EOV en sección de la pieza la podemos observar en la **figura 18.b**, donde los estallidos de energía generaran unos bordes más densos que la parte central del objeto a imprimir. De los ensayos mecánicos se tiene que las probetas orientadas en el eje X tienen la mayor resistencia a la tracción, lo cual es debido a que las líneas de barrido estuvieron orientadas en la dirección de la carga. Así también se ensayaron probetas de flexión con 8mm y 10mm de ancho, encontrando que las probetas de 8mm de ancho poseen una mejor resistencia a la flexión, lo cual es debido al efecto EOV. Aunque el efecto EOV siempre ocurra, esta influirá en mayor medida a las propiedades mecánicas de piezas que tengan pequeñas dimensiones [**Ajoku, 2006**].



**Figura 17.** Orientación de probetas de tracción impresas por SLS [Ajoku, 2006].



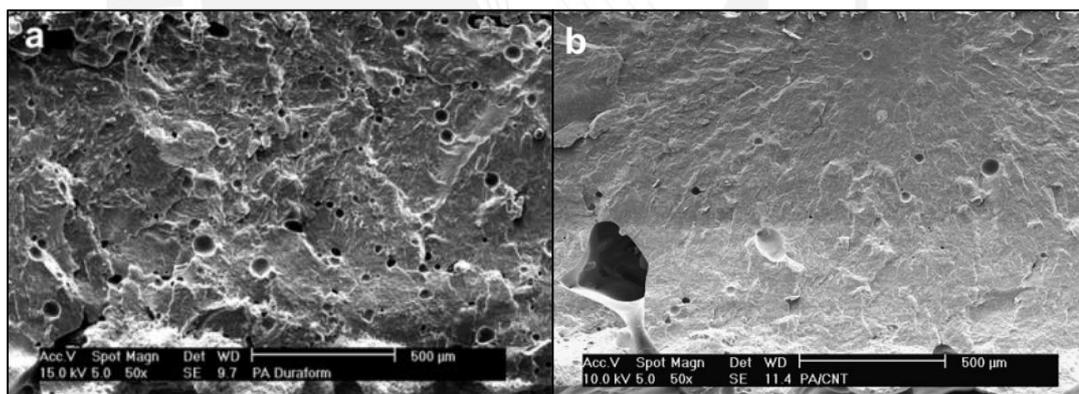
**Figura 18.** (a) grafica de la potencia del láser vs tiempo en una línea de barrido y (b) representación esquemática del efecto EO en una sección de una pieza a imprimir por SLS [Ajoku, 2006].

Salmoria et al. estudio las propiedades mecánicas de un nanocompuesto obtenido por SLS, teniendo como matriz a una poliamida (PA) comercialmente llamada Duraform PA, y como material de refuerzo a unos nanotubos de carbono de múltiple pared (MWCNT) con 0.5% en peso en el compuesto. Los nanotubos fueron dispersos en los polvos de la PA por medio de un mezclador cilíndrico por 70 minutos a 90rpm. Los resultados del ensayo de flexión para el material compuesto y para la PA pura son mostrados en la **tabla 2**, donde se observa un incremento del 10% en la resistencia a la flexión, lo cual se debe a que nanotubos de carbono de múltiple pared (MWCNT) dispersos en la PA inhiben el movimiento de las cadenas

poliméricas, además se observa de los resultados que el nanocompuesto presenta una mayor desviación en los valores de las propiedades mecánicas respecto a los obtenidos en la matriz pura, lo cual se debe a que los MWCNTs incrementan los defectos en las piezas obtenidas por SLS. En la **figura 19** podemos observar las micrografías de la superficie de fractura de la PA y el nanocompuesto, lo cual revela que con la adición de 0.5% en peso de MWCNT se generaron piezas impresas con mayor densidad, lo cual probablemente se deba a una alta absorción de la energía del láser por parte de los MWCNTs y a la coalescencia de la PA. También podemos observar de las micrografías SEM una fractura más frágil en el nanocompuesto que en la matriz pura [**Salmoria, 2011**].

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas de flexión de la PA y PA/MWCNT impresas por SLS [**Salmoria, 2011**].

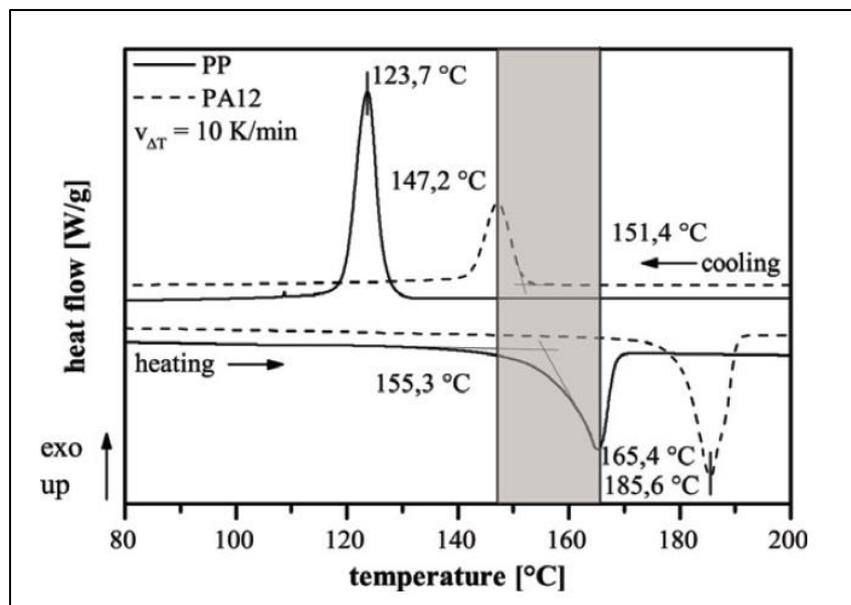
	Duraform PA	PA/MWCNT
Resistencia a la flexión	86±5	94±9
Módulo de flexión	546±28	718±125
Elongación (%)	11±0.5	9±1.5



**Figura 19.** Micrografías SEM de la superficie de fractura de (a) PA y (b) nanocompuestos de PA/MWCNT [**Salmoria, 2011**].

*Drummer et al.* Investigó la fabricación de una blanda polimérica de termoplásticos semicristalinos conformada por 80% en peso de polipropileno (PP) y 20% en peso de poliamida 12 (PA12) mediante manufactura aditiva basada en SLS. Donde nos habla que para una buena impresión por SLS de blandas poliméricas se deben trabajar en cierto rango de temperatura para la cámara de fabricación (zona que contiene a los polvos poliméricos que luego serán sinterizados por el láser de CO<sub>2</sub>). Dicho rango de temperatura está por debajo de la temperatura de fusión de uno de ellos y por encima de la temperatura de cristalización del otro, porque si se

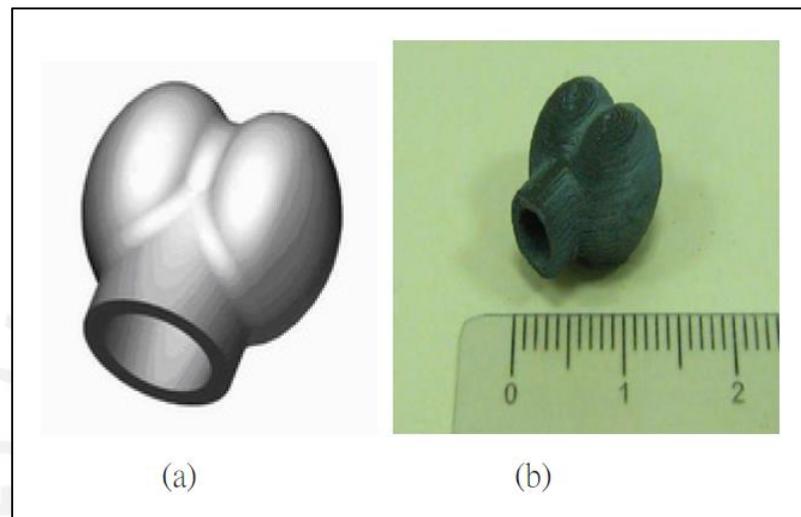
excede del límite superior uno de los materiales comenzara a fundirse de manera incontrolada, y para el caso en el que la temperatura este por debajo del límite inferior uno de los polímeros comenzara a cristalizar lo cual produciría un alabeo debido a los esfuerzos residuales en la capa fundida. En la **figura 20** se puede observar el rango de temperatura de la cámara en el que se trabajó para la blenda conformada por PP y PA12. La blenda obtenida de estos dos termoplásticos inmiscibles resulto ser porosa, sin embargo se logró disminuir la cantidad de poros obtenidos con una mayor potencia del láser. A pesar de ello se obtuvieron pobres valores en las propiedades mecánicas de los ensayos de tracción realizados, esto es debido a la pobre adhesión que se presentaba en la blenda [Drummer, 2012].



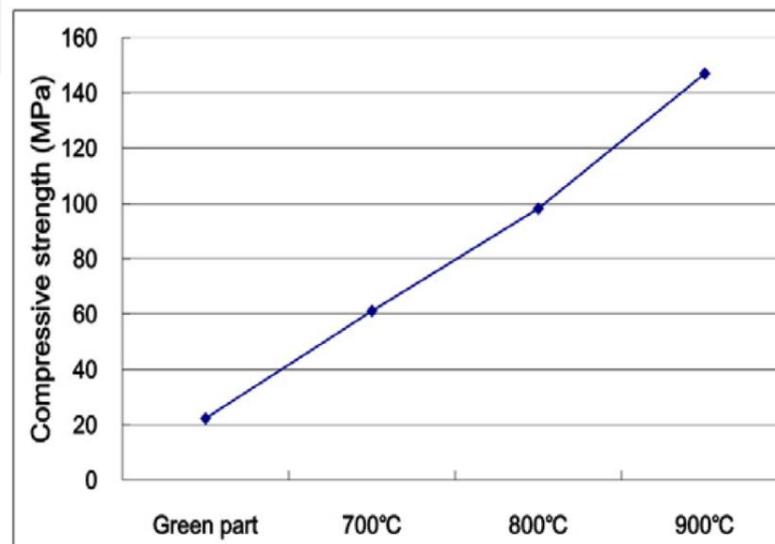
**Figura 20.** Determinación del rango de temperatura de la cámara de fabricación para una blenda de PP/PA12 obtenido mediante una calorimetría diferencial de barrido (DSC) [Drummer, 2012].

Liu et al. estudio el proceso de fabricación de un andamio de óseo mediante la técnica de impresión 3D por SLS. Para dicho estudio se usó como material de fabricación a una mezcla de polvos de titanio y silica sol con una relación en peso de 2 a 1, con un tamaño de  $10\mu\text{m}$  para los polvos de titanio, la función de la silica sol fue como aglutinante para conseguir una buena unión luego del proceso de sinterizado. Se debe tener en cuenta que para la impresión de geometrías muy complejas la mezcla debe tener una alta viscosidad, ya que en caso contrario las partes sobresalientes de la pieza a imprimir se deflactaría, cosa que no ocurrió en dicho estudio ya que la viscosidad de la mezcla era muy alta. Para el proceso de impresión se trabajó con una potencia de láser de 15W y una velocidad de 100mm/s obteniendo así exitosamente el andamio óseo luego de 3 horas (Figura

21). A dicho andamio óseo obtenido se realizaron ensayos de compresión. Debido a que las piezas recién salidas del proceso impresión por SLS son débiles y frágiles, se procedió a realizar un posproceso, el cual consistió en un calentamiento por 120 minutos, siendo las temperaturas de posprocesamiento estudiadas de 700°C, 800°C y 900°. Obteniendo un incremento en la resistencia a la compresión a mayor temperatura de posprocesamiento (**Figura 22**). Así también se observó un mayor crecimiento celular en el andamio óseo que fue postratado a 800°C que en el andamio óseo sin ningún postratamiento [*Liu, 2013*].



**Figura 21.** Andamio óseo obtenido por SLS: (a) modelo CAD (b) pieza impresa [*Liu, 2013*].

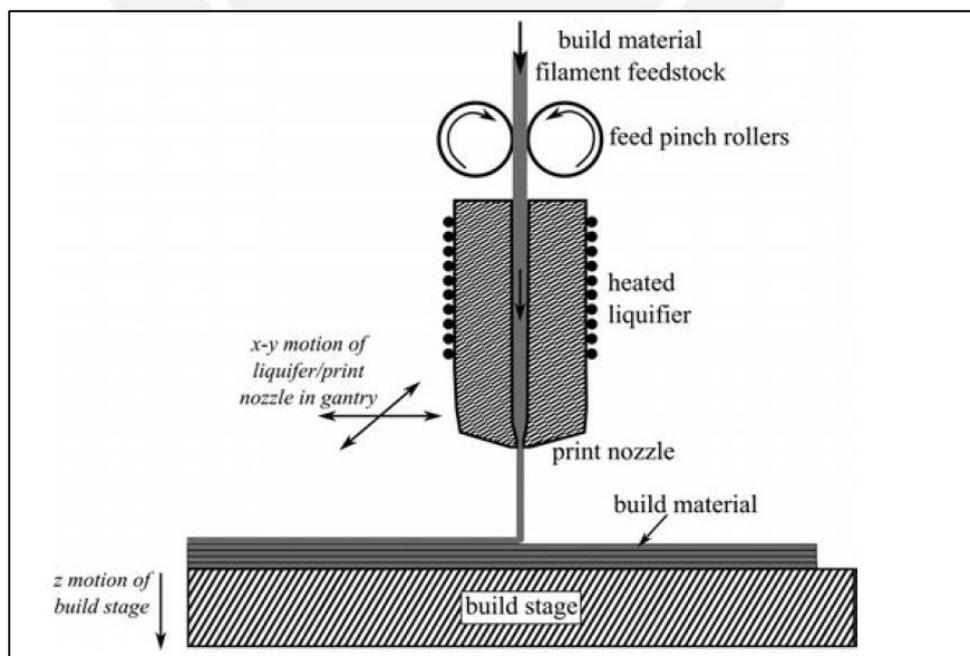


**Figura 22.** Resultado de los ensayos de compresión de andamio óseo sin postratamiento y con postratamiento a 700°C, 800°C y 900°C [*Liu, 2013*].

### 1.2.4 Modelado por deposición fundida (FDM)

El modelado por deposición de fundido se basa en un proceso de extrusión, como lo podemos observar en la **figura 23**, donde un filamento de termoplástico es alimentado por unos rodillos hacia una cámara caliente en donde dicho filamento se fundirá. El cabezal que contiene a los rodillos y a la cámara caliente se pueden mover en el plano X-Y, el filamento que aún no ha ingresado a la zona caliente actuara como un pistón, empujando al polímero termoplástico fundido hacia afuera de la boquilla, donde depositara al material fundido en una plataforma el cual se mueve en el eje Z, y es así como el objeto se formara por la deposición múltiples capas en la plataforma, plataforma que podría estar a cierta temperatura dependiendo del material con el cual se está trabajando. Los diámetros comerciales de los filamentos con los cuales trabajan las impresoras basadas en FDM son de 3mm y 1.75mm, y teniendo como diámetro de 0.3, 0.4 y 0.5mm en la salida de la boquilla.

La manufactura aditiva por FDM es muy famosa, ya que se pueden encontrar equipos muy baratos en comparación con las otras técnicas de AM, incluso existen equipos a la venta para usos domésticos. Equipos basados en FDM son ampliamente usados tanto en la industria, universidades y colegios, y así como se pueden encontrar equipos muy baratos, también existen equipos muy caros de prestigiosas marcas tales como 3D Systems y Stratasys.



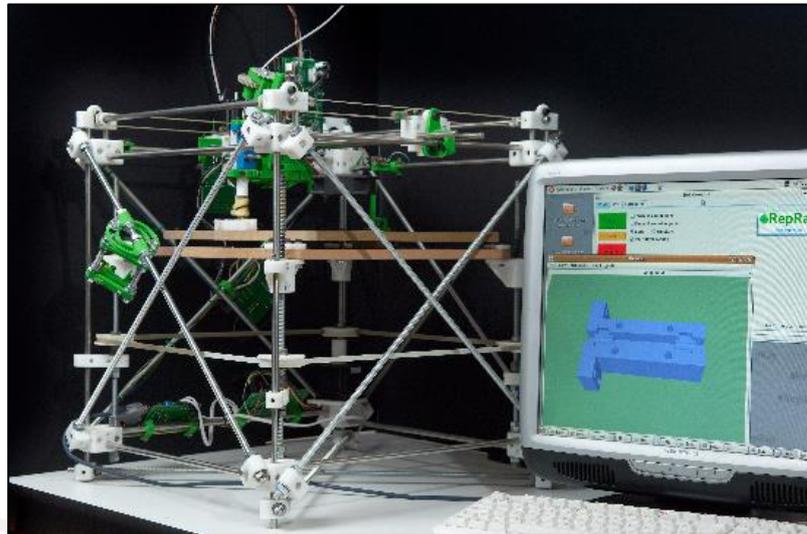
**Figura 23.** Esquema de un típico proceso de impresión por FDM [Turner, 2014].

Al día de hoy solo una pequeña cantidad de polímeros pueden ser imprimibles mediante FDM, ya que estos deben poseer propiedades particulares que son necesarias para poder obtener un buen proceso de impresión de un objeto, dichas propiedades son unas relativas bajas temperatura de transición ( $T_g$ ) y fusión ( $T_m$ ), así también una baja tendencia a la contracción tras la solidificación, con lo cual los termoplásticos de mayor uso son el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), con una temperatura de transición de  $110^{\circ}\text{C}$  y sin una verdadera temperatura de fusión por ser un polímero amorfo, el poliácido láctico (PLA) con una temperatura de transición de  $60^{\circ}\text{C}$  y de fusión de  $175^{\circ}\text{C}$ , estos dos polímeros cumplen los requisitos antes mencionados, pero además existen otros polímeros imprimibles tales como el policarbonato(PC) y el alcohol polivinílico (PVA) [Torrado,2014].

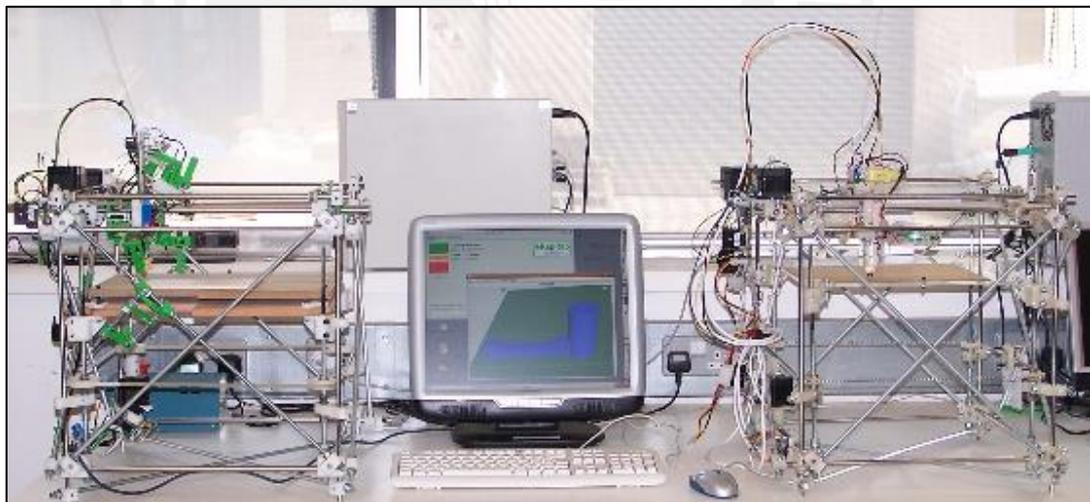
Cabe mencionar que a pesar de ser la técnica de manufactura aditiva más barata, esta es usada en aplicaciones aeronáuticas [Vashishtha, 2011], en automoción [Ilardo, 2010], en fabricación de partes de prototipos robóticos [Belter, 2014], así como armazones para la aplicación en ingeniería de tejidos [Zein, 2002]. Actualmente se vienen realizando investigaciones donde se busca introducir un material que refuerce a los termoplásticos comúnmente usados en la técnica de impresión por FDM [Shofner, 2002; Masood, 2004; Torrado, 2015], pero esta no es la única manera de conseguir mejores propiedades de los componentes impresos sino que también se van desarrollando nuevos algoritmos que permitan generar piezas impresas con mejores propiedades mecánicas y mayor precisión dimensional [Panda, 2014; Mohamed, 2016].

En el mercado actual de impresión 3D podemos encontrar equipos de impresión basada en FDM de muy bajo costo, lo cual fue gracias al proyecto RepRap iniciado en el 2005 y liderado por el Adrian Bowyer, donde buscaban crear impresoras autoreplicables, es decir que la mayoría de piezas necesarias para construir una impresora 3D sean fabricadas por otra impresora 3D, y buscando alternativas de bajo costo para los otros componentes necesarios para la fabricación de la impresora 3D, así también introdujeron el uso de software libre para controlar dichas impresoras, y es así como consiguieron reducir enormemente esta tecnología de impresión 3D [Sells, 2010]. La primera impresora producida por el proyecto RepRap fue la “RepRap Darwin 1.0” (Figura 24), donde más de la mitad de sus piezas fueron obtenidas por impresión 3D, dichas piezas fueron obtenidas por una impresora 3D de la marca Stratasys. Así también a partir de la RepRap Darwin 1.0 se pudo fabricar la impresora “RepRap Child” (Figura 25), que vendría a ser el hijo de la impresora Darwin 1, siendo la RepRap Child la primera impresora vendida

[Jones,2011]. Resultados de ensayos de tracción basados en la norma ASTM D638 muestran que componentes impresos por impresoras RepRap son comparables en resistencia a la tracción y modulo elástico a las de los componentes obtenidos por equipos de impresión 3D comerciales [Tymrak, 2014].



**Figura 24.** Impresora RepRap Darwin 1.0 [Jones, 2011].



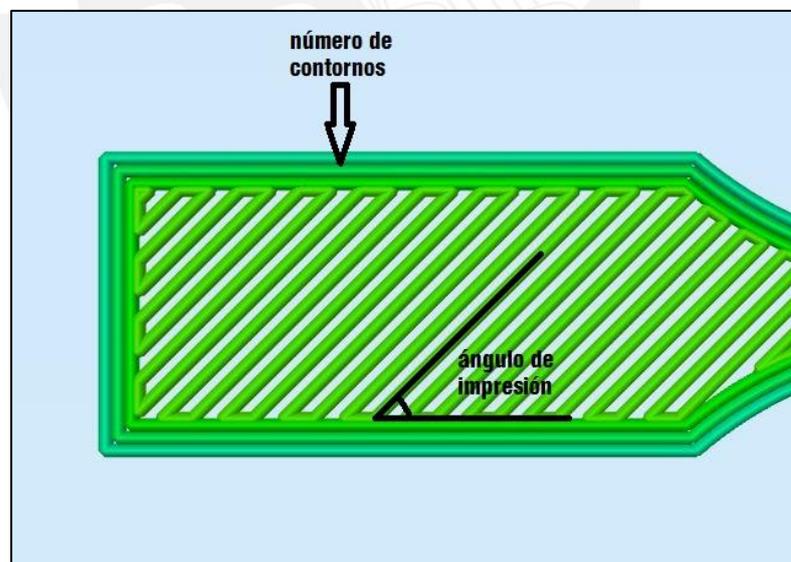
**Figura 25.** Impresora RepRap Darwin 1.0 (lado izquierdo) y la RepRap Child (lado derecho) [Jones, 2011].

Como se ha venido observando en las técnicas de manufactura aditiva anteriormente mencionadas, los parámetros de impresión juegan un rol importante en las propiedades mecánicas, densidad, acabado superficial, y precisión dimensional de los objetos impresos También se debe mencionar que dichos parámetros dependerán de las propiedades del material a imprimir. Es así que es importante conocerlas con el fin de comprender su efecto en las propiedades de los

objetos impresos por FDM. En un proceso FDM los principales parámetros de impresión son los descritos en la **tabla 3**. De la **figura 26** se puede ver esquemáticamente el ángulo de impresión y el número de contornos.

**Tabla 3.** Principales parámetros de impresión por FDM.

Parámetro	Descripción
Altura de capa	Altura de cada capa de material depositado.
velocidad de impresión	Velocidad a la cual se mueve el cabezal en el plano XY.
Temperatura de impresión	Temperatura al interior del extrusor.
Porcentaje de relleno	Porcentaje en volumen respecto al objeto sólido.
Diámetro de la boquilla	Diámetro a la salida del extrusor.
Temperatura de la base	Temperatura a la cual estará sometida la base que contendrá a la pieza impresa.
Air gap	Espaciamiento entre los delgados filamentos depositados.
Angulo de impresión	Angulo al cual será orientada la deposición del material a extrudir.
Numero de contornos	Es el cantidad de contornos perimetrales que tendrá la pieza a imprimir.

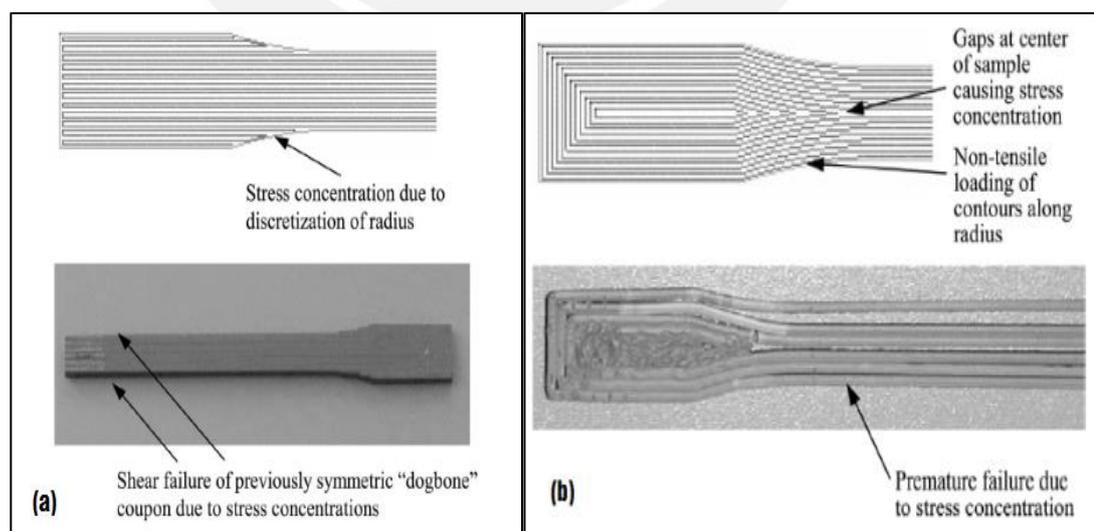


**Figura 26.** Esquema que representa el número de contornos y el ángulo de impresión en la técnica de impresión por FDM.

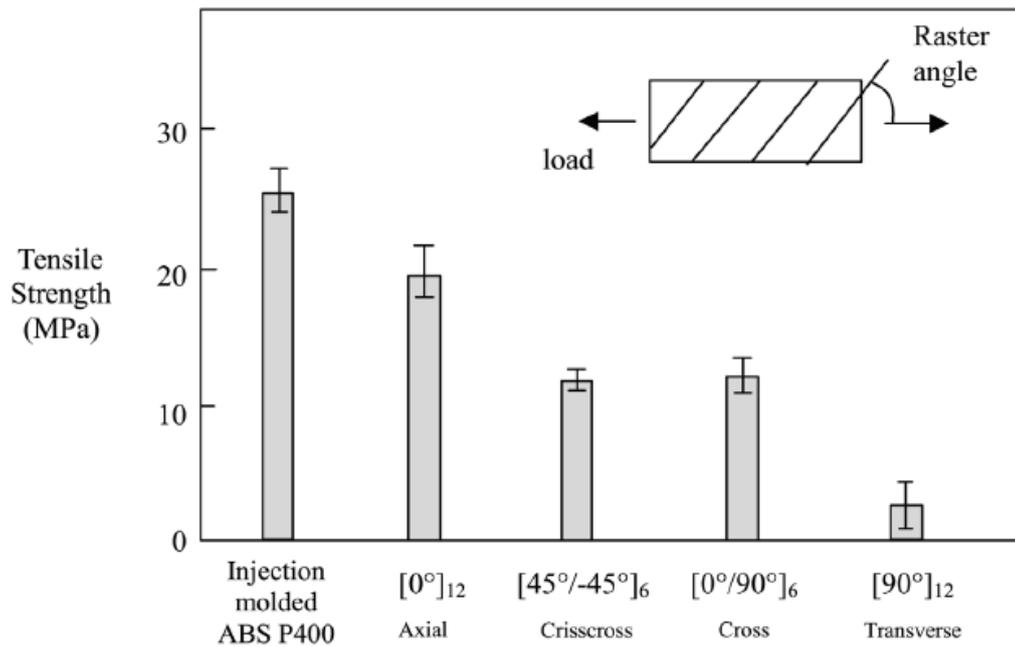
Ahn et al. Investigó el efecto del ángulo de impresión y el air gap en las propiedades mecánicas de probetas de tracción impresas con ABS, y las comparó con las propiedades mecánicas de probetas obtenidas por moldeo por inyección del mismo ABS. Así también reportan una falla prematura en los ensayos de tracción de las

probetas impresas con un ángulo de  $0^\circ$ , donde la geometría de las probetas fueron según la norma ASTM D638 tipo I, esta falla prematura se ve a la concentración de esfuerzos producidos por la discretización del radio en la probeta impresa (**Figura 27.a**). Para evitar esta discretización del radio se imprimieron probetas hechas de puro contornos, sin embargo estas probetas también presentaban concentradores de esfuerzos y además ciertas zonas que no eran sometidas a las carga de tracción durante el ensayo (**Figura 27.b**). Y es así que decidieron basarse en la norma ASTM D3039 con probetas de tracción de geometría rectangular. De las probetas con un valor de air gap igual a 0, la que poseía una mayor resistencia a la tracción fue la que tenía un ángulo de impresión de  $0^\circ$ , sin embargo esta fue menor que las obtenidas por modelo por inyección, y las probetas más débiles fueron las orientadas  $90^\circ$ . Así también se ensayaron probetas impresas donde se varía la orientación de cada capa obteniendo valores de resistencia a la tracción entre las obtenidas con ángulos de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  (**Figura 28**). También se ensayaron probetas con un air gap igual a -0.003 pulgadas, donde la resistencia a la tracción de las probetas con ángulo  $0^\circ$  no se incrementaron muchos a comparación de las otras probetas impresas (**Figura 29**) [**Ahn, 2002**].

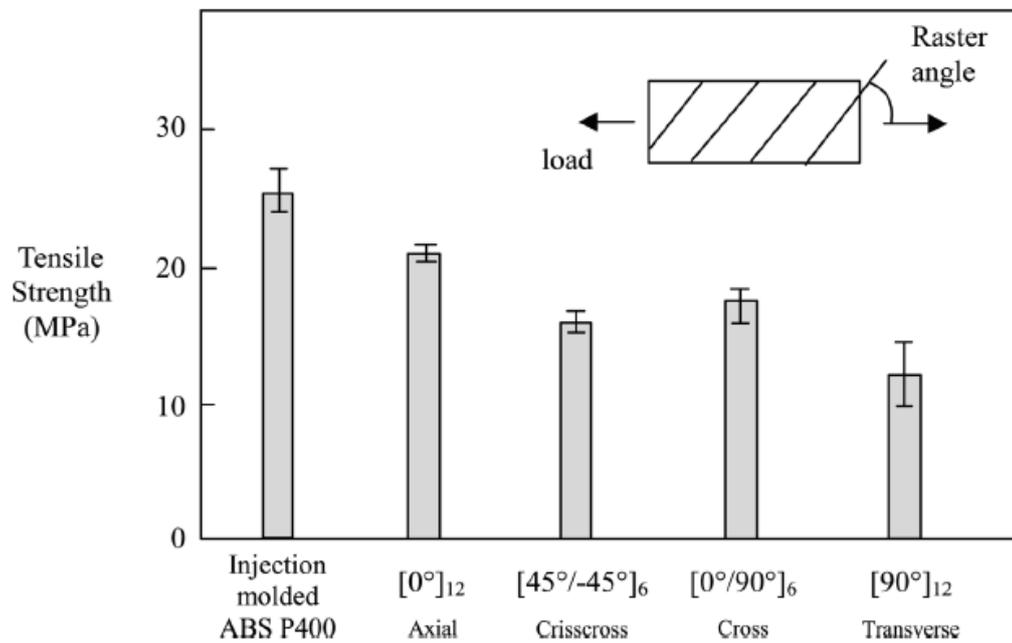
En contraste con lo reportado por *Ahn et al.*, *Vega et al.* Reporto que se tienen valores máximos de resistencia a la tracción para ángulos de impresión igual a  $0^\circ$  (respecto al eje x, es decir en la dirección de la carga de tracción). Este ángulo de impresión de  $0^\circ$  también ha demostrado ser adecuado para obtener valores máximos de resistencia a la flexión [**Vega, 2011**].



**Figura 27.** Probetas de sección reducida tipo I de la norma ASTM D638: (a) con ángulo de impresión de  $0^\circ$  y (b) con puro contorno [**Ahn, 2002**].

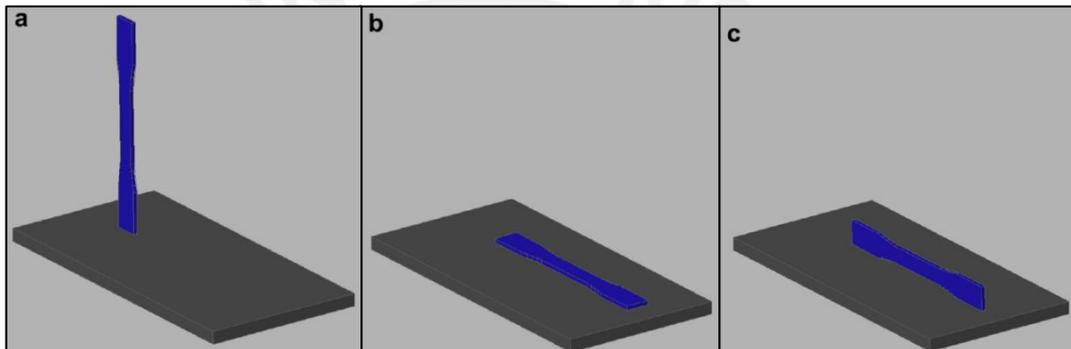


**Figura 28.** Resistencia a la tracción de las probetas obtenidas por moldeo por inyección y piezas impresas con un air gap igual a 0 y distintos ángulos de impresión [Ahn, 2002].

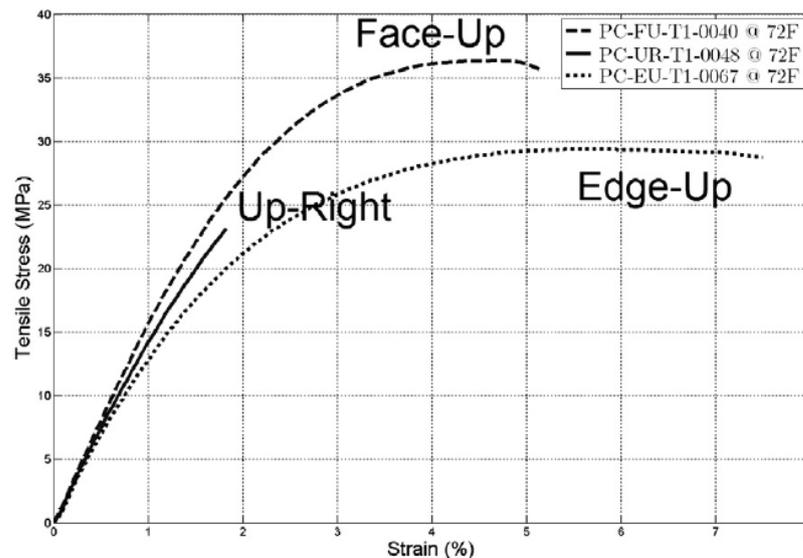


**Figura 29.** Resistencia a la tracción de las probetas obtenidas por moldeo por inyección y piezas impresas con un air gap igual a -0.003 pulgadas y distintos ángulos de impresión [Ahn, 2002].

Smith y Dean investigaron las propiedades mecánicas de probetas impresas de policarbonato (PC) en distintas orientaciones (**Figura 30**). Se tomaron como parámetros de impresión una altura de capa de 0.254mm, ángulos de impresión de  $[-45^\circ/45^\circ]$  y número de contornos igual a 1. Para la obtención de las probetas de tracción según la norma ASTM D638 (tipo I), un convencional método de maquinado fue realizado a bloques de material impreso. También se intentó fabricar probetas de sección reducida directamente por impresión, sin embargo la superficie de la probeta alineada verticalmente presentaba irregularidades, con lo cual se tuvieron problemas al realizar los ensayos mecánicos de dichas probetas. Los resultados de los ensayos de tracción de las probetas mecanizadas arrojan que se obtienen mejores valores de resistencia para las probetas con el lado de mayor superficie apoyada en la plataforma (**Figura 31**) [Smith, 2013].

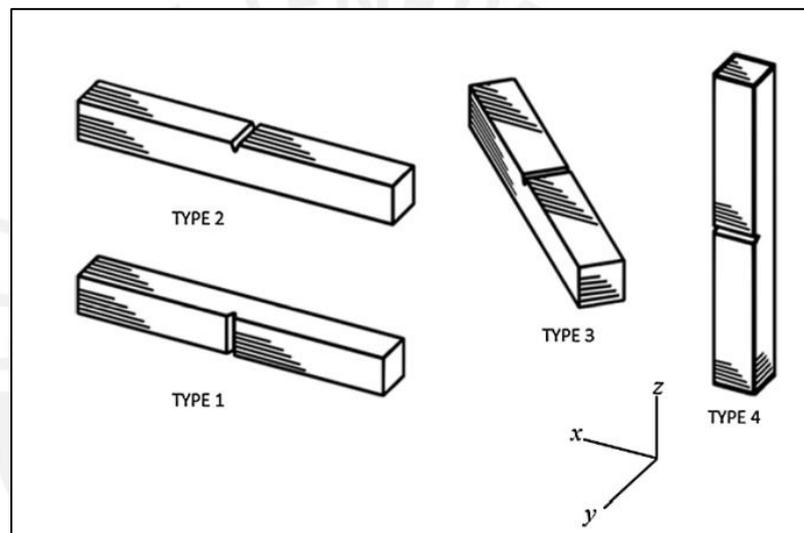


**Figura 30.** Orientaciones de impresión de probetas por FDM: (a) orientación Up-Right (b) orientación Face-Up y (c) Edge-Up [Smith, 2013].



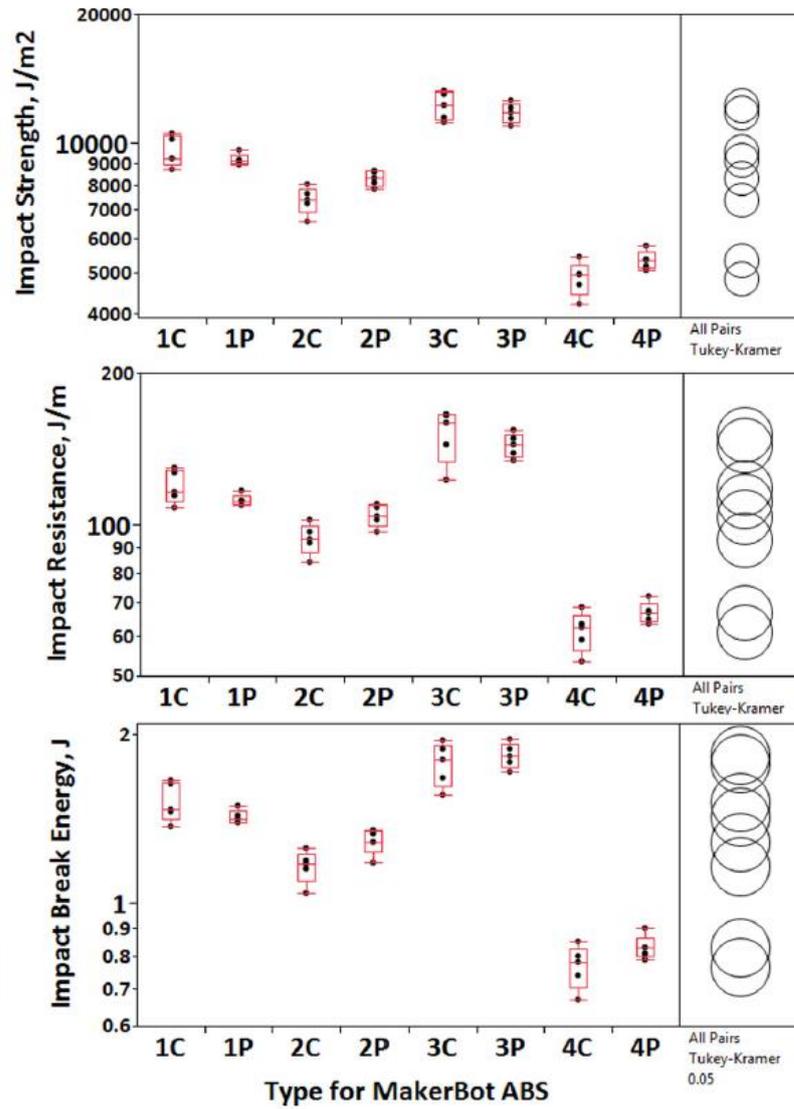
**Figura 31.** Curvas representativas de esfuerzo vs deformación de probetas impresas por FDM orientadas como se muestra en la figura 29 [Smith, 2013].

*Roberson et al.* investigó la resistencia al impacto de las piezas impresas de ABS por FDM, para los ensayos de impacto se basó en la norma ASTM D256-10, donde se analizaron 2 tipos de probetas de impacto, una con la entalla impresa y la otra con la entalla mecanizada, así también para dicho estudio se analizaron 4 tipos de orientación como se puede observar en la **figura 32**. Para el proceso de impresión se trabajó con 0.2mm de altura de capa, 100% de relleno, número de contornos igual a 1 y 240 de temperatura de impresión. Los resultados del ensayo de impacto revelan que no existe mucha diferencia en la resistencia al impacto de las probetas con entallas impresas y entallas mecanizadas. Los valores más altos de resistencia al impacto pertenecen a las probetas que tienen la orientación tipo 3, y los valores más bajos para la orientación tipo 4 (**Figura 33**) [*Roberson, 2015*].

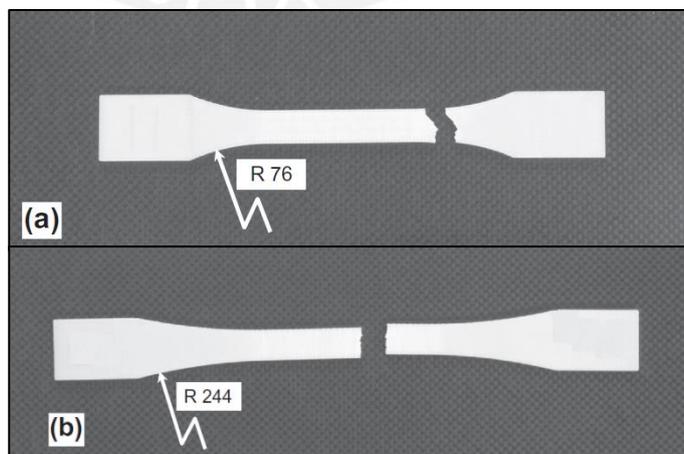


**Figura 32.** Distintas orientaciones y disposiciones de las entallas para probetas de impacto impresas por FDM [*Roberson, 2015*].

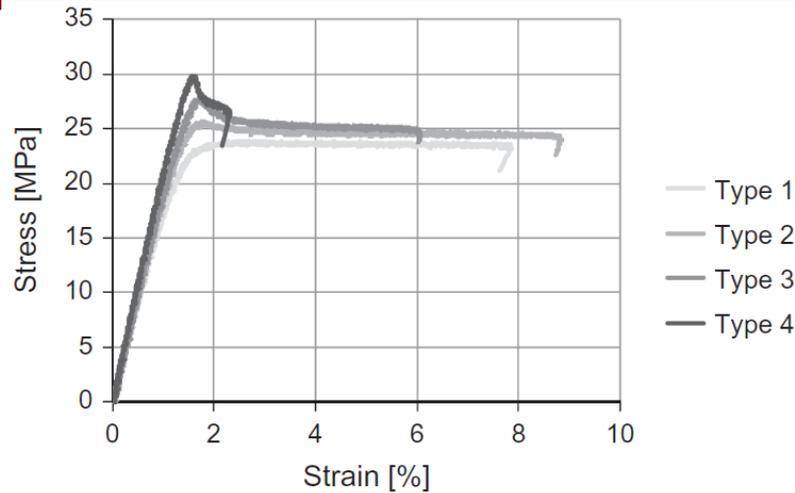
*Croccolo et al.* investigó el efecto del número de contornos en las propiedades mecánicas de piezas impresas de ABS por FDM. Para el proceso de impresión se trabajó con una altura de capa de 0.25mm, air gap igual a 0 y Ángulos de impresión de  $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$ . En dicho estudio trabajaron con un radio de 244mm para el cambio de sección, en lugar de los 76mm que indica la norma ASTM D638, con el fin de conseguir una menor concentración de esfuerzos en el cambio de sección, lo cual evitaba que las probetas se rompieran fuera de la longitud calibrada indicada por la norma (**Figura 34**). De los resultados de tracción realizados se pudo observar que a mayor número de contornos la resistencia mecánicas y el módulo elástico se incrementaban, mientras que el alargamiento de rotura disminuía, excepto para las probetas que tenían un número de contornos igual a 4 (**Figura 35**) [*Croccolo, 2013*].



**Figura 33.** Resultados de los ensayos de impacto para las probetas de distintas orientaciones con entallas impresas (P) y maquinadas (C) [Roberson, 2015].



**Figura 34.** Localización de la fractura en las probetas con radio (a) 76mm y (b) 244mm [Croccolo, 2013].



**Figura 35.** Curvas de esfuerzo vs deformación para probetas impresas con un número de contornos igual a 1 (tipo 1), 4 (tipo 2), 7 (tipo 3) y 10 (tipo 4) [Croccolo, 2013].

*Dawoud et al.* estudio las propiedades mecánicas de piezas obtenidas por impresión 3D y moldeo por inyección, donde vario el ángulo de impresión y el air gap para las piezas impresas (Tabla 4). Los parámetros de impresión que se mantuvieron constantes para todas las piezas impresas fueron una altura de capa de 0.5mm, diámetro de boquilla de 1mm, número de contornos igual a 1, temperatura de impresión de 250°C y una temperatura de base de 120°C. De los ensayo realizados se observa como era de esperarse una mayor densidad para la pieza obtenida por moldeo por inyección (Figura 35.a), lo cual se debe a las altas presiones que compactan al material, así también mayores valores de resistencia a la tracción, flexión e impacto en comparación con las probetas impresas. De las probetas impresas estudiadas, se tiene una mayor resistencia a la tracción e impacto para aquellas con un ángulo de impresión de  $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$ , mientras la mayor resistencia a la flexión se obtuvo para un ángulo de impresión de  $[0^{\circ}/90^{\circ}]$  (Figura 35). También se observó mayores valores en la resistencia mecánica, flexión e impacto para un air gap de -0.05mm [Dawoud, 2016].

*Casavola et al.* describió el comportamiento mecánico de piezas impresas de ABS y PLA por FDM mediante la teoría clásica de laminado (CTL), para el cual tuvo que realizar ensayos de tracción de probetas de una sola capa, ensayos para medir el módulo de Poisson de probetas con 5 capas con ángulo de impresión de  $0^{\circ}$ , mientras que para medir el módulo de corte se tuvieron que imprimir probetas de 16 capas con un ángulo de impresión de  $[+45^{\circ}/-45^{\circ}]$ . Para la comparación de resultados experimentales del módulo de Young con los obtenidos por la CTL, se imprimieron probetas con ángulo de impresión de  $[+30^{\circ}/-30^{\circ}/0^{\circ}/-30^{\circ}/+30^{\circ}]$ . De los resultados del módulo de Young se tiene que la diferencia entre los valores experimentales y los

obtenidos por la CLT fueron de 1.07% para el ABS y de 5.37% para el PLA (Figura 37), lo cual muestra que la CLT tiene una alta capacidad para predecir el modulo elástico de laminados de ABS y PLA obtenidos por FDM [Casavola, 2016].

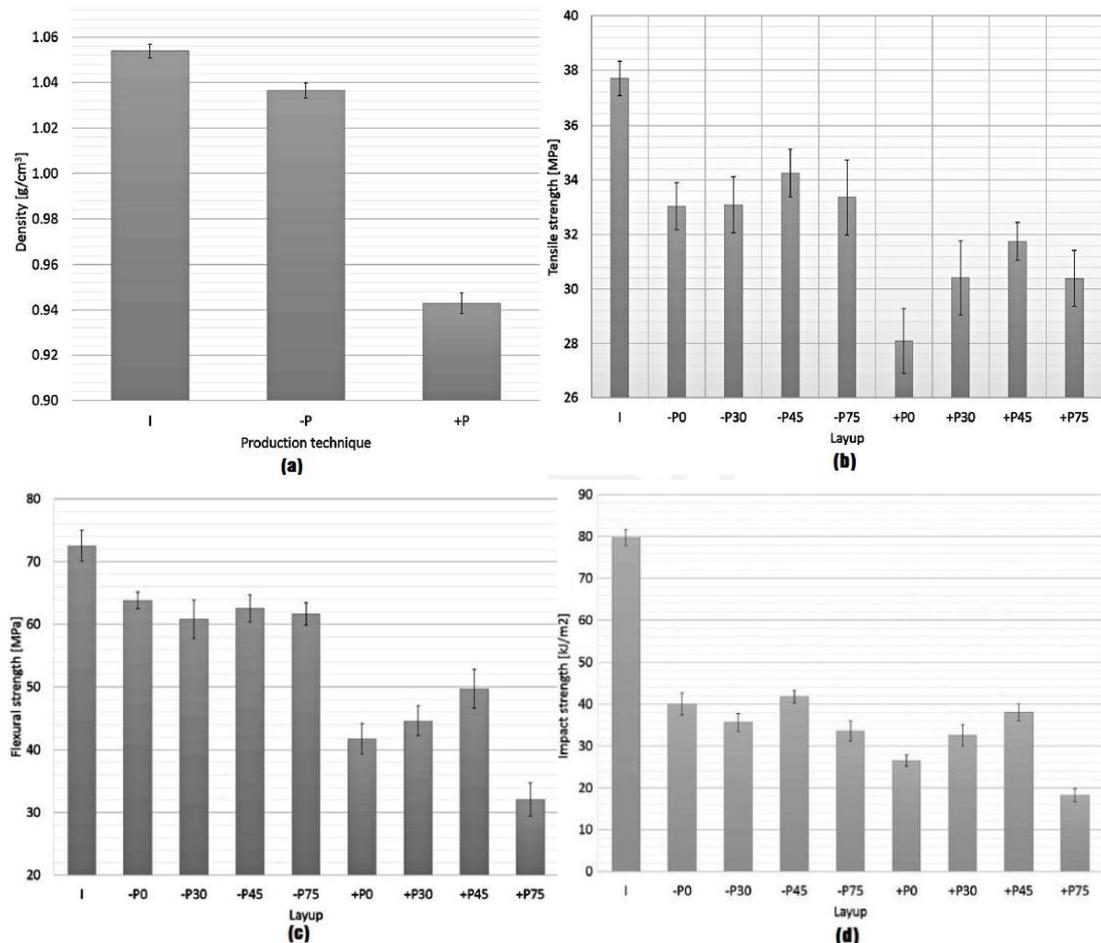
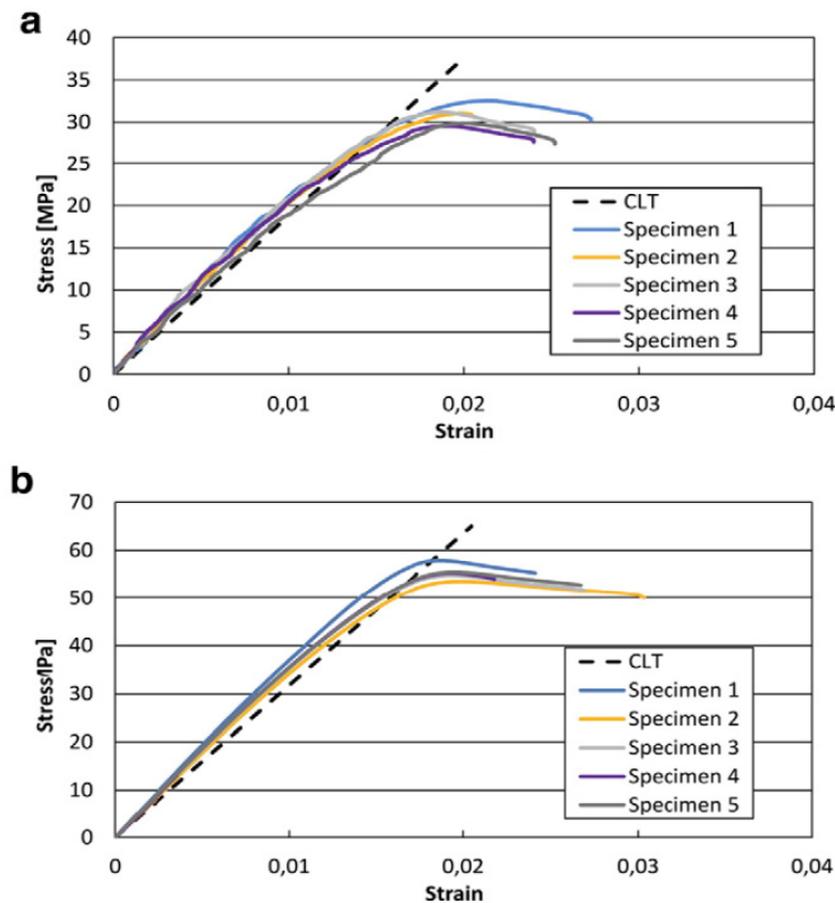


Figura 36. Resultados de los ensayos de (a) densidad, (b) tracción, (c) flexión e (d) impacto [Dawoud, 2016].

Tabla 4. Designación de las probetas con sus valores de air gap y ángulo de impresión [Dawoud, 2016].

Designación	Técnica de procesamiento	ángulo de impresión	air gap (mm)
I	Moldeo por inyección	-	-
-P0	FDM	[0°/90°]	-0.05
-P30	FDM	[30°/-30°]	-0.05
-P45	FDM	[-45°/+45]	-0.05
-P75	FDM	[+75°/-15°]	-0.05
+P0	FDM	[0°/90°]	+0.05
+P30	FDM	[30°/-30°]	+0.05
+P45	FDM	[-45°/+45]	+0.05
+P75	FDM	[+75°/-15°]	+0.05

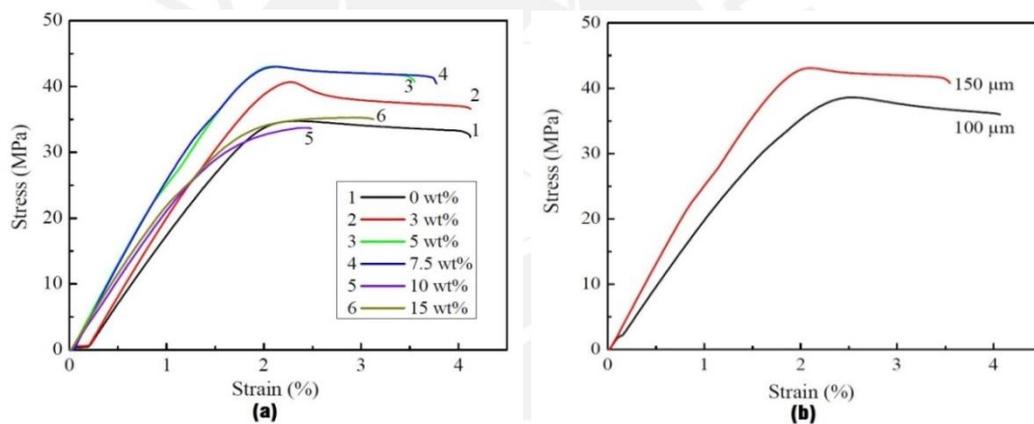


**Figura 37.** Comparación de los resultados experimentales de módulo de Young con el obtenido por la CTL del (a) ABS y (b) PLA [Casavola, 2016].

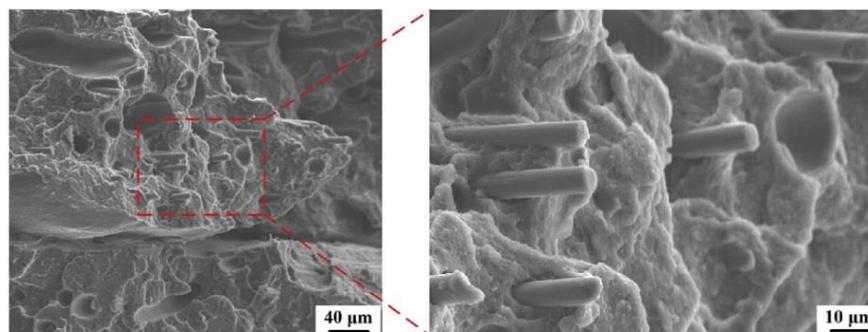
Si bien se pueden estudiar a los parámetros de impresión con el fin de optimizar las propiedades mecánicas de componentes impresos por FDM [Onwubolu, 2014], también se están buscando introducir nuevos materiales como el polipropileno y el poliuretano para ampliar las aplicaciones que pueda tener esta tan famosa técnica de impresión por FDM [Carneiro, 2015; Raasch, 2015].

Otra manera de poder conseguir buenas propiedades mecánicas y ampliar las aplicaciones de la impresión por FDM, es reforzar a los clásicos termoplásticos usados por esta técnica de impresión. Un estudio interesante fue el realizado por Ning *et al.*, donde investigo el efecto que tiene las fibras de carbono al introducirlas en el ABS. El filamento necesario para la alimentación de la impresora 3D fue obtenida por una doble extrusión de las fibras de carbono y ABS, con una extrusora de simple tornillo, los porcentajes en peso de fibra de carbono estudiadas fueron de 0%, 3%, 5%, 7.5%, 10% y 15%. Así también estudio el efecto de la longitud de las fibras de carbono en las propiedades mecánicas del material compuesto impreso.

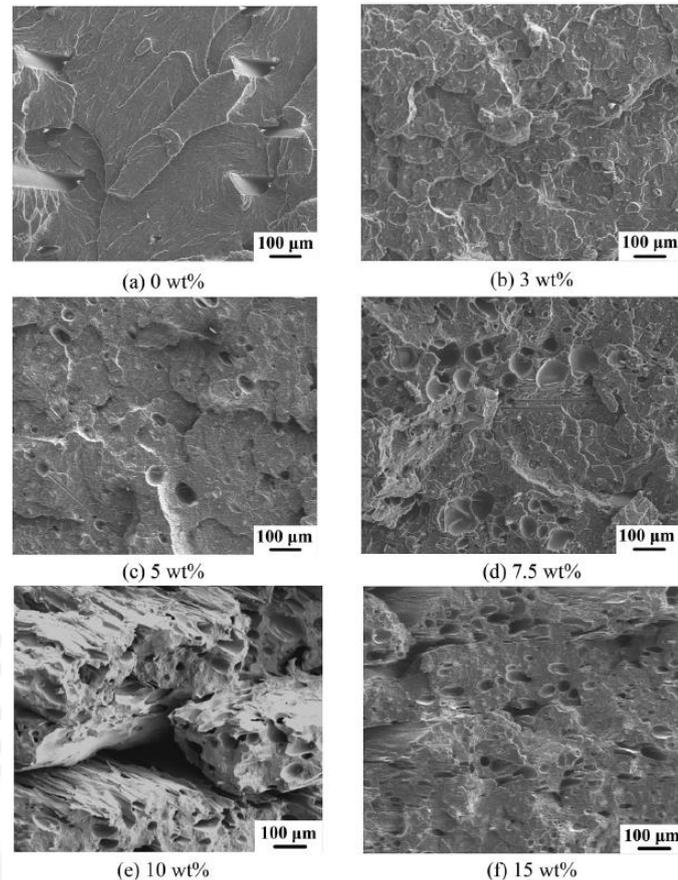
De los ensayos de tracción se observa un incremento en las propiedades mecánicas de las probetas impresas con contenidos de 3% y 5%, mientras que para el material compuesto de 7.5% de fibras se obtuvo un resultado semejante al obtenido con 5% de refuerzo. Para los contenidos de 10% y 15% la resistencia a la tracción tuvo valores semejantes a la de la matriz pura (**Figura 38.a**). De los ensayos también se encontró que se obtienen mejores valores de resistencia a la tracción para los materiales compuestos impresos de mayor longitud de fibra (**Figura 38.b**). De las micrografías SEM de la superficie de fractura de las probetas ensayadas (**Figura 40**) se observa que a mayor cantidad de fibras carbono se tiene una mayor cantidad de poros lo cual explica la tendencia de la resistencia a la tracción del material compuesto con los distintos contenidos de fibras. Así también podemos observar de la **figura 39** que las fibras han sido extraídas de la matriz (*pull out*) para el material compuesto impreso con 10% de fibras, lo cual indica la insuficiente adhesión entre la fibra y la matriz [**Ning, 2015**].



**Figura 38.** Curvas de esfuerzo vs deformación para (a) probetas impresas con distinto contenido de fibras de carbono (longitud de fibras de 150 $\mu$ m) y (b) probetas impresas con diferentes longitudes de fibras [**Ning, 2015**].



**Figura 39.** Micrografía SEM de probetas impresas con un 10% en contenido de fibras (longitud de fibras de 150 $\mu$ m), donde se puede observar que las fibras han sido extraídas de la matriz [**Ning, 2015**].



**Figura 40.** Micrografías SEM de la superficie de fractura de probetas impresas con distintos contenidos de fibra de carbono (longitud de fibras de 150 $\mu$ m) [Ning, 2015].

### 1.3 Materiales compuestos

Los materiales compuestos pueden ser definidos como un sistema de materiales constituidos por dos o más materiales, los cuales difieren en sus propiedades químicas y físicas además de no ser solubles entre sí [Najafi, 2012]. Los principales constituyentes de un material compuesto son la matriz y el refuerzo, la matriz la cual proporciona una integridad estructural mientras que el refuerzo contribuye en mejorar las propiedades mecánicas del material compuesto.

Hoy en día gracias al avance de la tecnología se ha llegado a desarrollar materiales compuestos con refuerzos de tamaño nanométrico, a estos materiales se les llama nanocompuestos que son materiales multifases donde al menos una de las fases constituyentes tiene una dimensión menor a los 100 nm [Hussain, 2006], como nanopartículas de TiO<sub>2</sub>, nanoarcillas, nanotubos y nanofibras; estos nanocompuestos exhiben excelentes propiedades mecánicas [Chaudhari, 2013; Bashar, 2014; Chen, 2007; Wood, 2011].

Los materiales compuestos pueden ser clasificados en 3 principales categorías los cuales son los materiales compuestos reforzados con fibras, los reforzados con partículas y los materiales compuestos estructurales. En el presente capítulo se presentarán algunos trabajos de investigación sobre materiales compuestos reforzados con fibras y reforzados con partículas.

### 1.3.1 Materiales compuestos reforzados con fibras

Las fibras son el refuerzo de mayor uso en materiales compuestos, ya que con refuerzos de forma fibrosa se tienen materiales más rígidos y resistentes que con refuerzos de cualquier otra forma [Chawla, 2012]. Se puede definir a la fibra como un hilo o como una estructura que posee una alta relación de aspecto (relación entre el largo y el ancho) [Nirmal, 2015].

Hoy en día debido a la escasez de los recursos no renovables, se está apuntando inevitablemente a la dependencia del uso de recursos renovables, tanto así que este siglo puede ser llamado como el siglo de la celulosa, ya que cada vez más recursos vegetales están siendo descubiertos [Faruk, 2012]. Es así que una potencial solución a esta escasez de los recursos no renovables es el uso de fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos, ya que estas poseen buenas propiedades mecánicas y sobretodo una baja densidad los cuales los hacen buenos candidatos en aplicaciones donde se requieran materiales compuestos ligeros tales como en la industria automotriz [Karonis, 2013].

Las fibras naturales pueden ser clasificados en tres categorías: fibras vegetales, fibras animales y fibras minerales [Riedel, 2005]. Dentro de las fibras vegetales que son las más estudiadas tenemos las fibras de madera, tallo, frutas, hojas, semillas, etc. (Tabla 5).

**Tabla 5.** Distintos grupos de fibras vegetales y sus plantas [Nirmal, 2015].

fibra de madera	fibra de tallo	fibra de fruta	fibra de semilla	fibra de hoja
madera dura	bambú	coco	algodón	sisal
madera blanda	trigo	nuez de betel	capoc	manila
aserrín	arroz		alfalfa	plátano
	hierbas			piña
	cebada			abacá
	maíz			palmera

Un número significativo de trabajos de investigación en fibras naturales se han venido realizando [**Holbery, 2006; Mehdi, 2010; Kowalczyk, 2011**]. A pesar de su bajo impacto ambiental, la principal ventaja que tienen las fibras naturales sobre las fibras sintéticas es que las fibras naturales son de baja densidad, renovables, de bajo costo, posee alta resistencia específica y son biodegradables [**Corbiere, 2001**].

Las fibras naturales obtenidas de las plantas son preferidas como reforzamientos en materiales compuestos para aplicaciones estructurales en la industria automotriz debido a la alta resistencia específica de las fibras [**Holbery, 2006**], en la **tabla 6** mostramos algunas de las propiedades mecánicas de las fibras naturales. Sin embargo estos presentan algunos defectos tales como la variación en la composición química debido a la localización geográfica de la planta del cual se extrajo la fibra, así también las etapas de crecimiento y las condiciones climáticas influyen en las propiedades de la fibra.

**Tabla 6.** Propiedades mecánicas de fibras naturales [**Holbery, 2006**].

Fibra	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Elongación (%)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Algodón	1.5-1.6	2.1-12.0	200-600	5.0-15.1
Jute	1.3-1.5	1.4-2.1	385-850	9-31
Lino	1.3-1.5	1.1-3.3	340-1600	25-81
Sisal	1.3-1.6	1.9-15	400-700	8.5-40
Kenaf	0.6-1.5	1.6-4.3	223-1191	11-60
Abacá	1.5	1.2-1.5	430-815	31.1-33.6
Plátano	0.5-1.5	2.4-3.5	711-789	4.0-32.7

Si comparamos la resistencia a la tracción de la fibra de vidrio con la de las fibras naturales, se tiene que la de la fibra de vidrio (2000-3500 MPa) posee valores más altos de resistencia, sin embargo si consideramos la resistencia específica de las fibras naturales, estos podrían presentar valores comparables o mejores que la fibra de vidrio, estas altas propiedades específicas son el principal motivo de usar a las fibras naturales como reforzamientos en materiales compuestos con matriz polimérica, donde se desean buenas propiedades en un peso reducido.

Las fibras naturales como elementos que refuerzan los materiales compuestos de matriz polimérica, presentan una alta absorción de humedad y pobre compatibilidad

con la matriz, con lo cual las fibras naturales deben ser tratadas química o físicamente con el fin de modificar las propiedades de superficie y así poder mejorar la adhesión interfacial entre la fibra y la matriz, y también hacerla más hidrofóbica y resistente a la presencia de agua.

Materiales compuestos de matriz y refuerzo biodegradables son también conocidos como “Green composites” los cuales prometen un gran beneficios para el mundo ya que estos ayudarían a resolver algunos problemas del mundo actual, tales como la contaminación ambiental, y la dependencia de productos derivados del petróleo entre otros, es por ello que numerosas investigación sobre materiales compuestos biodegradables se vienen realizando hoy en día, un ejemplo de este tipo de material compuesto lo podemos observar al reforzar un biopolímero con fibras naturales, en la cual se obtienen mejores propiedades que el biopolímero puro, es por ello que los polímeros derivados de recursos renovables son actualmente considerados como alternativas prometedoras a los tradicionales polímeros derivados del petróleo, con lo cual se busca ayudar a resolver las preocupaciones actuales relacionadas la contaminación ambiental, emisiones de gases de efecto invernadero y el agotamiento de los recursos fósiles, así también una gran atención se ha dedicado especialmente a los polímeros biodegradables y biocompatibles, viéndolos de una perspectiva ecológica y biomédica.

Los principales biopolímeros que existen son el policaprolactona (PCL), poliácido láctico (PLA), ácido poliglicólico (PGA), y el polihidroxialcanoato (PHA), de los cuales el PLA es el más prometedor por ser obtenido de fuente agrícola renovable, además de ser biocompatible y biodegradable el PLA es un candidato apropiado para ser utilizado en aplicaciones de empaque, sin embargo algunos inconvenientes como la baja capacidad de estiramiento, tenacidad insuficiente, y limitada propiedad de barrera de gases deben ser superadas.

Además de su biodegradabilidad y su renovabilidad, *Anderson et al.* obtuvo que el PLA posee un módulo de Young alrededor de 3GPa, una resistencia a la tracción entre 50 y 70 MPa con un alargamiento a la rotura de 4% y una resistencia al impacto cercana al  $2.5\text{kJ/m}^2$  [**Anderson, 2008**]. Si comparamos al PLLA (PLA semicristalino) con otros polímeros derivados del petróleo (**Tabla 7**) tales como poliestireno (PS) y al polietilen tereftalato (PET), las propiedades mecánicas del PLA son atractivas, particularmente su módulo de Young haciendo de este un excelente sustituto para los polímeros actuales de uso común.

**Tabla 7. Propiedades mecánicas del PLA, PS y PET [Auras, 2004].**

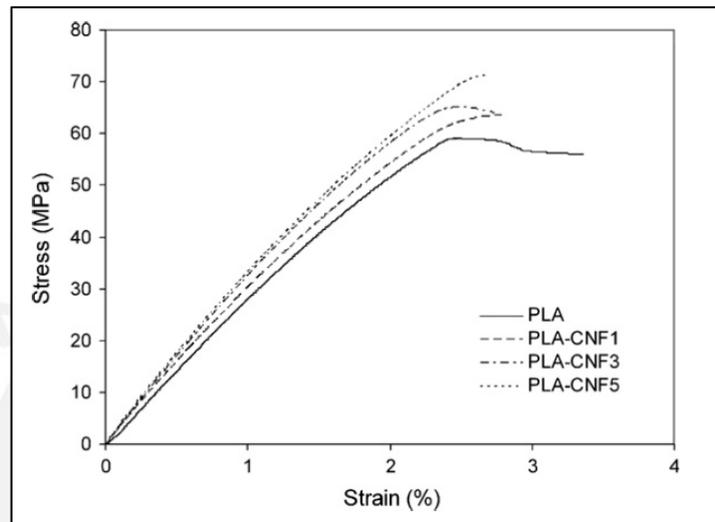
	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Elongación (%)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)
PLLA	1.26	4-7	59	3.8
PS	1.05	3	45	3.2
PET	1.40	300	57	2.8-4.1

Sin embargo al igual que el PS, el PLA es un material frágil con una baja resistencia al impacto, representando una de sus principales limitaciones para el desarrollo sostenible del PLA [Auras, 2004], además de esto otro problema que posee el PLA es su baja capacidad de cristalización, lo que significaría una limitación a la industrialización en diferentes aplicaciones, especialmente en aplicaciones donde se requiera durabilidad tales como la automoción y la electrónica [Rasal, 2010], una solución desarrollada gran parte en los últimos años ha consistido en la incorporación de refuerzos en una matriz polimérica de PLA con el fin de desarrollar materiales compuestos que cumplan las exigencias requeridas en ciertas aplicaciones, es por ello que el uso de fibras naturales para reforzar una matriz de PLA está siendo investigado enormemente, además de obtener materiales compuestos biodegradables ya que si estos materiales son desechados luego de haber cumplido su función no contaminarían tanto como lo hacen la mayoría de polímeros derivados del petróleo que tardan muchos años en degradarse.

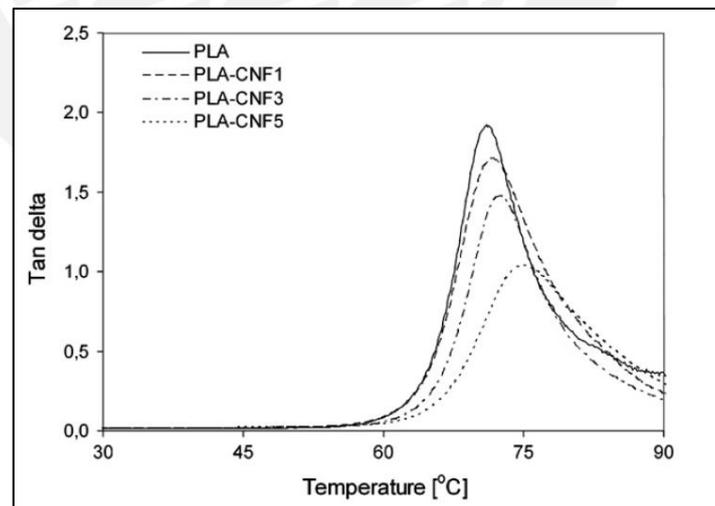
La preocupación por el medio ambiente, el cambio climático y el agotamiento de los combustibles fósiles, ha motivado a los investigadores a encontrar alternativas de solución a estas preocupaciones, es por ello que actualmente se vienen realizando numerosas investigaciones sobre polímeros obtenidos de fuentes renovables y así ofrecer una importante contribución al problema de la dependencia de los combustibles fósiles y al impacto ambiental de estos.

*Mehdi et al.* investigo las propiedades mecánicas y térmicas del PLA reforzado con distintos contenidos de nanofibras de celulosa (CNF), el nanocompuesto fue obtenido por extrusión de doble tornillo, mediante SEM se observó una buena dispersión con 1% y 3% en peso de CNF y una mala dispersión con 5% en peso de CNF, así también se observó el incremento de la resistencia a la tracción como se

puede apreciar en la **figura 40**. El módulo elástico del PLA se incrementó de 2.9 GPa a 3.6 GPa y su resistencia a la tracción se incrementó en 21% con reforzándolo con 5% en peso de las CNF. En el estudio de las propiedades térmicas de los nanocompuesto de PLA con CNF se tiene que el módulo elástico aumento junto con el cambio positivo de la curva tan delta (**Figura 41**) lo cual se atribuye a la interacción física entre el polímero y las nanofibras que restringen la movilidad de las cadenas del polímero [**Mehdi, 2010**].



**Figura 40.** Curva esfuerzo-deformación del PLA y nanocompuesto de PLA y CNF [**Mehdi, 2010**].



**Figura 41.** Curva tan delta del PLA y nanocompuesto de PLA y CNF [**Mehdi, 2010**].

*Kowalczyk et al.* evaluó las propiedades mecánicas y térmicas de materiales compuestos de PLA reforzados con nanofibras de celulosa artificial (2% en peso) y fibras de celulosa artificial de tamaño estándar (2% y 20% en peso), el nanocompuesto exhibió notablemente un módulo de almacenamiento superior en

comparación con el PLA puro. La misma cantidad de fibras de celulosa de tamaño estándar no causó un notable cambio en el módulo de almacenamiento, aunque para el 20% en peso de las fibras de celulosa de tamaño estándar se produjo incluso un efecto mayor. El módulo mejorado del nanocompuesto es debido a una mayor área de interface fibra/matriz conseguido por la disminución del diámetro de la fibra [*Kowalczyk, 2011*].

### 1.3.2 Materiales compuestos reforzados con partículas

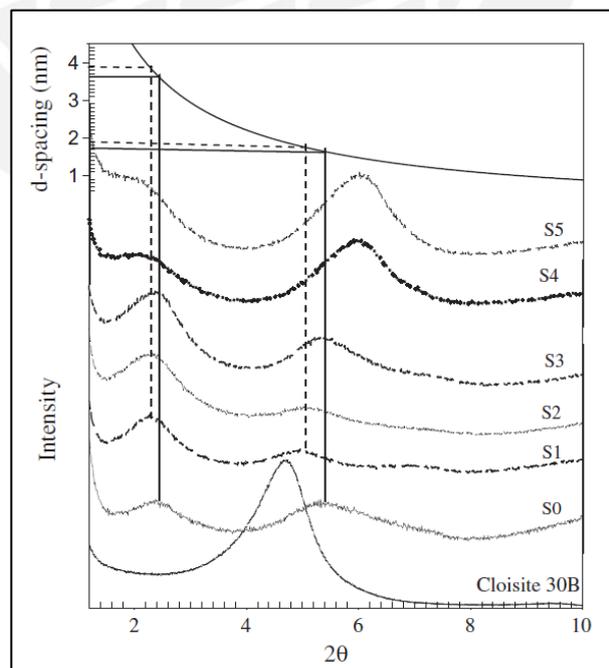
Los polímeros son cada vez más usados debido a su bajo costo de procesamiento y su versatilidad. Sin embargo sus bajas propiedades mecánicas y alta sensibilidad a la temperatura son sus principales inconvenientes. Para mejorar sus propiedades, los polímeros suelen ser reforzados con partículas o fibras con el fin de incrementar su rigidez o su resistencia a la temperatura. Para muchas aplicaciones incluso luego de reforzarlos, estos materiales poliméricos no llegan a ser lo suficientemente rígidos para ciertas aplicaciones estructurales, es así que los nanorefuerzos son considerados una potencial solución para superar los inconvenientes antes mencionados. Entre estos nanorefuerzos tenemos a las nanoarcillas, el cual se viene investigando los efectos de estos como refuerzo de polímeros.

*Najafi et al.* investigó el efecto de las condiciones de procesamiento sobre la dispersión de las arcillas con la presencia del Joncryl como extensor de cadena, para el cual se realizaron diferentes métodos de como introducir los extensores de cadena dentro del nanocompuesto (variando el orden de mezcla y número de extrusiones para las distintas mezclas) de PLA y arcilla, así también se determinaron las propiedades reológicas y mecánicas, los materiales usados fueron PLA ( $T_g=60^\circ\text{C}$  y  $T_m=170^\circ\text{C}$ ) como matriz polimérica, cloisite 30B como nanopartículas de refuerzo, y Joncryl como extensor de cadena, se realizó un análisis de difracción de rayos X, el patrón de difracción para la Cloisite 30B presentó un pico para un  $2\theta=4.73^\circ$  por lo cual la separación entre laminas es de 1.86nm, mientras que para los nanocompuestos de PLA y arcillas con extensor de cadena tuvieron un pico de difracción con un ángulo menor con lo cual se evidencia que las capas de la Cloisite 30B se separan más al formar nanocompuestos con el PLA (**Figura 42**).

La morfología fue observada mediante microscopio electrónico de barrido, en la cual las micrografías del nanocompuesto sin extensor de cadena muestran una distribución muy uniforme de las partículas de arcilla en la matriz de PLA, mientras

que con extensor de cadena la uniformidad no es tan buena excepto para el nanocompuesto obtenida mediante el segundo método de introducción del extensor de cadena en el nanocompuesto (PLA, arcillas y Joncryl extruidos simultáneamente una sola vez). El PLA muestra un impresionante incremento de la viscosidad y del módulo de almacenamiento con la presencia del extensor de cadena, sin embargo el efecto que el extensor de cadena da al PLA no es tan espectacular con la presencia de arcillas que favorecen la degradación de la matriz.

Para los ensayos de tracción realizados el PLA presenta un comportamiento frágil con alto módulo de elasticidad y alta resistencia a la tracción, para el PLA con extensor de cadena se observó un incremento en el módulo de elasticidad y su resistencia a la tracción, esto se debe al incremento en su peso molecular y la formación de una estructura ramificada de cadena larga, esta estructura ramificada aumenta los enredos en la estructura del polímero y por lo tanto dificulta más el deslizamiento y la orientación de las cadenas al ser sometido a cargas de tracción, pero el PLA con extensor de cadena presenta un menor alargamiento de rotura que el PLA puro, para el nanocompuesto (PLA/arcilla) con extensor de cadena se observa que la resistencia a la tracción y el módulo elástico tiene valores intermedios entre el PLA puro y el PLA con extensor de cadena, pero con mayor alargamiento de rotura que estos, con lo cual el nanocompuesto con extensor de cadena presenta mayor tenacidad **[Najafi, 2012]**.



**Figura 42.** Patrón de difracción de rayos X para la cloisite 30B y los nanocompuestos con extensor de cadena **[Najafi, 2012]**.

*Faruk et al.* investigo si la adición de nanoarcillas pueden mejorar las propiedades mecánicas de los WPCs (materiales compuestos de plástico y madera), teniendo al HDPE como matriz, para el cual se estudiaron la influencia de 5 tipos de nanoarcillas (Cloisite 10A, Cloisite 15A, Cloisite 20A, Cloisite 25A y Cloisite 30B) en estos WPCs. Así también se estudió la influencia de 2 métodos de introducción de las nanoarcillas en las propiedades mecánicas, el primer método consiste en procesar un nanocompuesto de nanoarcillas y HDPE que luego se usara como matriz en el moldeo por inyección de esta matriz(nanoarcilla/HDPE) con el polvo de madera y así formar el WPC, este primer método se llama “ Melt blending process”, mientras que el segundo método se basa en mezclar directamente las nanoarcillas con el HDPE y el polvo de madera en el proceso de secado previo al moldeo por inyección, es así que este método es llamado “Direct dry blending process”.

Para el análisis de la dispersión de las nanoarcillas en el HDPE (usando el primer método de procesamiento) se realizó un análisis de difracción de rayos X y una microscopia electrónica de transmisión, obteniendo una mejor dispersión para la nanoarcilla Cloisite 10A (5% en peso en el nanocompuesto Cloisite 10A/HDPE) lo cual corrobora la hipótesis que plantea que debido a la presencia de más reactivos en la cloisite 10A podría favorecer en la interacción química entre el polímero y la nanoarcilla, haciendo que el HDPE sea más compatible con la nanoarcilla lo cual resulta una mayor penetración entre las cadenas del HDPE y las capas de la Cloisite 10A . Así también para los ensayos de flexión y tracción se alcanza un incremento tanto para la resistencia a la tracción y la resistencia a la flexión solo con la Cloisite 10A (**Tabla 8**), con lo cual probablemente se deba a la mejor dispersión que presenta la Cloisite 10A en el nanocompuesto Cloisite 10A/HDPE(procesado por el primer método), mientras que la adición de la Cloisite 10A en el WPC por el método Direct dry blending se ha reducido significativamente la resistencia a la flexión del material compuesto, lo cual se puede atribuir a la pobre dispersión de las nanoarcillas en el WPC mediante este método, con lo cual se concluye que usando el primer método se obtiene WPCs con mejores propiedades mecánicas[*Faruk, 2008*].

*Yang et al.* investigo las modificaciones en la microestructura, propiedades físico-químicas y propiedades mecánicas del Polipropileno (PP) cristalizado a elevadas presiones. Como se sabe el PP es un termoplástico muy importante por su buena procesabilidad, alta resistencia mecánica, resistencia química y bajo costo. Sin embargo estas propiedades disminuyen a bajas temperaturas, con lo cual para poder incrementar la resistencia al impacto a bajas temperaturas se le agrega

ethylene-propylene rubber (EPR) o ethylene-propylene dieno terpolymer (EPDM) durante la polimerización o por mezcla, obteniendo así a un polipropileno modificado, también llamada olefina termoplástica (TPO), el cual hereda la resistencia al impacto del EPR o EPDM y conserva la buena procesabilidad del PP. La dispersión entre las nanoarcillas y el TPO fue estudiado mediante microscopía electrónica de transmisión, con la cual se observó una buena distribución de las nanoarcillas en la TPO, la dispersión uniforme de las nanoarcillas es importante para así poder utilizar los beneficios que pueden traer estas nanopartículas en el nanocompuesto, ya que si las nanoarcillas estuvieran concentradas solo en ciertas regiones, estas actuarían como concentradores de tensión lo cual provocaría una falla prematura del nanocompuesto. Así también se observó mediante un análisis calorimétrico diferencial de barrido (DSC) que las nanoarcillas aumentaron la viscosidad en la TPO fundida, para el estudio de la resistencia al impacto se ensayaron al PP puro, PP con nanoarcillas, TPO puro y TPO con nanoarcillas, observándose que la TPO tuvo una mayor resistencia al impacto que el PP puro o PP con nanoarcillas en todas las temperaturas ensayadas, además se observó que las nanoarcillas incrementan la resistencia al impacto tanto para TPO (**Figura 43**) como para el PP (**Figura 44**) [**Yang, 2011**].

**Tabla 8.** Propiedades de flexión y tracción de los distintos tipos de nanoarcillas en HDPE [**Faruk, 2008**].

Nanoarcilla en la matriz de HDPE	Propiedades de flexión		Propiedades de tracción	
	Resistencia (MPa)	Modulo (MPa)	Resistencia (MPa)	Modulo (MPa)
Cloisite 10A	31.7±1.8	947±76	27.6±1.1	1353±50
Cloisite 15A	24.7±0.8	693±40	25±0.5	1333±36
Cloisite 20A	26.4±0.5	757±35	25.1±0.3	1334±24
Cloisite 25A	26.8±0.6	759±21	25.1±0.1	1341±23
Cloisite 30B	25.7±0.3	744±19	25.3±0.2	1335±10

*Ferreira et al.* investigo el efecto que tienen las nanoarcillas tratadas superficialmente y las no tratadas en el polipropileno (PP), observando que ambas nanoarcillas incrementan la resistencia a la tracción y el módulo elástico, pero obteniendo un mayor incremento con las nanoarcillas que fueron tratadas superficialmente, así también los ensayos de fatiga revelaron que ambos nanocompuestos tienen una alta capacidad de deformación y liberación de

esfuerzos, sin embargo estas son menores que la del PP puro, siendo la PP reforzada con nanoarcillas tratadas superficialmente las más cercanas a la del PP puro, lo cual es debido a la mejor dispersión que presentan en el PP [Ferreira, 2011].

Hwang et al. investigo el efecto que tienen las nanoarcillas organomodificadas en el poliestireno (PS), evaluando sus propiedades mecánicas y térmicas, en la cual observo que estas nanoarcillas incrementan la resistencia a la tracción, encontrándose un máximo valor de resistencia a la tracción para un contenido de 1% de nanoarcillas organomodificadas, así también estas incrementaron la temperatura de transición y la temperatura de descomposición del nanocompuesto [Hwang, 2009].

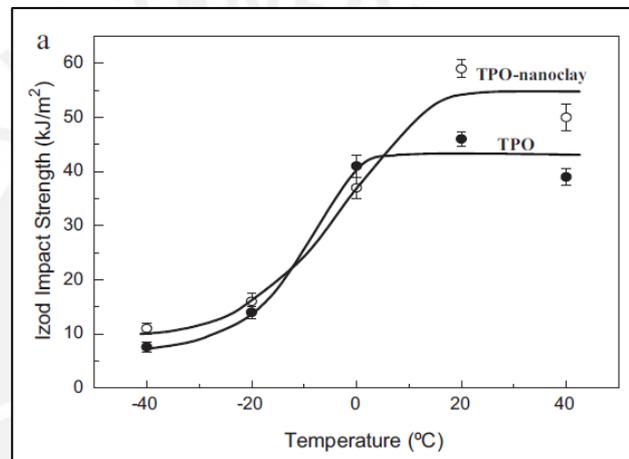


Figura 43. Resistencia al impacto Izod del TPO con nanoarcillas en función de la temperatura [Yang, 2011].

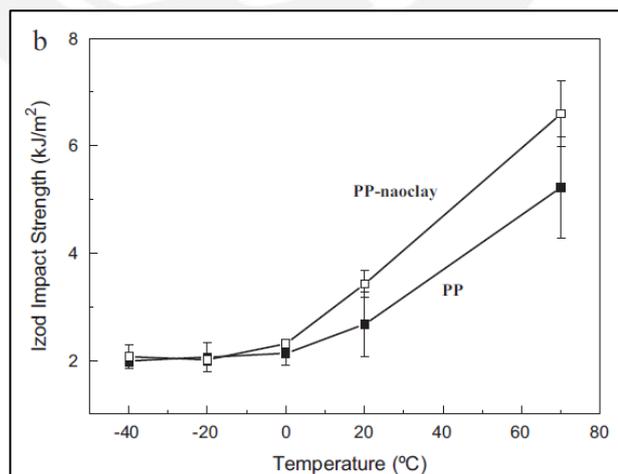


Figura 44. Resistencia al impacto Izod del PP con nanoarcillas en función de la temperatura [Yang et al., 2011].

Droz dov et al. desarrollo un nanocompuesto de polietileno de alta densidad (HDPE) reforzada con arcillas montmorillonita, en la cual sometió a este nanocompuesto a

un ensayo tracción uniaxial cíclico, del cual pudo observar que las capas de silicatos que conforman a la montmorillonita mejoran las elasticidad y reducen la viscosidad del HDPE [**Drozdov, 2007**].

*Abdeen* desarrollo una serie de nanocompuestos de Policloruro de vinilo (PVC) reforzado con nanopulvos de óxido de aluminio, en el cual realizó un ensayo de tracción a distintas temperaturas, observando que el modulo elástico y el esfuerzo de fluencia decrecen a mayor concentración de los nanopulvos y a mayor temperatura, esto se observó a partir de una concentración superior a 5% en peso de los nanopulvos [**Abdeen, 2012**]. *Ramkumar et al.* estudio el efecto de la adición de nanoarcillas en la poliamida-6 (PA6), en el cual observo mediante un análisis de fatiga que para bajos niveles de esfuerzos los nanocompuestos presentaron una menor caída del módulo fallando después de  $10^5$  ciclos [**Ramkumar, 2008**].

*Timmaraju et al.* estudio el comportamiento a la fatiga por flexión de la poliamida 66 (PA66) reforzada con hectorita (nanoarcilla), así también estudio el efecto del medio circundante en el rendimiento del nanocompuesto sometido a cargas cíclicas de flexión, en el cual observo que se produce una mayor disipación de energía por ciclo en la niebla que en el aire ambos a condiciones de estado estacionario cíclico, lo cual conllevaría a una caída en la vida de fatiga para el nanocompuesto [**Timmaraju, 2001**].

*Hwang et al.* investigo el efecto que tienen las nanoarcillas organomodificadas montmorillonita en el polibutil tereftalato (PBT), en el cual fueron prepararon estos nanocompuestos mediante un moldeo por inyección microcelular, los nanocompuestos fueron sometidos a ensayos de tracción, observando un incremento en la resistencia mecánica en comparación con el PBT puro, así también se observó mediante ensayos DSC y TGA un incremento en la estabilidad térmica del nanocompuesto, además de observar que la velocidad a la que gira el husillo del extrusor influye en la resistencia a la tracción del nanocompuesto [**Hwang, 2010**].

Como se vio hay numerosas investigaciones en la cual se usa a los polímeros como matrices de nanocompuestos. Es así que ahora hablaremos del ABS, que es uno de los polímeros más usados y aplicados en ingeniería, generalmente el ABS consiste en partículas de polibutadieno (PB) injertado parcialmente en una fase continua de estireno/acrilonitrilo (SAN) para el cual existen distintos procesos de polimerización [**Moore, 1973**].

*Singh y Ghosh* estudiaron las propiedades de tensión y torsión de nanocompuestos de ABS y arcillas, en la cual encontró que la adición de las arcillas incrementan la viscosidad y el módulo de almacenamiento del ABS, además de proponer que el nanocompuesto de ABS con un 2% en peso de arcillas puede ser usado en aplicaciones estructurales por su buena resistencia a la torsión y sus buenas propiedades de tenacidad y rigidez [**Singh, 2014**].

*Shishavan et al.* investigo el efecto de las nanoarcillas en el ABS y los parámetros de procesamiento del moldeo por inyección del nanocompuesto, observando que para un 2% en peso de nanoarcillas se tiene la más alta resistencia a la tracción, además de observar que el mayor valor de dureza se consigue con el nanocompuesto con un contenido en peso del 4% de nanoarcillas, también indico que la temperatura de inyección ha sido el efecto más importante en la resistencia a la tracción y en el valor de dureza del nanocompuesto [**Shishavan, 2014**].

En general un nanocompuesto puede ser preparado principalmente de 3 maneras los cuales son *solution dispersión*, *in-situ polymerization* y *melt intercalation*, siendo el in-situ polimerización el método de preparación en la que se obtiene una mejor dispersión del refuerzo en la matriz [**Wang, 2001**]. Sin embargo el método melt intercalation es el método más usado en la preparación de nanocompuestos y por su gran aplicación industrial, la principal ventaja de este método es que no se requiere de un solvente, para el caso en el cual se tenga como refuerzo a las arcillas este método consiste en una mezcla de las capas de silicato presentes en la montmorillonita con el polímero, calentando esta mezcla por encima del punto de ablandamiento del polímero [**Ray, 2003**]. El poliestireno fue el primer polímero usado en la obtención de un nanocompuesto mediante este método, método que sigue siendo usado hasta el día de hoy [**Liu, 2010**].

*Hambir et al.* observo una mejor estabilidad térmica y un incremento en módulo de almacenamiento del nanocompuesto de PP reforzado con arcillas obtenidas mediante el método melt intercalation [**Hambir, 2002**]. *Kodgire et al.* desarrollo un nanocompuesto con exfoliación parcial a partir de arcillas modificadas en una matriz de PP usando anhídrido maleico injertado en el PP, este nanocompuesto fue obtenido mediante el método de preparación melt intercalation, con lo cual obtuvo que este nanocompuesto presento una alta temperatura de degradación, así también mediante ensayos de tracción obtuvo que este nanocompuesto presento un incremento de 35% en el módulo elástico y de 10% en la resistencia a la tracción [**Kodgire, 2001**].



**Capítulo II**  
**Parte experimental**

## 2.1 Materiales

Para la primera parte del trabajo de investigación se usaran filamentos de ABS y PLA suministrados por MakerBot Industries, siendo estos dos polímeros los termoplásticos comerciales más comunes usados en impresión 3D. Para la segunda parte se fabricaran filamentos mediante un proceso de extrusión de doble tornillo partiendo de granza de ABS y PLA, con y sin contenido de nanoarcillas.

### 2.1.1 Filamentos comerciales de ABS y PLA

Para el inicio de la presente investigación se realizaran pruebas de impresión 3D por FDM, para el cual se usaran filamentos de ABS de color plateado y filamentos de PLA de color blanco, de 1.8mm y 1.75mm de diámetro respectivamente (**Figura 45**), ambos suministrados por MakerBot Industries.



**Figura 45.** Filamentos de ABS (plateado) y PLA (blanco) proporcionados por MakerBot industries.

### 2.1.2 Granza de ABS y PLA

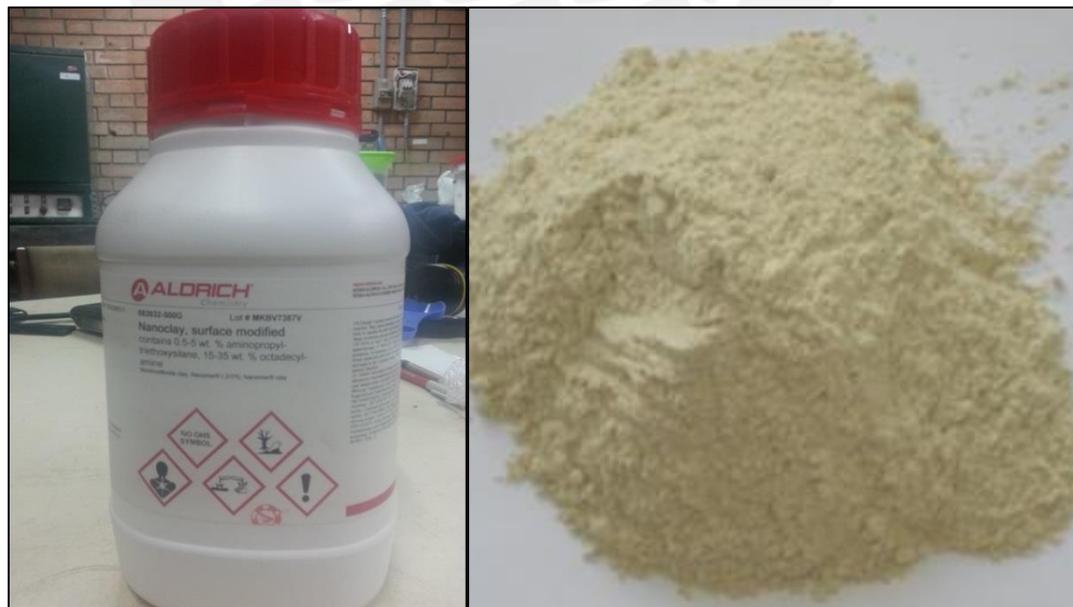
Para las pruebas de moldeo por extrusión y la fabricación de filamentos de matriz pura y de material compuesto se usaran granza de ABS (STAR PRIME™ Resins ABS448T, Star Plastics Inc, USA) y PLA (NatureWorks PLA4043D, NatureWorks LLC, USA) como se puede observar en la **figura 46** (ver anexo 2).



**Figura 46.** Granza de ABS (lado izquierdo) y PLA (lado derecho).

### 2.1.3 Nanoarcillas

El material de refuerzo que se usará para este trabajo de investigación serán nanoarcillas Nanomer® I.31PS proporcionadas por Sigma-Aldrich (**Figura 47**), el cual es una montmorillonita de superficie modificada con 15-35% en peso de octadecilamina y 0.5-5% en peso de aminopropiltriethoxisilano. El tamaño típico de las partículas aglomeradas está en el rango de 15 a 20  $\mu\text{m}$  (ver anexo 2).

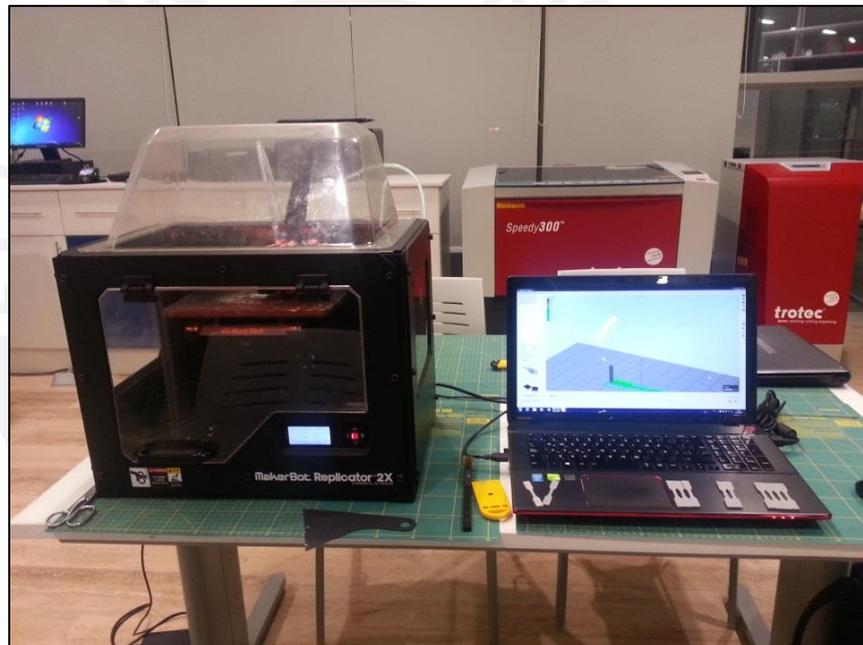


**Figura 47.** Nanoarcillas Nanomer® I.31PS.

## 2.2 Equipos

### 2.2.1 Impresora 3D

Para las pruebas de impresión 3D y la fabricación de probetas para los ensayados realizados, se usara una impresora 3D MakerBot® Replicator™ 2X de MakerBot Industries, USA (**Figura 48**). El cual se basa en la técnica de manufactura aditiva por FDM, con una capacidad de volumen máximo de impresión de 24.6x15.2x15.5cm, una resolución en el eje Z de hasta 100  $\mu\text{m}$  y se alimenta con filamentos de 1.75mm de diámetro. Esta impresora cuenta con dos extrusores para el posible uso de dos materiales distintos, boquillas de extrusión de 0.4mm de diámetro, una plataforma con temperatura regulable y una tapa superior de acrílico para mantener la temperatura al interior de la impresora 3D.



**Figura 48.** Impresora MakerBot® Replicator™ 2X.

### 2.2.2 Horno de convección forzada

Los filamentos, las nanoarcillas, así como la granza de ABS y PLA serán secadas en un horno de convección (**Figura 49**), para así evitar problemas al momento de la impresión 3D y el moldeo por extrusión. Este horno de convección puede llegar hasta una temperatura de 300°C, y debe ser conectada a una red monofásica de 220V para su funcionamiento.



**Figura 49.** Balanza analítica (lado izquierdo) y horno de convección (lado derecho).

### 2.2.3 Balanza analítica

Para pesar las nanoarcillas que se usaran como refuerzos del ABS y PLA, se usó una balanza digital METTLER TOLEDO con una precisión de 0.0001 y una capacidad máxima de 200 g (**Figura 49**).

### 2.2.4 Balanza digital

Esta balanza se usara para pesar la granza de ABS y PLA, con una precisión de 5g y una capacidad máxima de 30 Kg.



**Figura 50.** Balanza digital KAMBOR®.

### 2.2.5 Mezclador de cuchillas

Para mezclar la granza de ABS y PLA, con distintas proporciones de nanoarcillas se usara un mezclador de cuchillas (**Figura 51**). El tanque así como las cuchillas de agitación están hechos de acero inoxidable. La capacidad máxima del mezclador de cuchillas es de 3 Kg.



*Figura 51. Mezclador de cuchillas.*

### 2.2.6 Extrusora de doble tornillo

Para la fabricación de los filamentos se usara una extrusora de doble tornillo Labtech Scientific LTE26 40L/D, Labtech Engineering Company Ltd., Tailandia (**Figura 52**). El cual cuenta con:

- Dos tornillos co-giratorios de 26 mm de diámetro cada uno, hechos de acero de alta dureza con superficie nitrurada.
- 10 barriles de calentamiento, los cuales están hechos de un acero especial endurecido a más de 60 HRC con lo que se puede llegar a temperaturas de extrusión de hasta 400°C, cada barril cuenta con un enfriamiento por agua.
- Un alimentador de simple tornillo de velocidad variable, con agitador.
- Una bomba de vacío ubicada en la última zona de calentamiento, con una válvula de regulación de vacío de hasta -1bar (**Figura 53**), así también posee una trampa de resina y un filtro de protección de malla de acero inoxidable.
- Motor de 15 kW de potencia.

- Velocidad de los tornillos de hasta 800RPM, así también se cuenta con un limitador de torque para evitar la sobrecarga en los tornillos.
- Boquilla de 4 orificios para producir 4 hileras de filamentos.
- Un plato rompedor a la salida del extrusor, que sirve para cambiar de un flujo en espiral a un flujo axial (**Figura 54**).



*Figura 52. Extrusora de doble tornillo Labtech Scientific LTE26 40L/D.*



*Figura 53. Vacuómetro de la bomba de vacío ubicado la última zona de calentamiento.*



**Figura 54.** Plato rompedor de la extrusora Labtech Scientific LTE26 40L/D.

### 2.2.7 Cubeta de enfriamiento

Para el enfriamiento de los filamentos a la salida de la extrusora se usará una cubeta de enfriamiento por agua Labtech LW-100, Labtech Engineering Company Ltd. Tailandia (**Figura 55.b**). El cual está hecho de acero inoxidable y tiene una longitud de 1.5 m. Así también cuenta con 3 rodillos guías de filamento, una bomba para la circulación del agua de enfriamiento y un dispositivo de succión para remover el agua impregnada en la superficie del filamento a la salida de la cubeta.

### 2.2.8 Granuladora

Una granuladora Labtech LZ-120, Labtech Engineering Company Ltd. Tailandia (**Figura 55.a**), será usada para tensionar y guiar a los filamentos extruidos que fueron enfriados, para su uso se tendrá que retirar la cuchilla de 20 dientes hecha de un acero de alta dureza. Esta granuladora tiene a la entrada un rodillo de goma de poliuretano, el cual jalara los filamentos sin producir deformación por aplastamiento.

En la **figura 56** podemos observar la línea completa de extrusión para poder producir los filamentos, los cuales servirán de alimentación para la impresora 3D MakerBot® Replicator™ 2X.



**Figura 56.** Línea completa de extrusión: (a) granuladora, (b) cubeta de enfriamiento por agua y (c) extrusora de doble tornillo.

### 2.3 Diseño experimental

La parte experimental del presente trabajo de investigación puede ser dividida principalmente en 2 partes, la primera donde se usaran los filamentos tanto de ABS como de PLA proporcionados por MakerBot Industries para obtener las probetas para los distintos ensayos, y la segunda donde se usarann los filamentos producidos por extrusión de doble tornillo.

Al inicio se realizaran pruebas de impresión 3D con el objetivo de familiarizarse con el software y la impresora MakerBot® Replicator™ 2X. Luego se procedera a estudiar el efecto de los principales parámetros de impresión 3D en las propiedades mecánicas obtenidas de los ensayos de tracción de las probetas impresas a partir de los filamentos MakerBot de ABS y PLA. Dichos parámetros son los siguientes:

- Temperatura de impresión (parametro1)
- Altura de capa (parámetro 2)
- Angulo de impresión (parámetro 3)

Donde los valores de los parámetros estudiados se muestran en la **tabla 9**.

**Tabla 9.** Valores de los parámetros estudiados de las probetas de tracción impresas.

Parámetros de impresión		
Temperatura de impresión (°C)	Altura de capa (mm)	Angulo de impresión (°)
200	0.10	[0]
210	0.15	[90]
220	0.20	[45]
230	0.25	[0/90]
240	0.30	[-45/45]
250		[0/45/90]
260		[0/45/90/135]
270		

Para la realización de los ensayos de tracción según la norma ASTM D638-14 se requiere de 5 probetas de tracción como mínimo. Así también se estudiaran el efecto del ángulo de impresión en la resistencia al impacto de las probetas impresas de filamento MakerBot de ABS y PLA, para lo cual según la norma ISO 179-1 se requieren de 10 probetas de impacto como mínimo.

**Tabla 10.** Cantidad total de las probetas para los ensayos de tracción e impacto.

	Ensayo de tracción	Ensayo de impacto
Cantidad de materiales (ABS y PLA)	2	2
Numero de probetas por ensayo	5	10
Cantidad de valores del parámetro 1	8	-
Cantidad de valores del parámetro 2	5	-
Cantidad de valores del parámetro 3	7	7
Cantidad total de probetas impresas	200	140

De la **tabla 10** se tiene que se requieren 200 probetas impresas para los ensayos de tracción y 140 probetas impresas para los ensayos de impacto.

Para las probetas impresas a partir de los filamentos producidos por extrusión de doble tornillo, se realizarán ensayos de tracción e impacto bajo las mismas normas anteriormente mencionadas. Donde se producirán filamentos con 4 diferentes proporciones en peso de nanoarcilla Nanomer® I.31PS en la matriz de ABS y PLA como se muestra en la **tabla 11**.

**Tabla 11.** Proporciones de nanoarcillas para los filamentos que serán obtenidos por extrusión de doble tornillo.

Matriz	Porcentajes en peso de nanoarcillas (%)				Cantidad total de proporciones
ABS	0	1	2	3	4
PLA	0	1	2	3	4

**Tabla 12.** Cantidad total de las probetas producidas a partir de los filamentos que serán extruidos.

	Ensayo de tracción	Ensayo de impacto
Numero de proporciones con matriz de ABS	4	4
Numero de proporciones con matriz de PLA	4	4
Numero de probetas por ensayo	5	10
Cantidad total de probetas impresas	40	80

De la **tabla 12** observamos que se requieren 40 probetas de tracción y 80 probetas de impacto para la realización de los ensayos mecánicos de probetas impresas a partir de filamentos de ABS, PLA y sus compuestos extruidos. Así también se realizara un análisis de microscopia electrónica de barrido de la superficie de fractura de las probetas de impacto que serán ensayadas.

#### 2.4 Procesamiento del material compuesto

La materia prima que se usara para la producción de filamentos de material compuesto, será granza de ABS (STAR PRIME™ Resins ABS448T, Star Plastics Inc, USA), PLA (NatureWorks PLA4043D, NatureWorks LLC, USA) y nanoarcillas Nanomer® I.31PS. La granza de ABS se secura por 2 h a 85°C, la de PLA a 80°C por 2 h, mientras que las nanoarcillas se secan por 24 h a 85°C, todas se secan en el horno de convección anteriormente mencionado.

La granza y las nanoarcillas sern mezcladas en las proporciones indicadas en la **tabla 11** en un mezclador de cuchillas, cada proporción se mezclara por un tiempo de 10 min.

Para el proceso de extrusión, primero se tendra que purgar la extrusora con la matriz pura de ABS o PLA (**Figura 57**). Luego se realizaran pruebas de extrusión con el fin de determinar los parámetros adecuados para producir filamentos de material compuesto tanto de matriz de ASB como PLA.

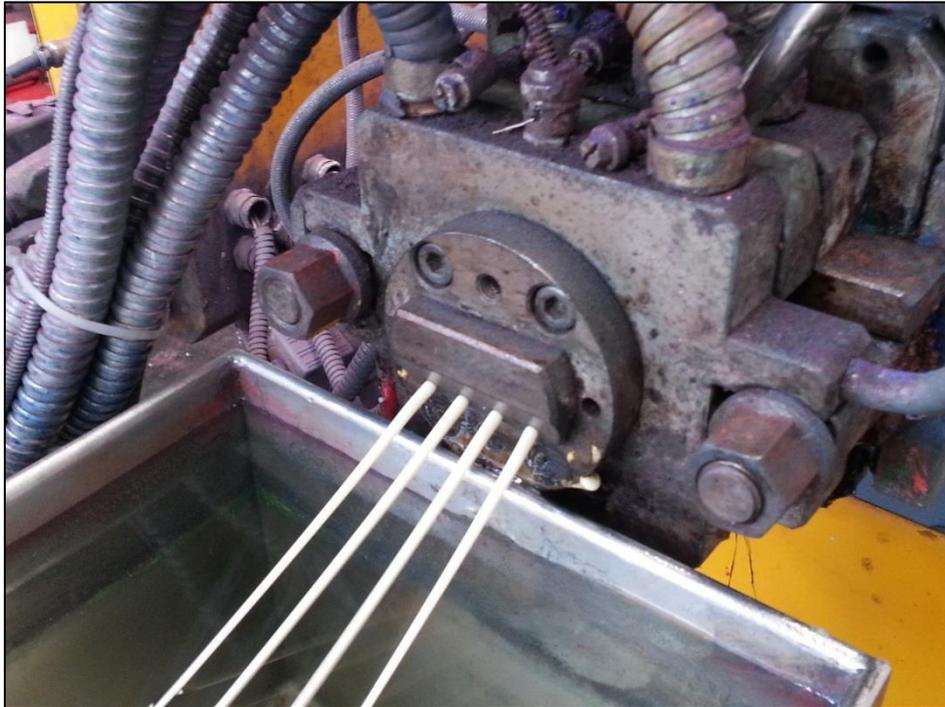


*Figura 57. Purga de la extrusora.*

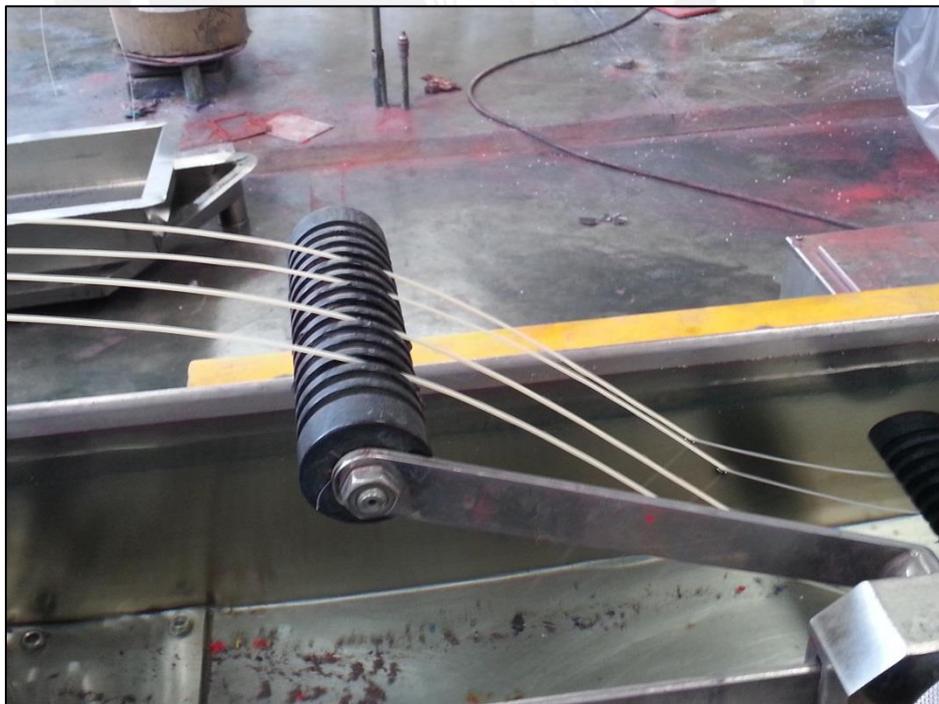
Una vez que se definida los parámetros adecuados, se procederá a introducir la primera proporción en la tolva de alimentación de la extrusora (**Figura 58**) obteniendo 4 hileras de filamentos (**Figura 59**) a la salida de la extrusora, Luego estos filamentos serán guiados a través de la cubeta de enfriamiento (**Figura 60**), donde a la salida de la cubeta se tendrá un dispositivo que succionara el agua impregnada en la superficie de los filamentos producidos (**Figura 61**).



*Figura 58. Material introducido en la tolva de alimentación.*



**Figura 59.** Producción de 4 hileras de filamento a la salida de la extrusora.



**Figura 60.** Rodillos guiadores en la cubeta de enfriamiento.



**Figura 61.** Dispositivo de succión del agua impregnada en la superficie de los filamentos enfriados.

Los filamentos enfriados serán introducidos en la granuladora donde estos serán tensionados con el fin de poder controlar el diámetro de los filamentos producidos (**Figura 62**). A la salida de la granuladora estos filamentos serán enrollados manualmente en carretes.



**Figura 62.** Filamentos tensionados por la granuladora.

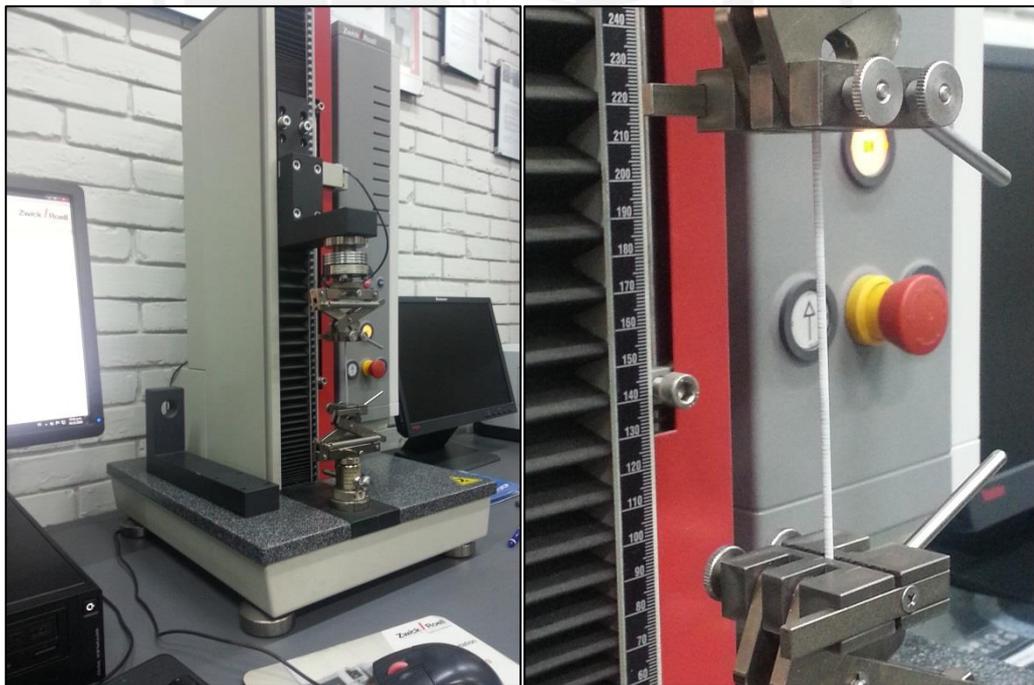
Este mismo procedimiento se repetirá para todas las proporciones, teniendo en cuenta que para el cambio de proporción se purgara la extrusora con la matriz pura del material compuesto que se estuvo produciendo.

## 2.5 Caracterización de filamentos

Se realizaran ensayos de tracción de los filamentos MakerBot de ABS y PLA, así como la medición del índice de fluidez y un análisis de calorimetría diferencial de barrido para los filamentos producidos por extrusión.

### 2.5.1 Ensayo de tracción

Para el ensayo de tracción de los filamentos MakerBot de ABS y PLA, se tomaran 5 probetas de 100mm de longitud, donde los diámetros promedios fueron de 1.75mm y 1.8mm para el ABS y PLA respectivamente. Los filamentos serán ensayados en un equipo Zwick/Roell Z0.5 (**Figura 63**) el cual cuenta con una celda de carga de 500 N. La velocidad del ensayo fue de 5mm/min, con una longitud calibrada de 75mm.



**Figura 63.** Equipo Zwick/Roell Z0.5 utilizada para los filamentos MakerBot.

### 2.5.2 Medición del índice de fluidez

Se midieron el índice de fluidez para los filamentos MakerBot de ABS y PLA, así como para los filamentos producidos por extrusión. Los filamentos fueron picados en longitudes 3mm a 5mm, para poder introducirlos en el medidor de índice de fluidez Zwick/Roell Cflow Extrusion Plastomer (**Figura 64**). La medición se realizara bajo la norma ASTM D1238, para ello se trabajara con pesas de 2.16 kg y 5 kg para el PLA y ABS respectivamente, ambos a 230 °C.



**Figura 64.** Medidor del índice de fluidez Zwick/Roell Cflow Extrusion Plastomer.

### 2.5.3 Análisis térmico

Se realizara un ensayo de calorimetría diferencial de barrido (DSC) para los filamentos de ABS y PLA extruidos. Los ensayos se realizaran bajo la norma ASTM D3418-12, con el fin de hallar las temperatura de transición vítrea y la temperatura de fusión de los filamentos que serán estudiados, para al cual se llevaran a cabo 3 procesos, el primero de calentamiento de 25°C hasta 200°C, el segundo de enfriamiento de 200°C hasta 25°C y el tercero de calentamiento de 25°C hasta 200°C todos estos procesos seran a una velocidad de enfriamiento y calentamiento de 10°C/min. El equipo para este ensayo de DSC será una NETZSCH STA 449 F1 Jupiter® (**Figura 65**). Así también se realizara un análisis

termogravimétrico (TGA) para determinar la temperatura de degradación de los filamentos de ABS y PLA.



*Figura 65. Equipo para TGA y DSC NETZSCH STA 449 F1 Júpiter®.*

## 2.6 Fabricación de probetas

Para la fabricación de las probetas y las pruebas realizadas, se usó una impresora MakerBot® Replicator™ 2X. Las pruebas fueron realizadas tanto para ABS y PLA con el objetivo de familiarizarse con el proceso de impresión 3D mediante la técnica de FDM.

Los filamentos comerciales de ABS y PLA fueron secados por 12 h a 45 °C antes de ser usados en el proceso de impresión ya que en las pruebas de impresión se observaron problemas debido a la humedad. Tales problemas los podemos observar en la **figura 66**, donde la alimentación del filamento extruido por la impresora no fue de manera continua, lo cual generó cráteres en la superficie de las probetas, y llegando incluso a detener la deposición del filamento fundido obligando así a retirar el filamento que está al ingreso del extrusor, donde se pudo observar una gran burbuja (**Figura 67**).

Una de las pruebas consistió en imprimir probetas de tracción con distintas configuraciones en el ángulo de impresión y el número de contornos como se puede observar en la **figura 68**.



**Figura 66.** *Probeta de tracción con una deposición discontinua de filamento fundido.*



**Figura 67.** *Burbuja generada en el interior del extrusor debido a la humedad presente en el filamento.*



**Figura 68.** *Probetas de tracción impresas con distintas configuraciones.*

Así también de las pruebas de impresión realizadas se eligió una temperatura de la plataforma de 110°C para el ABS y de 90°C para el PLA, ya que si se usaban menores temperaturas se tenía una mala adhesión a la plataforma lo cual generaba que las piezas se alabeen durante el proceso de impresión (**Figura 69**).



**Figura 69.** Alabeo de una probeta de tracción impresa de ABS debido a una mala selección de la temperatura de la plataforma.

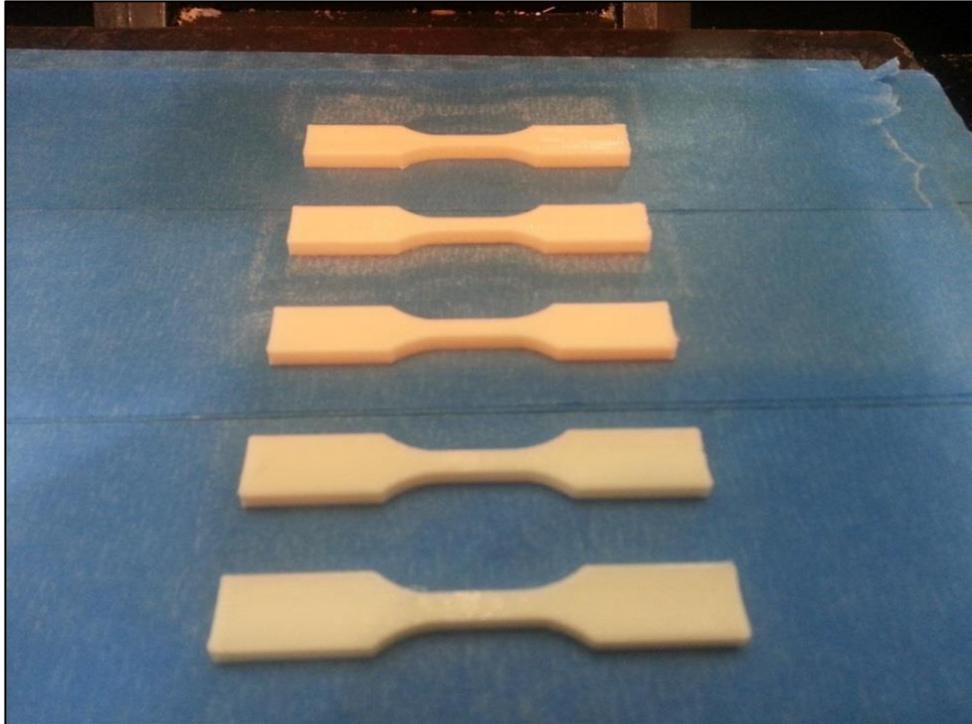
Primero se fabricaron las probetas de tracción impresas a distintas temperaturas como se puede observar en la **tabla 8**. Todas estas probetas fueron impresas bajo los parámetros observados en la **tabla 13**.

La geometría de las probetas de tracción fueron las de tipo V de la norma ASTM D638-14. Se puede observar en la **figura 70** probetas de tracción impresa a partir de filamentos comerciales de PLA, así también se puede observar una cinta color azul el cual sirvió para generar una buena adhesión del material depositado a la plataforma.

**Tabla 13.** Parámetros de impresión para las probetas de ABS y PLA impresas a distintas temperaturas de impresión.

Relleno, %	100
Altura de capa, mm	0.2
Numero de contornos	1
Velocidad de impresión, mm/min	6600
Diámetro de filamento, mm	1.75
Diámetro de la boquilla, mm	0.4
Angulo de impresión	0°

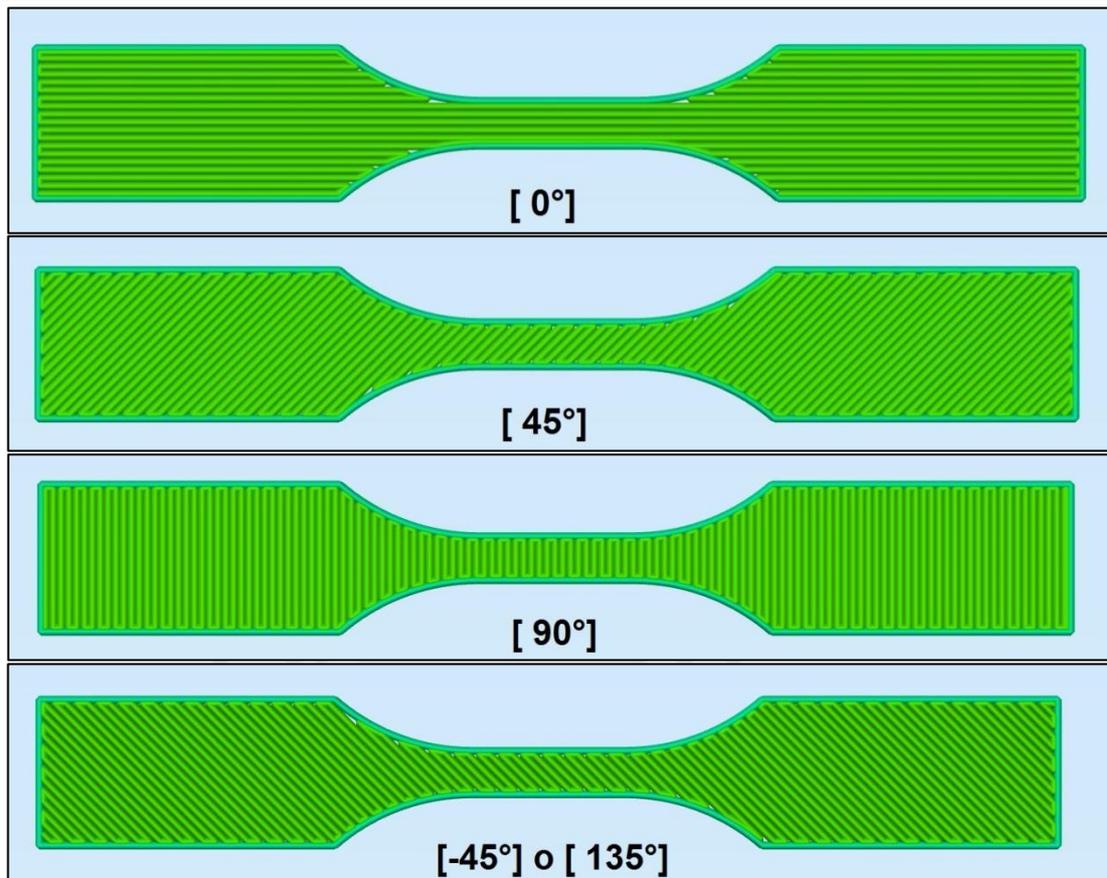
Luego de haber elegido una adecuada temperatura en el proceso de impresión tanto para el ABS como para el PLA, se procedió a estudiar el efecto que tiene la altura de capa en las probetas de tracción impresas.



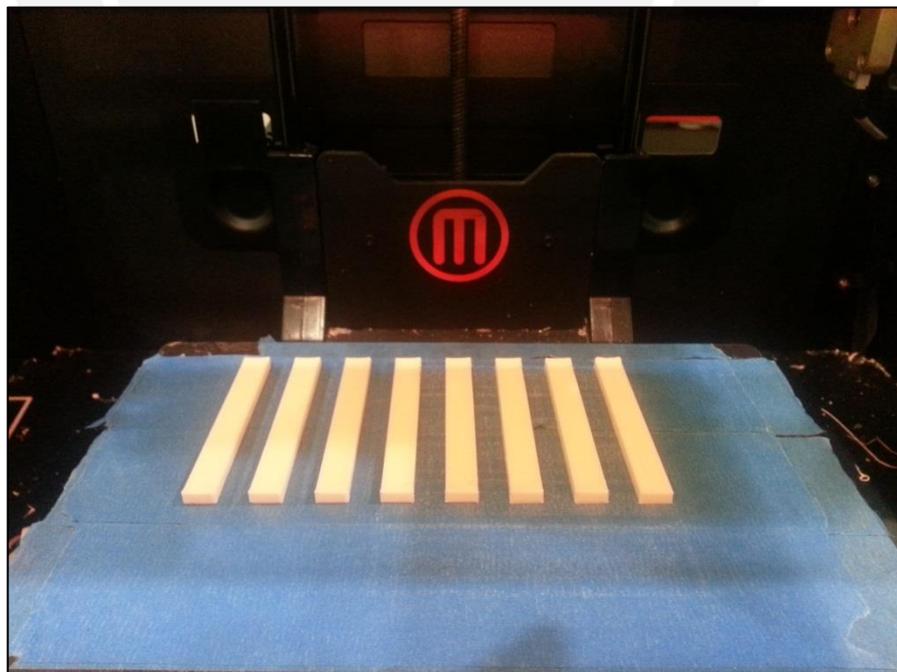
*Figura 70. Probetas de tracción impresas a partir de filamentos MakerBot de PLA.*

Una vez seleccionado la altura de capa y temperatura de impresión para el ABS y PLA, se procedió a la fabricación de probetas de tracción con distintos ángulo de impresión según la **tabla 13**. En la **figura 71** se puede observar esquemáticamente los principales ángulos de impresión con los que se trabajaron para cada lamina impresa, con lo cual una probeta fabricada con un ángulo de impresión de  $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$  estaría conformadas por láminas de  $[-45^{\circ}]$  y  $[45^{\circ}]$  de manera alternada hasta completar el espesor de la probeta impresa.

También se fabricaron probetas de impacto a partir de los filamentos comerciales de ABS y PLA y basándose en la norma ISO 179-1, con los mismos ángulos de impresión observadas en la **tabla 13**, además de usar los valores de altura de capa y temperatura de impresión seleccionadas anteriormente (**Figura 72**). Donde las entallas de las probetas fueron maquinadas, ya que la resistencia al impacto de probetas con entallas impresas y entallas maquinadas presentan similar resistencia a la tracción [**Roberson, 2015**]. Para el maquinado de las entallas se usó una máquina de corte automático Zwick/Roell ZNO como se puede observar en la **figura 73**, obteniendo probetas como el de la **figura 74**.



**Figura 71.** Distintos ángulos de las láminas impresas para la fabricación de probetas de tracción.



**Figura 72.** Probetas de impacto de PLA impresas sin entalla.



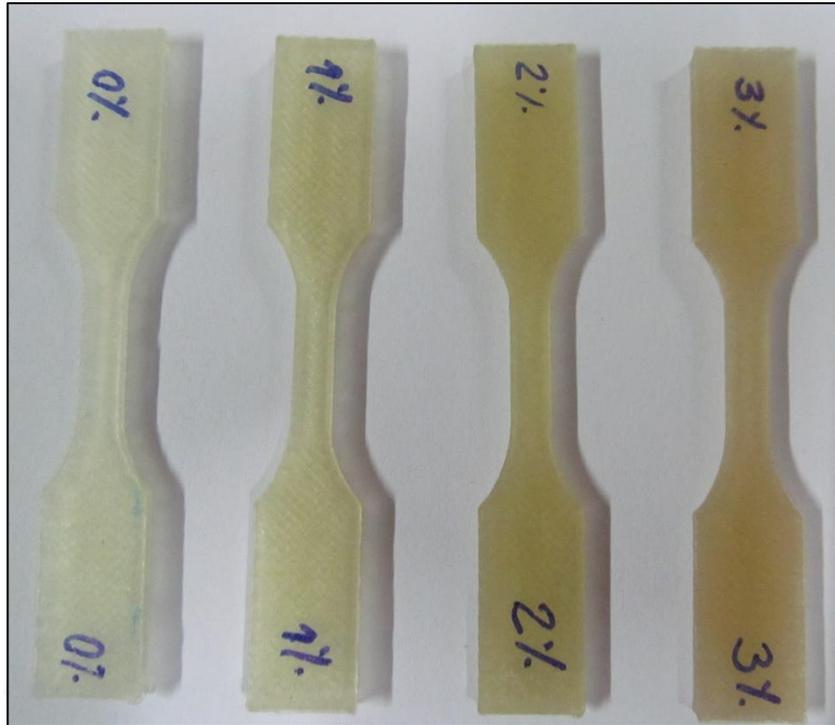
**Figura 73.** Máquina de corte de entallas automático Zwick/Roell ZNO.



**Figura 74.** Probeta de impacto impresa de PLA con entalla maquinada.

Para la fabricación de probetas de material compuesto, los filamentos extruidos fueron secados por 12h a 45°C antes de ser usados en el proceso de impresión para evitar los problemas antes mencionados. La geometría de las probetas de tracción fueron las de tipo V de la norma ASTM D638-14, y para las de impacto se basó en la norma ISO 179-1.

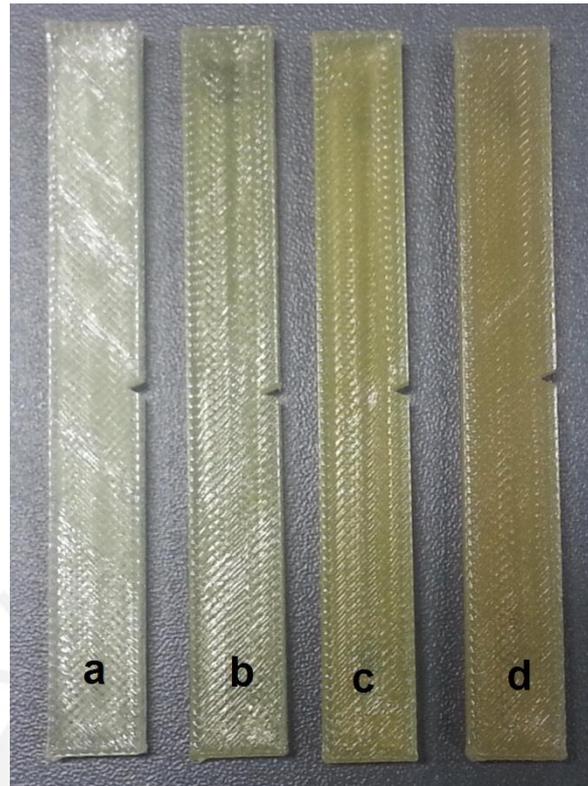
Para la fabricación de dichas probetas se usaron los parámetros seleccionados (temperatura de impresión, altura de capa y ángulo de impresión) anteriormente. En la **figura 75** y **figura 76** se pueden ver probetas de tracción impresas a partir de filamentos extruidos de ABS y PLA respectivamente, donde se puede observar claramente como aumenta la opacidad a mayor cantidad de nanoarcillas tanto para el PLA como el ABS, lo mismo ocurre con las probetas de impacto (**Figura 77**).



**Figura 75.** Probetas de tracción a partir de filamentos extruidos de PLA con distintos contenidos de nanoarcillas.



**Figura 76.** Probetas de tracción a partir de filamentos extruidos de ABS con distintos contenidos de nanoarcillas.



**Figura 77.** Probetas de impacto a partir de filamentos extruidos de PLA con (a) 0%, (b) 1% (c) 2% y (d) 3% en peso de nanoarcillas.

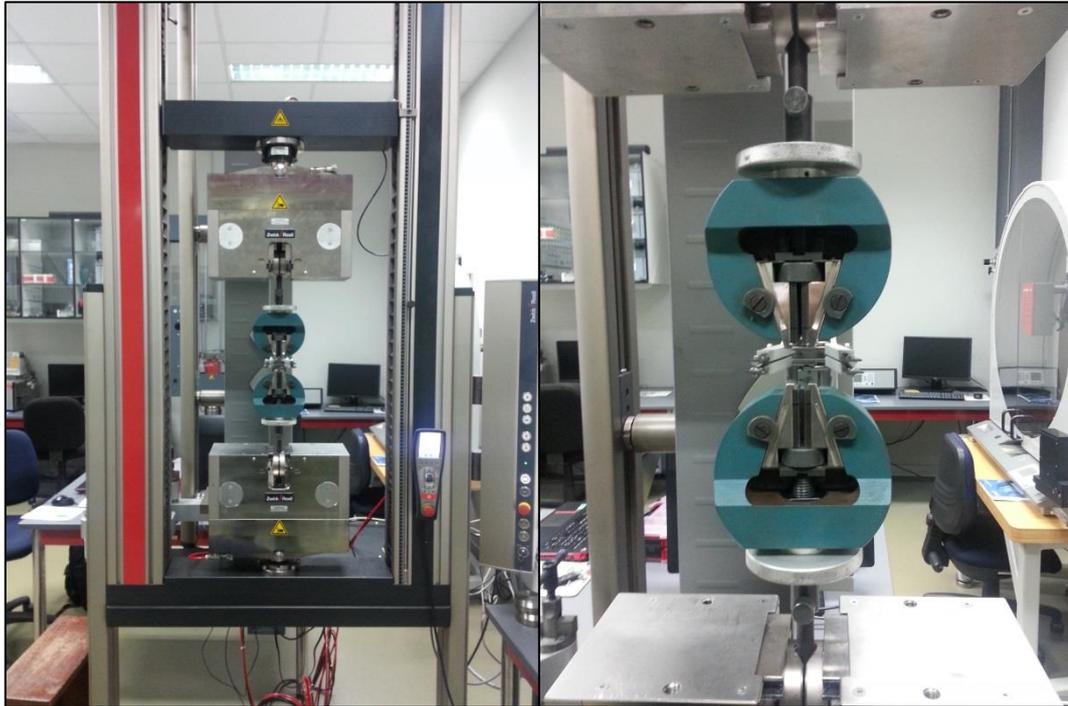
## 2.7 Ensayos para las probetas impresas

Con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas de probetas impresas a partir de filamentos comerciales de ABS y PLA, así como de filamentos extruidos de PLA y ABS con distintos contenidos de nanoarcillas, se realizarán ensayos de tracción e impacto, así como un análisis por microscopía electrónica de barrido para observar la morfología de las nanoarcillas en la superficie de fractura de las probetas de impacto que serán ensayadas.

### 2.7.1 Ensayo de tracción

Los ensayos de tracción en el presente trabajo serán basados en la norma ASTM D638-14. Donde todas las probetas de tracción impresas serán las de tipo V de la norma, y teniendo cada juego 5 probetas como mínimo.

Estos ensayos se realizarán en una máquina de tracción universal Zwick/Roell Z050 (**Figura 78**) el cual cuenta con una celda de carga de 50 kN, así como un extensómetro Zwick/Roell multiXtens, donde la velocidad de ensayo será de 5mm/min.



*Figura 78. Máquina de tracción universal Zwick/Roell Z050.*

### 2.7.2 Ensayo de impacto

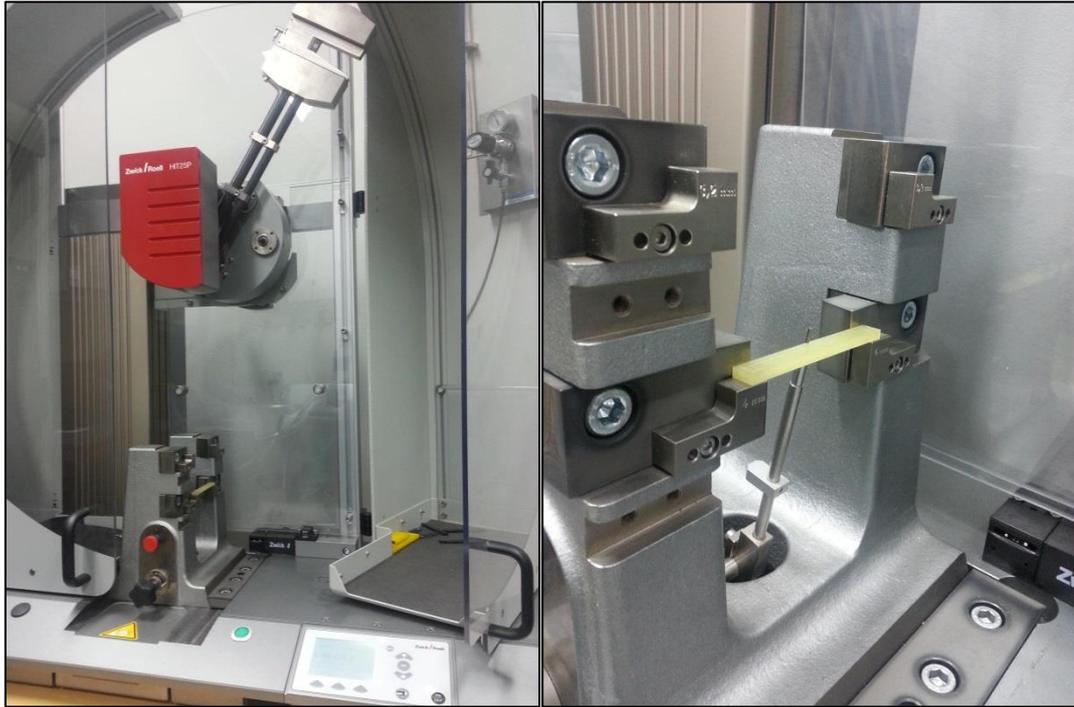
La norma que se usara para la evaluación de la resistencia al impacto Charpy sera la ISO 179-1, para el cual se usara una maquina universal de impacto Zwick/Roell HIT 25P con una capacidad de hasta 25J como se puede observar en la **figura 79**.

### 2.7.3 Microscopia electrónica de barrido

Con el fin de observar la morfología de las nanoarcillas en la superficie de fractura de las probetas impresas a partir de filamento extruido, se usara un microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 650 (**Figura 80**), el cual cuenta con una capacidad de hasta 300000 aumentos además de realizar microanálisis químico.

Las probetas de impacto fracturadas serán cortadas, para así tener secciones de 10mm de longitud que puedan ser fijadas al portamuestra del microscopio.

También se observaron la superficie de fractura de probetas de tracción impresas a distintas temperaturas anteriormente estudiadas.



**Figura 79.** Máquina universal de ensayo de impacto Zwick/Roell HIT 25P (lado izquierdo), así como el posicionamiento de una probeta de material compuesto (lado derecho).



**Figura 80.** Microscopio electrónico de barrido FEI Quanta 650.



## ***Capítulo III***

### ***Resultados y discusión***

### 3.1 Resultado y discusión

En este capítulo se abordara los resultados y las discusiones de los distintos ensayos que se han realizado en el presente trabajo. Iniciando con los resultados de la medición del índice de fluidez para los filamentos comerciales y los filamentos extruidos. Seguido de los resultados obtenidos por calorimetría diferencial de barrido y de una análisis termo-gravimétrico. Luego son analizados los resultados de los ensayos de tracción, donde se estudiaron el efecto de los principales parámetros de impresión en las propiedades mecánicas, con el fin de definir valores adecuados de dichos parámetros que permitan obtener piezas de buenas propiedades mecánicas y de fácil impresión 3D, para así poder aplicarlos en la impresión de piezas de material compuesto a partir de filamentos extruidos. Finalmente se estudiaran la resistencia al impacto de probetas impresas con distintos ángulos de impresión a partir de filamentos comerciales, así como la resistencia al impacto de probetas impresas de material compuesto.

#### 3.1.1 Índice de fluidez

Los resultados de la medición de los índices de fluidez para el ABS y PLA son mostrados en la **tabla 14** y **tabla 15** respectivamente.

De los resultados se puede ver que los filamentos comerciales de ABS (ABS-MB) presentan menor índice de fluidez que los filamentos extruidos, esto nos indica de manera indirecta que los **filamentos** comerciales de ABS tienen una mayor viscosidad en estado fundido que los filamentos extruidos, es decir que los filamentos de ABS comercial presentan una mayor oposición al flujo, lo cual es notado en el proceso de impresión 3D. Mientras que los filamentos comerciales de PLA muestra un índice de fluidez poco mayor al del filamento extruido de PLA puro.

Para los filamentos extruidos de material compuesto se observa que a mayor contenido de nanoarcillas el índice de fluidez se incrementa, siendo esto más notorio en el material compuesto de matriz de PLA. Este incremento en el índice de fluidez estaría indicando un incremento en la movilidad de las cadenas poliméricas de PLA, es por ello que al parecer las nanoarcillas estarían actuando como un plastificante. Tal comportamiento también ha sido reportado al introducir nanoarcillas en el polietileno de alta densidad (HDPE) [**Sevet, 2015**], así también se han reportado disminución del índice de fluidez al introducir nanoarcillas en una

matriz de PLA y Nylon, es decir que las nanoarcillas también podrían restringir la movilidad de las cadenas poliméricas [Kim, 2004; Leu, 2012].

**Tabla 14.** Índice de fluidez (230°C, 5kg) para filamentos comerciales y extruidos de ABS.

Designación	Composición		MFI (g/10min)
	ABS (wt %)	nanoarcilla (wt %)	
ABS-MB	-	-	5.84
ABS-0NC	100	0	11.98
ABS-1NC	99	1	12.43
ABS-2NC	98	2	12.90
ABS-3NC	97	3	13.14

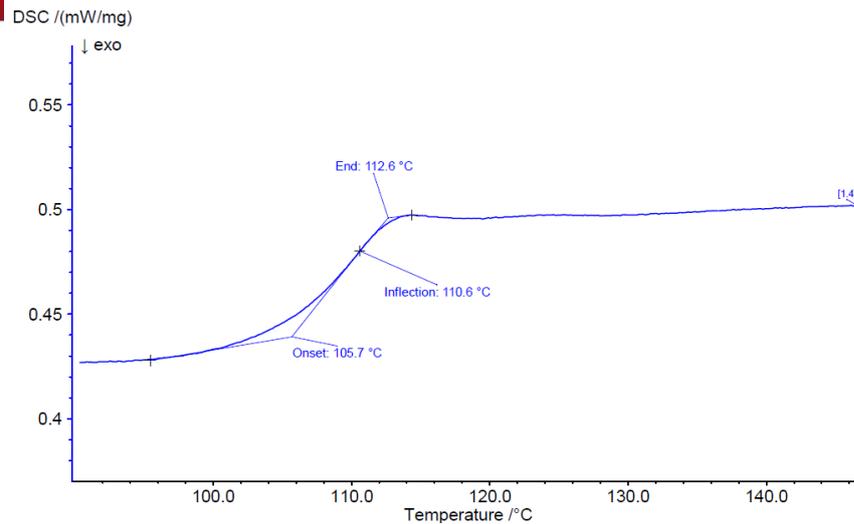
**Tabla 15.** Índice de fluidez (230°C, 2.16kg) para filamentos comerciales y extruidos de PLA.

Designación	Composición		MFI (g/10min)
	PLA (wt %)	nanoarcilla (wt %)	
PLA-MB	100	0	25.51
PLA-0NC	100	0	23.29
PLA-1NC	99	1	25.25
PLA-2NC	98	2	27.82
PLA-3NC	97	3	30.55

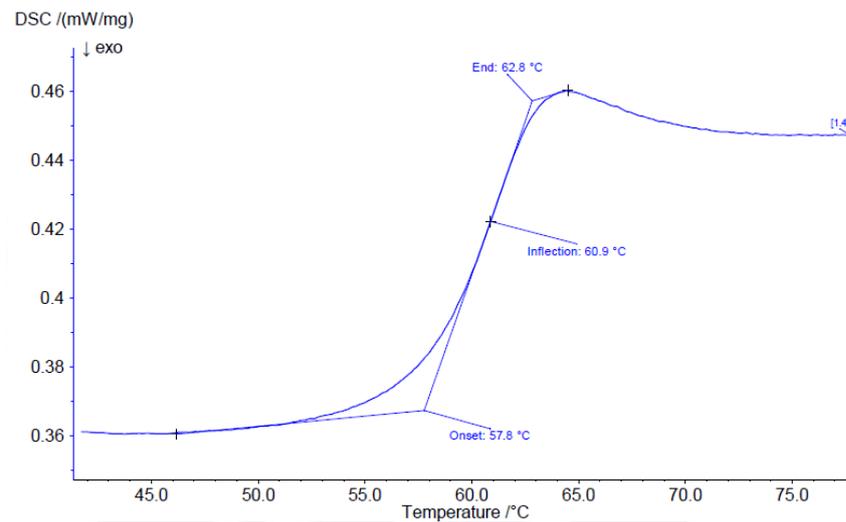
### 3.1.2 Calorimetría diferencial de barrido y análisis termo-gravimétrico

Se llevó a cabo ensayos de calorimetría diferencial de barrido (DSC), así como un análisis termo-gravimétrico (TGA) para los filamentos producidos por extrusión de matriz pura de ABS y PLA. De las curvas de los ensayos de DSC obtenidas (**Figura 81 y 82**) podemos decir que la temperatura de transición vítrea del ABS fue de 110 °C, y de 61 °C para el PLA. Lo cual nos lleva a decir que la temperatura usada en la plataforma de impresión fue la adecuada ya que estas fueron por encima o igual a la temperatura de transición del material a imprimir.

En la **figura 83** podemos observar parte de la curva DSC obtenida (ampliada para una mejor ilustración), en el cual se puede observar picos de cristalización y fusión del PLA, mientras que en la curva DSC del ABS no se observó dichos picos ya que el ABS es un termoplástico amorfo, con lo cual este no presentaría un verdadero punto de fusión.



**Figura 81.** Zona ampliada de la curva DSC del ABS en el cual se observa la temperatura de transición vítrea.



**Figura 82.** Zona ampliada de la curva DSC del PLA en el cual se observa la temperatura de transición vítrea.

Con las entalpías de cristalización y de fusión obtenidas del ensayo DSC para el PLA procederemos a calcular el grado de cristalinidad de los filamentos de PLA extruidos, según la siguiente ecuación [Luo, 2014].

$$X_c = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^o} \times 100\%$$

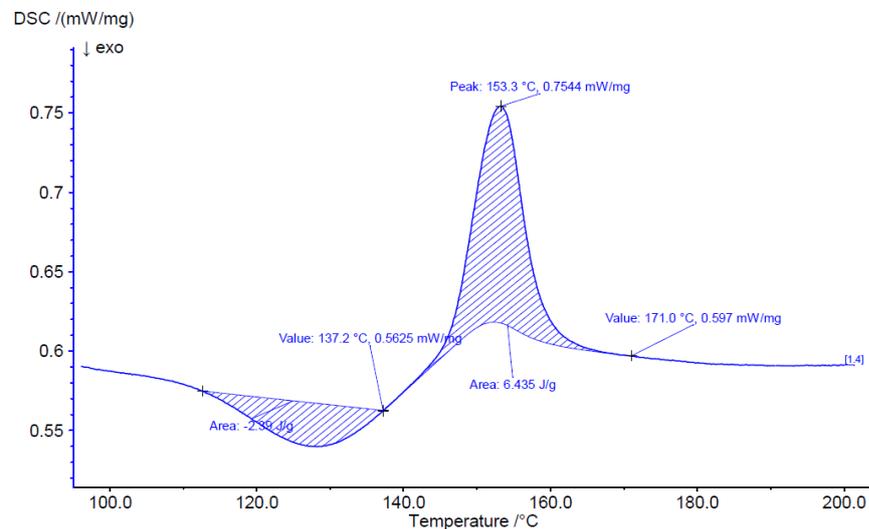
Dónde:

$\Delta H_m$ : Entalpia de fusión del polímero semicristalino (J/g)

$\Delta H_m^o$ : Entalpia de fusión del polímero 100% cristalino (J/g)

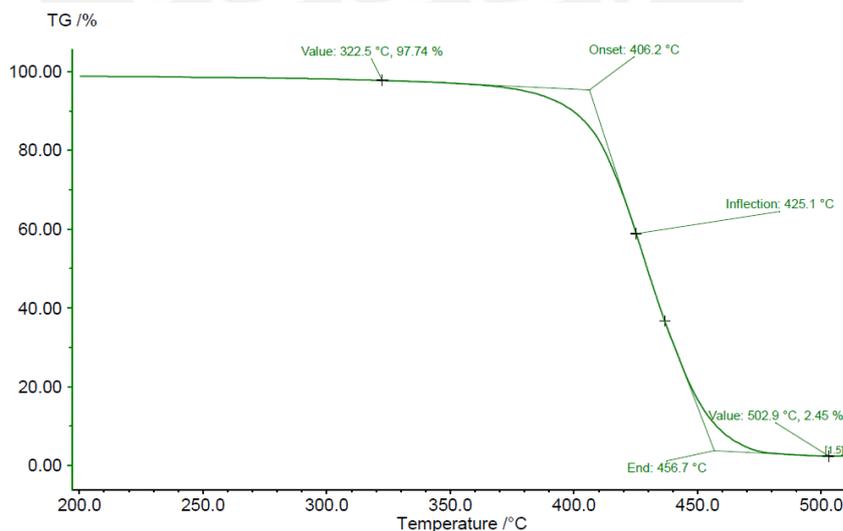
Para el PLA se tiene que  $\Delta H_m^o=93.7$  J/g [Luo, 2014]

Con lo cual la entalpia de fusión del PLA seria  $(6.435-2.39)= 4.045$  J/g ya que no debemos considerar la entalpia producto de la cristalización del polímero, con lo cual el grado de cristalinidad seria de 4.3%.

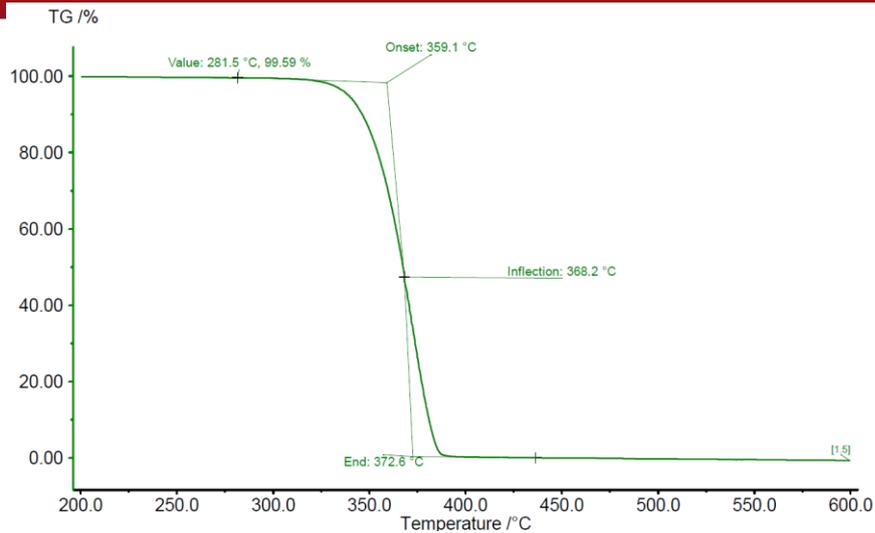


**Figura 83.** Zona ampliada de la curva DSC del PLA en el cual se observa los picos de fusión y cristalización.

De las curvas de TGA mostrados en la **figura 84 y 85**, se tiene que la temperatura de descomposición del PLA fue de alrededor de 280 °C, mientras que para el ABS fue de 320 °C aproximadamente.



**Figura 84.** Curva de TGA para el ABS.



**Figura 85.** Curva de TGA para el PLA

### 3.1.3 Ensayos de tracción de filamentos comerciales de ABS y PLA

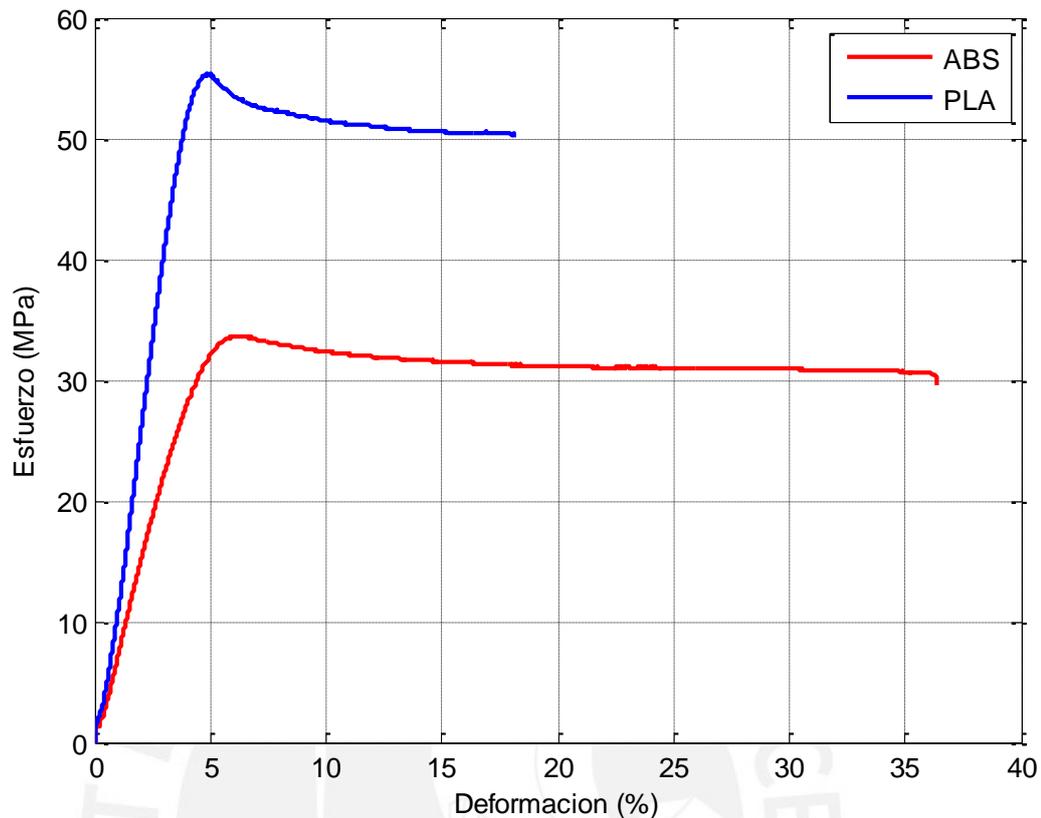
Se realizaron ensayos de tracción para los filamentos comerciales de ABS y PLA con el fin de conocer las propiedades mecánicas de los materiales de partida con los cuales serán impresas distintas probetas bajo distintos parámetros de impresión.

Los resultados muestran que los filamentos comerciales de PLA tienen un módulo elástico de casi el doble que el de los filamentos de ABS, además de presentar una mayor resistencia a la tracción (**Tabla 16**). Sin embargo podemos observar de las curvas esfuerzos-deformación de los ensayos de tracción de probetas representativas mostradas en la **figura 86**, que el PLA tiene una menor elongación a la rotura que el ABS.

**Tabla 16.** Resistencia a la tracción y módulo elástico de filamentos comerciales de ABS y PLA.

Filamento comercial	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Dev. St.	CV (%)	Media	Dev. St.	CV (%)
ABS	34.4	0.5	1.3	761	15	1.9
PLA	55.4	1.0	1.8	1499	28	1.9

Si bien el PLA presenta una mayor resistencia a la tracción y módulo elástico lo cual lo convierten en un tentativo sustituto del ABS, este presenta una baja durabilidad, lo cual es debido a la biodegradabilidad [**Casavola, 2016**].



**Figura 86.** Curvas de esfuerzo vs deformación de probetas representativas de filamentos comerciales de ABS y PLA.

### 3.1.4 Ensayos de tracción de probetas impresas a partir de filamentos comerciales de ABS y PLA bajo distintos valores de los principales parámetros de impresión.

Para el estudio del efecto de los principales parámetros de impresión en las propiedades mecánicas se realizaron ensayos de tracción basándose en la norma ASTM D638, se inició estudiando a la temperatura de impresión tanto para probetas impresas de ABS como de PLA, ambos a partir de los filamentos comerciales anteriormente estudiados y usando los parámetros de impresión mostrados en la **tabla 13**.

De los resultados de los ensayos de tracción de probetas impresas de ABS, se puede observar que a mayor temperatura de impresión se tiene una menor resistencia a la tracción como se puede observar en la **figura 87**. Así como también se puede observar en la **figura 88** la tendencia del módulo elástico con la temperatura de impresión. El mayor valor de la resistencia a la tracción fue de 41.3 MPa conseguido con una temperatura de impresión de 200°C, mientras que el

mayor módulo elástico fue de 2091 MPa para una temperatura de impresión de 230 °C como se pueden ver en la **tabla 17**.

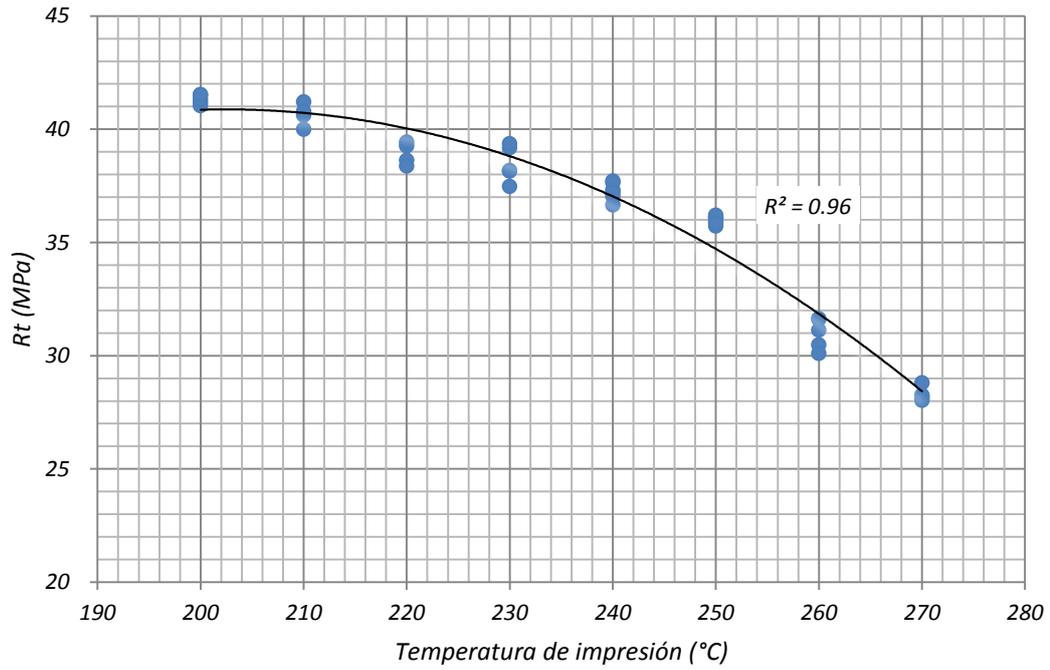
En la **Figura 89** podemos observar la superficie de fracturas de probetas fabricadas con temperatura de impresión de 200°C y 270°C, en el cual se puede ver que para una temperatura de impresión de 200°C se tiene una fractura frágil, mientras que para 270 °C se tuvo una fractura dúctil. Así también se observó en el proceso de impresión 3D, que a menor temperatura de impresión se presentaban dificultades tales como una mayor cantidad de probetas alabeadas, así como una obstrucción frecuente de la boquilla debido a la baja fluidez del ABS. Es así que se eligió como una adecuada temperatura de impresión a 230 °C, el cual permitiera obtener piezas de buenas propiedades mecánicas y de fácil impresión.

**Tabla 17.** Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para probetas impresas de ABS a distintas temperaturas.

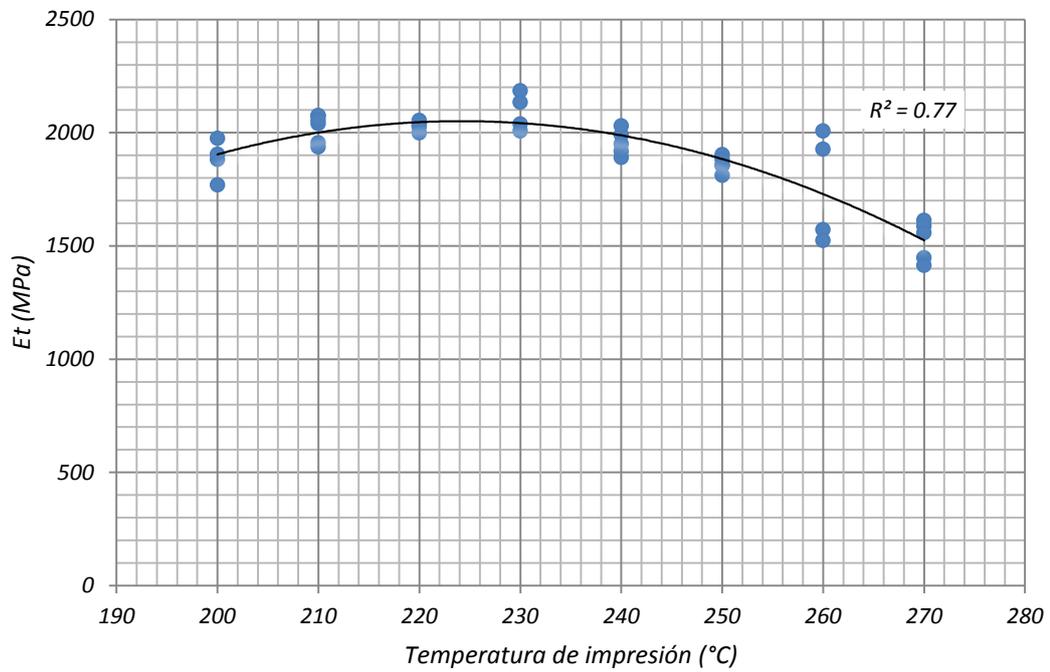
Temperatura (°C)	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Dev. St.	CV (%)	Media	Dev. St.	CV (%)
200	41.3	0.2	0.5	1882	85	4.5
210	40.7	0.5	1.2	2022	62	3.0
220	38.9	0.5	1.3	2027	23	1.1
230	38.5	0.8	2.0	2091	82	3.9
240	37.3	0.4	1.1	1955	56	2.9
250	36.0	0.2	0.5	1861	34	1.8
260	31.0	0.7	2.2	1757	245	14.0
270	28.3	0.3	1.2	1523	88	5.8

**Tabla 18.** Resistencia a la tracción y módulo de elasticidad para probetas impresas de PLA a distintas temperaturas.

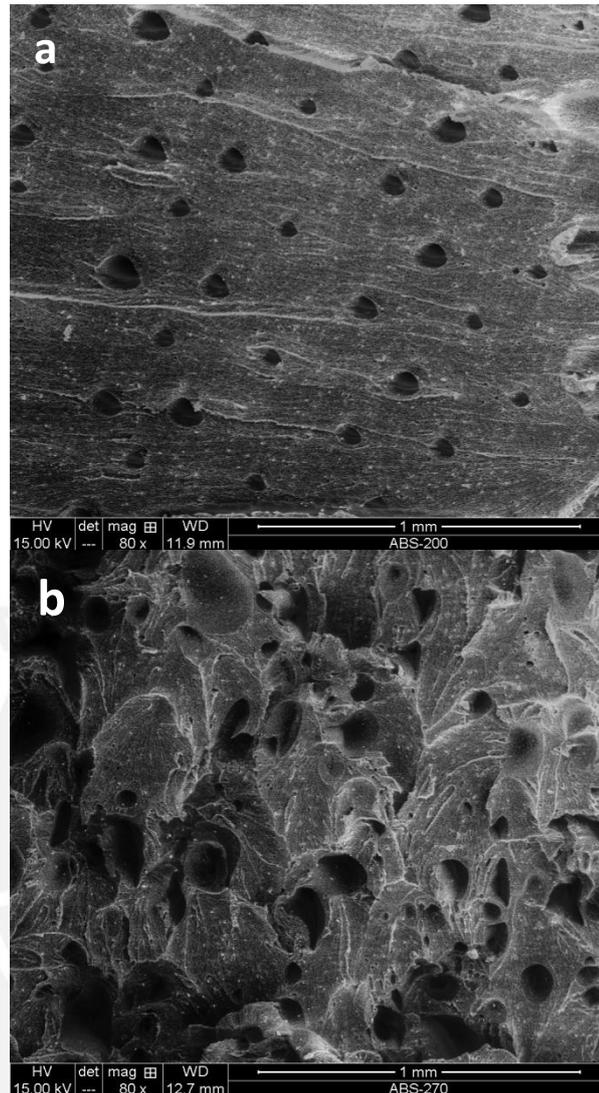
Temperatura (°C)	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Dev. St.	CV (%)	Media	Dev. St.	CV (%)
200	55.8	1.1	2.0	2857	125	4.4
210	55.5	1.5	2.8	3189	163	5.1
220	57.0	1.3	2.2	3286	174	5.3
230	58.8	0.8	1.4	3337	210	6.3
240	59.4	1.0	1.7	3319	60	1.8
250	61.2	0.9	1.5	2905	102	3.5
260	55.0	1.2	2.2	2861	178	6.2
270	52.9	0.9	1.7	2989	44	1.5



**Figura 87.** Resistencia a la tracción de probetas impresas de ABS vs la temperatura de impresión.



**Figura 88.** Módulo de elasticidad de probetas impresas de ABS vs la temperatura de impresión.



**Figura 89.** Micrografías SEM de la superficie de fractura de probetas de tracción impresas de ABS a (a) 200 °C y (b) 270 °C.

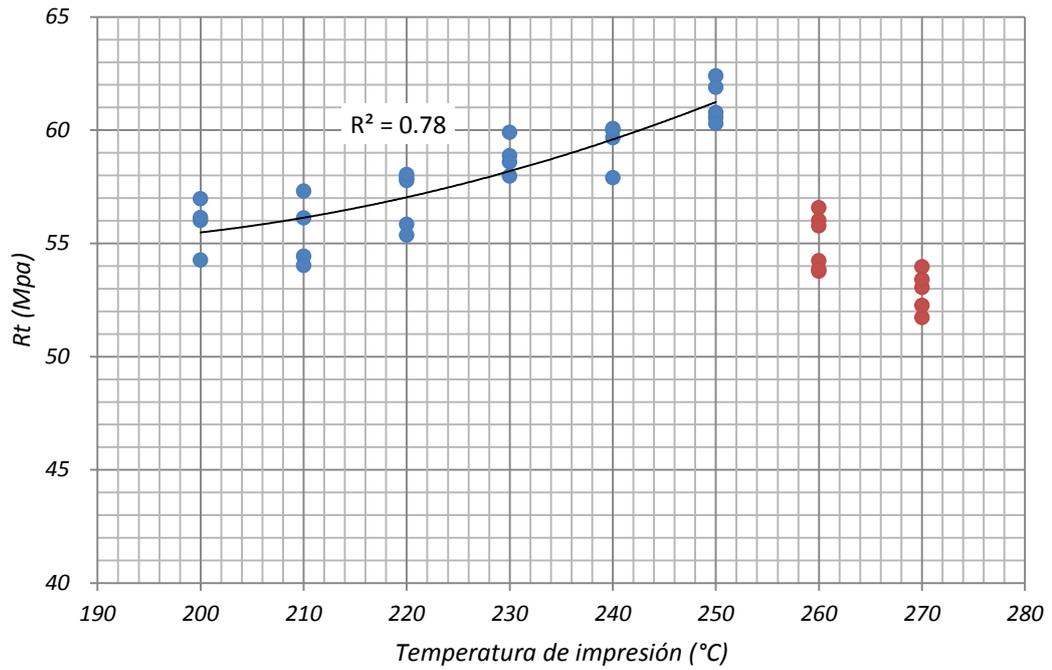
En la **figura 90** podemos observar la tendencia de la resistencia mecánica de probetas impresas de PLA a distintas temperaturas de impresión. Donde se puede ver un crecimiento de la resistencia en el intervalo de 200 °C a 250 °C, mientras que para temperaturas de impresión de 260 y 270°C se ve una caída de la resistencia mecánica. También podemos ver el comportamiento del módulo elástico a distintas temperaturas de impresión de la **figura 91**, mostrando un comportamiento semejante al del ABS, excepto para las temperaturas de 260 °C y 270 °C donde se ve que el módulo elástico no decae.

De los resultados mostrados en la **tabla 18**, se tiene que el mayor valor en la resistencia a la tracción fue de 61.2 MPa correspondiente a una temperatura de impresión de 250°C y que el mayor modulo elástico fue de 3337 MPa para una temperatura de 230 °C. La tendencia del incremento de la resistencia a la tracción a mayor temperatura de impresión también ha sido reportada en probetas de tracción impresas a partir de filamentos comerciales de la marca LulzBot®, donde las temperaturas estudiadas fueron de 190, 200 ,210 y 215°C [**Wittbrodt, 2015**].

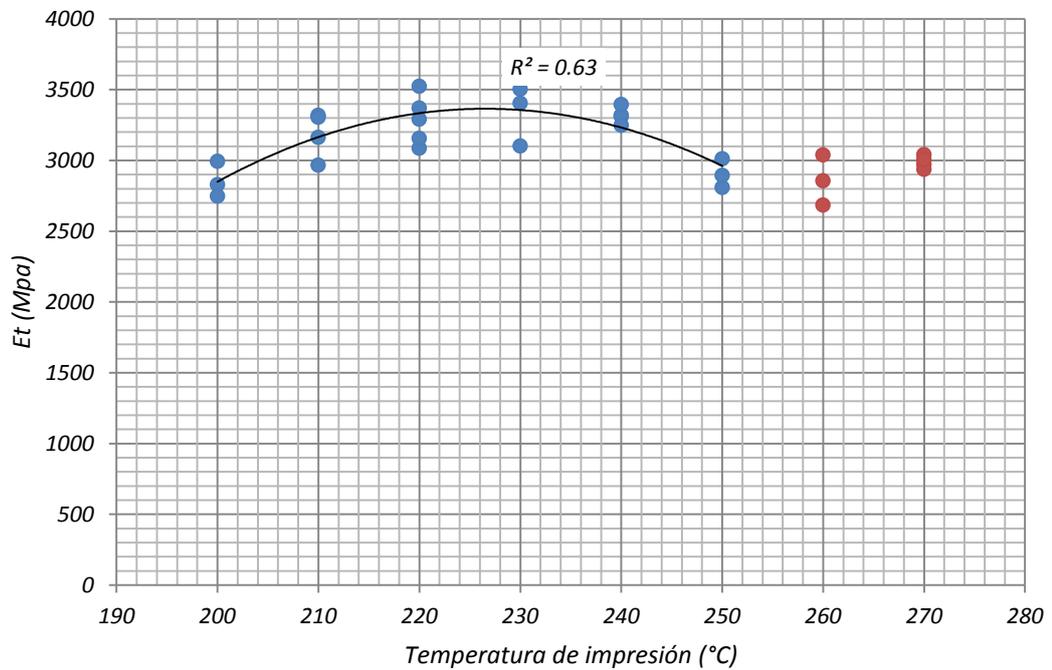
En el presente trabajo, la tendencia de la resistencia a la tracción puede ser explicada si observamos las micrografías SEM de la superficie de fractura de probetas de tracción impresas de PLA, mostradas en la **figura 92**. Donde se puede ver que se tiene una mayor cantidad de poros para las probetas impresas a 200°C, los cuales actuarían como concentradores de esfuerzo explicando así su menor resistencia a la tracción. Para las temperaturas de impresión de 230 y 250°C la cantidad de poros disminuye, esto podría deberse a que a mayor temperatura se tendría una menor viscosidad del filamento fundido lo cual ayudaría a una mejor compactación y union entre las capas depositadas, mientras que para la temperatura de 270 °C la cantidad de poros se incrementa además de sus tamaños con lo cual decaería su resistencia a la tracción.

Si bien se consigue una mayor resistencia a la tracción para temperaturas de impresión de 240 y 250°C, estas presentaron problemas en las probetas obtenidas ya que al trabajar con temperaturas altas se tendría un mayor cambio de temperatura entre el filamento que sale del extrusor y la plataforma de impresión, lo cual podría producir alabeos de la probeta. Así también al ser tan altas las temperaturas de impresión, la viscosidad del filamento fundido de PLA disminuiría, siendo propenso a deformarse con mayor facilidad en el proceso de impresión. Con lo cual se seleccionó a 230°C como una buena temperatura de impresión a donde se tiene buenas propiedades mecánicas y una fácil impresión 3D.

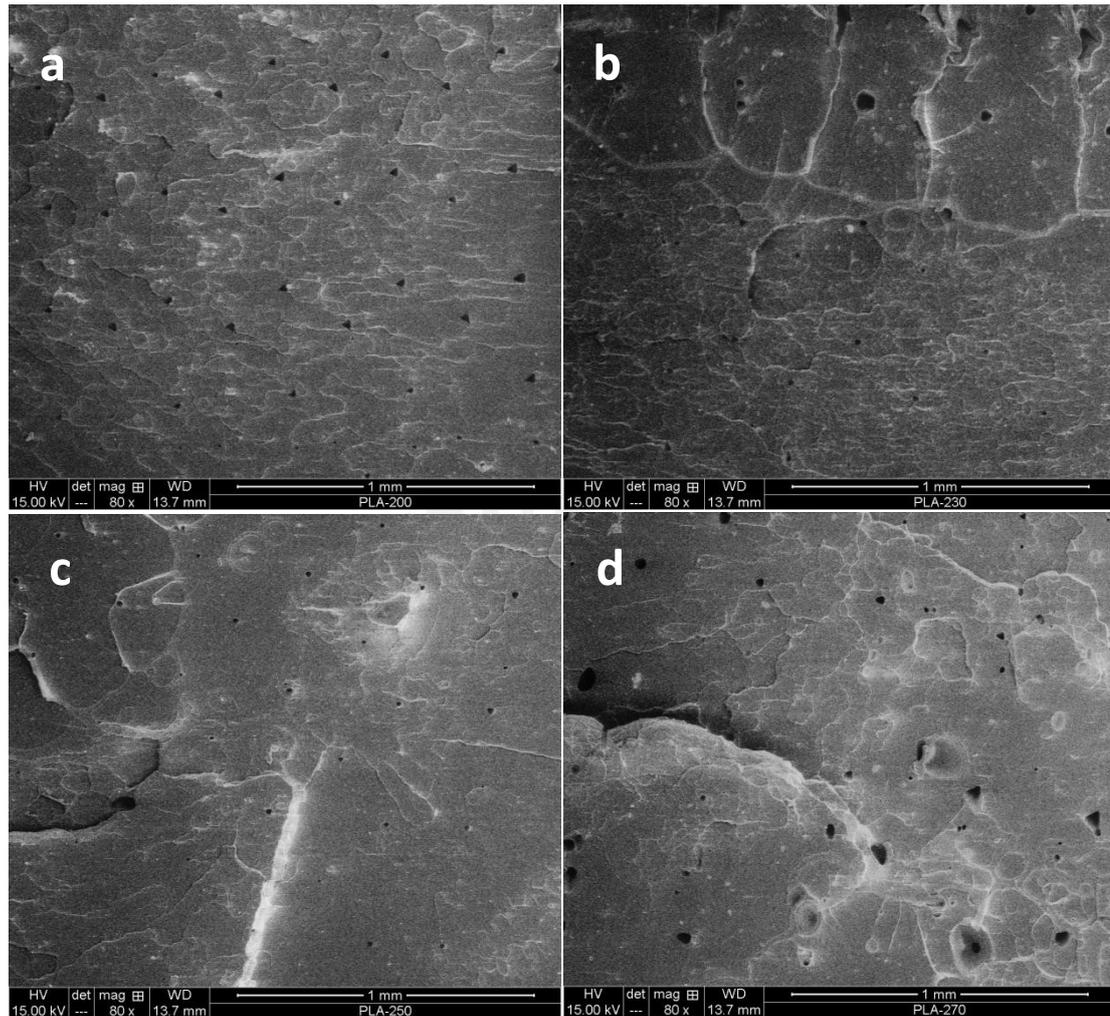
Una vez definida una adecuada temperatura de impresión para el ABS y PLA, se procederá a estudiar el efecto de la altura de capa en las propiedades mecánicas de probetas de tracción impresas usando los parámetros de impresión mostrados en la **tabla 19**, para el cual se estudiaron alturas de capa de 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 y 0.3mm para el ABS y PLA.



**Figura 90.** Resistencia a la tracción de probetas impresas de PLA vs la temperatura de impresión.



**Figura 91.** Módulo de elasticidad de probetas impresas de PLA vs la temperatura de impresión.



**Figura 92.** Micrografías SEM de la superficie de fractura de probetas de tracción impresas de PLA a (a) 200 °C, (b) 230 °C, (c) 250 °C y (d) 270 °C.

Tanto para el ABS como para el PLA se tiene que a menor altura de capa se consigue una mayor resistencia a la tracción como se muestra en la **figura 93** y **figura 94**, lo cual resulta lógico, ya que se tendría una mayor compactación en las probetas impresas. Sin embargo una disminución de la altura de capa implicaría un mayor tiempo en el proceso de impresión como se puede observar en la **tabla 20**.

Así también podemos observar un mayor crecimiento en la resistencia mecánica para el ABS que para el PLA cuando se disminuye la altura de capa de 0.3 a 0.1mm como se puede observar de la **tabla 21** y **tabla 22**, teniendo un incremento de 16.5 MPa para el ABS y de 4.3 MPa para el PLA, lo cual indicaría que la altura de capa influye más en las propiedades mecánicas de probetas impresas de ABS que en las PLA. Esto podría deberse a que el PLA posee un mayor índice de fluidez, con lo cual se produciría un buen sinterizado entre las capas depositadas, por

consiguiendo una reducción en la altura de capa no implicaría un gran incremento en la resistencia mecánica.

De la **figura 95** podemos observar que el módulo elástico de probetas de tracción impresas de ABS se incrementa a menor altura de capa, teniendo como máximo valor a 2203 MPa correspondiente a una altura de capa de 0.1mm, y como mínimo valor a 1376 MPa para un altura de capa de 0.3mm. Así también para el PLA se puede ver de la **figura 96** que también se tiene una mayor resistencia mecánica para menores valores de altura de capa, sin embargo este crecimiento no es tan notorio como en el caso de las probetas impresas de ABS, ya que solo se consiguió un incremento de 352 MPa para el PLA, mientras que para el ABS se tuvo un incremento de 827 MPa, al pasar de una altura de capa de 0.3 a 0.1mm.

De todos los resultados observados anteriormente se seleccionó una altura de capa de 0.2mm con el cual se tenga piezas impresas de intermedias propiedades mecánicas y de fácil impresión, tanto para el ABS como el PLA, ya que si bien es cierto que las mejores propiedades mecánicas se consiguen con una altura de capa de 0.1mm, esta implicaría un mayor tiempo en el proceso de impresión.

**Tabla 19.** *Parámetros de impresión para probetas de tracción de ABS y PLA impresas con diferentes valores de altura de capa.*

Parámetro	Valor
Relleno, %	100
Temperatura de impresión, °C	230
Numero de contornos	1
Velocidad de impresión, mm/min	6600
Diámetro de filamento, mm	1.75
Diámetro de la boquilla, mm	0.4
Angulo de impresión	0°

**Tabla 20.** Tiempo del proceso de impresión para probetas de tracción de ABS y PLA impresas con distintas alturas de capa.

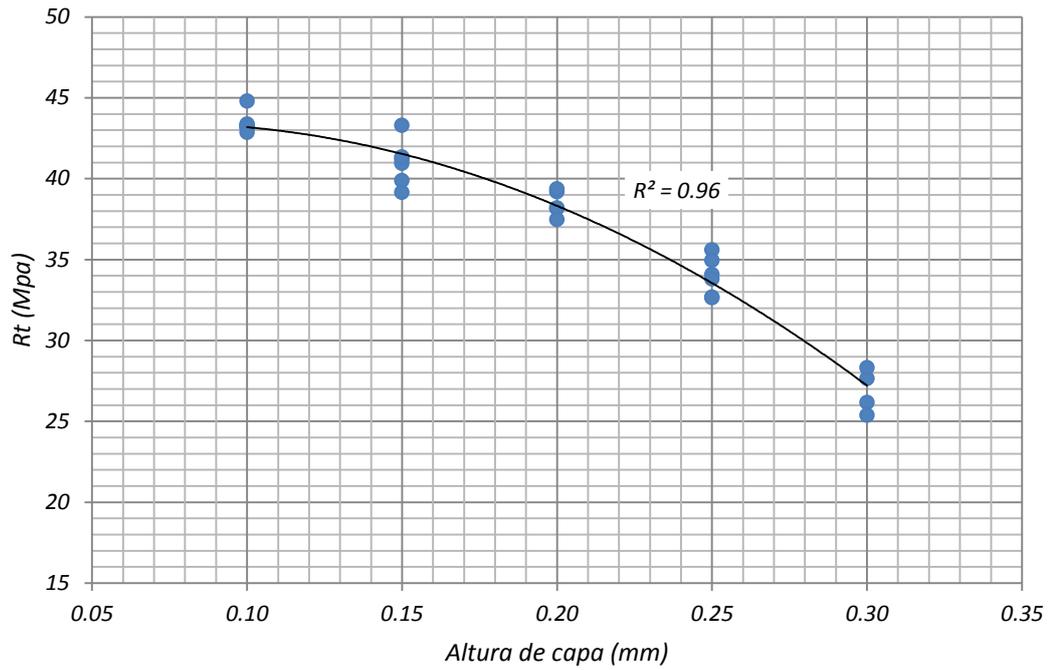
Material	Altura de capa (mm)	Tiempo de impresión (min)
ABS	0.30	9.9
	0.25	10.7
	0.20	11.5
	0.15	13.5
	0.10	15.6
PLA	0.30	12.9
	0.25	13.7
	0.20	14.5
	0.15	16.5
	0.10	18.6

**Tabla 21.** Resistencia a la tracción y modulo elástico de probetas de ABS impresas con distintas alturas de capa.

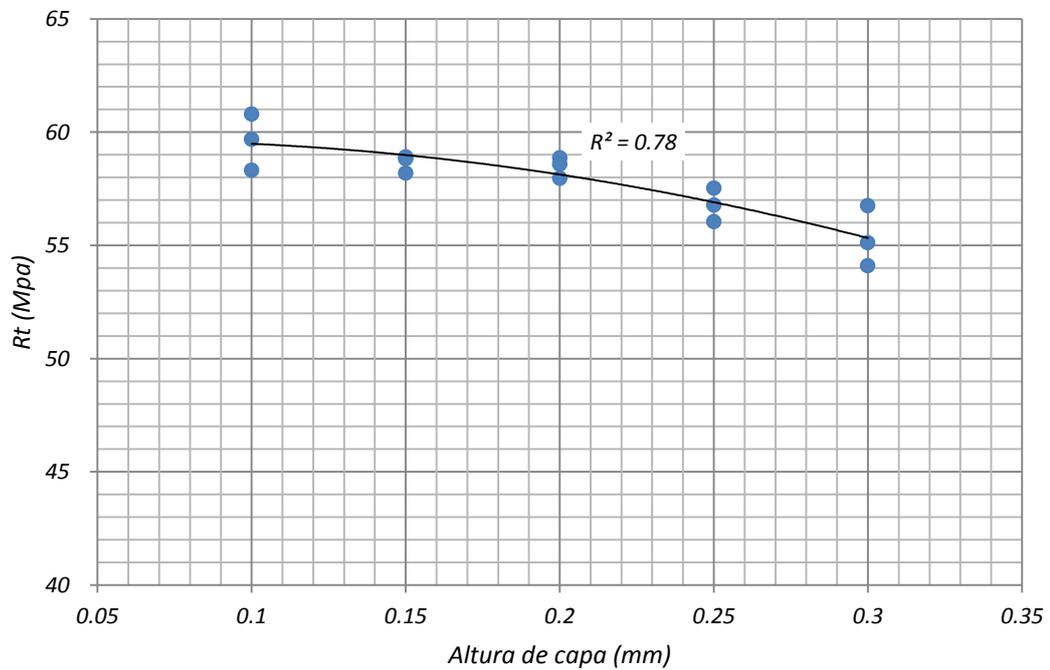
Altura de capa (mm)	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Dev. St.	CV (%)	Media	Dev. St.	CV (%)
0.30	26.9	1.3	5.0	1376	112	8.2
0.25	34.0	1.2	3.5	1597	48	3.0
0.20	38.5	0.8	2.0	2025	88	4.3
0.15	41.0	1.4	3.5	2077	65	3.1
0.10	43.4	0.7	1.6	2203	155	7.0

**Tabla 22.** Resistencia a la tracción y modulo elástico de probetas de PLA impresas con distintas alturas de capa.

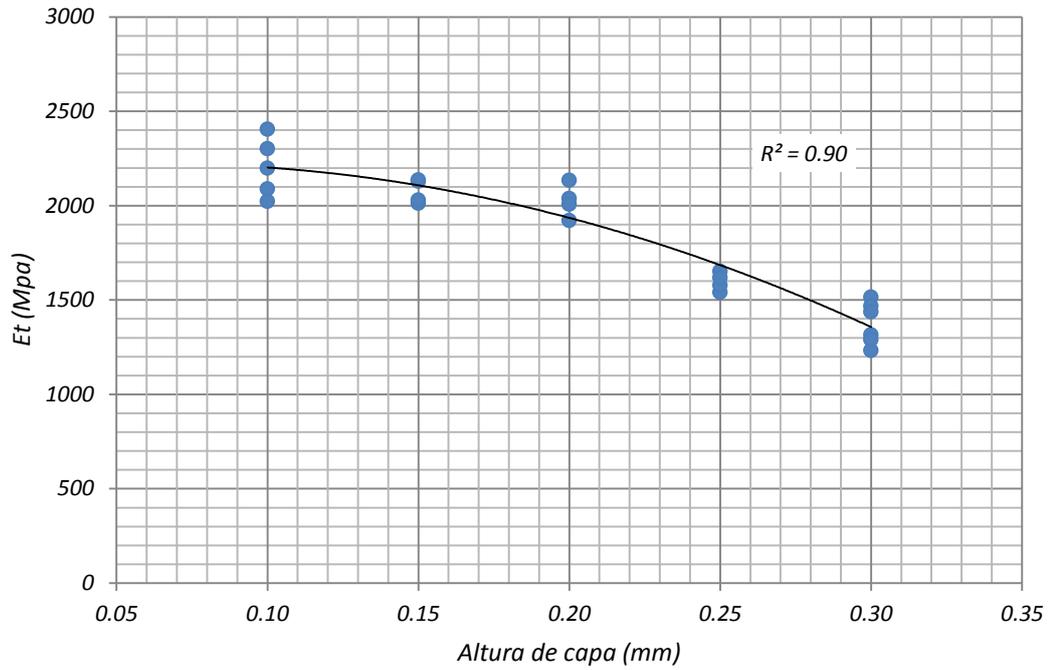
Altura de capa (mm)	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Dev. St.	CV (%)	Media	Dev. St.	CV (%)
0.30	55.3	1.3	2.4	3044	41	1.4
0.25	56.8	0.7	1.3	3112	179	5.7
0.20	58.5	0.5	0.8	3200	323	10.1
0.15	58.6	0.4	0.7	3215	82	2.6
0.10	59.6	1.2	2.1	3396	330	9.7



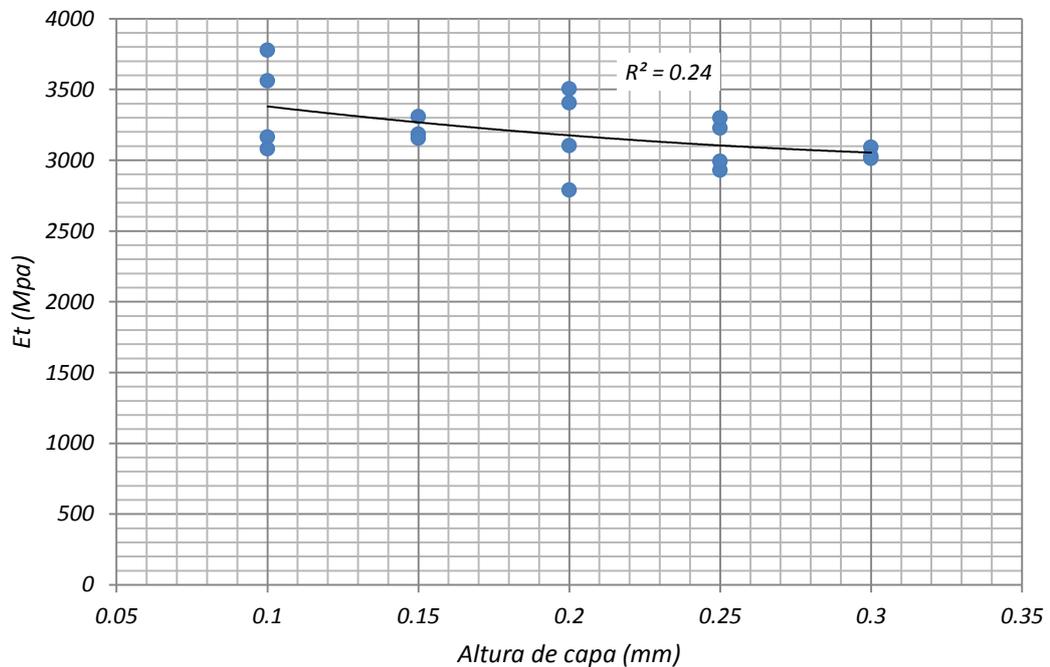
**Figura 93.** Resistencia a la tracción de probetas impresas de ABS vs la altura de capa depositada en el proceso de impresión.



**Figura 94.** Resistencia a la tracción de probetas impresas de PLA vs la altura de capa depositada en el proceso de impresión.



**Figura 95.** Módulo de elasticidad de probetas impresas de ABS vs la altura de capa depositada en el proceso de impresión.



**Figura 96.** Módulo de elasticidad de probetas impresas de PLA vs la altura de capa depositada en el proceso de impresión.

Con la temperatura de impresión y la altura de capa ya seleccionadas, se procedió a estudiar el efecto del ángulo de impresión en las propiedades mecánicas de probetas de tracción impresas de ABS y PLA bajo los parámetros de impresión mostrados en la **tabla 23**. El ángulo de impresión se mide tomando como referencia la dirección de la carga aplicada en el ensayo de tracción.

**Tabla 23.** *Parámetros de impresión para probetas de tracción de ABS y PLA impresas con diferentes valores de ángulo de impresión.*

Parámetro	Valor
Relleno,%	100
Temperatura de impresión, °C	230
Altura de capa, mm	0.2
Numero de contornos	1
Velocidad de impresión, mm/min	6600
Diámetro de filamento, mm	1.75
Diámetro de la boquilla, mm	0.4

De la **figura 97** y **figura 99** podemos observar que la resistencia a la tracción más alta de probetas de tracción de ABS y PLA se consigue con un ángulo de impresión de  $[0^\circ]$ , ya que los filamentos depositados en el proceso de impresión están orientados en la dirección de la carga. Mientras que para un ángulo de impresión de  $[90^\circ]$  se tiene la más baja resistencia a la tracción, ya que es la unión entre filamentos, y no los mismos filamentos depositados, los que son sometidos a la carga de tracción. En contraste con lo encontrado en el presente trabajo, se han reportado que con un ángulo de impresión de  $0^\circ$  en probetas de ABS se tienen la mayor resistencia a la tracción e incluso es adecuado para tener valores máximos de resistencia a la flexión [Ahn, 2002; Vega, 2011].

Las probetas de tracción tanto de ABS y PLA con un ángulo de impresión de  $[45^\circ]$  muestran valores intermedios de resistencia a la tracción entre las impresas con  $[0^\circ]$  y  $[90^\circ]$ , el cual muestra que mientras se va incrementando el ángulo de impresión en el rango de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  la resistencia tenderá a disminuir. También se estudiaron ángulos de impresión de  $[0^\circ/90^\circ]$ , el cual consiste de capas impresas a  $0^\circ$  seguidas de capas de  $90^\circ$ , así sucesivamente hasta completar todo el espesor. Además se estudió el ángulo de impresión de  $[-45^\circ/45^\circ]$  el cual es un ángulo de impresión

[0°/90°] rotado -45°. De los resultados mostrados en la **tabla 24** y **tabla 25** se tiene que el ángulo de impresión [-45°/-45°] presenta una mayor resistencia que el ángulo [0/90] tanto para probetas impresas de ABS y PLA.

**Tabla 24.** Resistencia a la tracción y modulo elástico de probetas de ABS con distintos ángulos de impresión.

Angulo de impresión (°)	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Dev. St.	CV (%)	Media	Dev. St.	CV (%)
[ 0°]	39.1	1.1	2.8	2091	82	3.9
[ 45°]	31.7	0.6	2.0	1735	96	5.5
[ 90°]	30.0	0.8	2.6	1752	46	2.6
[ 0°/90°]	32.3	0.9	2.7	1951	75	3.9
[-45°/45°]	34.0	0.7	2.1	1857	97	5.2
[ 0°/45°/90°]	34.5	0.4	1.2	1985	143	7.2
[ 0°/45°/90°/135°]	34.0	0.2	0.7	1869	114	6.1

**Tabla 25.** Resistencia a la tracción y modulo elástico de probetas de PLA con distintos ángulos de impresión.

Angulo de impresión (°)	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Dev. St.	CV (%)	Media	Dev. St.	CV (%)
[ 0°]	59.6	1.2	1.9	3337	210	6.3
[ 45°]	57.1	0.5	0.9	3091	156	5.0
[ 90°]	53.5	0.7	1.3	2963	200	6.8
[ 0°/90°]	55.7	0.7	1.2	3028	166	5.5
[-45°/45°]	56.4	1.2	2.2	3139	117	3.7
[ 0°/45°/90°]	57.8	2.1	3.7	3045	222	7.3
[ 0°/45°/90°/135°]	55.1	1.3	2.3	3083	290	9.4

Como sabemos uno de los problemas que presentan las piezas impresas por FDM es la anisotropía de las propiedades mecánicas, es por esta razón que también se estudiaron probetas con ángulos de impresión de [0°/45°/90°] y [0°/45°/90°/135°], ya que si se desean imprimir piezas funcionales, se debe tener en cuenta que estas serán sometidas a cargas en distintas direcciones. De los resultados mostrados se tiene que tanto para el ABS y PLA el ángulo [0/45/90] ofrece una mayor resistencia a la tracción que el ángulo [0/45/90/135], lo cual se debe a que este posee una mayor cantidad de capas con ángulo de 0°.

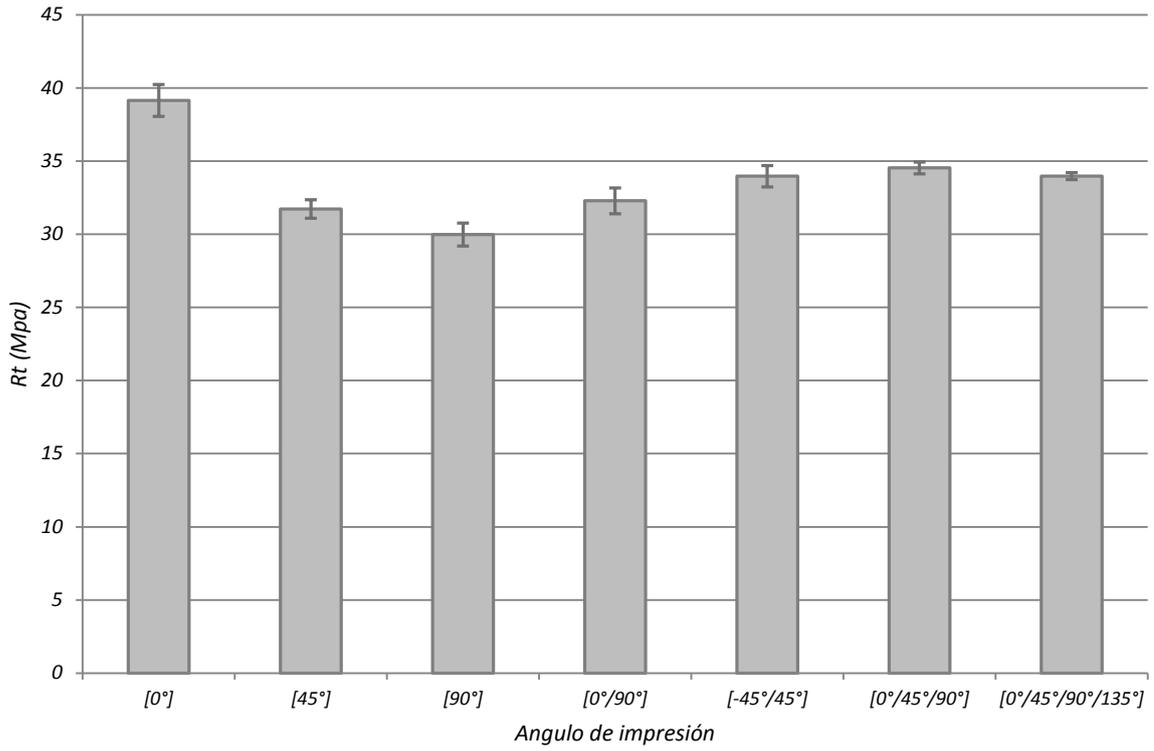
Al igual que con la resistencia a la tracción, se puede observar de la **figura 98** y **figura 100**, que se tiene un mayor módulo de elasticidad para probetas con un ángulo de impresión de  $[0^\circ]$ , y menor módulo de elasticidad para un ángulo de impresión de  $[90^\circ]$  tanto para ABS y PLA.

Si bien el ángulo de impresión de  $[0^\circ]$  nos ofrece la mayor resistencia a la tracción, esta no siempre es recomendable si se quiere imprimir un componente funcional. Es por ello que se debería requerir de un ángulo de impresión que permita tener simetría en las propiedades mecánicas y así tener una menor anisotropía, dichos candidatos podrían ser  $[0^\circ/90^\circ]$ ,  $[-45^\circ/45^\circ]$  y  $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/135^\circ]$ , de los cuales el ángulo de  $[-45^\circ/45^\circ]$  ofrece una mayor resistencia a la tracción para el ABS y PLA. Por lo tanto este será el ángulo seleccionado para poder imprimir las probetas de tracción e impacto de material compuesto.

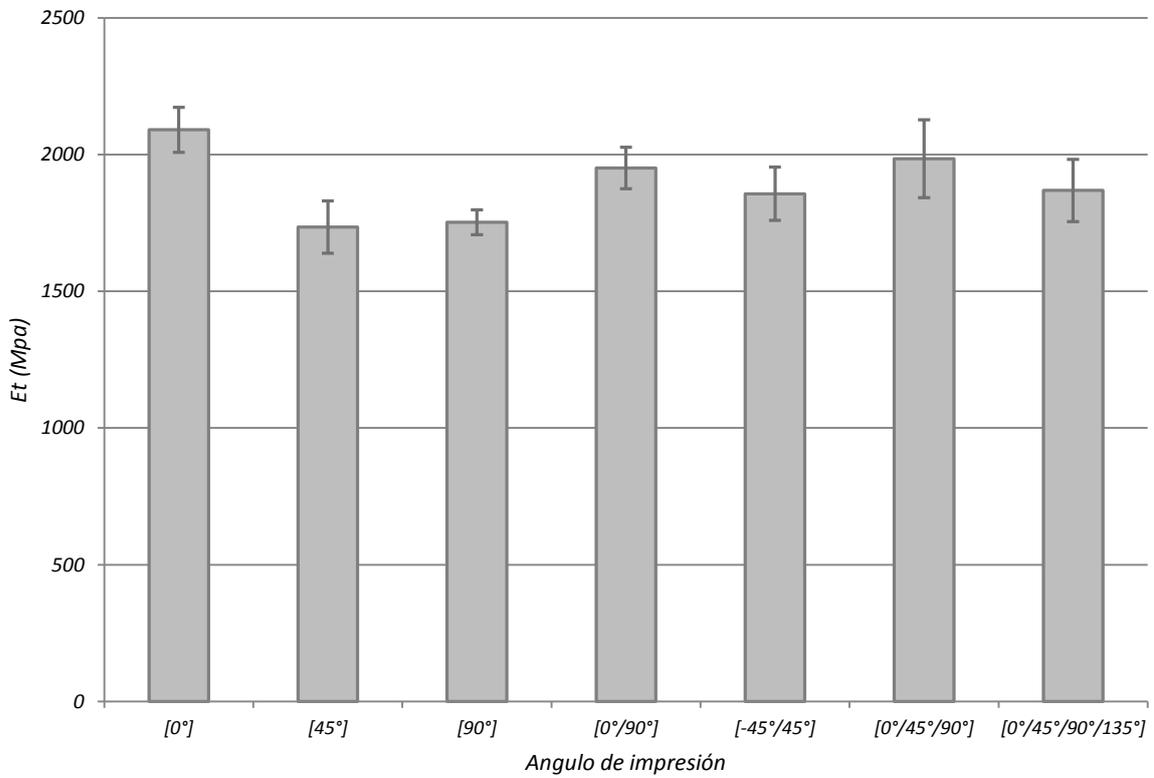
En resumen podemos observar de la **tabla 26** el incremento de la resistencia a la tracción y el modulo elástico al variar los principales parámetros de impresión. Donde el ABS logra un mayor incremento tanto en la resistencia a la tracción como en modulo elástico al reducir su altura de capa de 0.3mm a 0.1mm. Para el caso del PLA se tiene un mayor incremento en la resistencia a la tracción y modulo elástico al cambiar el ángulo de impresión de  $[90^\circ]$  a  $[0^\circ]$ . Observando de manera general que se tiene un mayor incremento en las propiedades mecánicas del ABS que el PLA, al variar los parámetros de impresión.

**Tabla 26.** Incremento en la resistencia a la tracción y modulo elástico conseguidos al variar los principales parámetros de impresión 3D.

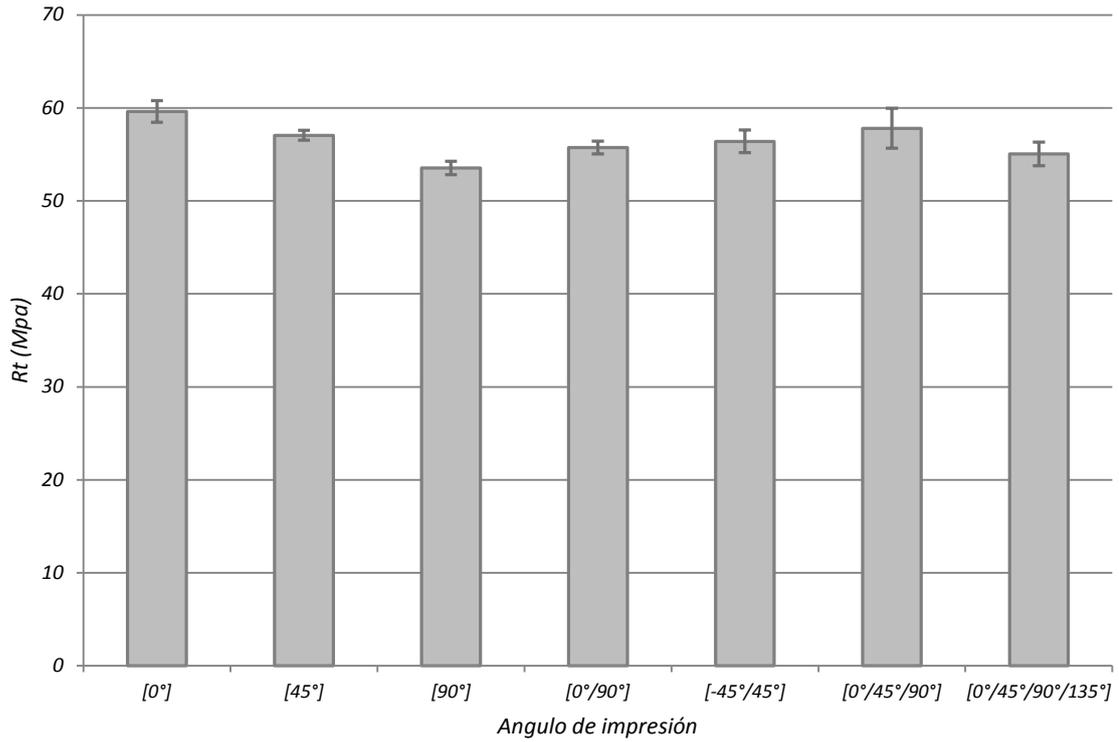
Material	Parámetro	Valor inicial	Valor final	Incremento de la Resistencia a la tracción (MPa)	Incremento del módulo de elasticidad (MPa)
ABS	Temperatura de impresión ( $^\circ\text{C}$ )	270	200	13.0	359.0
	Altura de capa (mm)	0.3	0.1	16.5	827.0
	Angulo de impresión	$[90^\circ]$	$[0^\circ]$	9.1	339.0
PLA	Temperatura de impresión ( $^\circ\text{C}$ )	200	250	5.4	48.0
	Altura de capa (mm)	0.3	0.1	4.3	352.0
	Angulo de impresión	$[90^\circ]$	$[0^\circ]$	6.1	374.0



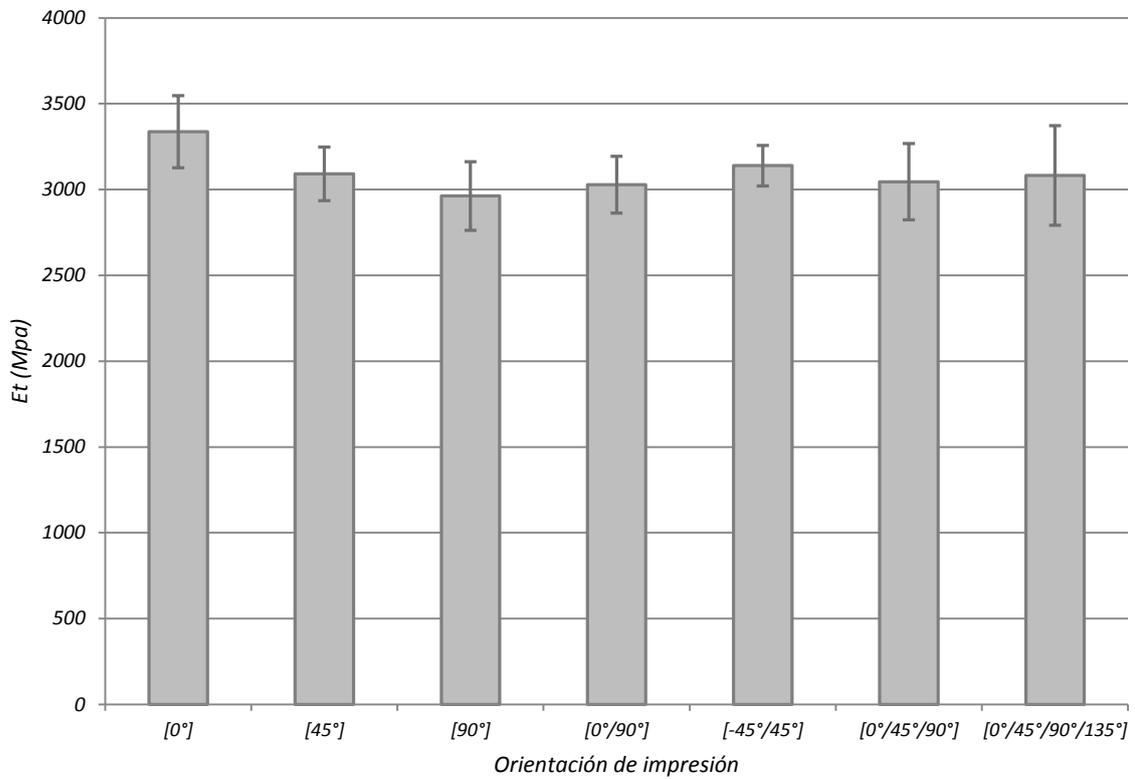
**Figura 97.** Resistencia a la tracción de probetas de ABS con distintos ángulos de impresión.



**Figura 98.** Módulo de elasticidad de probetas de ABS con distintos ángulos de impresión.



**Figura 99.** Resistencia a la tracción de probetas de PLA con distintos ángulos de impresión.

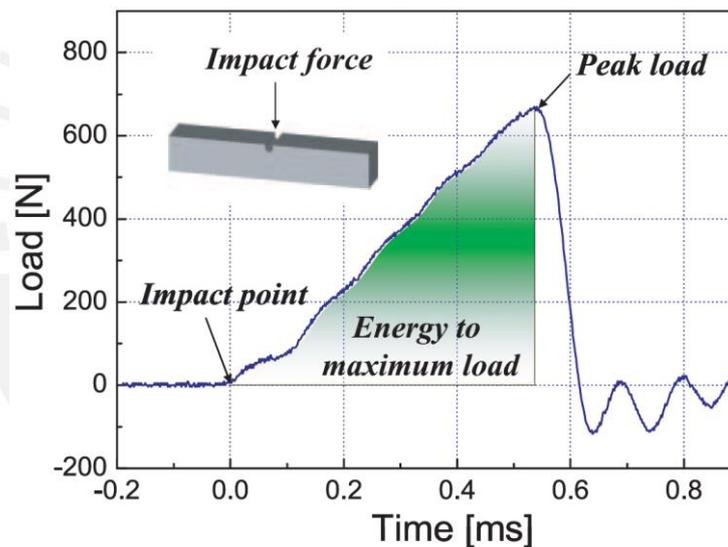


**Figura 100.** Módulo de elasticidad de probetas de PLA con distintos ángulos de impresión.

### 3.1.5 Ensayos de impacto de probetas impresas a partir de filamentos comerciales de ABS y PLA con distintos ángulos de impresión.

En esta parte se estudiara como influye el ángulo de impresión sobre la resistencia al impacto de probetas impresas a partir de filamentos comerciales de ABS y PLA. Para ello se usó los mismos parámetros indicados en la **tabla 23**.

Para la realización de los ensayos de impacto charpy se usó un péndulo el cual posee un piezoeléctrico que registra la fuerza con la que esta venia impactando a la probeta durante el tiempo de impacto, registrando así una curva similar a la de la **figura 101**, así el área bajo la curva indica la capacidad de absorber la energía de impacto. La energía hasta el punto de la fuerza máxima es considerada la resistencia al impacto en algunos trabajos de investigación [Kim, 2007], lo cual también será adoptada en el presente trabajo.



**Figura 101.** Variación de la fuerza en un ensayo de impacto [Kim. 2007].

De la **figura 97** se puede ver claramente que la mayor resistencia al impacto de probetas de ABS se consigue con un ángulo de impresión de  $[0^\circ]$ , llegando a tener un valor de  $11.44 \text{ kJ/m}^2$  como se puede ver en la **tabla 27**, mientras que para los otros ángulos de impresión los valores de la resistencia al impacto están entre  $3.64 \text{ kJ/m}^2$  y  $4.04 \text{ kJ/m}^2$ . Es así que con un ángulo de impresión de  $[0^\circ]$  se tiene los más altos valores de la resistencia a la tracción, modulo elástico y resistencia al impacto para probetas impresas de ABS. Así también se puede observar una menor dispersión en los valores de la resistencia al impacto para un ángulo de impresión de  $[0^\circ]$ , y una mayor dispersión para  $[90^\circ]$ .

Para el caso de las probetas de PLA se tiene una mayor resistencia al impacto para un ángulo de impresión de  $[-45^{\circ}/45^{\circ}]$  como se puede observar en la **figura 103**, y una menor resistencia al impacto para el ángulo de  $[45^{\circ}]$ , siendo estos valores de resistencia al impacto de  $2.6 \text{ kJ/m}^2$  y  $1.97 \text{ kJ/m}^2$  como se puede observar en la **tabla 28**, así también se puede ver que los valores de la resistencia al impacto de las probetas de PLA presentan una mayor dispersión que la del ABS.

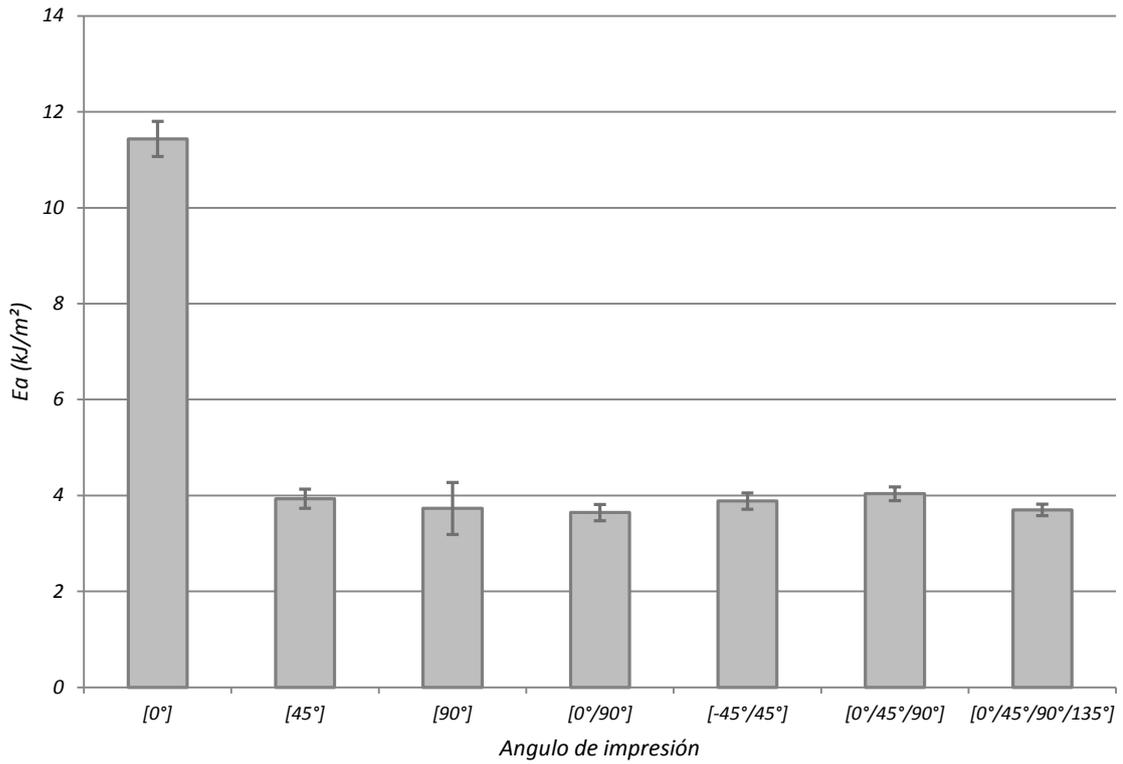
También podemos observar que la resistencia al impacto de probetas de ABS impresas con un ángulo de  $[0^{\circ}]$ , es aproximadamente el triple de la resistencia al impacto de las probetas de ABS impresas con los otros ángulos estudiados en el presente trabajo. Si bien el PLA posee una mayor resistencia a la tracción y módulo elástico que el ABS, este posee una menor resistencia al impacto como se puede observar de los resultados obtenidos.

**Tabla 27.** Resistencia al impacto de probetas de ABS con distintos ángulos de impresión.

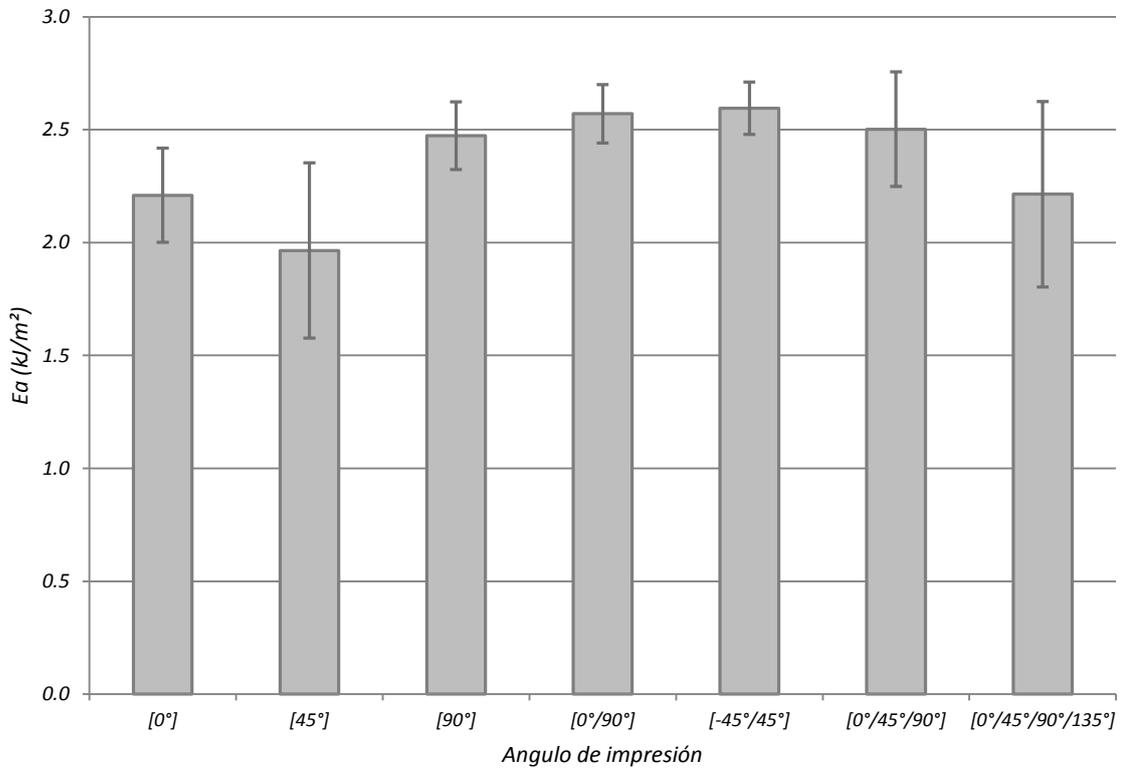
Angulo de impresión (°)	Resistencia al impacto (kJ/m <sup>2</sup> )		
	Media	Dev. St.	CV (%)
$[0^{\circ}]$	11.44	0.37	3.2
$[45^{\circ}]$	3.93	0.20	5.0
$[90^{\circ}]$	3.73	0.54	14.5
$[0^{\circ}/90^{\circ}]$	3.64	0.17	4.7
$[45^{\circ}/-45^{\circ}]$	3.88	0.17	4.4
$[0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}]$	4.04	0.14	3.5
$[0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/135^{\circ}]$	3.70	0.12	3.3

**Tabla 28.** Resistencia al impacto de probetas de PLA con distintos ángulos de impresión.

Angulo de impresión (°)	Resistencia al impacto (kJ/m <sup>2</sup> )		
	Media	Dev. St.	CV (%)
$[0^{\circ}]$	2.21	0.21	9.4
$[45^{\circ}]$	1.97	0.39	19.7
$[90^{\circ}]$	2.47	0.15	6.1
$[0^{\circ}/90^{\circ}]$	2.57	0.13	5.0
$[45^{\circ}/-45^{\circ}]$	2.60	0.12	4.5
$[0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}]$	2.50	0.25	10.2
$[0^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/135^{\circ}]$	2.21	0.41	18.5



**Figura 102.** Resistencia al impacto de probetas de ABS con distintos ángulos de impresión.



**Figura 103.** Resistencia al impacto de probetas de PLA con distintos ángulos de impresión.

### 3.1.6 Ensayos de tracción e impacto para probetas impresas de material compuesto

En base al estudio previo realizado, se usaron los parámetros observados en la **tabla 29** para la impresión de probetas de tracción a partir de filamentos de material compuestos obtenidos por extrusión de doble tornillo.

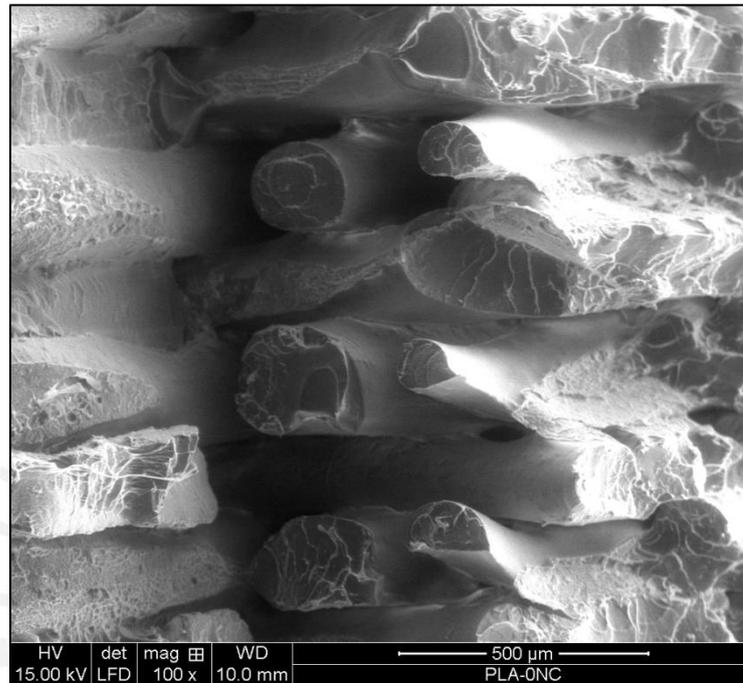
En la **figura 104** podemos observar una micrografía SEM de la zona de fractura de una probeta de tracción de solo PLA, donde se puede ver cómo están orientados los filamentos depositados en cada capa, así también como estos se han fracturado por la carga del ensayo de tracción. Así también podemos observar en la **figura 105** una muestra de la nanoarcilla Nanomer® I.31PS a una magnificación de 400, donde se puede observar los aglomerados de nanoarcilla.

**Tabla 29.** *Parámetros de impresión para probetas de tracción e impacto impresos a partir de filamentos de material compuesto.*

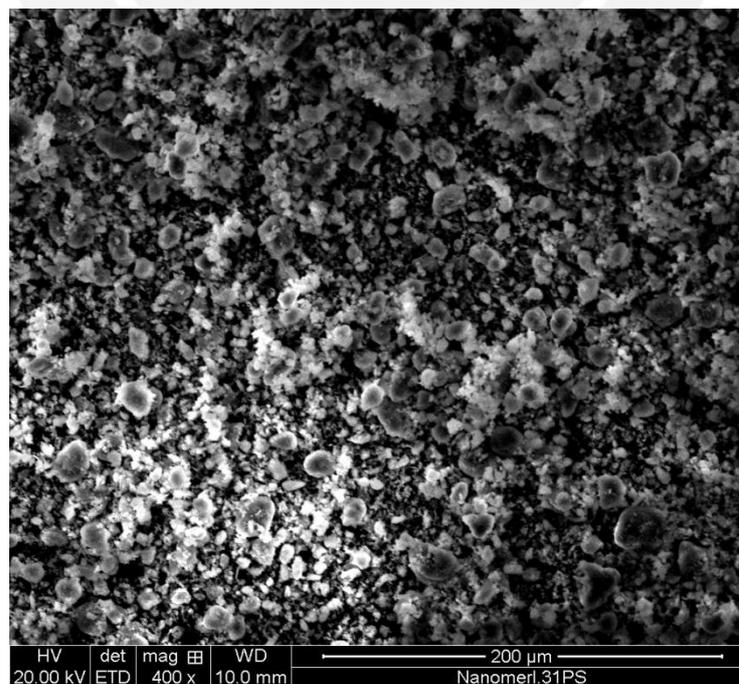
Parámetro	Valor
Relleno, %	100
Temperatura de impresión, °C	230
Altura de capa, mm	0.2
Angulo de impresión	[-45/45]
Numero de contornos	1
Velocidad de impresión, mm/min	6600
Diámetro de filamento, mm	1.75
Diámetro de la boquilla, mm	0.4

De los ensayos de tracción realizados se tiene que se logró incrementar la resistencia a la tracción al introducir nanoarcillas en el ABS como se puede observar en la **figura 106**. Teniendo un mayor incremento de la resistencia a la tracción para un contenido de 2% de nanoarcillas, logrando así incrementar la resistencia a la tracción de 32.4 MPa para la matriz pura a 36.96MPa para el material compuesto con 2% de nanoarcillas (ver **tabla 30**). También se logró incrementar el módulo de elasticidad (ver **figura 107**), teniendo el mayor incremento para un contenido de 1% de nanoarcillas, mientras que para un contenido de 2% el modulo elástico disminuyo respecto a la matriz pura. También se puede observar

que la resistencia a la tracción de probetas de ABS con 3% de nanoarcillas disminuye, sin embargo este continúa siendo mayor que la del ABS puro. Otros trabajos de investigación también han encontrado que con un 2% de nanoarcillas en una matriz de ABS se consigue el mayor incremento en la resistencia a la tracción [Shishavan, 2014].



**Figura 104.** Micrografía SEM de la superficie de fractura de una probeta de tracción de PLA.



**Figura 105.** Micrografía SEM de una muestra de nanoarcillas Nanomer® I.31PS.

**Tabla 30.** Resistencia a la tracción y modulo elástico de probetas impresas de ABS con distintos contenidos de nanoarcillas.

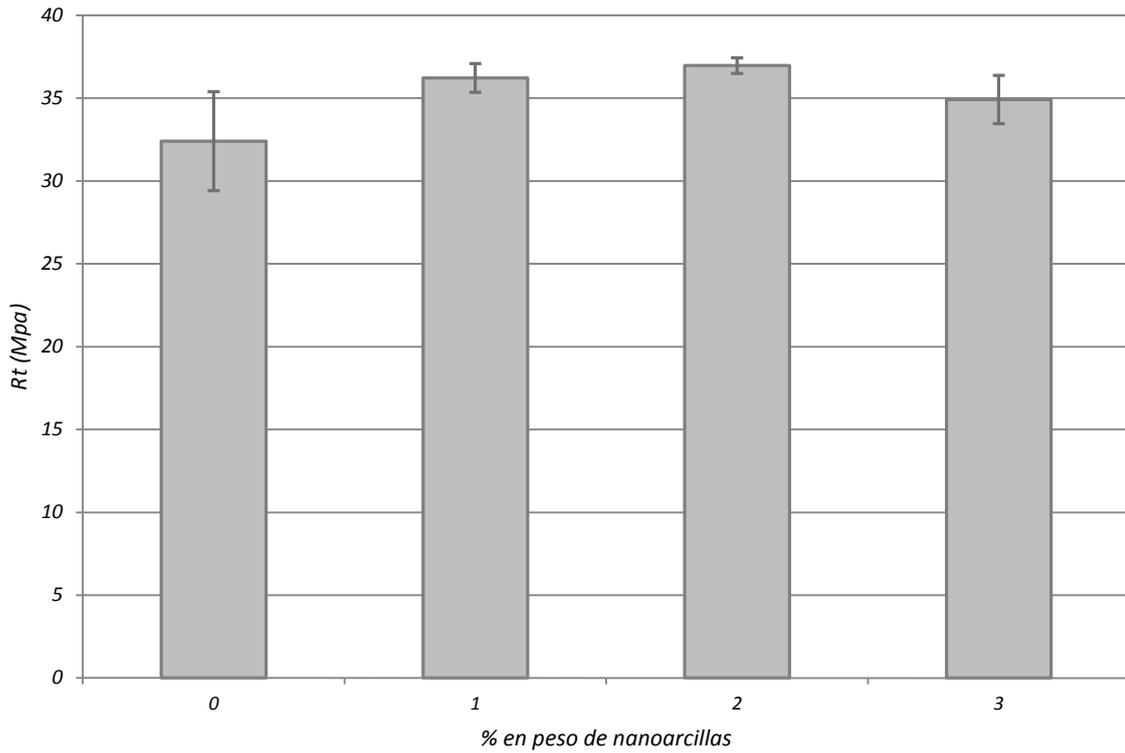
% en peso de nanoarcillas	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Dev. St.	CV (%)	Media	Dev. St.	CV (%)
0	32.40	2.99	9.2	1767	156	8.8
1	36.21	0.87	2.4	1891	88	4.7
2	36.96	0.47	1.3	1675	48	2.8
3	34.92	1.45	4.2	1795	135	7.5

Los resultados de los ensayos de tracción de probetas impresas de PLA con nanoarcillas, muestran que tanto la resistencia a la tracción como el módulo de elasticidad disminuyen al introducir las nanoarcillas (**Figura 108**). Llegando a disminuir la resistencia a la tracción de 55.46 MPa para la matriz pura a 51.63MPa para el PLA con 2% en peso de nanoarcillas (ver **tabla31**). Así también el menor valor del módulo elástico se tiene para un contenido de 2% (**Figura 109**). Esta disminución de la resistencia a la tracción al introducir nanoarcillas en una matriz polimérica también han sido reportadas para el HDPE, donde también disminuyó la resistencia a la flexión [**Sepet, 2015**].

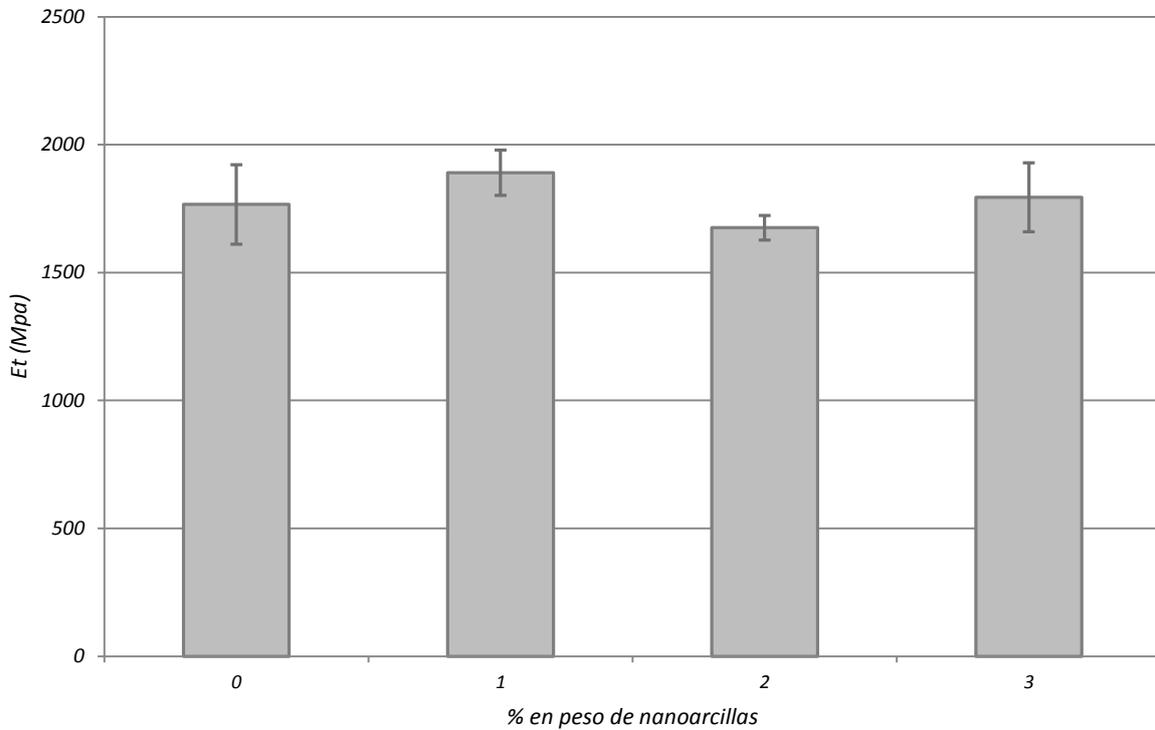
De los resultados de la medición del índice de fluidez del PLA con distintos contenidos de nanoarcillas, esta tendía a incrementar a mayor contenido de nanoarcillas, lo cual revela que las nanoarcillas no restringen la movilidad de las cadenas poliméricas de PLA, con lo cual no se logró un incremento de la resistencia a la tracción al introducir las nanoarcillas, ya que la restricción del movimiento de las cadenas poliméricas juegan un rol importante en el incremento de las propiedades mecánicas [**Rashmi, 2011**].

**Tabla 31.** Resistencia a la tracción y modulo elástico de probetas impresas de PLA con distintos contenidos de nanoarcillas.

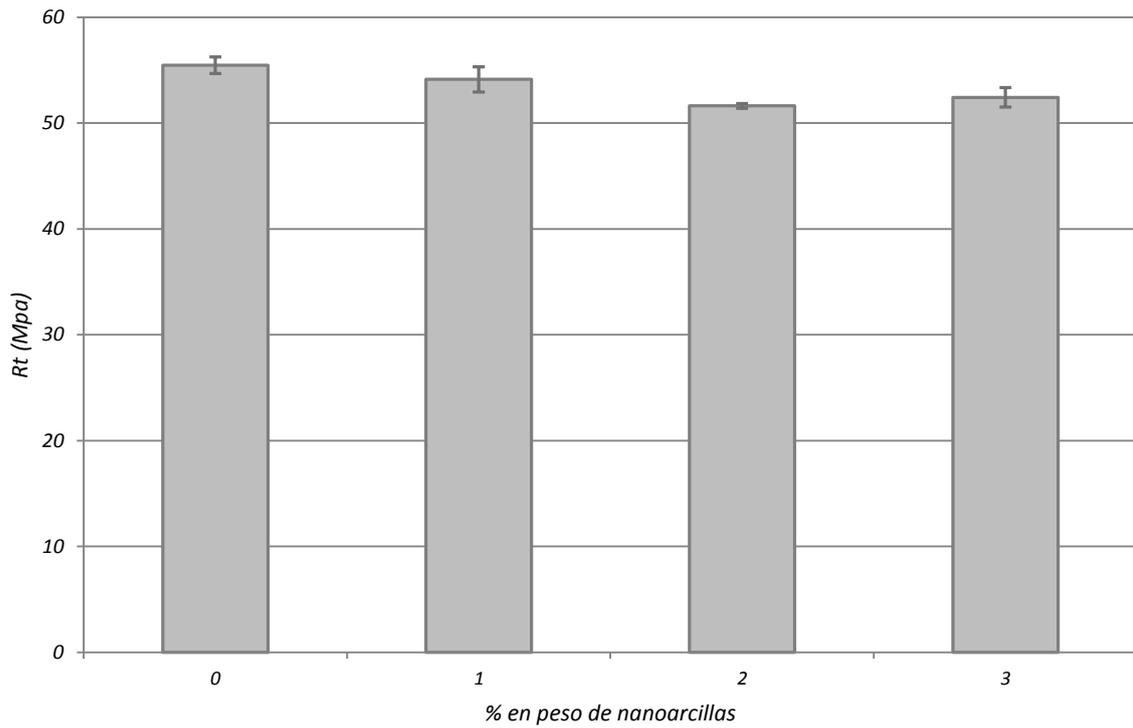
% en peso de nanoarcillas	Resistencia a la tracción (MPa)			Módulo de elasticidad (MPa)		
	Media	Dev. St.	CV (%)	Media	Dev. St.	CV (%)
0	55.46	0.79	1.4	3036	119	3.9
1	54.12	1.19	2.2	3017	121	4.0
2	51.63	0.23	0.4	2662	132	5.0
3	52.43	0.92	1.8	2918	56	1.9



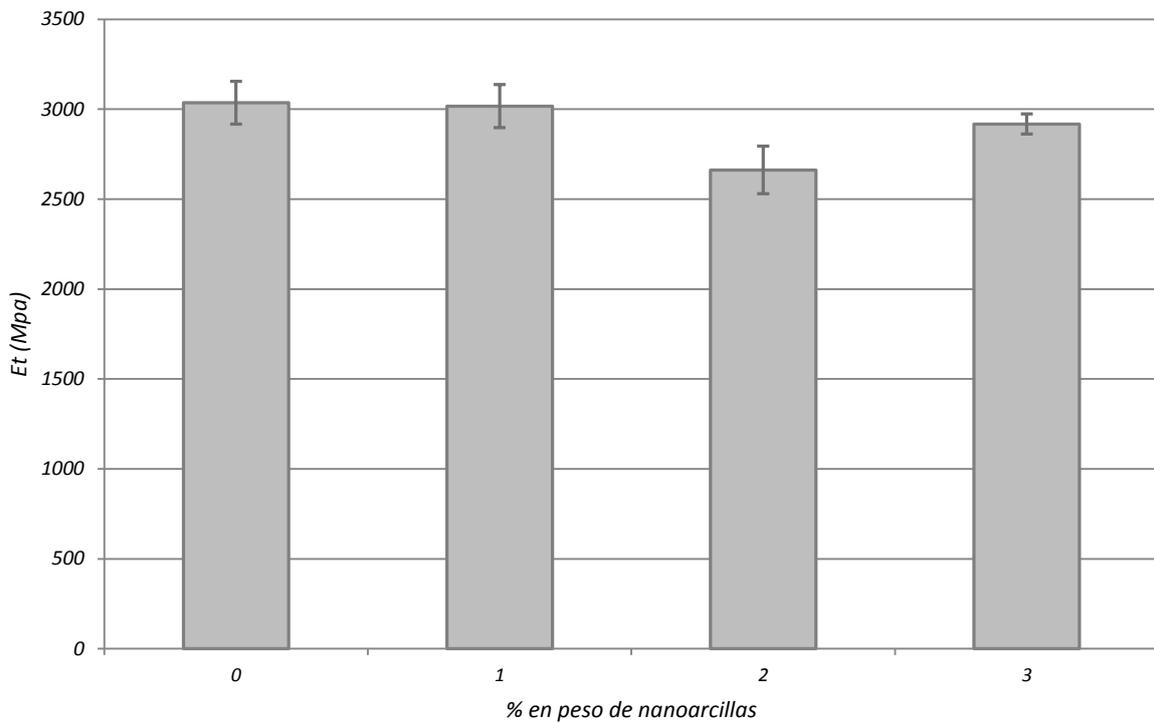
**Figura 106.** Resistencia a la tracción de probetas de ABS con distintos contenidos de nanoarcillas.



**Figura 107.** Módulo de elasticidad de probetas de ABS con distintos contenidos de nanoarcillas.

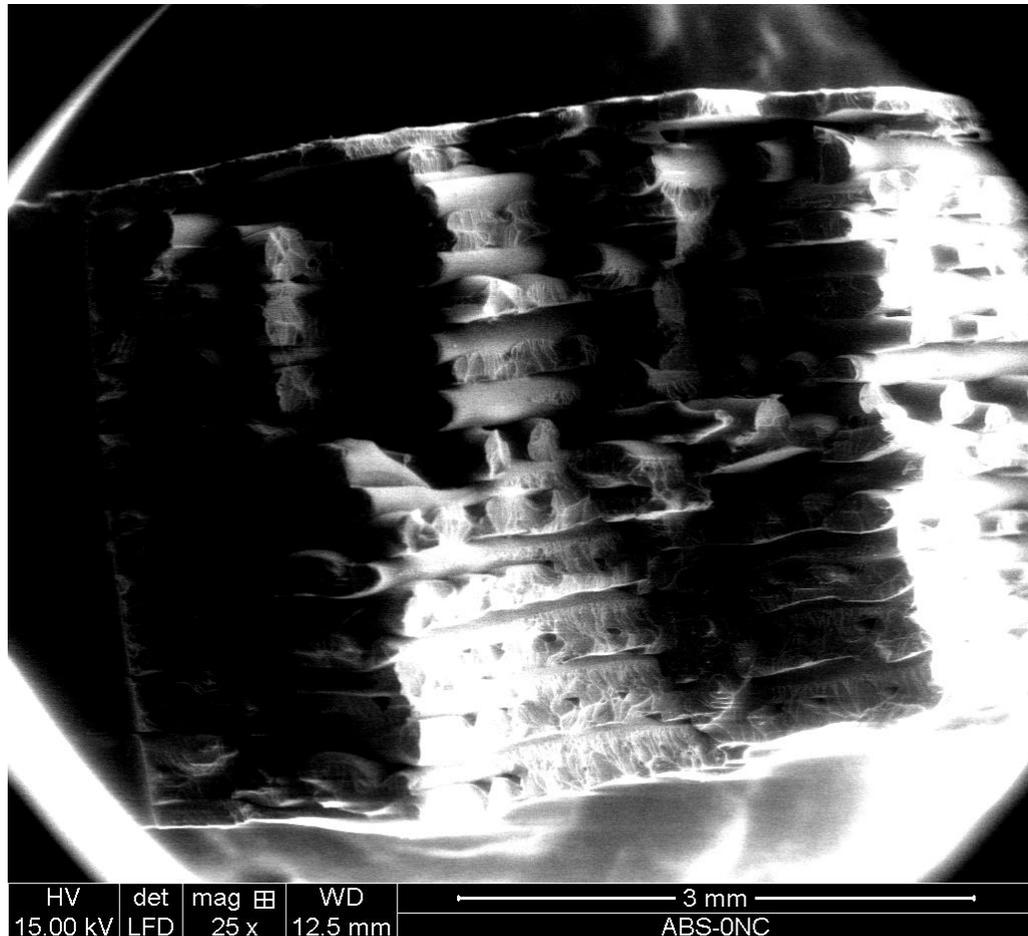


**Figura 108.** Resistencia a la tracción de probetas de PLA con distintos contenidos de nanoarcillas.



**Figura 109.** Módulo de elasticidad de probetas de PLA con distintos contenidos de nanoarcillas.

En la **figura 110** podemos observar la superficie de fractura de una probeta de impacto de ABS sin contenido de nanoarcillas, donde podemos observar la orientación de los filamentos depositados así como sus fracturas.



**Figura 110.** Micrografía SEM de la superficie de fractura de una probeta de impacto de ABS sin contenido de nanoarcillas.

De los resultados de los ensayos de impacto, se tiene que la matriz pura llegó a tener una resistencia al impacto de  $3.49 \text{ kJ/m}^2$  (ver **tabla 32**) y al introducir nanoarcillas en el ABS la resistencia al impacto disminuye, teniendo el menor valor para un contenido de nanoarcillas de 2%, como se puede observar de la **figura 111**. Mientras que para el PLA se logra incrementar de  $1.77 \text{ kJ/m}^2$  para la matriz pura a  $2.15 \text{ kJ/m}^2$  para el PLA con 3% de nanoarcillas (ver **tabla 33** y **figura 112**).

Entonces si bien se consigue una mayor resistencia a la tracción y módulo elástico con un contenido de 2% en el ABS, este presentará la menor resistencia al impacto, incluso igualando la resistencia al impacto de probetas impresas de PLA puro.

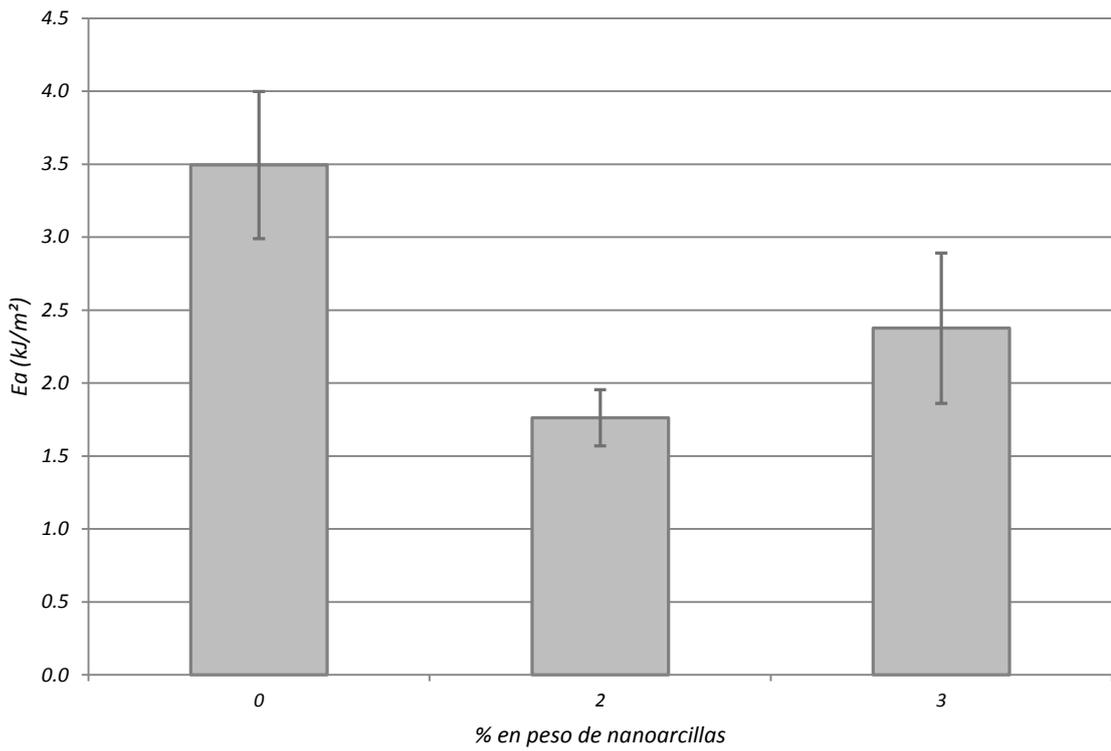
De la micrografía SEM de la superficie de fractura de las probetas de impacto de ABS con 2% y 3% de nanoarcillas (**figura 113**), podemos decir que la menor resistencia a la tracción del ABS con 3% frente a la de 2% en peso de nanoarcillas, se debe a la mayor aglomeración de la nanoarcilla. La disminución de la resistencia mecánica y módulo de elasticidad de probetas impresas de PLA con nanoarcillas se puede deber a la incompatibilidad entre estas.

**Tabla 32.** Resistencia al impacto de probetas impresas de ABS con distintos contenidos de nanoarcillas.

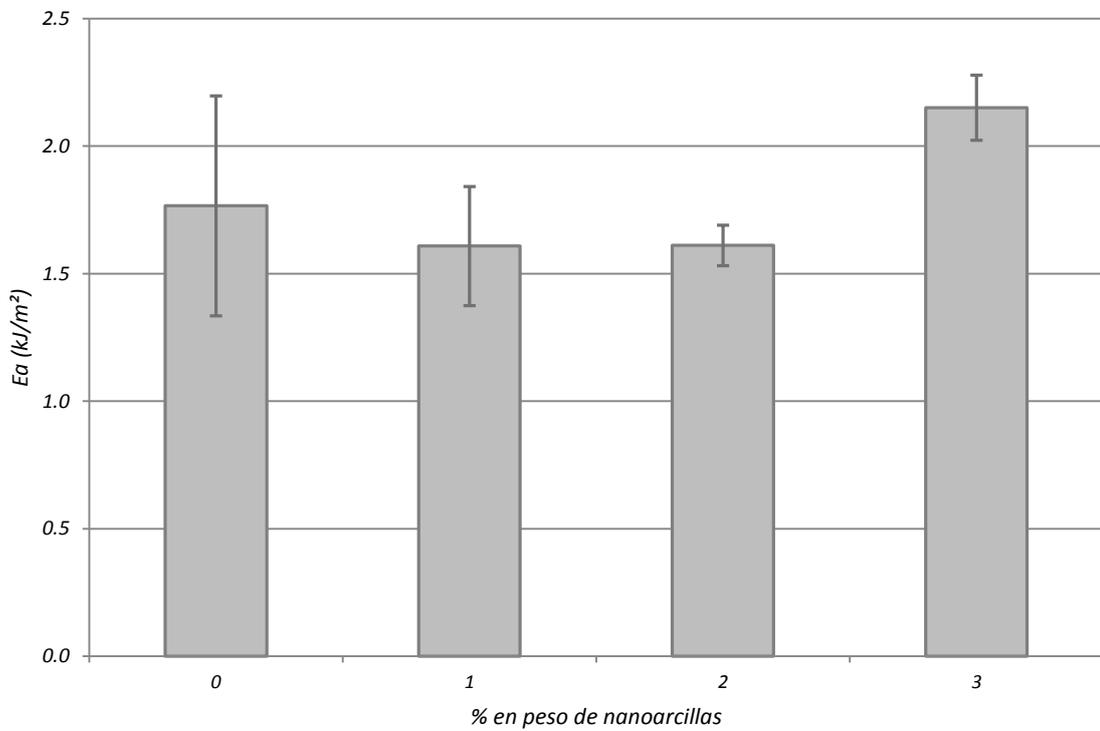
% en peso de nanoarcillas	Resistencia al impacto (kJ/m <sup>2</sup> )		
	Media	Dev. St.	CV (%)
0	3.49	0.50	14.4
2	1.76	0.19	11.0
3	2.38	0.52	21.7

**Tabla 33.** Resistencia al impacto de probetas impresas de PLA con distintos contenidos de nanoarcillas.

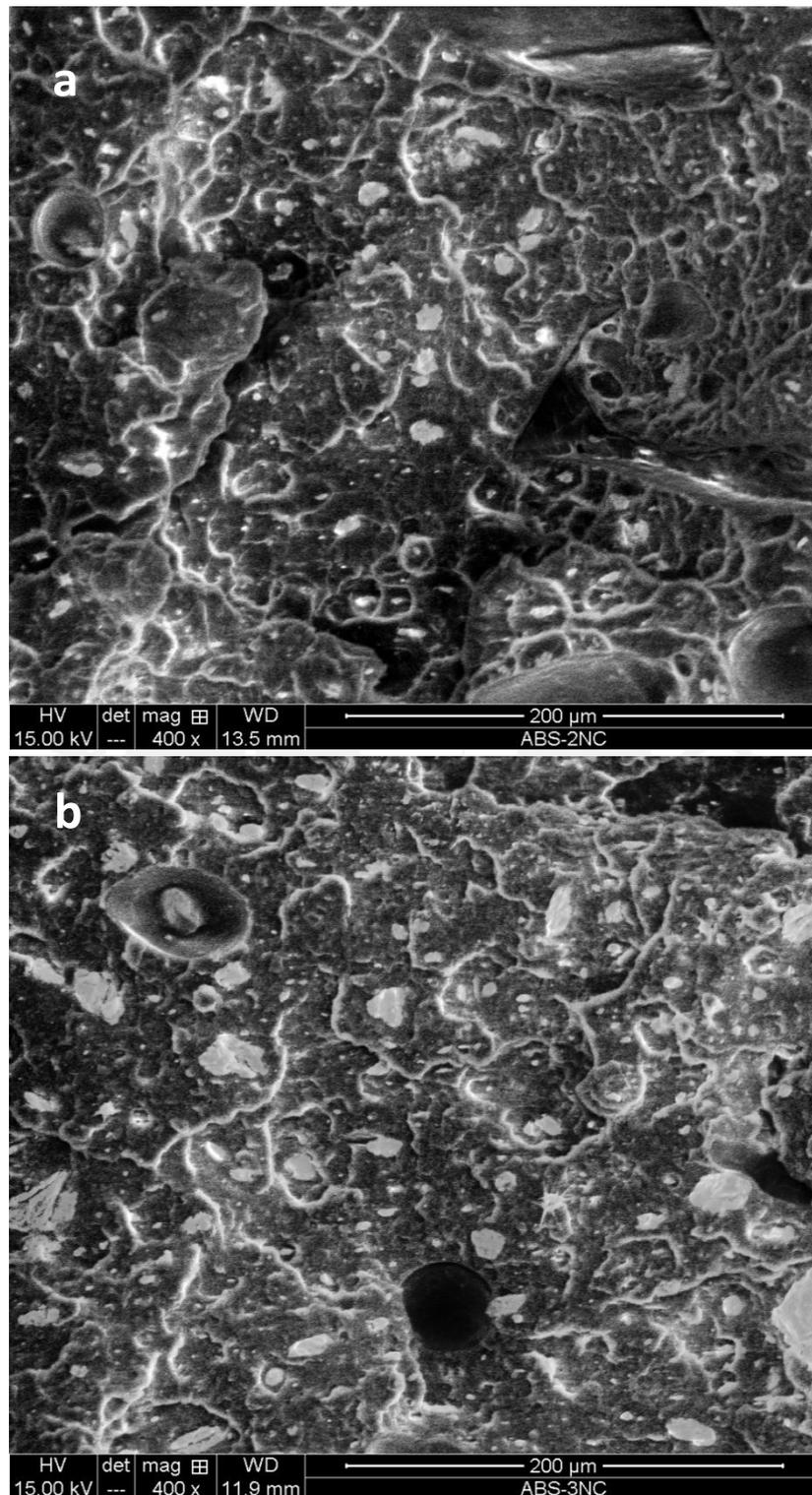
% en peso de nanoarcillas	Resistencia al impacto (kJ/m <sup>2</sup> )		
	Media	Dev. St.	CV (%)
0	1.77	0.43	24.4
1	1.61	0.23	14.5
2	1.61	0.08	4.9
3	2.15	0.13	5.9



**Figura 111.** Resistencia al impacto de probetas de ABS con distintos contenidos de nanoarcillas.



**Figura 112.** Resistencia al impacto de probetas de PLA con distintos contenidos de nanoarcillas.



**Figura 113.** Micrografía SEM de las superficies de fractura de probetas de impacto de ABS con (a) 2% y (b) 3% de contenido de nanoarcilla.

## Conclusiones

Se han desarrollado materiales compuestos de matriz termoplástica a partir de Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) y Políácido Láctico (PLA), reforzados con nanoarcillas (Montmorillonita), utilizando la técnica de modelado por deposición fundida empleada en manufactura aditiva, a partir de valores adecuados de los principales parámetros de impresión para el ABS y PLA.

El índice de fluidez del ABS varía muy poco al introducir las nanoarcillas, mientras que en el PLA se incrementa el índice de fluidez a mayor contenido de nanoarcillas, lo cual indica que las nanoarcillas actuaron como un plastificante en la matriz de PLA, es así que las nanoarcillas incrementaron la movilidad de las cadenas poliméricas bajo calor y carga.

El filamento comercial de ABS tiene una resistencia a la tracción de 34.4 MPa y un módulo de elasticidad de 761 MPa, mientras que el PLA tiene una resistencia a la tracción de 55.4 MPa y un módulo de elasticidad de 1499 MPa. Es así que el PLA presenta una mayor resistencia a la tracción y módulo elástico, pero una menor elongación a la rotura.

Las probetas de tracción impresas a partir de filamentos extruidos de ABS tienen una caída de la resistencia a la tracción a medida que se va incrementando la temperatura de impresión. Con lo cual se consigue la mayor resistencia a la tracción con una temperatura de 200°C, teniendo una resistencia a la tracción de 41.3 MPa y un módulo elástico de 1882 MPa.

El PLA consigue incrementar su resistencia a la tracción a mayor temperatura de impresión, ya que la cantidad de poros disminuye a mayor temperatura. Sin embargo este comportamiento se dio solo hasta la temperatura de 250°C ya que se observó que la resistencia a la tracción cae bruscamente para temperaturas de impresión de 260 °C y 270°C. La mayor resistencia a la tracción para el PLA se dio a 250 °C, con valores de resistencia a la tracción y modulo elástico de 61.2MPa y 2905 MPa respectivamente.

Tanto para el ABS como para el PLA, se tiene que a menor altura de capa se logra incrementar la resistencia a la tracción, lo cual se debe a que se tendría una mejor compactación de la pieza impresa a menor altura de capa. Consiguiendo así para una altura de capa 0.1mm resistencias a la tracción de 43.4 MPa y 59.6 MPa para el ABS y PLA respectivamente.

La temperatura de impresión de 230°C, así como una altura de capa de 0.2 mm tanto para el ABS y PLA permiten obtener piezas de buenas propiedades mecánicas y de fácil impresión.

Un ángulo de impresión de [0°] tanto en probetas de ABS y PLA, tienen la mayor resistencia a la tracción, esto es debido a que los filamentos depositados están orientados en la dirección de la carga, llegando así a tener una resistencia a la tracción de 39.1 MPa y un módulo elástico de 2091 MPa para el ABS, y para el PLA una resistencia a la tracción de 59.6 MPa y un módulo elástico de 3337MPa.

La menor resistencia a la tracción se da con un ángulo de impresión [ 90°], ya que es la unión entre filamentos y no los mismos filamentos los que son sometidos a carga de tracción; teniendo así resistencias a la tracción de 31.7 MPa y 53.5 MPa para el ABS y Pla respectivamente.

Entre los ángulos de impresión que permitan obtener piezas simétricas y que serían candidatos a ser aplicados en piezas funcionales, los cuales serán sometidos a cargas en distintas direcciones, es el ángulo [-45°/45°] el que tiene una mayor resistencia a la tracción tanto para el ABS y PLA, teniendo así una resistencia a la tracción de 34 MPa para el ABS, y para el PLA una resistencia a la tracción de 56.4 MPa. Es por ello que en el presente trabajo se selecciona al ángulo de [-45°/45°] para ser usado al imprimir piezas de material compuesto de matrices de ABS y PLA.

El ángulo de [0°] permite tener la mayor resistencia al impacto para las probetas de ABS, siendo esta resistencia al impacto de 11.44 kJ/m<sup>2</sup>, el cual resulta ser aproximadamente el triple de las obtenidas con otros ángulos de impresión. Por lo tanto el ángulo de impresión de [0°] permite tener mayores valores de resistencia a la tracción, modulo elástico y resistencia al impacto. Mientras que para las probetas de PLA se tiene la mayor resistencia al impacto para un ángulo de impresión de [-45°/45°] siendo este valor de 2.6 kJ/m<sup>2</sup>.

La resistencia a la tracción y el modulo elástico se incrementan al introducir nanoarcillas en la matriz de ABS. Consiguiendo el mayor incremento para un contenido de 2% de nanoarcillas, llegando así a incrementar de 32.4 MPa para el ABS puro a 36.9 MPa para el material compuesto con 2% de nanoarcillas. Mientras que para el PLA la resistencia a la tracción disminuyo sensiblemente al introducir las nanoarcillas.

La resistencia al impacto del ABS puro fue de  $3.49\text{kJ/m}^2$ , disminuyendo dicho valor al introducir las nanoarcillas. Mientras que para el PLA se tiene un incremento en la resistencia al impacto con 3% de contenido de nanoarcillas, siendo este valor de  $2.15\text{kJ/m}^2$ .





## ***Bibliografía***

- Abu-Abdeen, M., 2012**, “Static dynamic mechanical properties of poly(vinyl chloride) loaded with aluminum oxide nanopowder”. *Materials and Design*, Vol. 33, pp. 523-528.
- Ahn, S., Montero, M., Odell, D., Roundy, S. and Wright, P., 2002**, “Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS”, *Rapid Prototyping*, Vol. 8, pp. 248-257.
- Ajoku, U., Saleh, N., Hopkinson, H., Hague, R. and Erasenthiran, P., 2006**, “Investigating mechanical anisotropy and end-of-vector effect in laser-sintered nylon parts”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, pp. 1077-1086.
- Altan, M., Yildirim, H. and Uysal, A., 2011**, “Tensile properties of polypropylene/metal oxide nano composites”, *The Online Journal of Science and Technology*, Vol. 1, pp. 25-30.
- Anderson, K.S., Schreck, K.M. and Hillmyer, M.A., 2008**, “Toughening polylactide”, *Polymer Reviews*, Vol. 48, pp. 85-108.
- Auras, R., Haste, B. and Selke, S., 2004**, “An overview of Poly lactides as packing Materials”. *Macromolecular Bioscience*, Vol. 4, pp. 835-864.
- Azwa, Z.N., Yousif, B.F., Manalo, A.C. and Karunsena, W., 2013**, “A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres”, *Materials and Design*, Vol. 47, pp. 424-442.
- Barclift, M. and Williams, C., 2012**, “Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3D printing”, *International Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, TX.
- Bashar, M., Mertiny, P. and Sundararaj, U., 2014**, “Effect of nanocomposite structures on fracture behavior of epoxy-clay nanocomposites prepared by different dispersion methods”, *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2014, pp. 1-13.
- Belter, J. and Dollar, A., 2014**, “Strengthening of 3D printed robotic parts via fill compositing”, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Chicago, pp. 2886-2891.
- Bikas, H., Stavropoulos and P., Chryssolouris, G., 2015**, “Additive manufacturing methods and modelling approaches : a critical review”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1–17.
- Carneiro, O.S., Silva, A.F. and Gomes, R., 2015**, “Fused deposition modeling with polypropylene”, *Materials & Design*, Vol. 83, pp. 768-776.
- Casavola, C., Cazzato, A., Moramarco, V. and Pappalettere, C., 2016**, “Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory”, *Materials and Design*, Vol. 90, pp. 453-458.

- Cazon, A., Morer, P. and Matey, L., 2014**, “Polyjet technology for product prototyping: Tensile strength and surface roughness properties”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 228, pp. 1664-1675.
- Chaudhari, S., Shaikh, T. and Pandey, P., 2013**, “A Review on Polymer Tio2 Nanocomposites”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 3, pp. 1386-1391.
- Chawla, K., 2012**, “Composite Materials Science and Engineering”, 3<sup>rd</sup> edition, Springer.
- Cheah, C.M., Fuh, J.Y.H., Nee, A.Y.C. and Lu, L., 1999**, “Mechanical characteristics of fiber-filled photo-polymer used in stereolithography”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 5, pp. 112-119.
- Chen, L., Pang, X. and Yu, Z., 2007**, “Study on polycarbonate/multi-walled carbon nanotubes composite produced by melt processing”, *Material Science and Engineering A*, Vol. 457, pp. 287-291.
- Corbiere, T., Gfeller, B., Lundquist, L., Leterrier, Y. and Jolliet, O., 2001**, “Life cycle assessment of biofibres replacing glass fibres as reinforcement in plastics”. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 33, pp. 267-287.
- Croccolo, D., De Agostinis, M. and Olmi, G., 2013**, “Experimental characterization and analytical modeling of the mechanical behavior of fused deposition processed parts made of ABS-M30”, *Computational Materials Science*, Vol. 79, pp. 506-518.
- Crump, C., 1989**, “Apparatus and method for creating three-dimensional objects”, U.S. Patent No. 5,121,329.
- Dawoud, M., Taha, I. and Ebeid, S., 2016**, “Mechanical behavior of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 21, pp. 39-45.
- Deckard, C., 1986**, “Method and apparatus for producing parts by selective sintering”, U.S. Patent No. 4,863,538.
- Domingo, M., Puigoriol, J., Garcia, A., Lumma, J., Borros, S. and Reyes, G., 2015**, “Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts”, *Materials & Design*, Vol. 83, pp. 670-677.
- Drozdov, A.D. and Christiansen, J., 2007**, “Cyclic viscoplasticity of high-density polyethylene/montmorillonite clay nanocomposite”. *European Polymer Journal*, Vol. 43, pp. 10-25.
- Drummer, D., Wudy, K., Kühnlein, F. and Drexler, M., 2012**, “Polymer Blends for Selective Laser Sintering: Material and Process Requirements”, *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 509-517.

- Faruk, O. and Matuana, L., 2008**, “Nanoclay reinforced HDPE as matrix for wood plastic composites”. *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 2073-2077.
- Faruk, O., Bledzki, A., Fink, H. and Sain, M., 2012**, “Biocomposites reinforced with natural fibers”, *Progress in Polymer Science*, Vol. 37, pp. 1552-1596.
- Ferreira, J.A.M., Reis, P.N.B., Costa, J.D.M., Richardson, B.C.H. and Rochardson, M.O.W., 2011**, “A study of the mechanical properties on polypropylene enhanced by surface treated nanoclays”. *Composites Part B*, Vol. 42, pp. 1366-1372.
- Ford, S., Mortara, L. and Minshall, T., 2016**, “The Emergence of Additive Manufacturing: Introduction to the Special Issue”, *Technological Forecasting & Social Change*, Vol. 102, pp. 156-159.
- Fwu-Hsing, L., Ruey-Tsung, L., Wen-Hsueng, L. and Yunn-Shiuan, L., 2013**, “Selective laser sintering of bio-metal scaffold”, *Procedia CIRP*, Vol. 5, pp. 83-87.
- Gibson, I. and Shi, D., 1997**, “Material properties and fabrication parameters in selective laser sintering process”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 3, pp. 129-136.
- Gothait, H., 1999**, “Apparatus and method three dimensional model printing”, U.S. Patent No. 6,259,962.
- Gowda, R., Udayagiri, C. and Narendra, D., 2014**, “Studies on the Process Parameters of Rapid Prototyping Technique (Stereolithography) for the Betterment of Part Quality”, *International Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2014, pp. 1-11.
- Gupta, A. and Ogale, A. A., 2002**, “Dual Curing of Carbon Fiber Reinforced Photoresins for Rapid Prototyping”, *Polymer Composites*, Vol. 23, pp. 1162-1170.
- Hambir, S., Bulakh, N. and Jog, J., 2002**, “PP/clay nanocomposites: effect of compatibilizer on the thermal, crystallization and dynamic mechanical behavior”. *Polymer Engineering and Science*, Vol. 42, pp. 1800-18007.
- Holbery, J. and Houston, D., 2006**, “Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications”. *The Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, Vol. 58, pp. 80-86.
- Hull, C.W., 1984** “Apparatus for production of three-dimensional objects by Stereolithography”, U.S. Patent No. 4,575,330.
- Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto and M., Gorga, 2006**, “Polymer-matrix nanocomposites, processing, manufacturing, and application: an overview”. *Journal of Composite Materials*, Vol. 40, pp. 1511-1575.
- Hwa-Hsing, T., Ming-Lu, C. and Hsiao-Chuan, Y., 2011**, “Slurry-based selective laser sintering of polymer-coated ceramic powders to fabricate high strength alumina parts”, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 31, pp. 1383-1388.

**Hwang, S., Hsu, P., Yeh, J., Hu, C. and Chang, K., 2009**, “Effect of organoclay on the mechanical/thermal properties of microcellular injection molded polystyrene-clay nanocomposites”. *International Communications in heat and mass transfer*, Vol. 36, pp. 799-805.

**Hwang, S., Liu, S., Jui-ming, P., Chang, K. and Lai, Y., 2010**, “Effect of organoclay on the mechanical/thermal properties of microcellular injection molded PBT-clay nanocomposites”. *International Communications in heat and mass transfer*, Vol. 37, pp. 1036-1043.

**Ilardo, R. and Williams, C., 2010**, “Design and manufacture of a Formula SAE intake system using fused deposition modeling and fiber-reinforced composite materials”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 16, pp. 174-179.

**Jansson, A. and Pejryd, L., 2016**, “Characterization of carbon fibre-reinforced polyamide manufactured by selective laser sintering”, *Additive Manufacturing*, Vol. 9, pp. 7-13.

**Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C. and Bowyer, A., 2011**, “RepRap-the replicating rapid prototype”, *Robotica*, Vol. 29, pp. 177-191.

**Jonoobi, M., Harun, J., Mathew, A. and Oksman, K., 2010**, “Mechanical properties of cellulose nanofiber (CNF) reinforced polylactid acid (PLA) prepared by twin screw extrusion”. *Composites Science and Technology*, Vol. 70, pp. 1742-1747.

**Karalekas, D.E., 2003**, “Study of the mechanical properties of nonwoven fibre mat reinforced photopolymers used in rapid prototyping”, *Materials & Design*, Vol. 24, pp. 665-670.

**Kesy, A. and Kotlinski, J., 2010**, “Mechanical properties of parts produced by using polymer jetting technology”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 10, pp. 37-50.

**Kim, J. and Creasy, T.S., 2004**, “Selective laser sintering characteristics of nylon 6/clay-reinforced nanocomposite”, *Polymer Testing*, Vol. 23, pp. 629-636.

**Kodgire, P., Kalgaonkar, R. and Hambir, S., 2001**, “PP/clay nanocomposites: effect of clay treatment on morphology and dynamic mechanical properties”. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 81, pp. 1786-1792.

**Koronis, G., Silva, A. and Fontul, M., 2013**, “Green composites: A review of adequate materials for automotive applications”, *Composites: Part B*, Vol. 44, pp. 120-127.

**Kowalczyk, M., Piorkowska, E., Kulpinski, P. and Pracella, M., 2011**, “Mechanical and thermal properties of PLA composites with cellulose nanofibers and standard size fibers”. *Composites: Part A*, Vol. 42, pp. 1509-1514.

**Kumar, S. and Kruth, J.-P., 2010**, “Composites by rapid prototyping technology”, *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 850-856.

**Leu, Y. Y., Mohd, Z. A. and Chow, W. S., 2012**, “Mechanical, Thermal, and Morphological Properties of Injection Molded Poly(lactic acid)/SEBS-g-MAH/organo-Montmorillonite Nanocomposites”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 124, pp. 1200-1207.

**Liu, S. P. and Huang, I.J., 2010**, “Mechanical properties of polystyrene-montmorillonite nanocomposites prepared by melt intercalation”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 115, pp. 288-296.

**Masood, S. H. and Song, W. Q., 2004**, “Development of new metal/ polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modeling”, *Materials and Design*, Vol. 25, pp. 587-594.

**Mohamed, O., Masood, S. and Bhowmik, J., 2016**, “Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion”, *Measurement*, Vol. 81, pp. 174-196.

**Moore, J.D., (1973)**, “Acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS)- a review”. *Composites*, Vol. 4, pp. 118-130.

**Murr, L., (2014)**, “Additive Manufacturing: Changing the Rules of Manufacturing”, *Handbook of Materials Structures, Properties, Processing and Performance*.

**Murr, L., 2015**, “Handbook of Materials Structures, Properties, Processing and Performance”, Springer.

**Najafi, N., Heuzey, M.C. and Carreau, P.J., 2012**, “Polylactide (PLA)-clay nanocomposites prepared by melt compounding in the presence of chain extender”. *Composites Science and Technology*, Vol. 72, pp. 608-615.

**Nannan, G. and Ming, L., 2013**, “Additive manufacturing: technology, applications and research need”, *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 8, pp. 215-243.

**Ning, F., Cong, W., Qiu, J., Wei, J. and Wang, S., 2015**, “Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling”, *Composites Part B*, Vol. 80, pp. 369-378.

**Nirmal, U., Hashim, J. and Ahmad, M.M.H., 2015**, “A review on tribological performance of natural fibre polymeric composites”, *Tribology International*, Vol. 2015, pp. 77-104.

**Onwubolu, G. and Rayegani, F., 2014**, “Characterization and Optimization of Mechanical Properties of ABS Parts Manufactures by the Fused Deposition Modelling Process”, *International Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2014, pp. 1-13.

**Panda, B., Bahubalendruni, M. V. A. and Biswal, B., 2014**, “Comparative Evaluation of Optimization Algorithms at training of Genetic Programming for Tensile strength prediction of FDM processed part”, *Procedia Materials Science*, Vol. 5, pp. 2250-2257.

**Peters, S.T., 1998**, “Handbook of Composites”, 2<sup>nd</sup> edition, Springer.

**Pham, D.T. and Dimov, S.S., 2001**, “Rapid Manufacturing: The Technologies and Applications of Rapid Prototyping and Rapid Tooling”, Springer, 1<sup>st</sup> edition.

**Raasch, J., Ivey, M., Aldrich, D., Nobes, D. and Ayranci, C., 2015**, “Characterization of polyurethane shape memory polymer processed by material extrusion additive manufacturing”, *Additive Manufacturing*, Vol. 8, pp. 132-141.

**Ramkumar, A. and Gnanamoorthy, R., 2008**, “Axial fatigue behavior of polyamide-6 and polyamide-6 nanocomposites at room temperature”. *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp. 3401-3405.

**Rasal, R.M., Janorkar, A.V. and Hirt, D.E., 2010**, “Poly(lactic acid) modifications”. *Progress in polymer Science*, Vol. 35, pp. 338-356.

**Ray, S.S and Okamoloto, M., 2003**, “Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing”. *Progress Polymer Science*, Vol. 28, pp. 1539-1641.

**Renukappa, R., Chikkakuntappa, N.M. and Shivakumar, R., 2011**, “Montmorillonite nanoclay filler effects on electrical conductivity, thermal and mechanical properties of epoxy-Based nanocomposites”, *Polymer Engineering and Science*, Vol. 51, pp. 1828-1836.

**Riedel, U. and Nickel, J., 2005**, “Applications of Natural Fiber Composites for Constructive Parts in Aerospace, Automobiles, and Other Areas”. *Biopolymers*, Vol. 10, pp. 1-28.

**Roberson, D., Torrado, A., Shemelya, C., Rivera, A., MacDonald, E. and Wicker, R., 2015**, “Comparison of stress concentrator fabrication for 3D printed polymeric izod impact test specimens”, *Additive Manufacturing*, Vol. 7, pp. 1-11.

**Salmoria, G., Paggi, R., Lago, A. and Beal, V., 2011**, “Microstructural and mechanical characterization of PA12/MWCNTs nanocomposite manufactured by selective laser sintering”, *Polymer Testing*, Vol. 30, pp. 611-615.

**Salmoria, G.V., Ahrens, C.H., Fredel, M., Soldi V. and Pires, A.T.N., 2005**, “Stereolithography somos 7110 resin: mechanical behavior and fractography of parts post-cured by different methods”, *Polymer Testing*, Vol. 24, pp. 157-162.

**Schmidt, M., Pohle, D. and Rechtenwal, T., 2007**, “Selective Laser Sintering of PEEK”, *Annals of the CIRP*, Vol. 56, pp. 205-208.

**Sells, E., Bailard, S., Smith, Z., Bowyer, A. and Olliver, V., 2010**, “RepRap: The Replicating Rapid Prototyper: Maximizing Customizability by Breeding the Means of Production”, *Handbook of Research in Mass Customization and Personalization*, pp. 568-580.

**Sepet, H., Tarkcioglu, N. and Misra, R., 2015**, “Investigation of mechanical, thermal and Surface properties of nanoclay/HDPE nanocomposites produced industrially by melt mixing approach”, *Journal of Composite Materials*, Vol. 0, pp. 1-12.

**Shishavan, S., Azdast, T. and Ahmadi, S., 2014**, “Investigation of effect of nanoclay and processing parameters on the tensile strength and hardness of injection molded Acrylonitrile Butadiene Styrene-organoclay nanocomposites”. *Materials and Design*, 58, pp. 527-534.

**Shishavan, S., Taher, A. and Ahmadi, S., 2014**, “Investigation of the effect of nanoclay and processing parameters on the tensile strength and hardness of injection molded Acrylonitrile Butadiene Styrene-organoclay nanocomposites”, *Materials & Design*, Vol. 58, pp. 527-534.

**Shofner, M. L., Lozano, K., Rodriguez, F. J. and Barrera, E. V., 2003**, “Nanofiber-Reinforced Polymers Prepared by Fused Deposition Modeling”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 89, pp. 3081-3090.

**Singh, P. and Ghosh, A.K., 2014**, “Torsional, tensile and structural properties of acrylonitrile-butadiene-styrene clay nanocomposites”. *Material and Design*, Vol. 55, pp. 137-145.

**Smith, W. and Dean, R., 2013**, “Structural characteristics of fused deposition modeling polycarbonate material”, *Polymer Testing*, Vol. 32, pp. 1306-1312.

**Stansbury, J. and Idacavage, M., 2016**, “3D printing with polymers: Challenges among expanding options and opportunities”, *Dental Materials*, Vol. 32, pp. 54-64.

**Sugavaneswaran, M. and Arumaikkannu, G., 2014**, “Modelling for randomly oriented multi material additive manufacturing component and its fabrication”, *Materials and Design*, Vol. 54, pp. 779-785.

**Sugavaneswaran, M. and Arumaikkannu, G., 2015**, “Analytical and experimental investigation on elastic modulus of reinforced additive manufactures structure”, *Materials and Design*, Vol. 66, pp. 29-36.

**Timmaraju, M., Gnanamoorthy, R. and Kannan, K. 2001**, “Effect of environment on flexural fatigue behavior of polyamide66/hectorite nanocomposite”. *International Journal of fatigue*, Vol. 33, pp. 541-548

**Torrado, A., Roberson, D. and Wicker, R. 2014**, “Fracture Surface Analysis of 3D-Printed Tensile Specimens of Novel ABS-Based Materials”, *Journal of Failure Analysis and Prevention*, Vol. 14, pp. 343-353.

**Torrado, A., Shemelya, C., English, J., Lin, Y., Wicker, R. and Roberson, D., 2015**, “Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing”, *Additive Manufacturing*, Vol. 6, pp. 16-29.

**Turner, B., Strong, R. and Gold, S., 2014**, “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 2014, pp. 192-204.

**Tymrak, B.M., Kreiger, M. and Pearce, J.M., 2014**, “Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions”, *Material and Design*, Vol. 58, pp. 242-246.

**Vashishtha, V., Makade, R. and Mehla, N., 2011**, “Advancement of Rapid Prototyping in Aerospace Industri -A Review”, *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 3, pp. 2486–2493.

**Wang, H., Zeng, C., Elkovitch, M., Lee, L.J. and Koelling, K.W., 2001**, “Processing and properties of polymeric nano-composites”, *Polymer Engineering Science.*, Vol. 41, pp. 2036-2046.

**West, J. and Kuk, G., 2016**, “The complementarity of openness: How MakerBot leveraged Thingiverse in 3D printing”, *Technological Forecasting & Social Change*, 102, pp. 169-181.

**Wittbrodt, B. and Pearce, J., 2015**, “The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components”, *Additive Manufacturing*, Vol. 8, pp. 110-116.

**Wong, K. and Hernandez, A., 2012**, “A Review of Additive Manufacturing”, *ISRN Mechanical Engineering*, Vol. 2012, pp. 1-10.

**Wood, W., Maguire, R. and Zhong, W., 2011**, “Improved wear and mechanical properties of UHMWPE-carbon nanofiber composites through an optimized paraffin-assisted melt-mixing process”, *Composites: Part B*, Vol. 42, pp. 584-591.

**Yang, Y., Chen, J., Yuan, Q. and Misra, K., 2011**, “Structure-property relationship in impact modified nanoclay reinforced polypropylene”. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 1857-1863.

**Yi, X., Tan, Z., Yu, W., Li, J., Li, B., Huang, B. and Liao, J., 2016**, “Three dimensional printing of carbon/carbon composites by selective laser sintering”, *Carbon*, Vol. 96, pp. 603-607.

**Zein, I., Hutmacher, D., Tan, K. and Teoh, S., 2002**, “Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications”, *Biomaterials*, Vol. 23, pp. 1169-1185.

**ASTM D638-14**, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.

**ASTM D3418-12**, Standard test method for transition temperatures and enthalpies of fusion and crystallization of polymer by differential scanning calorimetry.

**ASTM F2792-12**. Standard terminology for additive manufacturing technologies.

**ISO 179-1, 2000**, Plastics-determination of Charpy impact properties- part 1: non-instrumented impact test.

**ISO-1133, 1999**, Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and the melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics.



**Anexo 1**  
**Resultados de los ensayos**

ABS						
Temperatura de impresión (°C)	e (mm)	b (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo elástico (MPa)
200	3.00	3.35	10.05	398.76	39.68	1881.65
200	3.00	3.45	10.35	429.65	41.51	2355.85
200	3.00	3.50	10.50	432.36	41.18	1974.18
200	3.00	3.40	10.20	418.61	41.04	1904.01
200	2.95	3.35	9.88	408.41	41.33	2229.94
200	3.05	3.55	10.83	449.74	41.54	1769.13
210	3.00	3.40	10.20	414.34	40.62	1954.17
210	3.00	3.45	10.35	433.88	41.92	1935.81
210	3.05	3.45	10.52	433.57	41.20	2039.86
210	3.00	3.40	10.20	427.03	41.87	2075.12
210	3.00	3.40	10.20	416.06	40.79	2073.87
210	3.00	3.40	10.20	407.99	40.00	2054.59
220	3.10	3.50	10.85	419.21	38.64	2032.04
220	3.15	3.50	11.03	412.67	37.43	2024.76
220	3.10	3.45	10.70	419.92	39.26	2053.08
220	3.10	3.45	10.70	410.43	38.38	2176.87
220	3.10	3.45	10.70	421.67	39.43	1997.78
230	3.20	3.60	11.52	451.42	39.19	2037.67
230	3.20	3.55	11.36	463.97	40.84	2133.29
230	3.20	3.55	11.36	447.13	39.36	2293.50
230	3.10	3.60	11.16	425.84	38.16	2184.36
230	3.20	3.65	11.68	445.90	38.18	2007.07
230	3.25	3.65	11.86	444.50	37.47	1920.71
240	3.15	3.55	11.18	417.31	37.32	1889.49
240	3.10	3.55	11.01	415.07	37.72	1990.29
240	3.15	3.55	11.18	414.12	37.03	2030.02
240	3.20	3.60	11.52	422.31	36.66	1917.82
240	3.20	3.55	11.36	427.66	37.65	1949.26
240	3.15	3.55	11.18	416.04	37.20	2179.17
250	3.05	3.65	11.13	401.92	36.10	1935.12
250	3.15	3.75	11.81	424.90	35.97	1810.60
250	3.10	3.65	11.32	408.44	36.10	1902.54
250	3.05	3.65	11.13	403.04	36.20	1880.80
250	3.00	3.65	10.95	391.25	35.73	1856.66
250	3.01	3.64	10.96	392.95	35.87	1854.32
260	3.25	3.65	11.86	361.51	30.48	1570.89
260	3.25	3.63	11.80	373.07	31.62	1926.35
260	3.25	3.75	12.19	366.82	30.10	1522.63
260	3.21	3.68	11.81	367.78	31.13	2091.12
260	3.19	3.69	11.77	372.29	31.63	2006.53
270	3.31	3.77	12.48	352.50	28.25	1612.24
270	3.17	3.73	11.82	354.35	29.97	1446.78
270	3.36	3.77	12.67	356.73	28.16	1586.04
270	3.41	3.78	12.89	361.20	28.02	1557.52
270	3.25	3.78	12.29	353.87	28.81	1413.54

ABS						
Altura de capa (mm)	e (mm)	b (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo elástico (MPa)
0.30	3.35	3.66	12.26	320.82	26.17	1314.81
0.30	3.24	3.61	11.70	382.07	32.67	1515.29
0.30	3.19	3.55	11.32	358.38	31.65	1467.53
0.30	3.44	3.56	12.25	310.81	25.38	1232.60
0.30	3.33	3.55	11.82	326.66	27.63	1290.73
0.30	3.21	3.55	11.40	322.74	28.32	1437.10
0.25	3.13	3.55	11.11	363.14	32.68	1540.94
0.25	3.24	3.61	11.70	381.77	32.64	1577.85
0.25	3.13	3.62	11.33	386.03	34.07	1652.13
0.25	3.13	3.60	11.27	401.01	35.59	1922.04
0.25	3.15	3.63	11.43	386.47	33.80	1618.92
0.25	3.15	3.57	11.25	392.86	34.93	1833.01
0.20	3.20	3.60	11.52	451.42	39.19	2037.67
0.20	3.20	3.55	11.36	463.97	40.84	2133.29
0.20	3.20	3.55	11.36	447.13	39.36	2293.50
0.20	3.10	3.60	11.16	425.84	38.16	2184.36
0.20	3.20	3.65	11.68	445.90	38.18	2007.07
0.20	3.25	3.65	11.86	444.50	37.47	1920.71
0.15	3.05	3.65	11.13	481.95	43.29	2128.38
0.15	3.05	3.65	11.13	444.02	39.89	1898.72
0.15	3.05	3.60	10.98	452.31	41.19	2012.50
0.15	3.05	3.65	11.13	455.82	40.94	2136.52
0.15	3.05	3.65	11.13	435.71	39.14	1836.95
0.15	3.00	3.60	10.80	446.54	41.35	2029.00
0.10	3.05	3.60	10.98	491.81	44.79	2404.11
0.10	3.10	3.65	11.32	490.71	43.37	2088.72
0.10	3.15	3.70	11.66	503.44	43.19	2022.14
0.10	3.05	3.65	11.13	482.23	43.32	2197.66
0.10	3.15	3.70	11.66	503.00	43.16	2300.77
0.10	3.25	3.65	11.86	508.43	42.86	1741.90

ABS						
Angulo de impresión (°)	e (mm)	b (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo elástico (MPa)
0	3.20	3.60	11.52	451.42	39.19	2037.67
0	3.20	3.55	11.36	463.97	40.84	2133.29
0	3.20	3.55	11.36	447.13	39.36	2293.50
0	3.10	3.60	11.16	425.84	38.16	2184.36
0	3.20	3.65	11.68	445.90	38.18	2007.07
0	3.25	3.65	11.86	444.50	37.47	1920.71
45	3.31	3.48	11.52	376.22	32.66	1726.14
45	3.22	3.60	11.59	371.38	32.04	2244.59
45	3.45	3.65	12.59	391.87	31.12	1872.10
45	3.42	3.62	12.38	387.18	31.27	1654.06
45	3.32	3.57	11.85	373.91	31.55	1688.57
90	2.89	3.53	10.20	317.43	31.11	1704.95
90	2.85	3.60	10.26	303.04	29.54	1806.69
90	3.25	3.52	11.44	342.09	29.90	1772.10
90	3.30	3.46	11.42	335.31	29.37	2037.39
90	3.20	3.50	11.20	296.58	26.48	1725.12
0/90	3.21	3.52	11.30	379.76	33.61	2271.76
0/90	3.21	3.50	11.24	353.20	31.44	1944.83
0/90	3.20	3.56	11.39	370.62	32.53	1612.61
0/90	3.21	3.56	11.43	369.35	32.32	2029.13
0/90	3.26	3.61	11.77	371.09	31.53	1878.77
45/-45	3.30	3.65	12.05	392.73	32.61	1766.01
45/-45	3.30	3.70	12.21	418.10	34.24	1763.63
45/-45	3.30	3.65	12.05	418.05	34.71	1583.22
45/-45	3.30	3.70	12.21	419.07	34.32	1889.09
45/-45	3.30	3.65	12.05	408.00	33.87	1996.33
45/-45	3.30	3.65	12.05	409.98	34.04	1869.29
0/45/90	3.09	3.59	11.09	377.42	34.02	1845.64
0/45/90	3.07	3.51	10.78	375.84	34.88	1844.25
0/45/90	3.13	3.61	11.30	390.18	34.53	2120.08
0/45/90	3.15	3.61	11.37	387.46	34.07	2139.78
0/45/90	3.09	3.61	11.15	389.90	34.95	1974.09
0/45/90	3.11	3.60	11.20	389.05	34.75	1671.32
0/45/90/135	3.36	3.58	12.03	405.20	33.69	1986.16
0/45/90/135	3.26	3.65	11.90	402.79	33.85	1837.52
0/45/90/135	3.33	3.55	11.82	404.24	34.20	1925.70
0/45/90/135	3.15	3.60	11.34	362.72	31.99	1724.92
0/45/90/135	3.21	3.57	11.46	391.05	34.12	1593.64

ABS						
Angulo de impresión (°)	b (mm)	e (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Wm (J)	Wb (kJ/m <sup>2</sup> )
0	7.88	4.04	31.84	220.71	0.30	9.5
0	7.93	4.05	32.12	218.45	0.37	11.4
0	7.84	3.88	30.42	222.41	0.30	9.9
0	7.94	3.81	30.25	201.54	0.36	11.9
0	8.01	3.93	31.48	192.17	0.35	11.0
0	7.81	3.84	29.99	225.13	0.31	10.3
0	8.00	3.84	30.72	208.20	0.22	7.1
0	7.81	3.83	29.91	195.29	0.35	11.8
0	7.89	3.81	30.06	199.79	0.34	11.2
0	7.96	3.98	31.68	220.09	0.36	11.3
45	7.81	3.90	30.46	179.09	0.20	6.7
45	7.96	3.94	31.36	192.38	0.13	4.3
45	8.04	3.99	32.08	193.53	0.12	3.8
45	7.88	3.96	31.20	157.60	0.12	3.9
45	8.00	3.89	31.12	188.22	0.12	4.0
45	7.94	4.02	31.92	174.42	0.13	4.0
45	7.88	3.95	31.13	172.12	0.12	3.8
45	7.92	4.03	31.92	164.65	0.12	3.7
45	7.96	3.90	31.04	169.86	0.12	3.7
45	7.80	3.95	30.81	157.13	0.21	6.7
45	8.02	3.84	30.80	186.51	0.13	4.2
90	7.85	3.90	30.62	151.83	0.07	2.2
90	7.85	3.85	30.22	187.06	0.13	4.1
90	7.94	3.83	30.41	141.89	0.06	2.0
90	7.93	4.15	32.91	223.44	0.13	3.9
90	7.80	3.95	30.81	116.67	0.06	1.9
90	7.88	3.88	30.57	209.14	0.13	4.2
90	7.88	4.09	32.23	181.50	0.12	3.8
90	7.82	4.02	31.44	124.80	0.08	2.7
90	7.92	4.00	31.68	179.27	0.12	3.7
90	7.92	4.00	31.68	147.56	0.06	2.0
0/90	7.93	4.00	31.72	168.24	0.11	3.6
0/90	8.01	3.83	30.68	171.13	0.12	3.9
0/90	7.87	3.86	30.38	138.92	0.11	3.5
0/90	7.95	4.03	32.04	126.87	0.11	3.4
0/90	7.76	3.85	29.88	170.98	0.13	4.4
0/90	7.90	3.86	30.49	184.64	0.12	4.0
0/90	7.73	3.89	30.07	147.27	0.12	3.9
0/90	8.01	3.95	31.64	134.61	0.11	3.6
0/90	7.84	3.97	31.12	157.24	0.12	3.7
0/90	7.88	3.60	28.37	139.94	0.10	3.6

ABS						
Angulo de impresión (°)	b (mm)	e (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Wm (J)	Wb (kJ/m <sup>2</sup> )
45/-45	7.86	4.03	31.68	179.10	0.12	3.7
45/-45	7.85	4.00	31.40	206.84	0.13	4.1
45/-45	7.83	4.00	31.32	177.42	0.12	3.9
45/-45	8.14	4.00	32.56	171.44	0.13	3.9
45/-45	8.09	4.19	33.90	224.61	0.13	3.9
45/-45	7.91	4.01	31.72	212.45	0.13	3.9
45/-45	7.83	3.84	30.07	182.46	0.13	4.2
45/-45	8.09	4.12	33.33	179.63	0.12	3.7
45/-45	8.01	4.20	33.64	180.26	0.12	3.7
45/-45	8.02	3.88	31.12	179.74	0.12	3.9
45/-45	7.99	4.04	32.28	208.66	0.21	6.6
0/45/90	7.96	3.93	31.28	205.00	0.13	4.0
0/45/90	7.93	3.97	31.48	157.29	0.12	3.9
0/45/90	7.90	3.99	31.52	175.23	0.12	3.9
0/45/90	7.87	3.89	30.61	149.69	0.20	6.6
0/45/90	7.91	3.84	30.37	214.58	0.13	4.3
0/45/90	7.87	3.88	30.54	177.10	0.14	4.5
0/45/90	7.92	3.95	31.28	169.21	0.12	4.0
0/45/90	7.86	4.03	31.68	190.12	0.13	4.0
0/45/90	7.95	3.94	31.32	177.96	0.13	4.0
0/45/90	7.88	3.97	31.28	216.26	0.13	4.1
0/45/90/135	8.10	3.96	32.08	159.15	0.12	3.7
0/45/90/135	8.06	4.07	32.80	195.15	0.13	3.9
0/45/90/135	7.94	4.01	31.84	187.73	0.12	3.7
0/45/90/135	7.79	4.00	31.16	140.43	0.12	3.7
0/45/90/135	7.89	4.13	32.59	161.40	0.11	3.5

ABS						
Contenido de nanoarcillas (wt. %)	e (mm)	b (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo elástico (MPa)
0	3.02	3.51	10.60	317.94	29.99	1729.51
0	3.05	3.46	10.55	320.74	30.39	1639.86
0	3.04	3.61	10.97	300.60	27.39	1903.93
0	3.02	3.51	10.60	321.10	30.29	1576.46
0	2.93	3.45	10.11	362.38	35.85	1974.46
0	2.88	3.67	10.57	375.11	35.49	1649.38
1	2.96	3.68	10.89	397.71	36.51	1982.11
1	2.95	3.48	10.27	378.76	36.89	2147.28
1	2.96	3.47	10.27	404.40	39.37	1949.17
1	2.99	3.49	10.44	367.66	35.23	1824.93
1	2.98	3.56	10.61	335.66	31.64	1805.90
2	3.12	3.68	11.48	425.84	37.09	1724.04
2	2.96	3.60	10.66	396.92	37.25	1669.90
2	3.01	3.65	10.99	407.61	37.10	1695.97
2	3.05	3.65	11.13	414.47	37.23	1689.10
2	3.02	3.60	10.87	392.82	36.13	1597.35
3	3.07	3.45	10.59	358.31	33.83	1658.70
3	3.10	3.53	10.94	392.00	35.82	2062.10
3	3.10	3.45	10.70	385.37	36.03	1893.99
3	3.12	3.45	10.76	354.22	32.91	1700.74
3	3.12	3.52	10.98	395.17	35.98	1925.98

ABS						
Contenido de nanoarcillas (wt. %)	b (mm)	e (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Wm (J)	Wb (kJ/m <sup>2</sup> )
0	7.98	3.72	29.69	137.21	0.16	5.2
0	7.85	3.89	30.54	189.38	0.12	4.0
0	7.83	3.82	29.91	99.97	0.05	1.7
0	7.80	3.88	30.26	130.22	0.10	3.1
0	7.86	3.91	30.73	125.24	0.17	5.5
0	7.80	3.92	30.58	122.06	0.10	3.4
0	7.77	3.50	27.20	98.76	0.08	3.0
0	7.92	3.78	29.94	223.62	0.22	7.3
0	7.84	3.81	29.87	92.44	0.06	2.1
0	7.83	3.81	29.83	187.30	0.13	4.2
0	7.89	3.86	30.46	118.96	0.10	3.3
2	7.75	3.92	30.38	116.09	0.06	1.8
2	7.83	3.88	30.38	102.87	0.05	1.6
2	7.84	3.97	31.12	149.25	0.06	1.9
2	7.82	3.86	30.19	90.59	0.07	2.3
2	7.86	3.82	30.03	143.86	0.06	1.9
2	7.89	3.90	30.77	110.36	0.05	1.7
2	7.80	3.80	29.64	82.71	0.04	1.4
2	7.80	3.80	29.64	94.14	0.08	2.7
2	7.88	3.80	29.94	147.35	0.06	1.9
2	7.87	3.86	30.38	153.27	0.05	1.8
3	7.86	3.93	30.89	117.25	0.09	2.9
3	7.82	3.92	30.65	159.22	0.06	2.1
3	7.86	3.85	30.26	125.94	0.06	1.9
3	7.87	3.90	30.69	161.80	0.06	2.0
3	7.92	3.88	30.73	135.97	0.09	2.8
3	7.92	3.90	30.89	118.92	0.09	3.0
3	7.93	3.95	31.32	112.66	0.06	1.8
3	7.89	3.85	30.38	120.81	0.09	2.9
3	7.87	4.05	31.87	157.11	0.06	1.9
3	7.80	3.77	29.41	76.88	0.04	1.4

PLA						
Temperatura de impresión (°C)	e (mm)	b (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo elástico (MPa)
200	3.34	3.45	11.52	645.34	56.00	2993.85
200	3.33	3.46	11.52	671.89	58.32	3081.37
200	3.30	3.46	11.42	640.94	56.13	2828.81
200	3.33	3.46	11.52	625.14	54.26	2747.60
200	3.40	3.50	11.90	677.98	56.97	3240.77
210	3.10	3.40	10.54	634.93	60.24	3613.15
210	3.10	3.35	10.39	595.16	57.31	2968.02
210	3.10	3.45	10.70	600.21	56.12	3162.80
210	3.15	3.45	10.87	591.47	54.43	3319.27
210	3.20	3.45	11.04	596.33	54.02	3305.30
210	3.15	3.30	10.40	604.45	58.15	3674.20
220	3.35	3.50	11.73	678.81	57.89	3085.82
220	3.25	3.50	11.38	657.20	57.78	3157.80
220	3.30	3.60	11.88	663.29	55.83	3525.22
220	3.30	3.55	11.72	679.94	58.04	4008.70
220	3.35	3.55	11.89	722.43	60.75	3370.64
220	3.35	3.60	12.06	667.59	55.36	3291.80
230	3.20	3.45	11.04	661.31	59.90	3102.05
230	3.30	3.55	11.72	716.25	61.14	3504.79
230	3.30	3.60	11.88	699.37	58.87	3404.19
230	3.30	3.55	11.72	679.05	57.96	2788.17
230	3.20	3.35	10.72	628.08	58.59	2528.29
240	3.25	3.65	11.86	686.77	57.89	3312.87
240	3.20	3.55	11.36	677.67	59.65	3318.52
240	3.20	3.55	11.36	681.52	59.99	3681.34
240	3.25	3.55	11.54	729.04	63.19	3395.96
240	3.20	3.50	11.20	672.76	60.07	3250.25
250	3.20	3.60	11.52	697.71	60.56	3154.09
250	3.20	3.55	11.36	708.81	62.40	2808.31
250	3.20	3.60	11.52	713.00	61.89	2895.86
250	3.15	3.55	11.18	679.65	60.78	3012.32
250	3.25	3.55	11.54	695.63	60.29	3266.41
260	3.18	3.66	11.64	658.50	56.58	2857.25
260	3.24	3.54	11.47	622.03	54.23	3040.30
260	3.17	3.74	11.86	663.98	56.00	3312.63
260	3.18	3.73	11.86	637.68	53.76	2684.97
260	3.19	3.68	11.74	654.72	55.77	3100.98
260	3.25	3.65	11.86	638.84	53.85	3455.49
270	3.29	3.79	12.47	661.38	53.04	3071.73
270	3.18	3.76	11.96	618.50	51.73	2973.50
270	3.19	3.79	12.09	659.33	54.54	2937.66
270	3.26	3.81	12.42	670.28	53.97	3622.28
270	3.22	3.78	12.17	636.12	52.26	3041.18
270	3.05	3.71	11.32	604.32	53.41	3005.03

PLA						
Altura de capa (mm)	e (mm)	b (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo elástico (MPa)
0.30	3.28	3.66	12.00	681.39	56.76	3241.20
0.30	3.26	3.56	11.61	690.54	59.50	3090.92
0.30	3.29	3.68	12.11	667.27	55.11	3247.40
0.30	3.28	3.58	11.74	635.26	54.10	3028.82
0.30	3.30	3.68	12.14	716.75	59.02	3012.52
0.25	3.35	3.62	12.13	679.79	56.06	2928.73
0.25	3.27	3.69	12.07	704.30	58.37	3396.15
0.25	3.34	3.61	12.06	684.70	56.79	2992.41
0.25	3.43	3.64	12.49	639.96	51.26	3226.83
0.25	3.33	3.68	12.25	704.97	57.53	3298.43
0.20	3.20	3.45	11.04	661.31	59.90	3102.05
0.20	3.30	3.55	11.72	716.25	61.14	3504.79
0.20	3.30	3.60	11.88	699.37	58.87	3404.19
0.20	3.30	3.55	11.72	679.05	57.96	2788.17
0.20	3.20	3.35	10.72	628.08	58.59	2528.29
0.15	3.24	3.58	11.60	683.26	58.91	3183.92
0.15	3.27	3.45	11.28	663.65	58.83	2942.04
0.15	3.31	3.54	11.72	681.88	58.19	3153.41
0.15	3.19	3.58	11.42	658.14	57.63	3308.46
0.15	3.36	3.51	11.79	672.52	57.02	3091.43
0.10	3.24	3.49	11.31	674.91	59.69	3561.05
0.10	3.24	3.42	11.08	630.28	56.88	4303.82
0.10	3.27	3.49	11.41	639.44	56.03	3777.67
0.10	3.28	3.42	11.22	682.00	60.80	3164.50
0.10	3.39	3.40	11.53	672.22	58.32	3079.28

PLA						
Angulo de impresión (°)	e (mm)	b (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo elástico (MPa)
0	3.20	3.45	11.04	661.31	59.90	3102.05
0	3.30	3.55	11.715	716.25	61.14	3504.79
0	3.30	3.60	11.88	699.37	58.87	3404.19
0	3.30	3.55	11.715	679.05	57.96	2788.17
0	3.20	3.35	10.72	628.08	58.59	2528.29
45	3.33	3.5	11.655	667.79	57.30	3094.94
45	3.39	3.59	12.17	702.07	57.69	3013.47
45	3.36	3.53	11.861	670.25	56.51	2948.55
45	3.36	3.58	12.029	679.79	56.51	4372.53
45	3.23	3.48	11.24	643.75	57.27	3307.08
90	3.09	3.38	10.444	567.11	54.30	2810.91
90	3.16	3.41	10.776	575.99	53.45	2887.74
90	3.14	3.51	11.021	630.04	57.17	3169.37
90	3.11	3.43	10.667	564.01	52.87	3251.60
90	3.1	3.48	10.788	546.42	50.65	2898.36
0/90	3.29	3.5	11.515	635.77	55.21	3053.90
0/90	3.15	3.52	11.088	623.84	56.26	3218.94
0/90	3.26	3.52	11.475	641.43	55.90	2626.08
0/90	3.22	3.49	11.238	638.04	56.78	2766.49
0/90	3.28	3.44	11.283	623.51	55.26	3090.43
0/90	3.3	3.53	11.649	641.28	55.05	3011.19
45/-45	3.38	3.5	11.83	627.96	53.08	3269.11
45/-45	3.33	3.54	11.788	674.41	57.21	3108.60
45/-45	3.3	3.57	11.781	657.32	55.79	3583.42
45/-45	3.31	3.55	11.751	646.23	55.00	3994.81
45/-45	3.26	3.57	11.638	670.56	57.62	3040.21
0/45/90	3.19	3.57	11.388	681.62	59.85	2923.70
0/45/90	3.2	3.48	11.136	648.43	58.23	3528.17
0/45/90	3.24	3.58	11.599	646.28	55.72	3361.69
0/45/90	3.27	3.42	11.183	642.54	57.46	3033.48
0/45/90	3.24	3.62	11.729	709.04	60.45	2862.62
0/45/90	3.24	3.49	11.308	623.90	55.18	3612.34
0/45/90/135	3.33	3.53	11.755	644.13	54.80	3313.09
0/45/90/135	3.19	3.41	10.878	612.73	56.33	3322.03
0/45/90/135	3.31	3.62	11.982	610.28	50.93	2765.99
0/45/90/135	3.25	3.56	11.57	617.98	53.41	2768.11
0/45/90/135	3.28	3.49	11.447	637.59	55.70	3245.55

PLA						
Angulo de impresión (°)	b (mm)	e (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Wm (J)	Wb (kJ/m <sup>2</sup> )
0	8.00	3.94	31.52	180.43	0.06	2.0
0	8.40	3.88	32.59	172.69	0.07	2.0
0	7.96	4.00	31.84	218.94	0.01	0.4
0	8.06	3.94	31.76	207.90	0.08	2.4
0	8.17	3.84	31.37	150.74	0.08	2.5
0	8.08	3.84	31.03	180.82	0.06	2.1
0	7.97	4.07	32.44	210.91	0.06	2.0
0	8.00	3.90	31.20	132.52	0.08	2.5
0	8.06	3.93	31.68	131.56	0.07	2.1
0	8.00	3.90	31.20	173.20	0.07	2.2
45	7.99	4.04	32.28	160.55	0.06	1.9
45	8.04	4.10	32.96	202.22	0.01	0.4
45	8.10	4.12	33.37	194.18	0.05	1.5
45	8.00	4.11	32.88	216.90	0.07	2.2
45	7.99	4.05	32.36	211.20	0.01	0.4
45	7.98	4.10	32.72	15853.08	0.22	6.9
45	7.92	4.07	32.23	214.70	0.01	0.4
45	8.08	4.09	33.05	298.62	0.08	2.5
45	7.90	4.10	32.39	206.23	0.07	2.2
45	7.98	4.07	32.48	195.28	0.05	1.6
90	7.94	4.15	32.95	298.10	0.09	2.6
90	8.04	4.05	32.56	210.38	0.08	2.4
90	8.05	4.02	32.36	266.00	0.08	2.4
90	8.05	4.18	33.65	177.64	0.07	2.0
90	8.15	4.00	32.60	244.17	0.08	2.4
90	8.08	4.08	32.97	256.84	0.08	2.4
90	8.03	4.01	32.20	177.27	0.05	1.4
90	8.03	4.01	32.20	295.78	0.09	2.7
90	8.01	4.12	33.00	282.55	0.08	2.5
90	7.96	4.15	33.03	261.34	0.07	2.2
0/90	8.12	4.10	33.29	264.95	0.09	2.6
0/90	8.04	4.08	32.80	196.32	0.05	1.6
0/90	8.00	4.06	32.48	199.34	0.08	2.4
0/90	8.06	3.97	32.00	167.07	0.05	1.7
0/90	8.12	4.16	33.78	234.93	0.12	3.6
0/90	8.02	4.14	33.20	215.47	0.12	3.6
0/90	8.12	4.12	33.45	210.27	0.09	2.6
0/90	8.01	4.09	32.76	250.15	0.09	2.6
0/90	8.02	4.09	32.80	213.77	0.05	1.6
0/90	7.90	4.15	32.79	208.04	0.09	2.7

PLA						
Angulo de impresión (°)	b (mm)	e (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Wm (J)	Wb (kJ/m <sup>2</sup> )
45/-45	8.05	4.08	32.84	202.77	0.06	1.7
45/-45	8.17	4.07	33.25	223.65	0.05	1.6
45/-45	8.07	4.02	32.44	220.95	0.09	2.7
45/-45	7.96	4.09	32.56	318.80	0.09	2.6
45/-45	8.03	4.11	33.00	252.43	0.08	2.4
45/-45	7.98	4.15	33.12	202.77	0.07	2.1
45/-45	8.05	4.01	32.28	254.19	0.09	2.7
45/-45	7.97	4.02	32.04	257.66	0.09	2.7
45/-45	8.00	4.16	33.28	245.54	0.05	1.6
45/-45	8.07	4.02	32.44	225.97	0.08	2.5
0/45/90	7.94	4.07	32.32	250.15	0.08	2.4
0/45/90	8.13	4.16	33.82	252.47	0.09	2.7
0/45/90	7.88	4.06	31.99	195.34	0.01	0.4
0/45/90	7.94	4.16	33.03	241.13	0.07	2.3
0/45/90	8.00	4.12	32.96	221.04	0.01	0.4
0/45/90	7.98	4.15	33.12	237.91	0.08	2.3
0/45/90	8.09	4.14	33.49	267.46	0.09	2.8
0/45/90	8.11	4.07	33.01	218.96	0.09	2.7
0/45/90	7.98	4.10	32.72	255.95	0.09	2.8
0/45/90	7.99	4.12	32.92	207.98	0.07	2.2
0/45/90/135	7.92	3.96	31.36	167.73	0.06	1.8
0/45/90/135	8.07	4.00	32.28	238.43	0.09	2.6
0/45/90/135	7.89	4.11	32.43	219.53	0.08	2.3
0/45/90/135	8.06	3.89	31.35	171.72	0.06	1.8
0/45/90/135	7.89	4.09	32.27	195.91	0.08	2.5

PLA						
Contenido de nanoarcillas (wt. %)	e (mm)	b (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo elástico (MPa)
0	3.13	3.78	11.83	659.34	55.73	3121.66
0	3.02	3.41	10.30	581.22	56.44	2856.44
0	2.85	3.55	10.12	556.05	54.96	3164.87
0	3.14	3.60	11.30	618.26	54.69	3015.24
0	3.27	3.50	11.45	585.64	51.17	2530.59
1	3.07	3.50	10.75	598.84	55.73	3030.70
1	3.30	3.57	11.78	626.35	53.17	3006.50
1	2.88	3.61	10.40	564.87	54.33	3158.67
1	3.27	3.55	11.61	601.02	51.77	3137.01
1	2.90	3.50	10.15	540.67	53.27	2926.82
2	2.65	3.73	9.88	425.73	43.07	2527.28
2	3.35	3.60	12.06	622.85	51.65	3327.53
2	3.18	3.95	12.56	624.80	49.74	2721.01
2	3.20	3.63	11.62	603.11	51.92	2731.32
2	3.15	3.65	11.50	590.47	51.36	2680.10
2	3.23	3.66	11.82	611.96	51.77	2829.57
2	2.97	3.50	10.40	534.97	51.46	2481.83
3	2.93	3.42	10.02	536.10	53.50	2999.99
3	2.98	3.39	10.10	538.86	53.34	2876.56
3	3.07	3.54	10.87	565.04	51.99	2856.00
3	3.21	3.53	11.33	571.66	50.45	2935.32
3	3.03	3.43	10.39	537.71	51.74	2919.81
3	2.95	3.51	10.35	534.02	51.57	3373.31

PLA						
Contenido de nanoarcillas (wt. %)	b (mm)	e (mm)	Ao (mm <sup>2</sup> )	Fmax (N)	Wm (J)	Wb (kJ/m <sup>2</sup> )
0	7.83	4.13	32.34	180.83	0.08	2.3
0	7.77	3.93	30.54	149.84	0.01	0.4
0	7.91	3.94	31.17	158.19	0.04	1.4
0	7.75	4.00	31.00	165.23	0.07	2.2
0	7.88	3.70	29.16	135.95	0.06	2.2
0	7.72	3.93	30.34	150.19	0.04	1.4
0	7.85	3.72	29.20	157.16	0.04	1.5
0	7.74	3.95	30.57	146.89	0.01	0.4
0	7.82	3.71	29.01	120.12	0.05	1.8
0	7.83	4.00	31.32	154.27	0.04	1.3
1	7.96	3.90	31.04	179.33	0.05	1.5
1	7.91	3.86	30.53	143.24	0.06	1.9
1	7.86	3.86	30.34	155.06	0.04	1.4
1	7.82	3.80	29.72	175.59	0.06	2.1
1	7.78	3.80	29.56	132.31	0.04	1.3
1	7.82	3.92	30.65	134.23	0.06	1.9
1	7.80	3.82	29.80	122.95	0.05	1.7
1	7.83	3.91	30.62	135.77	0.05	1.7
1	7.80	3.83	29.87	109.35	0.05	1.8
1	7.97	3.94	31.40	120.56	0.04	1.3
2	7.80	4.05	31.59	175.35	0.01	0.5
2	7.88	3.94	31.05	179.84	0.07	2.3
2	7.79	3.98	31.00	157.15	0.01	0.4
2	7.84	3.97	31.12	183.66	0.05	1.6
2	7.85	3.95	31.01	154.99	0.05	1.5
2	7.86	3.97	31.20	148.37	0.05	1.7
2	7.92	3.89	30.81	165.24	0.05	1.6
2	7.76	3.98	30.88	135.45	0.01	0.3
2	7.90	3.88	30.65	156.24	0.01	0.3
3	8.14	4.21	34.27	212.27	0.01	0.4
3	8.08	4.04	32.64	226.46	0.07	2.2
3	8.14	4.09	33.29	196.11	0.07	2.2
3	7.94	4.12	32.71	181.98	0.01	0.4
3	7.90	4.02	31.76	184.91	0.07	2.3
3	7.94	3.76	29.85	132.30	0.09	3.2
3	7.93	3.70	29.34	154.05	0.06	2.1
3	7.87	3.95	31.09	2497.43	0.01	0.2
3	7.95	3.76	29.89	135.36	0.06	2.0
3	8.01	3.92	31.40	135.15	0.05	1.6



## **Anexo 2**

### ***Materiales***

**Grade: ABS448T, ABS448TUV**  
 Molding Grade ABS and w/ UV

326 Jack Burlingame Dr, Millwood, WV 25262 USA  
 Phone: 304.273.0352, Fax: 304.273.0355

## Typical Material Properties

Physical	Nominal Values	ASTM Test
Specific Gravity	1.04	D792
Melt Flow (230 °C/3.8 kg)	5.0 g/10 min	D1238
<b>Mechanical</b>		
Tensile Modulus	350,000 psi	D638
Tensile Strength at Yield	6,500 psi	D638
Flexural Modulus	350,000 psi	D790
Flexural Strength at Yield	10,500 psi	D790
<b>Impact</b>		
Notched Izod Impact (73 °F, 0.125 in)	5.0 ft-lb/in	D256
<b>Thermal</b>		
DTUL @ 264 psi-unannealed (0.125 in)	183 °F	D648
<b>Mold Shrinkage</b>		
Linear Flow	.004 - .008 in/in	D955
<b>UL Rating</b>	<b>HB (1.5 mm)</b>	<b>UL 94</b>

The information provided above is based upon typical values, and are intended only as guides. Star Plastics, Inc./SDR Inc assumes no obligation or liability for any advice furnished or for any results obtained with respect to this information. **No guarantees or warranties are expressed or implied.**

\*STARPRIME™, VALUPAK™, & UTILITY™ are registered trademarks of Star Plastics Inc; SDR Plastics Inc, its subsidiaries or affiliates.

## Recommended Processing Guidelines

	Nominal Values
Drying Time and Temperature	2.0 - 4.0 hrs at 180 - 200 °F
Suggested Max Moisture	0.15%
Rear Temperature	370 - 425 °F
Middle Temperature	400 - 450 °F
Front Temperature	425 - 475 °F
Nozzle Temperature	425 - 525 °F
Processing (melt) Temperature	425 - 525 °F
Mold Temperature	120 - 170 °F
Back Pressure	25 - 100 psi
Screw Speed	25 - 75 rpm

The conditions listed above are only guidelines. You may want to adjust conditions to meet your requirements.

**Your Competitive Advantage in an Ever Changing Market!**

# Ingeo™ Biopolymer 4043D Technical Data Sheet

## Biaxially Oriented Films – General Purpose

### Film Characteristics/ Applications

Ingeo 4043D – a product from NatureWorks LLC – can be converted into a biaxially oriented film with use temperatures up to 265°F (130°C). This film has excellent optics, good machinability and excellent twist and deadfold. These properties make 4043D film an ideal candidate for candy twist wrap and other packaging applications. Additional properties include advantageous barrier to flavor and grease and superior oil resistance.

### Polymer Characteristics

4043D polymer is available in pellet form. Drying prior to processing is essential. The polymer is stable in the molten state, provided that the extrusion and drying procedures are followed.

### Machine Configuration

Ingeo polymers will process on conventional extruders using general purpose screws with L/D ratios from 24:1 to 30:1 and compression ratio of 2.5:1 to 3:1. Smooth barrels are recommended. Ingeo resins will process on conventional cast tenter equipment that has been designed for OPS or OPET with minimal modifications. Optimization to your specific equipment may require NatureWorks LLC technical support

### Process Details

#### Startup and Shutdown

Ingeo 4043D is not compatible with a wide variety of polyolefin resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or high MFR polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce Ingeo polymer into the extruder at the operating conditions used in Step 1.
4. Once Ingeo polymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

### Typical Material & Application Properties <sup>(1, 2, 3)</sup>

Film Properties		Ingeo 4043D	ASTM Method
Density		1.24 g/cc	D1505
Tensile Strength	MD	16 kpsi	D882
	TD	21 kpsi	D882
Tensile Modulus	MD	480 kpsi	D882
	TD	560 kpsi	D882
Elongation at Break	MD	160%	D882
	TD	100%	D882
Elmendorf Tear	MD	15 g/mil	D1922
	TD	13 g/mil	D1922
Spencer Impact		2.5 joules	
Transmission Rates	Oxygen	675 cc-mil/ m <sup>2</sup> -24hr-atm	D1434
	Carbon Dioxide	2,850 cc-mil/ m <sup>2</sup> -24hr-atm	Internal
Water Vapor		375 g-mil/ m <sup>2</sup> -24hr	F1249
Optical Characteristics	Haze	2.1%	D1003
	Gloss, 20°	90	D1003
Thermal Characteristics	Melting Point	145-160°C	D3418

- (1) Typical properties; not to be construed as specifications.
- (2) All properties measured on 1.0 mil film.
- (3) Typical values for a film oriented 3.5x in MD and 5x in TD.

### Processing Temperature Profile

Melt Temp.	410±15°F	210±8 °C
Feed Throat	113°F	45°C
Feed Temp.	355°F	180°C
Compression Section	375°F	190°C
Metering Section	390°F	200°C
Adapter	390°F	200°C
Die	390°F	200°C
Screw Speed	20-100 rpm	
MD Draw Temp.	140-160°F	60-70°C
TD Draw Temp.	160-175°F	70-80°C

### Drying

In-line drying is required. A moisture content of less than 0.025% (250ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Typical drying conditions are 4 hours at 175°F (80°C) or to a dew point of -30°F (-35°C), with an airflow rate greater than 0.5 cfm/lb of resin throughput. The resin should not be exposed to atmospheric

conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly reseal any unused material.

## Food Packaging Status

---

### U.S. Status

On January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at

<http://www.fda.gov/food/ingredientspackaginglabeling/packagingfcs/notifications/default.htm>

This grade of Ingeo biopolymer may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced Ingeo biopolymer formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use. Again, for any application, should you need further clarification, please do not hesitate to contact NatureWorks LLC.

### European Status

This grade of Ingeo biopolymer complies with Plastics Regulation 10/2011 as amended. No SML's for the above referenced grade exist in Plastics Regulation 10/2011 as amended. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU- Plastics Regulation 10/2011, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm<sup>2</sup> of the overall migration from finished plastic articles into food. In accordance with Plastics Regulation 10/2011 the migration should be measured on

finished articles placed into contact with the foodstuff or appropriate food simulants for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in Plastics Regulation 10/2011.

Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements.

This grade as supplied meets European Parliament and Council Directive 94/62/EC of 20 December 1994 on packaging and packaging waste heavy metal content as described in Article 11.

Should you need further clarification, contact NatureWorks LLC.

## Bulk Storage Recommendations

---

The resin silos recommended and used by NatureWorks LLC are designed to maintain dry air in the silo and to be isolated from the outside air. This design would be in contrast to an open, vented to atmosphere system that we understand to be a typical polystyrene resin silo. Key features that are added to a typical (example: polystyrene) resin silo to achieve this objective include a cyclone and rotary valve loading system and some pressure vessel relief valves. The dry air put to the system is sized to the resin flow rate out of the silo. Not too much dry air would be needed and there may be excess instrument air (-30°F dew point) available in the plant to meet the needs for dry air. Our estimate is 10 scfm for a 20,000 lb/hr rate resin usage. Typically, resin manufacturers specify aluminum or stainless steel silos for their own use and avoid epoxy-lined steel.

## Safety and Handling Considerations

Safety Data Sheets (SDS) for Ingeo biopolymers are available from NatureWorks. SDS's are provided to help customers satisfy their own handling, safety, and disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations. SDS's are updated regularly; therefore, please request and review the most current SDS's before handling or using any product.

*The following comments apply only to Ingeo biopolymers; additives and processing aids used in fabrication and other materials used in finishing steps have their own safe-use profile and must be investigated separately.*

## Hazards and Handling Precautions

Ingeo biopolymers have a very low degree of toxicity and, under normal conditions of use, should pose no unusual problems from incidental ingestion or eye and skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins, and good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Pellets or beads may present a slipping hazard.

No other precautions other than clean, body-covering clothing should be needed for handling Ingeo biopolymers. Use gloves with insulation for thermal protection when exposure to the melt is localized. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication.

Handling and fabrication of resins can result in the generation of vapors and dusts that may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, use an approved dust respirator.

Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. At temperatures exceeding the polymer melt temperature (typically 175°C), polymer can release fumes, which may contain fragments of the polymer, creating a potential to irritate eyes and mucous membranes. Good general ventilation should be sufficient for most conditions. Local exhaust ventilation is recommended for melt operations. Use safety glasses (or goggles) to prevent exposure to particles, which could cause mechanical injury to the eye. If vapor exposure causes eye discomfort, improve localized fume exhausting methods or use a full-face respirator.

The primary thermal decomposition product of PLA is acetaldehyde, a material also produced during the thermal degradation of PET. Thermal decomposition products also include carbon monoxide and hexanal, all of which exist as gases at normal room conditions. These species are highly flammable, easily ignited by spark or flame, and can also auto ignite. For polyesters such as PLA, thermal

decomposition producing flammable vapors containing acetaldehyde and carbon monoxide can occur in almost any process equipment maintaining PLA at high temperature over longer residence times than typically experienced in extruders, fiber spinning lines, injection molding machines, accumulators, pipe lines and adapters. As a rough guideline based upon some practical experience, significant decomposition of PLA will occur if polymer residues are held at temperatures above the melting point for prolonged periods, e.g., in excess of 24 hours at 175°C, although this will vary significantly with temperature.

## Combustibility

Ingeo biopolymers will burn. Clear to white smoke is produced when product burns. Toxic fumes are released under conditions of incomplete combustion. Do not permit dust to accumulate. Dust layers can be ignited by spontaneous combustion or other ignition sources. When suspended in air, dust can pose an explosion hazard. Firefighters should wear positive-pressure, self-contained breathing apparatuses and full protective equipment. Water or water fog is the preferred extinguishing medium. Foam, alcohol-resistant foam, carbon dioxide or dry chemicals may also be used. Soak thoroughly with water to cool and prevent re-ignition.

## Disposal

DO NOT DUMP INTO ANY SEWERS, ON THE GROUND, OR INTO ANY BODY OF WATER. For unused or uncontaminated material, the preferred option is to recycle into the process otherwise, send to an incinerator or other thermal destruction device. For used or contaminated material, the disposal options remain the same, although additional evaluation is required. Disposal must be in compliance with Federal, State/Provincial, and local laws and regulations.

## Environmental Concerns

Generally speaking, lost pellets, while undesirable, are benign in terms of their physical environmental impact, but if ingested by wildlife, they may mechanically cause adverse effects. Spills should be minimized, and they should be cleaned up when they happen. Plastics should not be discarded into the environment.

## Product Stewardship

NatureWorks has a fundamental duty to all those that use our products, and for the environment in which we live. This duty is the basis for our Product Stewardship philosophy, by which we assess the health and environmental information on our products and their intended use, and then take appropriate steps to protect the environment and the health of our employees and the public.

## Customer Notice

NatureWorks encourages its customers and potential users of its products to review their applications from the standpoint of human health and environmental quality. To help ensure our products are not used in ways for which they

were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts. NatureWorks literature should be consulted prior to the use of the company's products.

### NOTICE:

No freedom from infringement of any patent owned by NatureWorks LLC or others is to be inferred. No information in this publication can be considered a suggestion to infringe patents.

The technical information, recommendations and other statements contained in this document are based upon tests or experience that NatureWorks believes are reliable, but the accuracy or completeness of such information is not guaranteed. Many factors beyond NatureWorks control can affect the use and performance of a NatureWorks product in a particular application, including the conditions under which the product is used and the time and environmental conditions in which the product is expected to perform. Since these factors are uniquely within the user's knowledge or control, it is essential that the user evaluate the NatureWorks product to determine whether it is fit for a particular purpose and suitable for the user's method of application. In addition, because use conditions are outside of NatureWorks control and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is solely responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace, use and disposal practices are in compliance with applicable laws and regulations. NatureWorks LLC assumes no obligation or liability for the information in this document.

NATUREWORKS MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING THE INFORMATION CONTAINED HEREIN OR ITS PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO ANY WARRANTY AS TO ACCURACY OR COMPLETENESS OF INFORMATION, OR ANY IMPLIED WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

**NOTICE REGARDING PROHIBITED USE RESTRICTIONS:** Unless specifically agreed to in writing by NatureWorks, NatureWorks LLC will not knowingly sell or sample any product into any of the following commercial or developmental applications (i) components of or packaging for tobacco products, (ii) components of products intended for human or animal consumption, (iii) any application that is intended for any internal contact with human body fluids or body tissues, (iv) as a critical component in any medical device that supports or sustains human life, (v) in any product that is designed specifically for ingestion or internal use by pregnant women, (vi) in any application designed specifically to promote or interfere with human reproduction, (vii) in microbeads, including those used in personal care/cosmetic applications, or (viii) to manufacture bottles or bottle pre-forms in North America.

For additional information please contact NatureWorks via our [website](#) on the tab called [FAQ's](#) or by clicking [here](#).



15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, MN 55345

3050 Spruce Street, Saint Louis, MO 63103, USA

Website: [www.sigmaldrich.com](http://www.sigmaldrich.com)Email USA: [techserv@sial.com](mailto:techserv@sial.com)Outside USA: [eurtechserv@sial.com](mailto:eurtechserv@sial.com)

## Product Specification

Product Name:

Nanoclay, surface modified – contains 0.5–5 wt. % aminopropyltriethoxysilane, 15–35 wt. % octadecylamine

Product Number:

682632

**TEST****Specification**

Appearance (Color)

White to Off-White

Appearance (Form)

Powder

Loss on Drying

≤ 3.0 %

Size

≤ 20 micron

Density

200 - 500 kg/m<sup>3</sup>

(Bulk Density)

Specification: PRD.0.ZQ5.10000023839

Sigma-Aldrich warrants, that at the time of the quality release or subsequent retest date this product conformed to the information contained in this publication. The current Specification sheet may be available at [Sigma-Aldrich.com](http://Sigma-Aldrich.com). For further inquiries, please contact Technical Service. Purchaser must determine the suitability of the product for its particular use. See reverse side of invoice or packing slip for additional terms and conditions of sale.



## **Anexo 3**

### ***Parámetros de extrusión***

	<b>ABS</b>	<b>PLA</b>
T Zona 1 (°C)	90	60
T Zona 2 (°C)	210	190
T Zona 3 (°C)	225	220
T Zona 4 (°C)	225	220
T Zona 5 (°C)	225	220
T Zona 6 (°C)	225	220
T Zona 7 (°C)	225	220
T Zona 8 (°C)	225	220
T Zona 9 (°C)	220	220
T Zona 10 (°C)	215	215
Velocidad del tornillo (RPM)	140	90
Velocidad de alimentación (RPM)	13	9

*\* los mismos parametros fueron usados al introducir las nanoacillas en el ABS y PLA*