

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MEZCLAS
HETEROGÉNEAS POLIMÉRICAS OBTENIDAS MEDIANTE
EL MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (3D)

Ing. HOLGER ANTONIO CACUA RIVERA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
JULIO 2018

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MEZCLAS
HETEROGÉNEAS POLIMÉRICAS OBTENIDAS MEDIANTE
EL MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (3D)

Ing. HOLGER ANTONIO CACUA RIVERA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL
TITULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Directores:

Dr. CESAR AUGUSTO PEÑA CORTÉS

Dr. BLADIMIR AZDRUBAL RAMÓN VALENCIA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

JULIO 2018

*A Dios por darme perseverancia para no desistir en lo momentos difíciles,
y sabiduría para enfrentar los retos que demandaron este proyecto*

*A mis padres Manuel Antonio Tacua Jaimés y Doris Rivera Vera,
a mis Hermanos Ricardo Tacua Rivera y Carolina Tacua Rivera,
a sobrinitas, Valentina, Estefanía y Aysell siempre un gran apoyo
para alcanzar las metas.*

*A mi esposa Diana y a mi hermoso hijo Dylan, quienes con su apoyo,
comprensión y amor incondicional, me motivaron y me impulsaron para
para no desfallecer.*

Holger Antonio Tacua Rivera

AGRADECIMIENTOS

A mis directores Cesar Peña y Bladimir Ramón, por el tiempo, la motivación, las enseñanzas y toda la ayuda prestada para alcanzar esta meta.

Al ingeniero en formación Anderson Sánchez por todo su apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Andrés Granados por su colaboración en el laboratorio de impresión 3D de la Universidad de Pamplona.

A los ingenieros Jonathan Pavón y Adrián Patiño encargados de los laboratorios MMI de la Universidad de Pamplona la calidad en el servicio del laboratorio de soldadura y el Laboratorio de máquinas y herramientas donde se fabricó la impresora 3D. También el laboratorio de materiales para la realización de los ensayos de flexión y de tracción.

A todas las personas que de una u otra manera aportaron su granito de arena para culminar con éxito este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	MARCO TEORICO.....	3
2.1	Materiales Poliméricos	3
2.1.1	Generalidades	3
2.1.2	Estructura de los polímeros	4
2.1.3	Cristalinidad de los polímeros	7
2.1.4	Procesos de Fabricación de piezas con polímeros.....	8
2.1.5	Comportamiento mecánico de los polímeros	8
2.2	Modelado por deposición fundida FDM o impresión 3D	11
2.2.1	Principios básicos de la técnica de FDM.....	11
2.2.2	Técnicas de impresión 3D	12
2.2.3	Partes y tipos de impresoras 3D	14
2.2.4	Impresoras de Deposición Fundida	16
2.2.5	Materiales utilizados en impresión 3D	19
2.3	Antecedentes de investigaciones en modelado por deposición fundida.....	20
3	OBJETIVOS	25
3.1	Objetivo general	25
3.2	Objetivos específicos.....	25
4	DESARROLLO EXPERIMENTAL	26
4.1	Fabricación de la impresora 3D.....	26
4.1.1	Modificaciones realizadas a la estructura.....	29
4.1.2	Modificaciones realizadas al eje x.....	31
4.1.3	Modificaciones realizadas al eje y.....	34
4.1.4	Modificaciones realizadas en el eje Z.....	38

4.1.5	Diseños de piezas propios de la investigación.....	41
4.1.6	Electrónica de la impresora	41
4.1.7	Accesorios requeridos para fabricar la impresora.	47
4.2	Materiales utilizados para la fabricación de las probetas	48
4.2.1	Ácido Poli Láctico (PLA).....	49
4.2.2	Poliuretano termoplástico (TPU).....	49
4.3	Fabricación de probetas normalizadas para polímeros puros.....	51
4.3.1	Diseño de las probetas	51
4.3.2	Parámetros de impresión	53
4.4	Fabricación de probetas normalizadas para mezclas de polímeros	57
4.4.1	Diseño de las probetas	57
4.4.2	Parámetros de impresión.	57
4.5	Caracterización mecánica.....	60
4.5.1	Ensayo de tracción.....	60
4.5.2	Ensayo de flexión	62
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	64
5.1	Ensayo de tracción.....	64
5.2	Ensayos de flexión	68
5.3	Comparación de resultados con otras investigaciones reportadas en la literatura.	71
6	CONCLUSIONES	74
7	RECOMENDACIONES.....	75
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	77
	ANEXOS.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación de una cadena molecular de un polímero simple con números pliegues	5
Figura 2. Representación de las estructuras moleculares, (a) Lineal, (b) ramificada, (c) entrecruzada, (d) reticulada.	6
Figura 3. Representación de los copolímeros: (a) al azar, (b) alternados, (c) en bloque, (d) de injerto.	7
Figura 4. Fase amorfa, semicristalina y cristalina de un polímero según Beltran y Mancilla (2012).	8
Figura 5. Grafica esfuerzo deformación para fibras, plásticos rígidos, plásticos flexibles, elastómeros.	9
Figura 6. Funcionamiento de la estereolitografía	13
Figura 7. Funcionamiento de la Deposición de Material Fundido	14
Figura 8. Tipos de impresoras Delta	17
Figura 9. Imagen de una impresora cartesiana.	18
Figura 10. Imagen Impresora H-belt (Tomada de texsolab.net)	19
Figura 11. Prusa i3 Hephestos	27
Figura 12. Prusa i3 fabricada con madera.	29
Figura 13. Estructura metálica diseñada para la impresora 3D.	30
Figura 14. Adaptación de la pieza eje x izquierda	32
Figura 15. Adaptación de la pieza eje x derecha.	33
Figura 16. Finales de carrera.	34
Figura 17. Eje Y Prusa i3 Hephestos.	35
Figura 18. Adaptación de la pieza Eje Y esquina.	35
Figura 19. Transmisión de movimiento en el Eje Y .	36
Figura 20. Nuevo sistema de transmisión de movimiento Eje Y.	37
Figura 21. Soporte Eje Y motor.	38
Figura 22. Soportes motores Eje Z.	38
Figura 23 . Pieza Eje Z soporte motor	39
Figura 24. Barra trapezoidal.	39
Figura 25. Eje Z soporte superior.	40

Figura 26. Eje Z varilla lisa.....	40
Figura 27. Soporte para los extrusores.....	41
Figura 28. Caja de electrónica y soporte LCD.....	41
Figura 29. Representación del sistema electrónico de la impresora. Tomado de	42
Figura 30. Cama caliente.....	43
Figura 31. Hotend tipo diamante.....	43
Figura 32. Fallas en el hoten tipo diamante.	44
Figura 33. Hotend independiente de impresión directa.....	45
Figura 34. Representación de dos extrusores independientes.	46
Figura 35. Representación de una Ramps 1.4.	47
Figura 36. Probeta en forma de mancuerna para ensayos de tracción de polímeros.....	52
Figura 37. Probeta en forma de barra rectangular.	52
Figura 38. Diseño en Solig Word de probetas de tracción y de flexión.....	53
Figura 39. Ubicación de probetas de tracción en el software CAM para la fabricación.....	54
Figura 40. Ubicación de probetas de flexión en el software CAM para la fabricación.	55
Figura 41. Probetas normalizadas fabricadas con TPU y PLA para ensayos de flexión y de tracción.	57
Figura 42. Posición de fabricación de las 3 secciones que conforman la mezcla heterogénea en el software CAM.	58
Figura 43. Unión en el software CAM de las secciones que conforman la mezcla heterogénea. .	58
Figura 44. Configuración de parámetros para los extrusores.....	59
Figura 45. Probetas de tracción fabricadas con mezclas heterogéneas de materiales poliméricos.	59
Figura 46. Máquina Universal Shimadzu de ensayos UH 600 kNI y mordazas para ensayos de tensión.	61
Figura 47. Probetas de mezclas heterogéneas y materiales puros fabricadas para ensayos de tracción.....	61
Figura 48. Accesorio para ensayos de flexión.....	62
Figura 49. Ensayo de Tracción.....	64
Figura 50. Grafica esfuerzo deformación a tracción de las diferentes composiciones.	66
Figura 51. Gráfica esfuerzo deformación a escala del TPU.....	67

Figura 52. Ensayo de flexión.....	68
Figura 53. Gráfica esfuerzo deformación para el TPU y las diferentes combinaciones.	70

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de la impresora Prusa i3 Hephestos.....	28
Tabla 2. Otros materiales requeridos para la construcción de una impresora 3D.	47
Tabla 3. Propiedades mecánicas del PLA.	49
Tabla 4. Propiedades mecánicas del TPU	50
Tabla 5. Dimensiones de las probetas para ensayos de tracción.	53
Tabla 6. Dimensiones de las probetas para ensayos de flexión.	53
Tabla 7. Parámetros de impresión utilizados para la fabricación de las probetas	56
Tabla 8. Resultados ensayos de tracción.	65
Tabla 9. Resultados Ensayos de Flexión.	70
Tabla 10. Comparación de resultados con otras investigaciones.	72

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Velocidad de deformación.....	62
Ecuación 2. Esfuerzo de tracción.	64
Ecuación 3. Deformación máxima en tracción.	65
Ecuación 4. Módulo de elasticidad.....	65
Ecuación 5. Esfuerzo de flexión.....	68
Ecuación 6. Deformación máxima en flexión.	69
Ecuación 7. Módulo de flexión.	69

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Registro fotográfico construcción de la impresora	85
Anexo 2. Planos de algunas piezas diseñadas para la fabricación de la impresora.....	94
Anexo 3. Participación en el CIETA XII 2017	99
Anexo 4. Difusión de la información publicación en revista indexada.	101
Anexo 5. Documentos de generados por la maquina universal para cada ensayo.	119
Anexo 6. Cálculo de esfuerzos y deformación.....	121
Anexo 7. Difusión de la información. Ponencia Simposio	124
Anexo 8. Difusión de la información. Postulación para participar en el COMTELM 2018 Peru.	125

RESUMEN

La tecnología de las impresoras 3D ha irrumpido con fuerza últimamente para la creación de piezas pequeñas y es empleada en diversas áreas de interés. Es por tanto, una herramienta aplicada en la ingeniería biomédica, la educación, la electrónica, ingeniería forense, entre otras.

La impresión 3D se caracteriza por ser un proceso que consiste en la fabricación de elementos físicos a partir de un modelo computacional, por lo que se percibe como una forma de convertir una idea en un producto, pero que a su vez requiere el cumplimiento de una serie de parámetros y pasos que determinan su aplicabilidad.

Por tanto, la siguiente investigación tiene como propósito la caracterización mecánica de materiales, a partir de mezclas heterogéneas de polímeros, mediante el moldeo por deposición fundida (3D)

A través de su implementación, se pueden identificar las ventajas y desventajas, de acuerdo con las propiedades mecánicas obtenidas. Para tal fin, se prepararon probetas mediante la mezcla de materiales poliméricos (rígidos y flexibles). Inicialmente se realizó el diseño de las probetas basados en las normas ASTM utilizando un software CAD, posteriormente este diseño se transforma en un código G a través de un software CAM, y se establecieron los parámetros de fabricación para cada material. Una vez fabricadas las probetas, se ensayaron en condiciones estáticas bajo esfuerzos de tracción y flexión para determinar su comportamiento mecánico.

Como resultado de este proceso se obtiene un material formado mediante una mezcla heterogénea de poliméricos, que presenta mayor resistencia que los materiales flexibles tradicionales y mayor deformación que los materiales rígidos tradicionales. La mezcla se logra a través del uso de un extrusor implementado para fundir, considerando la diferencia en temperatura de fusión de los materiales, lo que permite ampliar el campo de aplicación de la tecnología de impresión 3D a sectores no explorados hasta el momento en la Ciencia e Ingeniería de los Materiales.

Palabras clave: Impresión 3D, polímeros, deposición de material fundido, extrusor, caracterización mecánica.

ABSTRACT

The technology of the 3D printers has entered strongly in the creation of small pieces and is used in diverse areas of interest lately. It is therefore it is applied a tool in the biomedical engineering, the education, the electronics, forensic engineering, among others.

The 3D impression is characterized for being a process which consists of the manufacture of physical elements from a computational model, what it is perceived as a way of turning an idea into a product, but that in turn needs the fulfillment of a series of parameters and steps that determine its applicability.

Therefore, the following mechanics of materials starting from a investigation has as an intention of the characterization of pieces obtained by means from heterogeneous mixtures of polymeric materials, which ask the construction of a 3D printer which allows the combination of thermoplastic materials with different characteristics.

Through its implementation, the advantages and disadvantages according to the. For that purpose its mechanical properties were prepared. For that, a serie of manometers were made by means of mixture of rigid polymers material: and flexible, which are submitted to test of traction and flexion to determine its mechanical properties.

This investigation is based on the ASTM D638 procedure for the tests of traction to plastic and the ASTM 790 for the bending tests. At the beginning the design of manometers is done based on the mentioned procedure by using a software CAD, later this design turns in a G code through a software CAM, to establish the manufacture parameters for every material. Once the manometers were tested in static conditions by flexion and traction efforts to determine the mechanic behavior

As a result from this process, a formed piece is obtained by means of a heterogeneous mixture of polymeric, which presents major resistance than the flexible traditional materials and major deformation than the rigid traditional materials, the mixture is obtained from chieves through the use of an extruder implemented to fuse, considering the difference in temperature of merger of the materials, which allows to extend the field of application of the technology of 3D impression to sectors not explored up to the moment Science and Engineering of the Materials at the moment.

Key Words: 3D impression, polymers, Deposition of molten material, extruder, Mechanical characterization.

1 INTRODUCCIÓN

Hoy día, en una época en la que la tecnología avanza a pasos agigantados, resulta imprescindible la concientización de los seres humanos con respecto a los nuevos retos y desafíos que se presentan a diario en la sociedad, esto con la finalidad de dar respuestas oportunas que satisfagan las necesidades esenciales de los individuos. En tal sentido, es conveniente señalar el surgimiento de la tecnología de impresoras en tercera dimensión o 3D que ha irrumpido con fuerza en los últimos años y que ha tenido alcances en diferentes áreas de interés, desde la fabricación de juguetes y piezas pequeñas para la diversión, así como en la criminología, la medicina y diferentes campos de la ingeniería.

Las impresoras 3D tienen como objetivo producir un diseño en tres dimensiones, que se ha creado en un ordenador, en un modelo real; es decir, mediante el uso de un programa CAD se logra imprimir un producto físico en la realidad; entonces vale la pena mencionar que una impresora 3D, es un dispositivo capaz de generar un objeto sólido tridimensional mediante la adición de material. Ésta convierte la información digital en un objeto físico, llevando a cabo las instrucciones de un archivo de diseño electrónico.

La tecnología de impresión 3D es considerada hoy día como una forma muy sencilla de convertir una idea en un producto. Actualmente las piezas fabricadas mediante el método de impresión 3 D tienen rangos de uso limitado, a raíz de que los materiales polímeros utilizados para generar estas piezas tienen un comportamiento definido. Estos pueden ser dúctiles o flexibles, si la estructura es amorfa, o pueden ser frágiles o rígidos, si la estructura es cristalina.

Esta investigación tiene como finalidad desarrollar una impresora 3D que permita fabricar mezclas heterogéneas de materiales poliméricos rígidos y flexibles, esto con el propósito de identificar o caracterizar las posibles ventajas y desventajas en las propiedades mecánicas obtenidas en la combinación de los materiales. Es preciso mencionar que las probetas son objetos cuyas dimensiones y geometría corresponden a las estipuladas por las normas ASTM D 638, para ensayos de tracción a plásticos, y la ASTM D 790 para ensayos de flexión. Para la fabricación de las probetas, inicialmente se diseñan utilizando un software de diseño asistido por computador, que

luego es transformado en un código de instrucciones que sigue la impresora 3D para posteriormente realizar el Modelado por Deposición Fundida, que permite tener como resultado el o los objetos con las geometrías requeridas. También es importante resaltar que los materiales se pueden mezclar implementando un extrusor que funde los polímeros rígidos y flexibles a combinar.

Se debe tener en cuenta que los materiales rígidos tienen una temperatura de fusión diferente a la de los materiales flexibles, lo que posiblemente implica la generación de algoritmos que permitan controlar las temperaturas en el extrusor. Para la identificación de las propiedades mecánicas se deben realizar ensayos de tracción, flexión a las probetas que se fabriquen. La finalidad de la presente investigación se orienta hacia desarrollo de nuevos materiales poliméricos con una combinación de propiedades de entre rígido y flexible, de tal manera que ampliar el campo de aplicación de las piezas fabricadas por el proceso de moldeado por deposición fundida.

Basado en investigaciones anteriores, expuestas en el capítulo 2 y 4 de este trabajo, y luego de un estudio sobre las especificaciones de las impresoras auto-replicas disponibles en el mercado, se propone en esta investigación la fabricación de un modelo apoyado en la impresora Prusa i3 Hephestos, debido a la ventaja de esta máquina de incorporar varios rollos de filamento. Vale la pena destacar que la Prusa i3 Hephestos es una impresora que corrige errores de vibración, velocidad de impresión, precisión; y se caracteriza por contar con un marco de aluminio sobre el cual se sujetan los soportes de los motores, esto hace que la estructura sea más rígida. Con el propósito de lograr los objetivos de esta investigación se realizan algunas modificaciones a la Prusa i3 Hephestos, principalmente en su estructura, en la electrónica y otros ajustes con accesorios necesarios para adaptarla a las especificaciones requeridas para esta investigación.

2 MARCO TEORICO

2.1 Materiales Poliméricos

2.1.1 Generalidades

Son macromoléculas formadas por la unión repetida de una o varias moléculas con enlaces covalentes unidas entre sí por enlaces débiles de puente de hidrógeno o Vander Walls. Son producidos mediante un proceso denominado polimerización, en el que las moléculas más pequeñas se unen para crear las macromoléculas. Por lo general, los elementos de un polímero consisten en carbono más uno o más elementos tales como el hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y cloro. Tienen una estructura vítrea o una mezcla de vítrea y cristalina (Groover, 2007). Se caracterizan por tener baja densidad y conductividad eléctrica y térmica, reducida resistencia y no son recomendables para usarse en temperaturas elevadas. Los polímeros incluyen el hule, los plásticos y muchos tipos de adhesivos. A menudo se utilizan como fibra y como matriz de compuestos. Son resistentes a la corrosión y al ataque químico.

Por otro lado, es importante considerar el número de monómeros de los polímeros, el tipo de monómeros y el peso molecular de éstos, debido a que esto afecta sus propiedades y la temperatura de fusión. De igual forma, se debe tener en cuenta que en los polímeros existe una temperatura llamada de transición vítrea, TG, por debajo de la cual los polímeros amorfos tienen muchas propiedades asociadas a vidrios inorgánicos ordinarios, como la rigidez, fragilidad o transparencia. Con esta temperatura el material experimenta un gran cambio de propiedades. Por encima de esta temperatura los segmentos relativamente grandes de unidades de repetición pueden moverse con libertad, lo que conlleva una modificación de las propiedades. En ocasiones este tipo de temperatura se mal interpreta o se confunde con algún tipo de fusión del material, pero es de aclarar que la fusión ocurre en polímeros cristalinos y la transición vítrea en polímeros amorfos (Relaño, 2013).

Lo que realmente diferencia ambas temperaturas desde el punto de vista térmico es la manera de absorción del calor. Por ejemplo, cuando se calienta un polímero cristalino a velocidad constante, se puede observar un incremento de la temperatura a velocidad constante, y al llegar al punto de

fusión se mantiene constante la temperatura, mientras que al tratar un polímero amorfo con la temperatura TG no existe un calor latente, sino que la temperatura sigue subiendo sin detenerse. De acuerdo con su comportamiento mecánico y térmico, los polímeros se clasifican en: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

- **Polímeros termoplásticos:** Este tipo de polímero se reblandece con el calor, por lo tanto, se puede conformar de nuevo y reutilizar. Se componen de largas cadenas producidas al unir moléculas pequeñas o monómeros con estructura lineal. Tienen buena ductilidad y conformabilidad. Estos polímeros pueden presentar una temperatura de transición vítrea TG, en caso de ser amorfo, o una temperatura de fusión TM, para material cristalino superior a la temperatura ambiente (Relaño, 2013).

- **Polímeros termoestables (termofijos):** Estos polímeros son más resistentes, aunque más frágiles que los termoplásticos porque sus cadenas moleculares están fuertemente enlazadas. Las moléculas se transforman en una estructura rígida y tridimensional al enfriarse a partir de su condición de plástico caliente. Estos se utilizan en muchas aplicaciones, incluyendo dispositivos electrónicos. No tienen una temperatura de fusión fija y es difícil reprocesarlos una vez ocurrida la formación de enlaces cruzados.

- **Elastómeros:** Estos polímeros tienen moléculas grandes con estructuras entrelazadas. Tienen características elásticas cuando se someten las moléculas a fuerzas cíclicas. Tienen la capacidad de deformarse elásticamente en grandes cantidades sin cambiar de forma permanentemente. Por lo general son polibutadienos o compuestos que contienen dobles enlaces en la cadena principal.

2.1.2 Estructura de los polímeros

Los polímeros consisten en largas cadena que pueden doblarse, plegarse y enrollarse extensamente formando macromoléculas como se observa en la figura 1. Dependiendo de la forma como se organizan estas cadenas la estructura molecular de los polímeros se clasifican según (Callister,

2007) como: lineales, entrecruzadas, ramificadas, reticuladas, y se pueden observar en la figura 1, de ellas dependen muchas de las propiedades de estos materiales como la deformación.

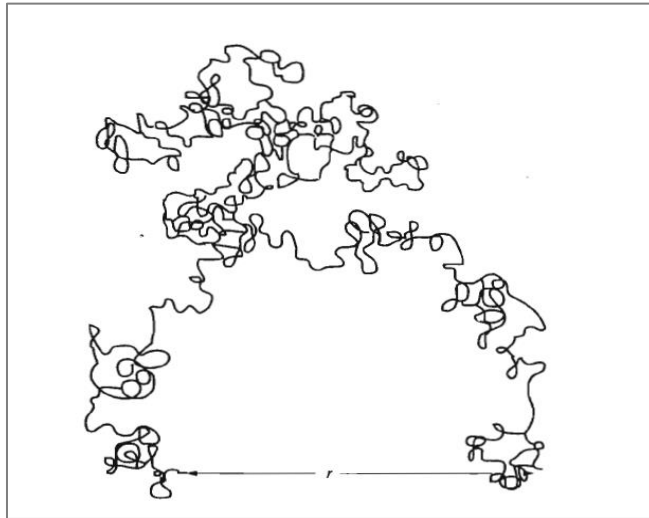


Figura 1. Representación de una cadena molecular de un polímero simple con números pliegues

Fuente: Callister. Libro de ciencia de los materiales.

- **Polímeros lineales:** En un polímero lineal los monómeros se unen entre sí por medio de enlaces débiles de Van der Waals, formando cadenas sencillas como se observa en la figura 2a. gracias a este tipo de distribución las cadenas son flexibles. Materiales con este tipo de estructura son el polietileno, cloruro de vinilo, poliestireno.
- **Polímeros ramificados:** Son polímeros cuya cadena central esta conecta en sus laterales a cadenas secundarias como se observa en la figura 2b, las ramas forman parte de la cadena principal y son el resultado de reacciones locales que ocurren durante la formación del polímero. Las cadenas ramificadas disminuyen la densidad de los materiales.
- **Polímeros entrecruzados:** En los polímeros entrecruzados cadenas lineales se unen entre si por medio de enlaces covalentes como se observa en la figura 2c. el entrecruzamiento se puede presentar durante la síntesis o por medio de reacciones químicas irreversibles, en el caso de los cauchos sucede a altas temperaturas en el proceso denominados vulcanización. Las cadenas entrecruzadas proporcionan propiedades elásticas a los materiales.

- **Polímeros reticulados:** Son polímeros compuestos por cadenas trifuncionales que se observan en la figura 2d, estas cadenas tienen 3 enlaces covalentes activo. A este grupo pertenecen los polímeros epoxi y los fenol-formaldehidos.

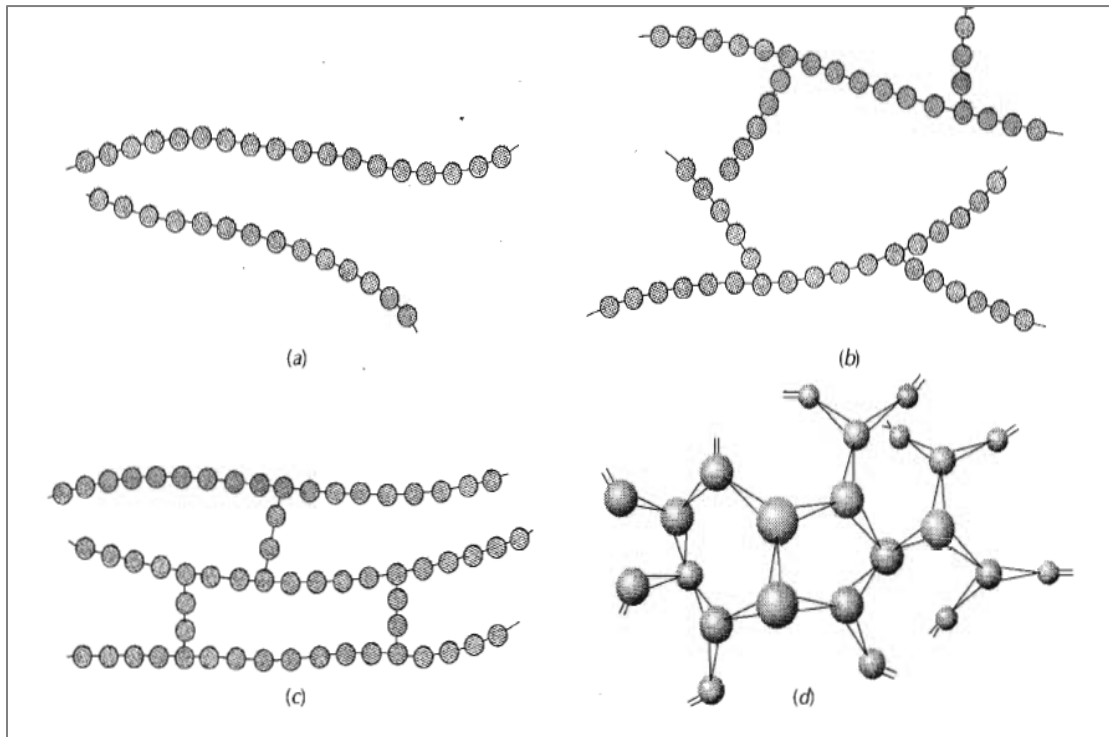


Figura 2. Representación de las estructuras moleculares, (a) Lineal, (b) ramificada, (c) entrecruzada, (d) reticulada.

- **Copolímeros:** La búsqueda de materiales de síntesis sencilla y de fabricación económica, que aporten mejores propiedades que no son posibles con los homopolímeros, ha llevado a los investigadores al descubrimiento de los copolímeros.

Los copolímeros son compuestos de diferentes unidades de monómeros que, dependiendo del proceso de polimerización, pueden obtener múltiples secuencias en las cadenas de los polímeros como se observa en la figura 3. Cuando los monómeros se organizan aleatoriamente dentro o de la cadena como se observa en la figura 3a se denominan copolímeros al azar. Cuando las unidades monoméricas permutan entre sí se denomina copolímeros alternados figura 3b, cuando se unen unidades monoméricas idénticas a lo largo de la cadena se denominan copolímeros en bloque figura

3 c. Y cuando la cadena principal está formada por un tipo de monómero y las cadenas laterales están formadas por otra unidad monomérica se denomina copolímero de injerto.

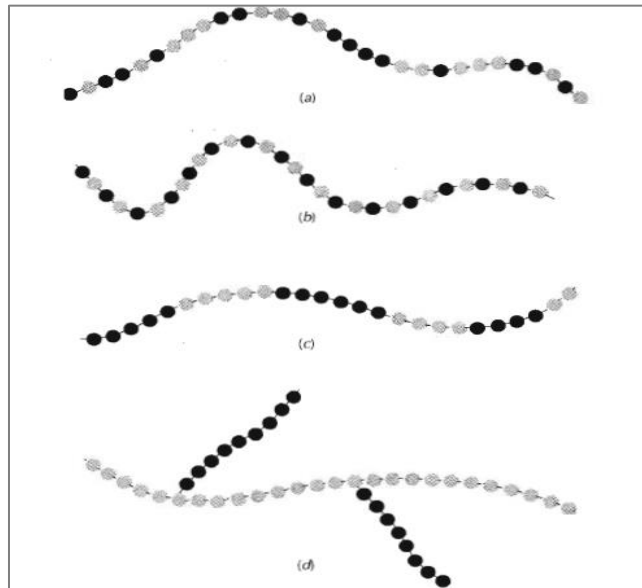


Figura 3. Representación de los copolímeros: (a) al azar, (b) alternados, (c) en bloque, (d) de injerto.

2.1.3 Cristalinidad de los polímeros

Un aspecto que se debe tener en cuenta con respecto a los polímeros termoplásticos, los cuales juegan un papel esencial en este trabajo, es el grado de cristalinidad que alcanzan o el grado de orden de su estructura. Se aclara que el término cristalino se usa con frecuencia para referirse a una estructura ordenada y el término amorfo para una estructura desordenada, como se observa en la Figura 4. También se debe considerar que en la práctica es muy difícil conseguir un polímero con la estructura perfectamente cristalina, y por lo general son los polímeros amorfos los que dejan pasar la luz de mejor manera y en ocasiones pueden ser transparentes.



Figura 4. Fase amorfa, semicristalina y cristalina de un polímero según Beltran y Mancilla (2012).

Los polímeros con estructura lineal por lo general son cristalinos puesto que no presentan restricciones para que se ordene la cadena, mientras que las ramas no permiten la cristalización completa por lo tanto los materiales con estructura ramificada tienden a ser semicristalinos, los reticulados son amorfos y los entrecruzados pueden presentar diferentes grados de cristalinidad.

2.1.4 Procesos de Fabricación de piezas con polímeros

Abarcan los procesos conocidos como de moldeo, los cuales se caracterizan por utilizar temperatura para aumentar la plasticidad del material en la mayoría de los casos hasta alcanzar el estado líquido. Dentro de los procesos de moldeo más comunes se encuentran, moldeo por extrusión, moldeo por inyección, moldeo por soplado y termoformado. En el moldeo por extrusión y en el moldeo por inyección el material se encuentra granulado y recibe el nombre de perlets, se usa un cilindro acondicionado con diferentes temperaturas y en su interior contiene un tornillo que se encarga de transportar y comprimir el material. En el termoformado una lámina de material polimérico se somete a temperatura para aumentar su plasticidad luego es comprimida por un molde que se encarga de dar la forma a la pieza a fabricar.

2.1.5 Comportamiento mecánico de los polímeros

El comportamiento mecánico de los polímeros se refiere a la relación entre el esfuerzo y la deformación causados en el material ante la aplicación de una carga, El comportamiento mecánico de un material puede ser determinado mediante la aplicación de un ensayo de esfuerzo

deformación, para lo cual se acciona una carga que varía uniformemente y de forma lenta sobre una superficie. Existen diferentes maneras de aplicar la carga, pueden ser de tracción o tensión, flexión, compresión entre otras, de pendiendo del esfuerzo y la deformación los materiales se clasifican en: fibras, plásticos rígidos, plásticos flexibles y elastómeros como se observa en la figura 5.

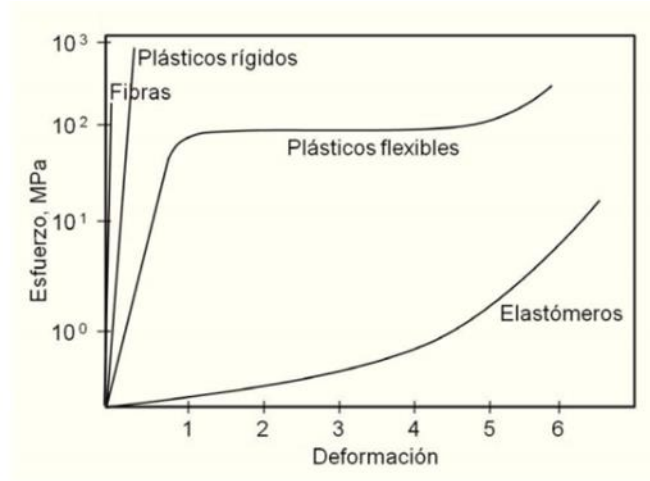


Figura 5. Grafica esfuerzo deformación para fibras, plásticos rígidos, plásticos flexibles, elastómeros.

Fuente: (Coreño, Méndez, 2010)

➤ **Comportamiento a la tracción:** Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o gradualmente aplicada. La probeta se coloca en la máquina de pruebas y se le aplica una fuerza F que se conoce como carga.

La norma ASTM D638 (2014b) para ensayos de tensión refiere a éste como un método diseñado para generar los datos de propiedad de tensión para el control y especificación de los materiales plásticos. Estos datos también son útiles para la caracterización cualitativa de los materiales y para el desarrollo de la investigación. Las propiedades tensoras pueden variar con la preparación de la muestra, con la velocidad y el ambiente de prueba. Por lo tanto, se deben tomar en cuenta estos factores para obtener resultados confiables. Este método se puede usar para evaluar los materiales de cualquier espesor por debajo de los 14mm (0.55 in.).

Es importante tener en cuenta que a partir de un ensayo de tensión se puede obtener información relacionada con la resistencia, rigidez y ductilidad de un material.

La resistencia a la tracción o tracción nominal es la cantidad de carga que se puede aplicar sobre un área, antes de que el material falle. Se expresa en unidades de fuerza sobre unidades de área N/mm^2 o MPa.

La deformación nominal hace referencia al cambio de longitud en un instante determinados con respecto a la longitud inicial.

El módulo de elasticidad o módulo de Young hace referencia a la rigidez del material y se representa como el esfuerzo en la zona elástica del material, sobre la deformación causada, en consecuencia, los materiales frágiles exhiben mayor módulo de rigidez que los materiales flexibles.

➤ **Comportamiento a flexión:** De acuerdo con la norma *American Society For Testing and Materials D790* (ASTM, 2014a) para los ensayos de flexión, este método cubre la determinación de las propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados, incluyendo los módulos compuestos y los materiales aislantes en forma de barras rectangulares o en cortes de hojas, laminas o con formas moldeadas. Generalmente se aplica a materiales rígidos y semirrígidos. Es importante tener en cuenta que la solidez de flexión no se puede determinar para aquellos materiales que no se rompen o que no fallan en la superficie externa de la muestra dentro del 5.0% del límite de presión de este método. Es muy importante considerar el efecto temporal y de la temperatura en los estudios dado que las propiedades básicas de flexión de los materiales dependen de las condiciones atmosféricas y de la temperatura.

2.2 Modelado por deposición fundida FDM o impresión 3D

2.2.1 Principios básicos de la técnica de FDM

La concepción de impresión 3D o manufactura aditiva, también conocida como prototipado rápido (PR), fue desarrollada por Charles Hull a inicio de los años 1980 cuando comenzó a trabajar en la fabricación de dispositivos plásticos desde fotorpolímeros en California. Esta se refiere a un proceso de fabricación en el que se utilizan diferentes materiales como: metales, polímeros (Ribeiro, Freitas, y Andrade, 2014) y compuestos (Weng, Wang, Senthil, y Wu, 2016). EL sector alimenticio también utiliza esta técnica de fabricación para obtener productos a base de chocolate (Lanaro, Forrestal, Scheurer, Slinger, Liao, Powell, y Woodruff, 2017), de igual forma, este tipo de impresión es utilizado para la elaboración de diferentes comidas, por ejemplo, aquellas relacionadas con las fibras de avena y pastas (Lille, Nurmela, Nordlund, Metsä-Kortelainen, y Sozer, 2018).

Aun cuando su invención fue un proceso largo de prueba y error, Hull se convirtió en el punto de partida para mejorar métodos actuales en el desarrollo de prototipos. En 1986 Hull obtuvo la patente de estereolitografía y obtuvo muchas más en tecnología 3D. Así pues, se desarrolló la primera impresora comercial 3D, la SLA-250. Con el trabajo de Hull además de la patente del Modelo de Deposición de Fundido (FDM por su sigla en inglés) por Scott Crump en Stratasys en 1990, la impresión 3 D revolucionó la manufactura y la investigación.

La primera impresora 3 D fue patentada por los profesores Michael Cima y Emanuel Sachs en 1993 la cual imprimía plástico, metal y partes cerámicas. Otras compañías han desarrollado impresoras 3D para aplicaciones comerciales tales como la Corporación DTM y la Z, entre otras (Gross, Erkal, Lockwood, Chen, y Spence, 2014).

Desde ya hace varios años existen máquinas diseñadas para traducir información directamente desde computadoras para la producción de objetos en tres dimensiones. De hecho, varias industrias utilizan impresoras 3D para producir diferentes piezas partiendo de un gráfico del computador. La impresión 3D ha tomado importancia en las industrias automotrices y aeroespaciales para la

impresión de modelos o prototipos de partes de vehículos y aeronaves. De igual forma, en el mundo arquitectónico ha sido provechosa para la impresión de modelos estructurales, y en el mercado de bienes industriales para el desarrollo de prototipos para diferentes compañías.

En líneas generales, la tecnología de las impresoras 3D ha irrumpido con fuerza últimamente para la creación de piezas pequeñas y juguetes. También ha sido empleada en diversas áreas de interés, por ejemplo en la criminalística, como la fabricación de armas y otros productos para la milicia, en la reproducción de piezas dentales que han servido para la identificación de personas, en la réplica de modelos de huellas digitales y otros insumos para el análisis de interés químico. Es por tanto una herramienta esencial en la ingeniería biomédica, la educación, la electrónica, ingeniería forense, entre otras.

2.2.2 Técnicas de impresión 3D

Una impresora 3D es un dispositivo capaz de generar un objeto sólido tridimensional mediante la adición de material. Este dispositivo convierte la información digital en un objeto físico al seguir instrucciones de un archivo de diseño electrónico.

En la impresión 3D, la fabricación de las piezas se basa en depositar material en las zonas de las piezas que lo requieran dejando el resto o los orificios sin aportar material. Actualmente existen diferentes técnicas de impresión, pero entre las más conocidas se encuentran la Estereolitografía (SLA), la Sinterización Selectiva por Láser (SLS) y la Deposición de Material Fundido (FDM).

➤ **La Estereolitografía (SLA):** Esta técnica consiste en la aplicación de luz ultravioleta a una resina líquida sensible a la luz de modo que se va formando la pieza que se desea imprimir capa a capa. Esta técnica tiene como limitante el alto costo de adquisición aun cuando la calidad y el nivel de detalle de las piezas que se obtienen son muy altos. En la Figura 6 muestra el funcionamiento de la estereolitografía.

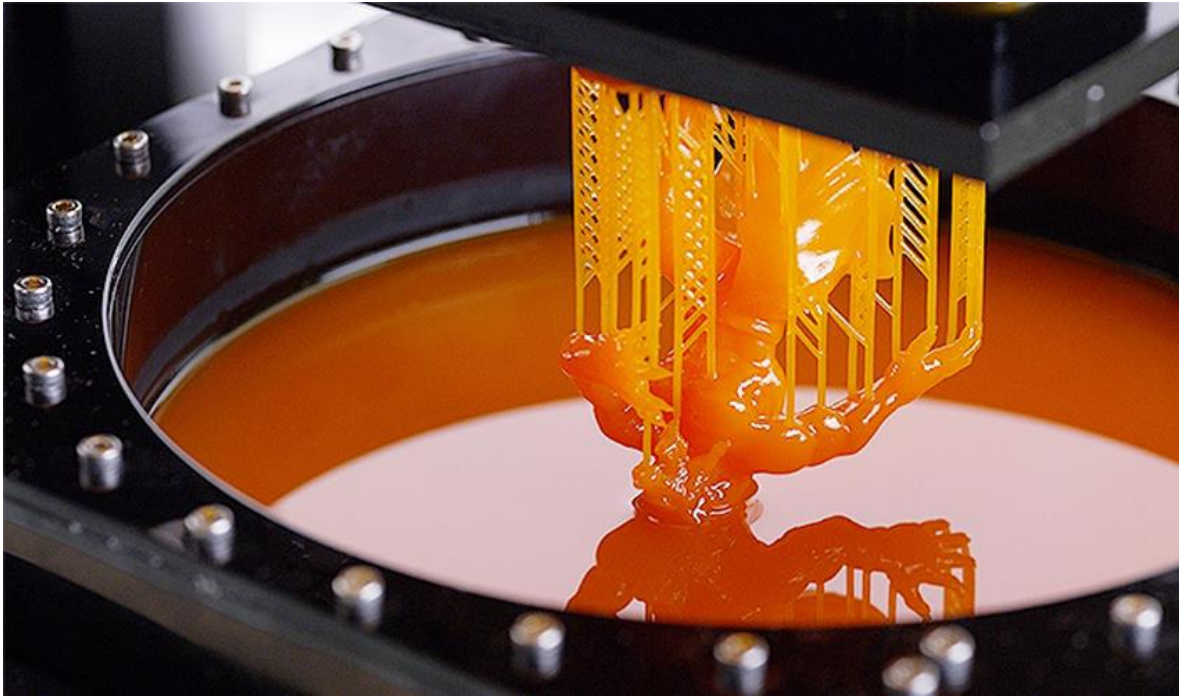


Figura 6. Funcionamiento de la estereolitografía

Fuente: www.3dnatives.com

➤ **Sinterización Selectiva por Láser (SLS):** Al igual que la técnica de Estereolitografía, ésta permite obtener piezas con gran precisión por lo cual es ampliamente utilizada en la industria y en la investigación. Su funcionamiento consiste en un láser que impacta en una capa de polvo, para ese momento el material se funde y se solidifica y se forma la pieza.

➤ **Deposición de Material Fundido (FDM):** Esta técnica, desarrollada por Scott Crump de Stratasys, es una de las tecnologías de manufactura más ampliamente usadas hoy día en la creación de prototipado rápido (Gross, Erkal, Lockwood, Chen, y Spence, 2014).

Ésta se refiere a la realización de piezas por capas mediante la extrusión de un filamento de polímero termoplástico a través de una boquilla que va trazando la geometría de la sección transversal de la pieza capa a capa (Ramírez y López, 2011). En este caso, el material está a 1°C por debajo de su punto de fusión, y por tanto se solidifica de manera instantánea sobre la capa anterior; este procedimiento se repite de manera continua hasta finalizar la impresión. La forma en que se produce la deposición de material define el tipo de tecnología de impresión en 3D. Es

importante tener en cuenta que para construir un objeto se requiere de un fusor que se desplace en los ejes X, Y Z sobre el área de impresión, depositando, fundiendo, compactando o grabando el material empleado, dando una forma tridimensional de lo que se desea fabricar. La Figura 7 muestra el procedimiento de impresión 3D, método de Deposición de Material Fundido.

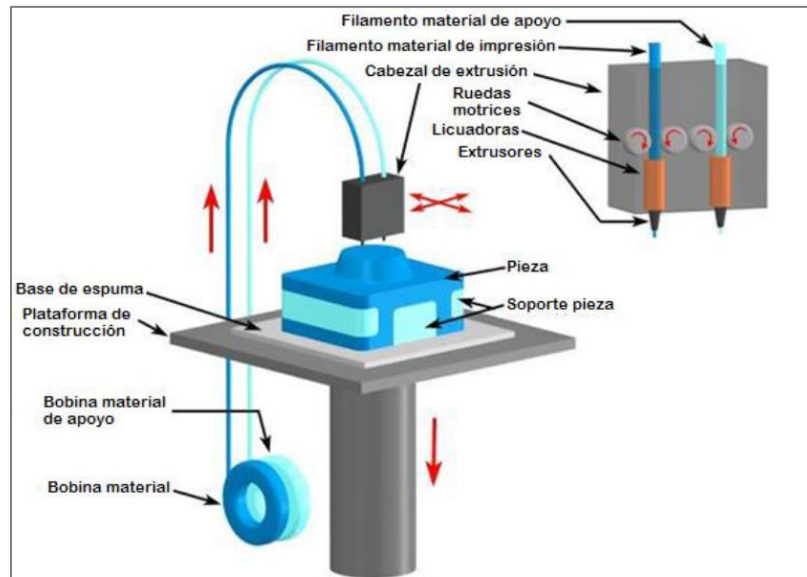


Figura 7. Funcionamiento de la Deposición de Material Fundido

En el método de capa por capa, se puede observar la forma del objeto en la parte externa y en la parte interna un entramado en forma de malla que sirve como soporte de la estructura externa y puede ser regulado según la densidad interna que se desee. Este tipo de impresión está siendo ampliamente empleada por su bajo costo en equipos y materias primas, lo cual ofrece un elevado número de ventajas a los usuarios.

2.2.3 Partes y tipos de impresoras 3D

En líneas generales, la innovación de las impresoras 3D ha respondido a tres factores importantes: las redes de trabajo comunitario de los diseñadores, los bajos costos de los materiales para construir y los programas informáticos que son de acceso libre a través de la internet. Las impresoras 3D que son utilizadas en el Método de Deposición Fundida tienen un elemento fundamental conocido

como extrusor. Este dispositivo se encarga de calentar el hilo plástico y fundirlo, permitiendo con esto construir la figura de diseño. En general, el extrusor es el componente que aprovecha las propiedades del polímero termoplástico para fundirlo y depositarlo capa sobre capa hasta formar la impresión digital. Esto se obtiene a través de transformaciones de energía eléctrica a térmica para llevar el polímero a las condiciones más óptimas de trabajo considerando variables como la velocidad y la cantidad de material.

En cuanto a los elementos que integran una impresora 3D se pueden mencionar el componente estructural, el componente mecánico y el componente electrónico, los cuales al ser unidos en una sola pieza, funcionan de forma ordenada y sincronizada, siendo controlados por un software que da la orden para que el extrusor comience a construir el objeto deseado.

Por otra parte, conviene señalar que entre los modelos comerciales más usados actualmente de impresoras 3D se encuentran las de compactación, en la que una masa de polvo se compacta por estratos; y las de adición o inyección de polímeros, en las que el propio material se añade por capas. Además, estas impresoras se pueden clasificar dependiendo del método empleado para la compactación del polvo en:

➤ **Impresoras 3D de tinta:** Este tipo de impresora utiliza una tinta aglomerante para compactar el polvo y su uso permite la impresión en diferentes colores. Es de destacar que el polvo composite utilizado en esta máquina puede ser a base de escayola o celulosa, lo que hace que las piezas obtenidas sean bastante frágiles. Por ello se recomienda someter la pieza a infiltración a base de cianocrilato o epoxis para darle la dureza necesaria. En líneas generales, esta impresora es económica y rápida, aunque las piezas son frágiles.

➤ **Impresoras 3D de láser:** En estas impresoras, se logra la polimerización a través de un láser que transfiere energía al polvo, luego se sumerge en un líquido que permite que las zonas tratadas se solidifiquen. Es preciso tener en consideración que una vez acabado el proceso de impresión, se debe esperar un tiempo para que el material termine de polimerizarse y poder entonces manipular la pieza. En comparación con la impresora de tinta, las piezas que se obtienen a través de esta

impresora láser son más resistentes y con mejor calidad, aun cuando el proceso es más lento y costoso.

Con respecto a las impresoras de adición o inyección de polímeros, éstas funcionan al inyectarles resinas en estado líquido y curándolas con luz ultravioleta. Es decir, se trata de fotopolímeros de base acrílica con diferentes propiedades físico-mecánicas entre las que se destacan la variedad de flexibilidades, elongación a rotura, resistencia, colores, entre otras. En este tipo de impresoras, la precisión y acabado de la superficie es de bastante calidad, y es una de las primeras tecnologías en lograr inyectar dos materiales diferentes en una misma impresión.

Ahora bien, conviene destacar las impresoras 3D por Deposición de Material Fundido más utilizadas de acuerdo con la construcción de la máquina, así se tiene por ejemplo, la impresora Delta, la impresora cartesiana y la impresora H-belt o core XY que se describen a continuación:

2.2.4 Impresoras de Deposición Fundida

➤ **Impresora delta:** Está basada en la tecnología del robot delta, cuyo diseño se fundamenta en el uso de paralelogramos en los brazos. El funcionamiento mecánico de esta impresora se basa en el desplazamiento sobre tres columnas verticales, y con los brazos que sujetan el extrusor, la transmisión de movimiento se puede hacer mediante bandas y poleas. Actualmente existen varios tipos de impresoras Delta en el mercado. En la Figura 8 se pueden observar algunos de ellos.

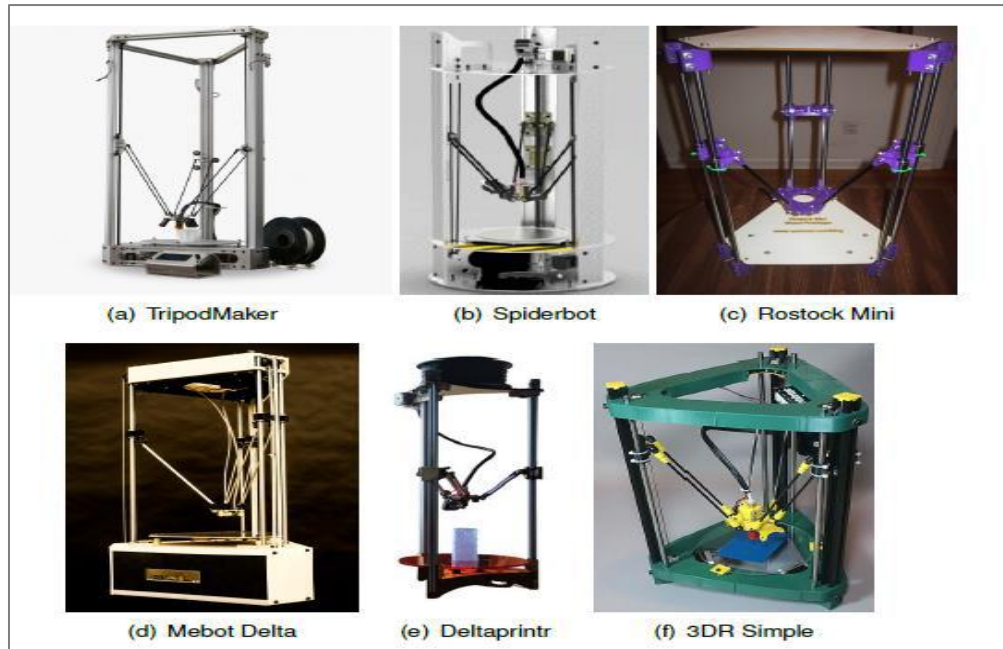


Figura 8. Tipos de impresoras Delta (Peña y Cañete, 2014)

➤ **La impresora cartesiana:** Ésta impresora dispone de 3 ejes puestos de forma ortogonal, lo cual le permite posicionarse en todas las direcciones dentro de su campo de trabajo. El movimiento puede aplicarse al extrusor, a la pieza o repartirse entre ambos. Normalmente los movimientos X y Z suelen aplicarse sobre el extrusor, mientras que el Y se le aplica a la pieza, aunque existen modelos en los que la altitud Z también se aplica sobre la pieza. En la Figura 9 se presenta una imagen de una impresora cartesiana.

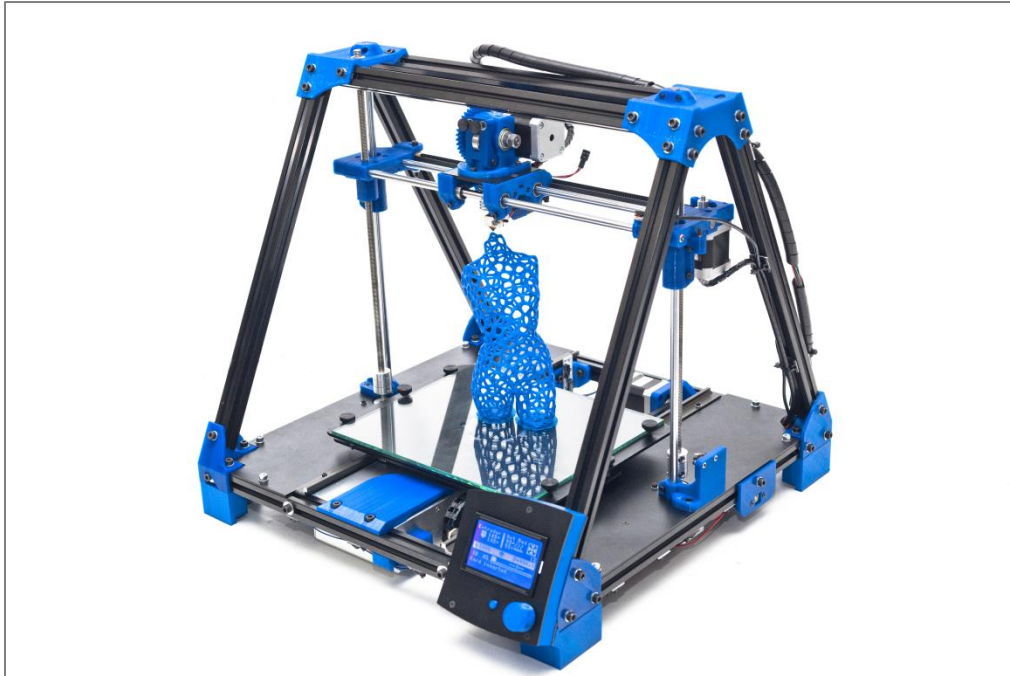


Figura 9. Imagen de una impresora cartesiana.

➤ **La impresora H-belt o core XY:** esta impresora es muy similar a la cartesiana pero tienen su diferencia en los ejes X y Y. Debido a su diseño particular, los ejes X y Y se controlan con una sola correa. De igual forma, los motores de estos ejes se sitúan en la parte fija de la máquina, lo que hace que las piezas en movimiento sean más ligeras y se pueda alcanzar mayores velocidades. A continuación se presenta la imagen de una impresora H-belt de mesa en la Figura 10.

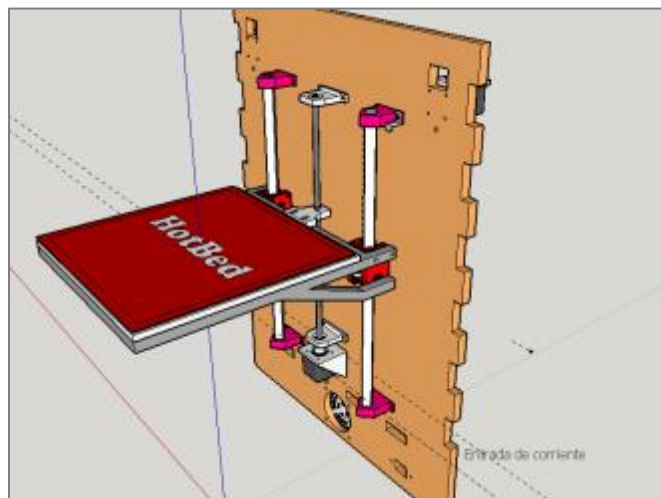


Figura 10. Imagen Impresora H-belt (Tomada de texsolab.net)

2.2.5 Materiales utilizados en impresión 3D

Es importante agregar aquí que la utilización de los materiales depende de la tecnología a aplicar en el estudio. En este caso, al usar la tecnología de la impresión 3D se debe considerar a los metales y plásticos como los materiales usados con mayor frecuencia. Entre los metales se destaca el uso del aluminio, el acero, y el titanio. A nivel industrial, son los materiales plásticos los mayormente utilizados. Entre ellos cuentan los ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), el PLA (Poliácido Láctico) el cual es un termoplástico, utilizado por excelencia en las impresoras no profesionales debido a sus características biodegradables, las resinas y las poliamidas.

El ABS, tiene la característica que se funde alrededor de 200 grados, por debajo del punto de fusión de otros materiales; es, además, resistente, tenaz y duro. Así mismo, es fácil de conseguir con diferentes características en cuanto a concentración, grosor del filamento, color, entre otras. Es un material que permite obtener objetos funcionales con acabados aceptables y puede ser tratado mediante disolventes como la acetona demostrando resistencia química ante otros compuestos. Valverde (2016) afirma que el ABS “es un plástico resistente al impacto muy utilizado en automoción, la industria y el uso doméstico. Es un termo plástico amorfo, se le llama plástico de ingeniería, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes” (p.79).

Por otro lado, el PLA es otro material termoplástico que se constituye a partir de recursos renovables. Este aspecto lo hace biodegradable y ecológico. El mismo se funde a 200 a 215 grados y su resistencia es similar al ABS. Para su tratado se necesita contar con disolventes industriales. Según Relaño (2013), el PLA “es un poliéster termoplástico alifático que procede de recursos renovables como pueden ser los restos de maíz, las raíces de tapioca, trozos de madera o de caña de azúcar. Su forma molecular es $(C_3H_4O_2)_n$. Es un termoplástico rígido que puede ser semi cristalino o totalmente amorfo” (p. 23). Su uso está orientado a la fabricación de objetos como botellas, contenedores de comida, juguetes, entre otros.

2.3 Antecedentes de investigaciones en modelado por deposición fundida

La impresión 3D inicia con un proyecto que consistía en materializar de forma rápida piezas virtuales en tres dimensiones, partiendo del diseño en un software de modelado como AutoCAD en formato STL: estereolitografía. (Almudena Lopez De Rego, 2013).

Para el año 1986 Charles Hull planteó su invento y creó la empresa 3D Systems comercializando su primera impresora 3D en 1987. Este mismo año, Carl Deckard desarrolló el Sintetizado Selectivo por Láser (SLS). Un año más tarde, Scott Crump inventó el Modelado por Deposición Fundida (FDM). Ya en 1992 Stratasys patenta su tecnología de FDM y en 1993 el MIT desarrolla la impresión 3D por inyección (3DP). Para el año 1995 Z Corporation obtiene la licencia de 3DP y en 1996 vende su primera impresora basada en la tecnología 3DP. Para 1999 el Instituto de Medicina Regenerativa de la Universidad de Wake Forrest implanta en humanos los primeros órganos modificados por medio de implantes arteriales impresos en 3D y cubiertos con células del paciente.

Sucesivamente, en el año 2000, la empresa MCP Technologies introduce la tecnología de Fusión Selectiva por Láser (SLM por su sigla en inglés) (Albarracín, Arias, y Adolfoduran, 2017; López, 2016; Salgado, 2017). En el 2002, se funda Envision Tec., y el Instituto de Medicina Regenerativa de la Universidad de Wake Forrest imprime el primer órgano en 3D, un riñón completamente funcional (Ariza, 2015). Además, en ese mismo año, la Universidad de Cornell ofrece la primera impresora 3D de código abierto.

Es importante destacar que la innovación tecnológica también provocó una transformación en diferentes ámbitos. Por ejemplo, el periodo conocido como Sociedad de la Información, el cual se fundamenta en las tecnologías de información y comunicación (TIC), rompió las barreras del espacio-tiempo e hizo posible el encuentro de información de calidad, digitalizada, accesible y gratuita, en diferentes páginas webs (Ballester, 2014); ésta evolución impactó por ende a la impresión 3D y comenzaron a formarse comunidades interesadas en impulsar esta técnica; es así como nació el proyecto RepRap.

Conviene resaltar que el proyecto RepRap inició en Inglaterra en el año 2004 cuando Adrian Bowyer tomó la iniciativa de crear una máquina de prototipado rápido auto replicante. Ésta técnica se convirtió en una herramienta novedosa que actualmente es usada en todo el mundo para la fabricación de impresoras 3D. Solamente se necesita el acceso a internet para descargar el diseño de una impresora e iniciar su fabricación (Reprap, 2016). RepRap es la abreviación de Replicating Rapid-Prototyper. Es una iniciativa creada con el propósito de desarrollar una máquina de prototipado rápido libre, que fuera capaz de replicarse a sí misma.

Desde el principio RepRap fue concebida como una máquina que podría ser utilizada por personas para hacer cosas en sus casas, así como en la industria. Esta iniciativa fue creciendo y poco a poco mucha más gente se fue interesando y se fue creando comunidad en torno a ella. Al principio los modelos de impresora eran muy artesanales pero con el tiempo se han ido mejorando hasta llegar a un nivel de sofisticación muy alto. El coste de los materiales necesarios para fabricar una RepRap es de alrededor de 400 euros, permitiendo que se ajuste al presupuesto de individuos, así como de pequeñas comunidades en el mundo desarrollado. RepRap fabrica objetos de una calidad ligeramente inferior que las máquinas comerciales, pero a un precio del 1% de su coste.

Una de las comunidades de impresión basada en impresoras libres más importantes del mundo es Clone Wars (Gómez, 2013), ubicada en España. Un punto remarcable de este proyecto es que favorece que unas impresoras creen a otras. Es decir, que las piezas de plástico de la próxima impresora sean impresas por otra del grupo. De tal manera que cada desarrollo o mejora en el diseño del software o la electrónica de este proyecto es exclusivamente de las iniciativas de sus propios usuarios. Por tanto, son los mismos usuarios quienes invierten su tiempo en la evolución de las RepRap.

Por otro lado es importante mencionar algunos avances que se han tenido con la aplicación de la tecnología de impresión 3D. Por ejemplo, Torres, León y Torres (2012), diseñaron y construyeron una máquina automatizada que responde a las necesidades técnicas y requerimientos de una impresora 3D que aplica el prototipado rápido por medio del modelado por deposición fundida, teniendo en cuenta las variables necesarias para la respuesta de la máquina en lo concerniente al acabado superficial de la pieza, tiempo de impresión, paradas de emergencia, entre otras. Los

autores reportan entre sus metas alcanzadas el diseño y construcción del sistema de posicionamiento tridimensional, un componente para la extrusión del material, la selección de sensores y actuadores y el diseño del sistema de control, satisfaciendo las características de movimiento determinado por la respuesta que entrega el software de modelamiento a través de la conversión del modelo CAD a código de estereolitografía (STL), y finalmente a código G, a partir del cual se responde a las coordenadas de posición y a las características de dosificación.

De igual forma Pohl, Gasca, Christ, y Hofmann (2013) reportan el uso de la tecnología de impresión 3D para la fabricación de cráneos de roedores, lo cual sirvió como alternativa para reemplazar el uso de animales vivos en las prácticas de laboratorio para la instalación de dispositivos intracraneales. Estos cráneos se diseñaron en un software CAD que luego fueron fabricados mediante el uso del método de impresión 3D obteniendo que las geometrías y dimensiones del producto fueran muy precisas y semejantes a los reales.

Asimismo, Ponce (2014) da cuenta de la construcción y puesta en marcha de una impresora 3D modelo Rostock, proyecto dedicado a documentar la construcción de una máquina de prototipado rápido por deposición de material fundido o impresora 3D. El modelo construido, denominado como Rostock, es un ejemplo de máquina de cinemática paralela de bajo coste. Esta arquitectura permite alcanzar mayores aceleraciones y velocidades. Además, proporciona una mayor estabilidad al cabezal impresor y dobla la altura de impresión en comparación con las impresoras de bajo coste más difundidas.

Ese mismo año, Ribeiro, Freitas, y Andrade (2014) desarrollaron en la universidad de Brasilia, una prótesis de mano y analizaron el comportamiento de los materiales utilizados en el modelamiento por deposición fundida. Para ello tomaron como modelo el diseño denominado Robohan el cual fue realizado por un carpintero africano llamado Richard Vans, luego de perder 4 dedos en un accidente laboral.

En esta prótesis los elementos rígidos fueron fabricados mediante impresión 3D y las articulaciones eran pines metálicos. Los investigadores de la universidad de Brasilia observaron

que el uso de estos elementos donde los esfuerzos de tensión eran variables, hacían que la vida útil del elemento disminuyera porque se presentaban fallas por fatiga.

Para solucionar este problema utilizaron materiales flexibles para reemplazar los pines metálicos. En función de lograrlo, tuvieron que hacer pausas en el proceso de impresión para cambiar los materiales entre rígidos y flexibles según la necesidad del elemento, dando como resultado una prótesis construida con materiales polímeros en su totalidad. Otro de los objetivos de la investigación era comparar las propiedades de los filamentos nacionales con respecto a los importados, se fabricaron probetas según la normas ASTM D 638, ASTM 412 (estas normas indican las dimensiones para realizar ensayos en plásticos), llegando a la conclusión de que los materiales nacionales eran de buena calidad y cumplían con los requerimientos de diseño.

Por su parte, Suárez, Tafur, y Calderón (2015) realizaron un estudio concerniente a la aplicación de herramientas CAD/CAM para el diseño y fabricación de prototipos de moldes de inyección de plásticos. Aplicando estas herramientas, diseñaron y construyeron un prototipo de molde para la inyección de materiales termoplásticos, guiados por un molde del laboratorio de inyección de la Universidad de Pamplona, al cual se le hicieron modificaciones para experimentar con su diseño. Y en el año siguiente, Rodríguez, Cortés, y Peña (2016), realizaron en la Universidad de Pamplona, el diseño, construcción, control y simulación de un robot paralelo para la impresión en 3D. Utilizaron la metodología QFD con el objetivo de tener mayor acceso a las prioridades y necesidades de los usuarios finales en el desarrollo de la máquina, involucrándolo en el diseño CAD y construcción. Asimismo, desarrollaron el análisis cinemático del mecanismo 5R mediante el análisis geométrico de mecanismos, el cual brindó el punto de partida para el desarrollo de la simulación. El objetivo final de esta máquina radica en el desarrollo de piezas volumétricas diseñadas previamente en un software CAD mediante la impresión en 3D.

En ese mismo año, Borjas y Flores (2016) basados en la tecnología de impresión 3 D, pretendieron cubrir la demanda de prótesis en Honduras debido a la escasez de materiales para la producción de las mismas, por lo tanto, analizaron la posibilidad de fabricarlas utilizando impresoras 3D. Para ello utilizaron una impresora 3D Air Golf y material ABS, obteniendo como resultado una prótesis

de mano que podía fabricarse en 48 horas y su ensamble se podía realizar en 3 horas. El bajo costo y el poco tiempo de fabricación representó una solución a la crisis vivida en el contexto del estudio.

De la misma manera, Romero y Valarezo (2016) diseñaron y construyeron una impresora 3D de plástico que muestra el proceso de diseño de la estructura de una impresora 3D tipo Delta, así como otros componentes relacionados con el movimiento del extrusor como son: los acoples o estructuras de rodamiento, entre otros. El diseño de la estructura se fundamentó en la elección de varios componentes esenciales como: perfiles de aluminio, ejes de acero calibrados de 12mm y rodamientos para los ejes. Una vez ensamblada la impresora y realizado el proceso de calibración, se encontró que la tolerancia de las piezas impresas varía entre +0.4 y +0.6 mm que es un rango aceptado y usual entre las impresoras que se encuentra en el mercado.

Abdullah, Noraihan, Tuan, Mohamad, Akil, y Rajion (2017) fabricaron filamentos mezclando PA 12 con Zirconio y B-TCP para generar probetas utilizando el proceso de impresión 3D, y analizar las propiedades del material resultante con el fin de comprobar si el método de modelado por deposición fundida puede ser utilizado en aplicaciones de reconstrucción craneofacial. Esto demuestra que el bajo tiempo, costo y la precisión de las geometrías ha hecho que diferentes investigadores se hayan interesado en usar la FDM en diferentes y nuevos campos de aplicación. Los resultados de este estudio señalan que en algunas muestras, el módulo de elasticidad y el módulo de flexión disminuyen pero el módulo de rigidez aumenta considerablemente; por tanto, un aspecto a considerar es la rugosidad medida en los materiales compuestos ya que es un factor importante en un biomaterial porque se relaciona con el apego y proliferación.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Fabricar y caracterizar mezclas heterogéneas de polímeros obtenidas mediante el modelado por deposición fundida (3D)

3.2 Objetivos específicos

- Construir una impresora 3D que permita combinar mínimo dos materiales con propiedades mecánicas diferentes, apoyado en los modelos RepRap existentes.
- Determinar las variables óptimas para la fabricación de probetas normalizadas mediante el moldeo por deposición fundida.
- Caracterizar de forma mecánica en tracción y flexión la mezcla de materiales poliméricos y realizar un análisis comparativo de los resultados.

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Fabricación de la impresora 3D

La necesidad de equipos de prototipo rápido ha incentivado a diferentes investigadores a fabricar impresoras 3D de bajo costo. En la Universidad de Pamplona, Colombia, los investigadores Rodríguez, Cortés, y Peña (2016) construyeron una impresora 3D utilizando el enfoque de la metodología del Desarrollo de la Función de la Calidad (QFD por su sigla en inglés), y mediante la aplicación de encuestas, pudieron determinar un alto grado de aceptación en la comunidad, debido principalmente a la escasez de equipos de prototipado en los laboratorios de la universidad. Por otro lado, estos mismos investigadores encontraron que ciertos parámetros como la precisión de la máquina, los buenos acabados y su adaptación a los materiales comerciales, resultaron ser de mayor interés para los usuarios que el costo de la máquina, su portabilidad y su área de trabajo. A la final, los autores construyeron un robot paralelo para tareas de impresión 3D.

De forma similar, en la Universidad de la Fuerzas Armadas en Ecuador, los investigadores Celi, Sempertegui, Morocho, Loza, Alulema, y Proano (2016) fabricaron una impresora 3D bajo el esquema de un robot Delta paralelo. Este esquema es utilizado en aplicaciones en las que se espera disminuir el tiempo de fabricación sin afectar la calidad de las piezas, ya que al ser de cadena cinemática cerrada permiten mayor velocidad en los movimientos, y en consecuencia, pierden área de trabajo.

Es importante señalar que una de las características de las impresoras 3D es su capacidad auto replicante. En este sentido, Kun (2016) reporta la fabricación de una impresora 3D utilizando la técnica del Modelado por Deposición Fundida (FDM). Este proyecto fue presentado en la Conferencia Internacional sobre ingeniería y materiales de manufactura en Slovakia, en el cual el investigador da cuenta del uso de su experiencia para la utilización de la ingeniería inversa y el logro en la fabricación de una máquina con dos cabezales, uno de ellos usado para depositar el material de soporte.

Vale la pena destacar aquí que el proceso de fabricación de piezas utilizando la impresión 3D se encuentra en constante evolución. Cada día se fabrican nuevas impresoras con controles más precisos, veloces y de mejor calidad; pero a pesar de estos avances, aún existen retos por superar, debido a que durante el proceso se pueden presentar errores que se podrían traducir en pérdidas de tiempo, energía y material. Dentro de los errores más comunes que se pudieran presentar se pueden mencionar la falta de material en la boquilla por filamento enredado, el deslizamiento del filamento en el extrusor, la boquilla obstruida, material adherido a la boquilla, el registro de capas incorrectas causando errores en la geometría, la mala adherencia del material depositado, entre otros (Santiago Blandon, Juan Camilo Amaya, Alvaro Jose Rojas, 2015).

Basados en las investigaciones expuestas anteriormente, además de las presentadas en el capítulo del marco teórico de este trabajo de grado y luego de hacer un estudio de las especificaciones de las impresoras auto replicantes disponibles en el mercado. En el año 2016 se propone la fabricación de una impresora, apoyado en el diseño de la máquina Prusa i3 Hephestos, puesto que tiene buenas especificaciones y su diseño estructural permite incorporar varios rollos de filamento. Un modelo de esta máquina se muestra en la figura 11 (anexo 1) se pueden observar un registro fotográfico del proceso de construcción.

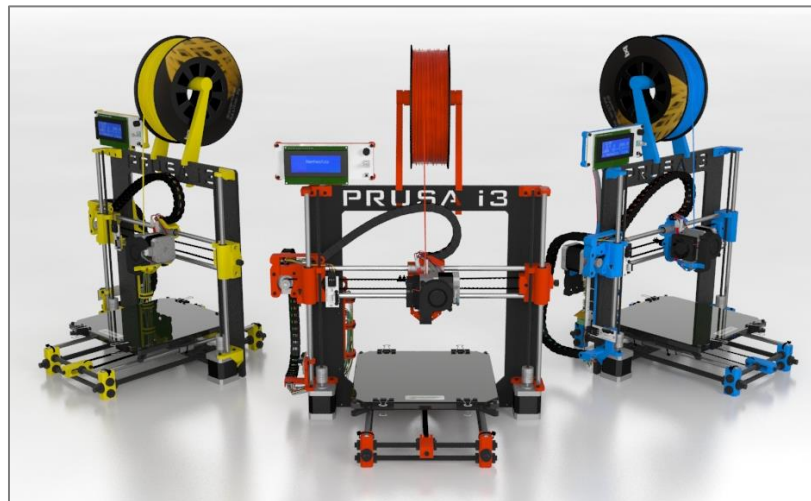


Figura 11. Prusa i3 Hephestos

Fuente: www.reprap.org

Es importante resaltar que la Prusa i3 Hephestos pertenece a un proyecto libre que forma parte de la comunidad REPRAP, por lo cual todos los diseños CAD de las piezas imprimibles se pueden

encontrar en su página web https://reprap.org/wiki/Prusa_i3_Hephestos/es en la que también se pueden evidenciar las modificaciones realizadas y algunos de los diseños que los investigadores adaptaron a esta nueva impresora; tales como tensores de correas, soporte LCD, sujeción finales de carrera, soporte ventilador, entre otros.

Por consiguiente, vale la pena destacar que la Prusa i3 Hephestos es una impresora que corrige errores de vibración, velocidad de impresión, precisión; y se caracteriza por contar con un marco de aluminio sobre el cual se sujetan los soportes de los motores, esto hace que la estructura sea más rígida. En la tabla 1 que se presenta a continuación, se muestran las especificaciones de la impresora Prusa i3 Hephestos.

Tabla 1. Especificaciones de la impresora Prusa i3 Hephestos

Velocidad e impresión	80 mm/s
Volumen de las piezas	215mm(X) x 210mm(Y) x 180mm(z)
Resolución	Alta 60 micras, Media 200 micras, Baja 100 micra
Material recomendado	Filamento PLA 1.75 mm
Boquilla del extrusor	0.4 mm
Disipador extrusor	Aletas con ventilador axial

Fuente: (www.reprap.com)

A continuación, se describen las modificaciones realizadas a la impresora Prusa i3 Hephestos para cumplir con los objetivos de esta investigación. En el anexo 2 se observan algunos avances de la construcción, los cuales fueron expuestos en el XII congreso internacional en Electrónica y Tecnologías de Avanzada en el año 2017.

La impresora Prusa i3 Hephestos está conformada por una serie de mecanismos que permiten el movimiento en las tres dimensiones, a estos mecanismos se le denominan ejes. Teniendo en cuenta lo anterior, la estructura que permite el movimiento del extrusor hacia la derecha e izquierda se le denomina Eje X; la estructura que permite que el extrusor se mueva hacia arriba y hacia abajo se le denomina Eje Z; y la estructura que permite el movimiento de la cama caliente hacia adelante y hacia atrás se le denomina Eje Y.

4.1.1 Modificaciones realizadas a la estructura

El marco de aluminio del eje Z característico de la Prusa i3 Hephestos aumenta el costo ya que implica manufacturar utilizando diferentes procesos convencionales de maquinado tales como fresado y troquelado. Por esta razón algunos fabricantes optan por reemplazar estos marcos de aluminio por otros materiales como acrílico o madera, tal como se muestra en la Figura 12. Esto trae como consecuencia que la resistencia de la impresora sea afectada generando fallas en las piezas impresas tales como desalineación, o imprecisiones dimensionales. Por otro lado el eje Y está construido con barras roscadas unidas entre sí por piezas fabricadas en impresión 3D, la cuales se rompen con facilidad cuando la impresora es transportada de un lugar a otro. En líneas generales, no se recomienda el uso de madera o acrílico debido a que estos materiales reducen la resistencia de la máquina.

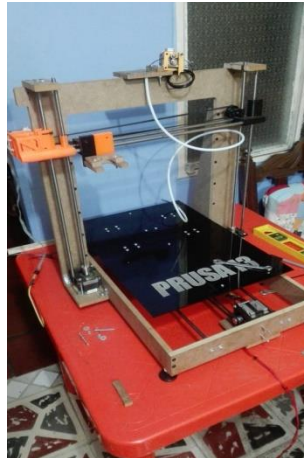


Figura 12. Prusa i3 fabricada con madera.

Por tanto, en este experimento se reemplazó el marco de aluminio y las varillas roscadas por una estructura metálica, esto con el fin de aportar mayor resistencia y evitar daños producto de la manipulación. En tal sentido, se utilizó un perfil metálico calibre 22 de una pulgada para la fabricación de la estructura. Se requirieron para ello 4 tramos de perfil de 55 cm para la base, 4 tramos de 58 cm y 2 tramos de 35 cm para los marcos laterales. En su parte inferior, los marcos laterales fueron soldados a la base de la impresora, y en su parte superior, se unieron entre sí por dos tramos de perfil de 50 cm; el marco lateral quedó formando un ángulo de 80 grados con respecto a la base, tal y como se puede observar en Figura 13.

En cuanto al área de impresión, es preciso conocer que ésta depende del tamaño de los segmentos de la base y de los marcos laterales. Por tanto, para lograr mayor área, se deben cortar tramos más grades de perfil debido a que la base aporta las dimensiones de las piezas en los ejes X, Y. Los marcos laterales aportan las dimensiones en el eje Z. Las uniones fueron realizadas con soldadura 6013 de diámetro 3/32 utilizando un equipo marca Miller con un amperaje de 60 A. Se usó unión soldada en vez de unión mecánica atornillada, porque de este modo se eliminan los desajustes provocados por el movimiento de la impresora durante el servicio. En consecuencia, se reducen las vibraciones que en ocasiones afectan la calidad de las piezas fabricadas (Pilch, Domin, & Szlapa, 2016).

Por otra parte, las dimensiones de la estructura permiten adaptar 4 camas calientes de 20x20 cm logrando un aprovechamiento del espacio y un área de impresión de 40x40 cm, mayor al de la Prusa i3 Hephestos. Por tal motivo, se logra la fabricación de piezas más grandes.

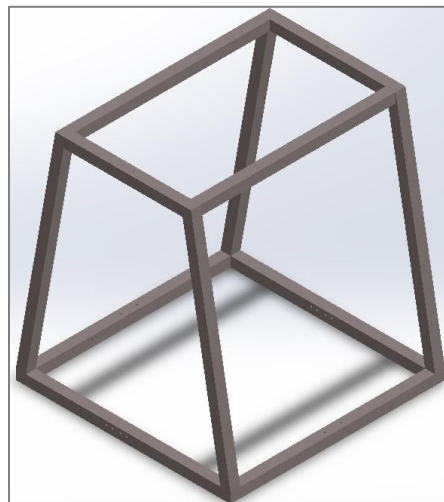


Figura 13. Estructura metálica diseñada para la impresora 3D.

También es importante resaltar que el diseño de las piezas se realizó de tal forma que todos los elementos quedasen ubicados dentro de esta estructura metálica, con el fin de disminuir los daños generados durante el transporte de la misma. Estos daños generalmente incluyen fracturas de las piezas, daño en los finales de carrera, desviación de los ejes, los cuales conllevan a la puesta fuera de servicio de la impresora.

4.1.2 Modificaciones realizadas al eje x

El Eje X en la impresora Prusa i3 Hephastos tiene como función mover el extrusor a la derecha y a la izquierda mientras deposita el material fundido. Éste se conforma de un carro apoyado sobre dos varillas lisas. El movimiento rotacional del motor es convertido en movimiento lineal y transmitido al carro por medio de un sistema de poleas y correa. Las modificaciones realizadas a este eje se describen a continuación:

➤ **Eje X (izquierda):** Esta pieza tiene como función sostener el motor que mueve al extrusor a lo largo del Eje X; además sostiene la tuerca de la varilla roscada de 5 mm que transmite el movimiento al carro sobre el eje Z. También, tiene una cavidad por donde pasa una varilla lisa que guía al carro en el lado izquierdo como se observa en la Figura 14. Esta pieza se adaptó debido a que la varilla roscada es reemplazada por una barra trapezoidal con el fin de mejorar la calidad de las piezas lo cual se explica con más detalles en la sección correspondiente a modificaciones realizadas en el Eje Z.

Por tanto, se diseñó una cavidad para encajar el husillo trapezoidal sobre el cual se aloja la barra. También, se cambió la posición del motor, de tal forma que se ubique dentro de la estructura metálica para prevenir daños. Por otro lado, se adaptó un graduador para el final de carrera del eje Z, esto con el fin de poder calibrar el *home* de una forma rápida y sencilla usando un destornillador figura 14.

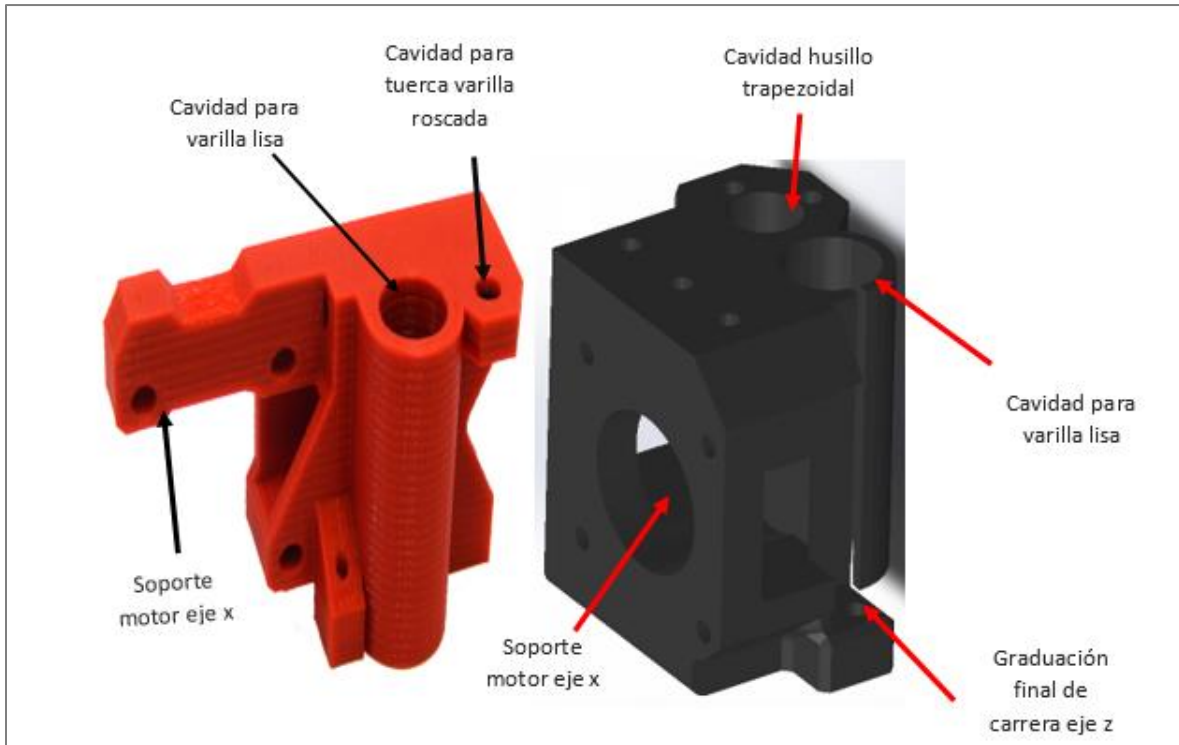


Figura 14. Adaptación de la pieza eje x izquierda

➤ **Eje X (derecha):** Esta pieza tiene como función sostener la tuerca de la varilla roscada de 5 mm que transmite el movimiento al lado derecho del carro sobre el eje Z, también tiene una cavidad por donde pasa una varilla lisa que guía al carro por ese mismo lado del eje Z en la figura 15a se puede apreciar la pieza utilizada en la Prusa i3 Hephestos. En vista de que la varilla roscada es reemplazada por una barra trapecoidal, se diseñó una cavidad para el husillo trapecoidal sobre el cual se aloja esta barra como se observa en la figura 15b.

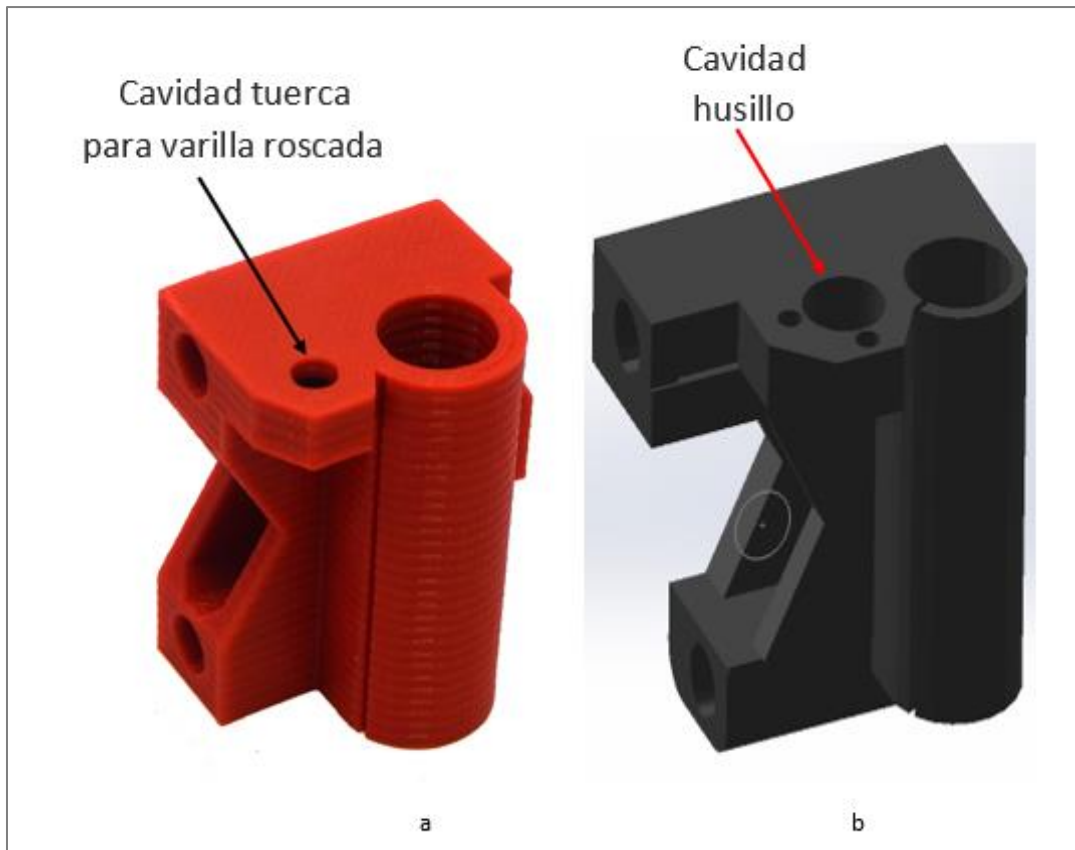


Figura 15. Adaptación de la pieza eje x derecha.

➤ **Eje X (final de carrera):** esta pieza se ajusta a presión sobre la varilla lisa, su función es sostener el sensor que indica el final de carrera sobre el eje X, por tal razón, se modificó para mejorar el ajuste mediante la fabricación de unos soportes que se pueden ajustar por medio de un tornillo pasante. También se le hicieron ranuras para trabar las tuercas para evitar el desajuste provocado por la vibración generada durante la impresión. Este soporte se usó para los finales de carrera de los 3 ejes, por lo cual no se requieren las piezas eje Y final de carrera baso, eje Y final de carrera marco, y eje Z final de carrera. A continuación se presenta la Figura 16 relacionada con la pieza final de carrera.

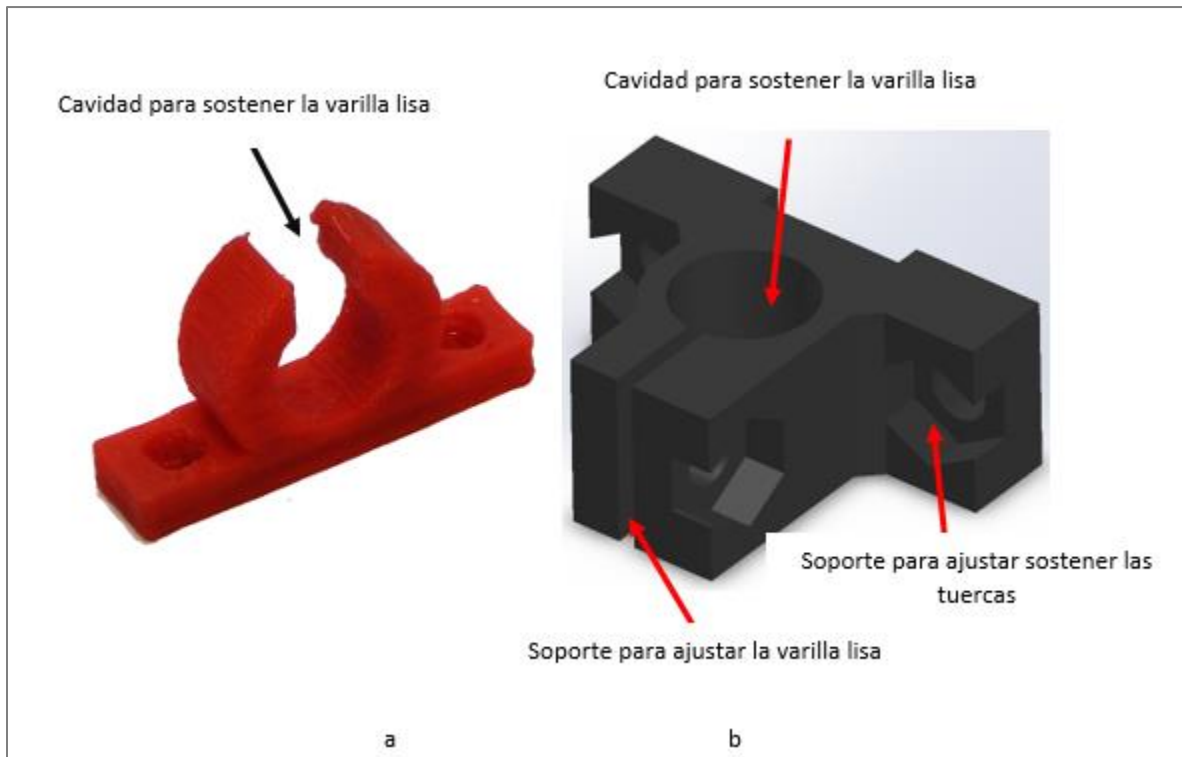


Figura 16. Finales de carrera.

4.1.3 Modificaciones realizadas al eje y

Para el movimiento en el Eje Y, la impresora requiere la estructura que se muestra en la **Figura 17**. Su principal función es sostener la cama caliente sobre la cual se depositará el material fundido. Esta estructura está construida con varillas roscadas de 10mm **(1)**, unidas en las esquinas por cuatro piezas llamadas eje Y esquina **(2)**. Estas piezas a su vez sostienen dos varillas lisas **(3)**, donde reposa una base de aluminio **(4)**, unida por medio de correas plásticas a unos rodamientos lineales **(5)**, que permiten su movimiento a lo largo de la varilla lisa. Sobre la base de aluminio se apoyará la cama caliente de la impresora.

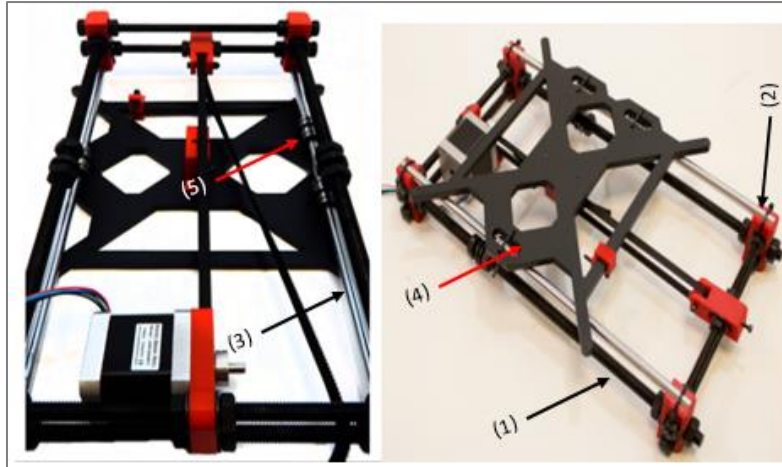


Figura 17. Eje Y Prusa i3 Hephestos(www.repreap.org)

Como se mencionó anteriormente, se utilizó una estructura metálica para la nueva impresora que se construyó en este proyecto; por lo tanto, el Eje Y fue reemplazado por esta. Por otro lado, se deben adaptar las piezas Eje Y Esquina a la nueva estructura. Estas se modificaron de tal forma que se pudiera encajar en el tubo cuadrado de 1 pulgada; además se le diseñaron unos soportes para ajustar por medio de una unión mecánica atornillada con el fin de mejorar el agarre de las varillas lisas, en vista de que en la impresora anterior se hacía por medio de correas plásticas y se soltaban fácilmente. figura 18 que se muestra a continuación describe la adaptación de la pieza Eje Y esquina.

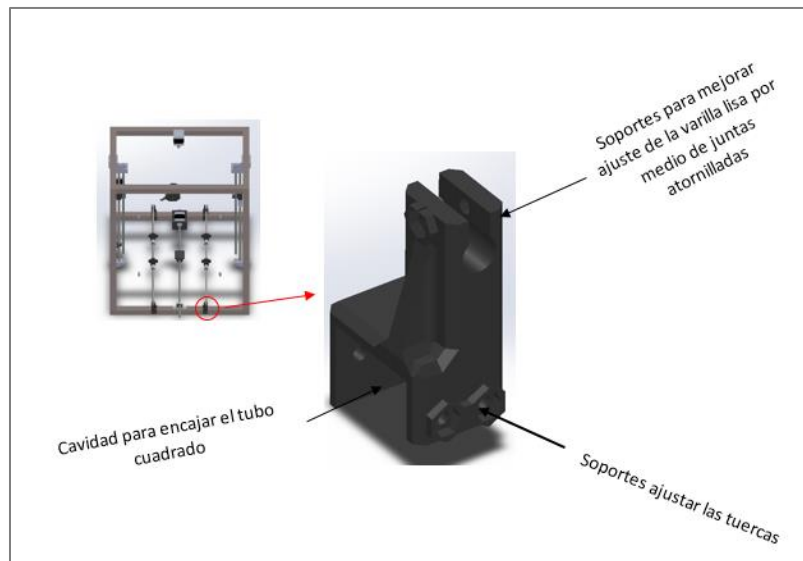


Figura 18. Adaptación de la pieza Eje Y esquina.

En la Prusa i3 Hephestos, el sistema de transmisión de movimiento del Eje Y está conformado por un servo motor(1), sobre el cual se ajusta una polea de 20 dientes(2), por ella circula una correa dentada(3), que pasa por un sistema de tensión fabricado en 3D(4), el cual se ubica al extremo opuesto del servo motor. Las dos puntas de la correa se ajustan a una pieza denominada Eje Y Sujeta Correa también fabricado en 3D (5). Esta pieza va anclada a una base de aluminio (6) permitiendo que la cama caliente se mueva a lo largo del eje Y a medida que gira el servo motor. Este proceso se puede observar en la figura 19 que se presenta a continuación.

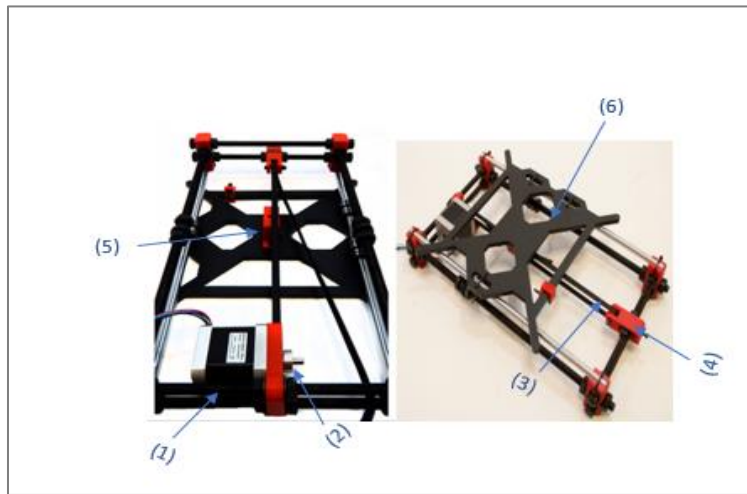


Figura 19. Transmisión de movimiento en el Eje Y (tomada de www.reprar.com).

Este sistema de transmisión por correa presenta desgaste significativo por el esfuerzo al que es sometido. En consecuencia, genera vibración en la cama caliente afectando la calidad de las piezas; por lo tanto, se reemplazó por una barra trapezoidal acoplada al servomotor con el fin de mejorar la precisión de la impresora.

La adaptación del nuevo sistema de transmisión, implica reemplazar la pieza Eje Y Sujeta Correa, por la pieza soporte para husillo para barra trapezoidal cuya función es alojar el husillo de la barra trapezoidal que transmitirá el movimiento a la cama caliente como se observa en la Figura 20.

Este se acopla por medio de juntas atornilladas a la base de aluminio para transmitir el movimiento.

Al otro extremo del servo motor se debe adaptar una chumacera P08RS para sostener la barra trapezoidal, esta chumacera se adquiere fácilmente en el mercado o en línea en páginas como www.aliexpress.com.

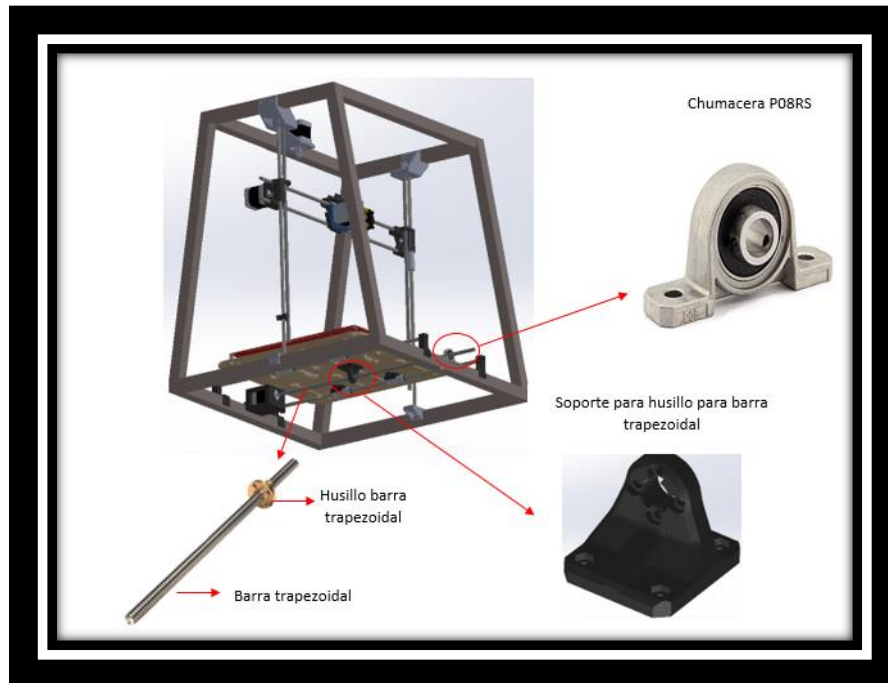


Figura 20. Nuevo sistema de transmisión de movimiento Eje Y.

Eje Y (del motor): Esta pieza tiene como función sostener el motor que mueve hacia adelante y hacia atrás a la cama caliente. Se modificó de tal forma que se pudiera encajar en perfil cuadrado. El soporte del motor se diseñó de modo que se ubicara dentro de la estructura metálica para prevenir daños por golpes. En la Figura 21 se muestra el soporte Eje Y del motor.

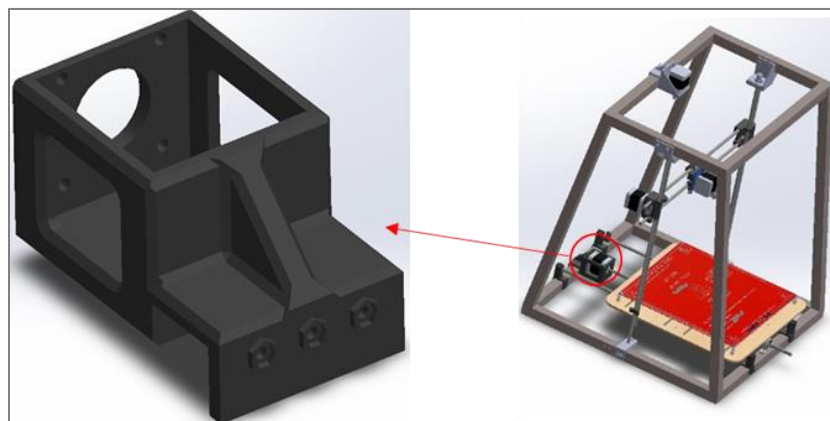


Figura 21. Soporte Eje Y motor.

4.1.4 Modificaciones realizadas en el eje Z

➤ **Eje Z Soporte inferior derecha (1) y Eje Z Soporte inferior izquierda (2):** Éstas piezas son las encargadas de sostener los motores que transmiten el movimiento al carro a lo largo del eje Z. Están ancladas a la parte inferior del marco de aluminio por medio de juntas atornilladas como se observa en la Figura 22.



Figura 22. Soportes motores Eje Z.

Estos soportes se reemplazaron por un diseño propio de la investigación denominada Eje Z soporte motor que se observa en la Figura 23. Esta pieza se ubica en la parte superior de la estructura metálica, con el fin de implementar un sistema de transmisión por correa que permita mover los dos lados del carro con el mismo motor garantizando así la simetría en el carro durante la deposición de material. Se adaptó para que encajara en el tubo cuadrado y se ajustó por medio de juntas atornilladas a la estructura metálica; ésta tiene unas cavidades sobre las cuales se puede desplazar el motor para tensionar la correa

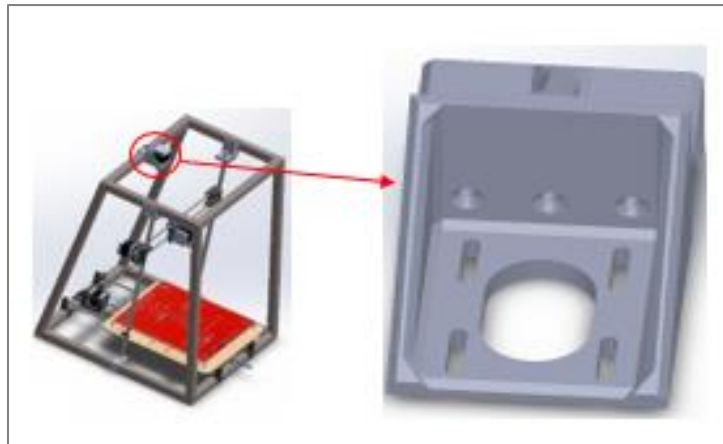


Figura 23 . Pieza Eje Z soporte motor

➤ **Varillas roscadas:** Las impresoras Prusa i3 Hephastos están fabricadas con varillas roscadas de 5mm, para transformar el movimiento rotacional de los motores en movimiento lineal en el eje Z. El control de estos movimientos marca la pauta del acabado final y la calidad de las piezas fabricadas. El eje Z influye significativamente en este aspecto pues es el encargado de controlar la altura de las capas depositadas (Frax, 2015); por tal razón, se reemplazaron las varillas roscadas de 5mm de este eje, por barras trapecoidales de paso largo que se observan en la figura 24, puesto que la holgura de la barra trapecoidal es menor que la de la barra roscada, por lo tanto es más precisa; de igual forma, la barra trapecoidal sufre menor desgaste, puede trabajar sin lubricación, lo que ayuda a una menor acumulación de polvo y es más eficiente (Iguas, 2018).

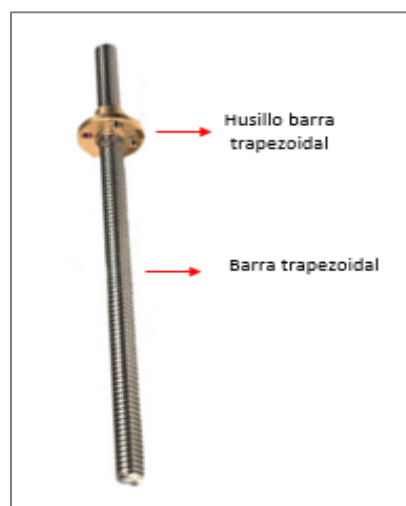


Figura 24. Barra trapecoidal.

➤ **Eje Z (Soporte superior):** La función de esta pieza es sostener la varilla lisa que guía al carro a lo largo del Eje Z. Se modificó para que adicionalmente sostenga la barra trapezoidal debida al nuevo sistema de transmisión (ver figura 20), además se adaptó para que encaje en el tubo cuadrado como se observa en la figura 25.

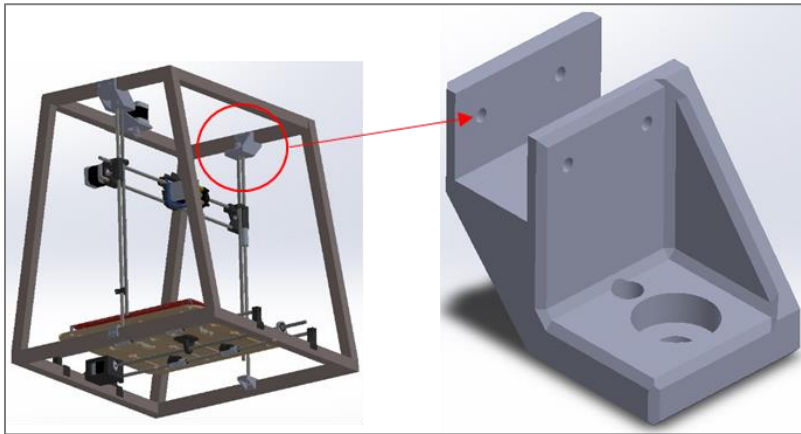


Figura 25. Eje Z soporte superior.

➤ **Eje Z soporte varilla lisa:** esta es otra pieza producto de la investigación. Su función es sostener la varilla lisa del eje Z en la parte inferior para que ésta se mantenga vertical. Se diseñó de tal forma que encaje en el tubo cuadrado. La Figura 26 muestra la piezas Eje Z varilla lisa.

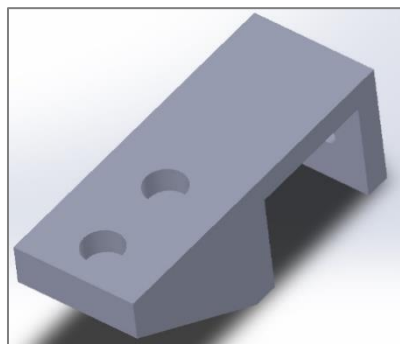


Figura 26. Eje Z varilla lisa.

4.1.5 Diseños de piezas propios de la investigación.

Soporte para los extrusores: Este soporte se fabrica con el fin de sostener los extrusores cuando se utiliza la deposición de tipo Bowden donde el Hotend se encuentra separado del extrusor. Este soporte se muestra en la Figura 27 a continuación.

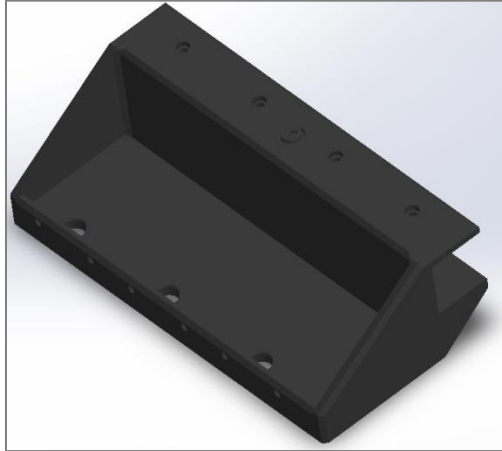


Figura 27. Soporte para los extrusores

➤ **Caja de electrónica y soporte LCD:** Esta pieza se diseña con el fin de anclar la parte electrónica a un lado de la estructura metálica para evitar el calentamiento de la tarjeta y los demás componentes. En la Figura 28 se muestra el diseño de la caja de electrónica y soporte LCD.

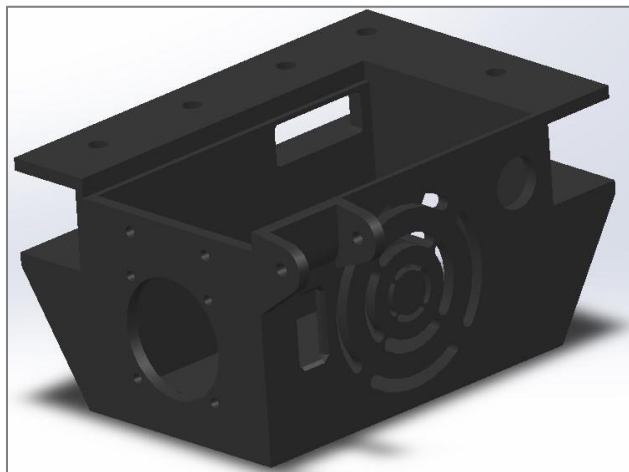


Figura 28. Caja de electrónica y soporte LCD.

4.1.6 Electrónica de la impresora

En la figura 29 que se presenta a continuación se puede ver una representación del sistema eléctrico encargado de controlar y realizar las acciones que le permiten funcionar correctamente a la impresora.

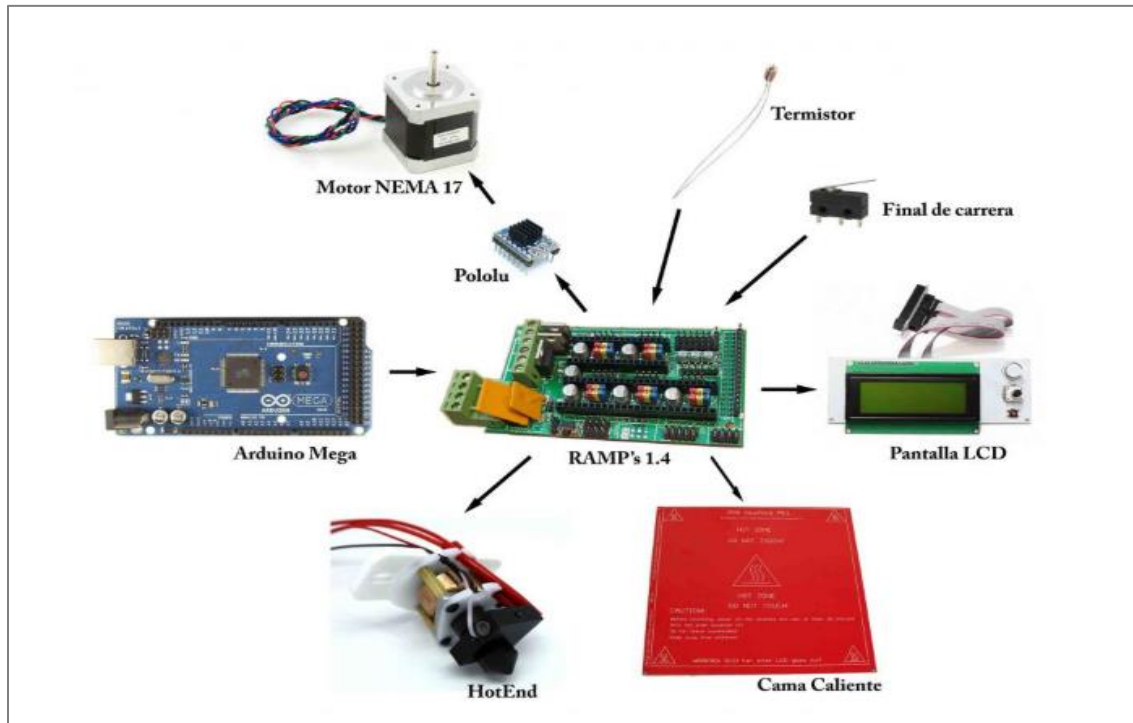


Figura 29. Representación del sistema electrónico de la impresora. Tomado de (www.zonamaker.com)

A continuación, se describe la función de cada uno de los elementos electrónicos.

➤ **Cama Caliente:** es una plataforma sobre la cual se deposita el material extruido. Funciona como una resistencia que consume energía y la transforma en calor. Para mejorar la adherencia con el material depositado la cama caliente se mantiene a una temperatura de 60 a 70 grados centígrados. Por lo general se complementa con un vidrio para asegurar que la superficie sea lo más plana posible. Se fabrica con baquelita o PCB. En la Figura 30 se muestra la cama caliente del sistema.



Figura 30. Cama caliente.

➤ **Hotend:** Un reto para esta investigación es incorporar un hotend que permitan fabricar piezas combinando dos materiales de diferentes propiedades, ya que los extrusores de varios materiales solo se han utilizado con fines estéticos para fabricar piezas de varios colores (Abilgazyev et al., 2015). Hasta la fecha no se ha profundizado en una investigación donde la combinación de materiales se haga para mejorar las propiedades mecánicas de las piezas. Por lo tanto, para lograr este objetivo se probaron dos opciones:

La primera opción fue el uso de un Hotend tipo diamante. Este se forma por la unión de tres Hotends, en un bloque en forma de diamante como se observa en la Figura 31. Esta es una buena opción para la fabricación de piezas con tres materiales, pero solo se puede manejar una temperatura de fusión; por lo tanto, sirve para materiales con temperaturas de fusión similares con colores diferentes y se obtienen piezas de 3 colores.

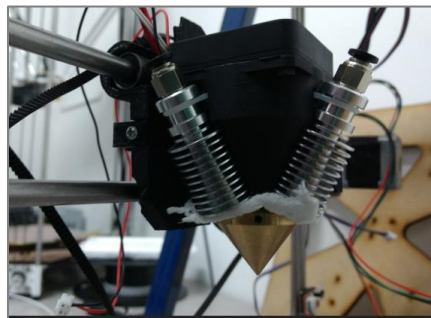


Figura 31. Hotend tipo diamante.

Es importante acotar que con este tipo de hotend no fue posible fabricar piezas mezclando materiales con propiedades diferentes. Uno de los principales inconvenientes es que la diferencia

entre la temperatura de fusión implica hacer una pausa mientras sube o baja la temperatura, según el requerimiento del material a extruir. Por otro lado en la Figura 32a se observa que la separación entre el hotend (1) y el extrusor (2) causa deformación (3) e impide la extrusión del material flexible. También se encontró que el material flexible tapona las gargantas de los otros materiales impidiendo la deposición figura 32b lo que implica desmontar el hotend (4) para retirar el material atascado manualmente (5), esta operación requiere aproximadamente 8 horas.

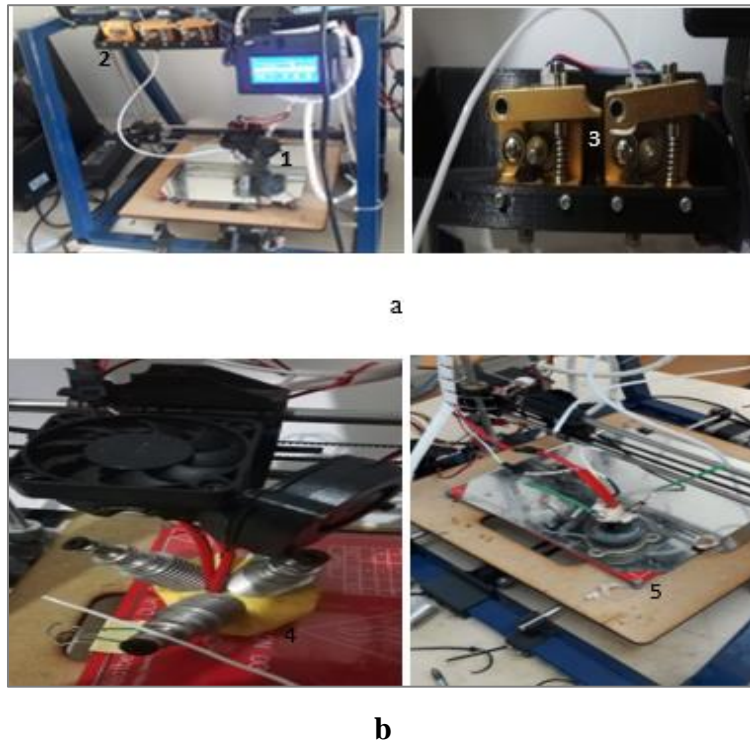


Figura 32. Fallas en el hotend tipo diamante.

La segunda opción fue la implementación de dos Hotend independientes de extrusión directa: cada Hotend independiente consta de un extrusor mk8 conectado al bloque y la boquilla por medio de una garganta que se encarga de guiar al filamento para que pueda ser extruido ver figura 33. Cada Hotend tiene la posibilidad de utilizar diferentes temperaturas y velocidades de impresión, permitiendo mezclar dos materiales con propiedades mecánicas diferentes.

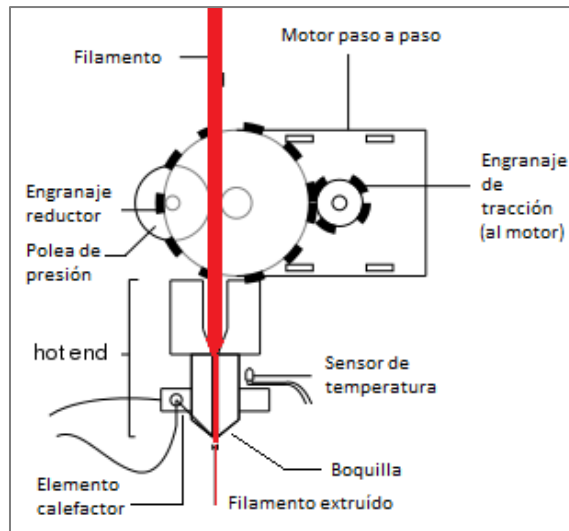


Figura 33. Hotend independiente de impresión directa (tomado de: www.mibqyyo.com)

Es relevante señalar aquí algunas recomendaciones para imprimir con dos materiales diferentes. Una de ellas es tener presente que las boquillas, que se muestran en la figura 34, deben estar alineadas para que los dos materiales sean depositados en el lugar indicado según se requiera. Además, es muy importante que las boquillas estén a la misma altura, puesto que la deposición en el Eje Z se realiza cada 0,2 mm. Una diferencia de 1mm en la altura de las boquillas representa 5 deposiciones en el eje Z, lo cual puede causar daños en el material depositado si una boquilla está más abajo que la anterior, o deposición en el aire, si está más arriba. En consecuencia, no existirá adherencia entre los dos materiales.

También se debe tomar la medida exacta entre los centros de las boquillas para poder compensar el desplazamiento al momento de realizar la deposición. En cuanto al diámetro de las boquillas, este puede ser diferente, pero las gargantas de los dos extrusores deben tener la misma longitud. De igual forma se debe estar consciente que el software permite programar diferentes temperaturas y velocidades de impresión, por tal razón no hay limitación en los diferentes materiales. La Figura 34 a continuación muestra la representación de dos extrusores independientes.

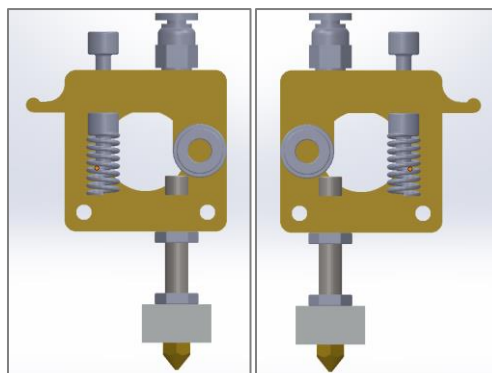


Figura 34. Representación de dos extrusores independientes.

- **Termistor:** Es un sensor fabricado con óxidos metálicos como manganeso-cobre o níquel-cobre, que sirve para medir la temperatura.

- **Boquilla del Hotend:** Es un elemento en forma de cono en el que se aloja el material fundido que sale del Hotend. En su parte inferior posee un agujero cuyo diámetro varía entre 0,4 y 0,8 mm y es por donde se extruye el material.
- **Motor paso a paso (PAP):** Están formados por dos bobinas las cuales se interpolan para generar un movimiento de grados por desplazamiento, dando así un movimiento preciso. Estos elementos son los encargados de los movimientos de toda la impresora.

- **Driver Pololu A4988:** Son los elementos encargados de controlar la posición de los motores PAP.

- **Fuente de alimentación:** Este elemento genera voltaje necesario para la operación de los componentes de la impresora. Por tanto, alimenta todo el sistema para la operación de la impresora.

- **Finales de carrera mecánicos:** Estos son *switches* mecánicos normalmente abiertos que cambian su estado a cerrados al ser accionados. Son los encargados de limitar el área de trabajo de la impresora para evitar posibles choques con la estructura y así causar daños.

- **RAMPS 1.4:** Este elemento es el encargado de ejecutar las instrucciones de la tarjeta Arduino e interconectar todos los componentes necesarios para el control de la impresora, dando las etapas

de control de potencia y protección para evitar sobrecargas o cortocircuito. Está diseñado para conectar 5 motores. En caso de fabricar piezas con dos materiales de diferentes propiedades, se debe realizar modificaciones directas en el *firmware marlín* (Prsa, Sobrevela, Irlinger, & Lueth, 2015); además se deben aumentar el número de extrusores, lo que se traduce en el uso de más motores. El control de temperatura se debe configurar también puesto que los materiales tienen temperaturas de fusión diferente. La Figura 35 muestra un Ramps 1.4.

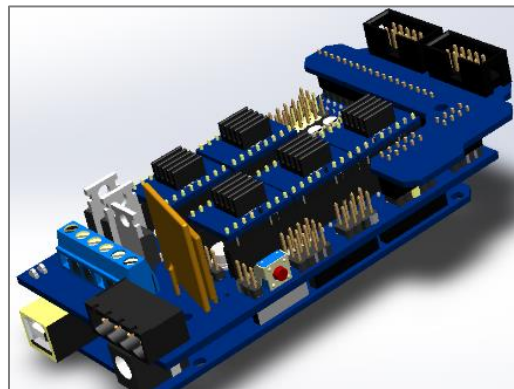


Figura 35. Representación de una Ramps 1.4.

4.1.7 Accesorios requeridos para fabricar la impresora.

Además de las piezas fabricadas en impresión 3D, la estructura metálica y el sistema electrónico, nombrados anteriormente, se presenta aquí en la tabla 2 una lista que contiene rodamientos, tornillería, poleas y otros materiales requeridos para la construcción de una impresora 3D.

Tabla 2. Materiales requeridos para la construcción de una impresora 3D.

CANTIDAD	NOMBRE	DESCIPCIÓN
3	Varillas trapezoidales de 50 cm	Diámetro 8 mm con tuerca
2	Rodamientos radiales 628 ZZ	Para soportar la varilla trapezoidal del eje Z.
1	Rodamiento 623 ZZ	Para la correa del eje X
1	Chumacera de referencia P08 RS	Para sujetar barra trapezoidal eje Z.
11	Rodamientos lineales de 8 mm	lm8uu para el eje Z 4 para el X 3 y para 4 para el eje Y
2	Polea dentada de 20 dientes para eje de 5 mm referencia gt2.	Una para motor eje X y una motor eje Z.
2	Polea dentada de 20 dientes para eje de 8 mm referencia gt2.	Para barras trapezoidales del eje Z.
1	Un acople flexible de 5 a 8 mm	Para el eje Y

8	Tornillos M3 de 35 mm	Para sujetar las piezas eje Y esquina
3	Tornillos m3 de 35 mm	Para sujetar pieza eje Y motor a la estructura
4	Tornillos m3 de 12 mm	Para sujetar el motor del eje Y a la pieza eje Y motor
9	Tornillos M3 de 15 mm	Para sujetar los soportes eje X final de carrera a la estructura
8	Tornillos M3 de 20 mm	Para sujetar los soportes de los rodamientos lineales
8	Tornillos M3 de 20 mm	Para sujetar la pieza eje Y sujeta correa
3	Tornillos M3 de 35mm	Para sujetar la pieza Eje Z soporte motor
4	Tornillos M3 de 12 mm	Para sujetar el motor a la pieza Eje Z soporte motor
2	Tornillos M3 de 40mm	Para sujetar Eje Z soporte Motor a la estructura
2	Tornillos M3 de 40 mm	Para sujetar Eje Z varilla lisa
2	Tornillos M3 de 15 mm	Para sujetar la tuerca trapezoidal de la pieza X derecha
1	Tornillos M3 de 40 mm	Para tensionar la correa del eje X
2	Tornillos M3 de 15 mm	Para sujetar la tuerca trapezoidal de la pieza X izquierda
4	Tornillos M3 de 25 mm	Para sujetar el motor a la pieza X izquierda
1	Tornillos M3 de 35 mm	Para graduar la altura de la pieza X izquierda con el final de carrera del eje Z
5	Tornillos M3 de 40 mm	Para sujetar soporte electrónica a la estructura
4	Tornillos M3 de 20 mm	Para sujetar el ventilador a la pieza soporte electrónica
2	Tornillos M3 de 50 mm	Para sujetar la pieza tapa soporte electrónica con la pieza soporte electrónica
1	Tornillos M3 de 40 mm	Para soporte de la pantalla LCD
6	Tornillos M3 de 15 mm	Para sujetar la tarjeta Arduino mega con el soporte de la electrónica
4	Tornillos M3 de 40 mm	Para sujetar soporte de extrusores a la estructura
6	Tornillos M3 de 30 mm	Para sujetar los extrusores a la pieza soporte extrusores
4	Tornillos M3 de 70 mm	Para soportar la caja LCD
4	Tornillos M3 de 35 mm	Para la cama caliente
4	Resortes de 20mm y 20 vueltas	Para nivelar la cama caliente

Fuente: El Autor 2018

Además en el anexo 3 se encuentran los planos de las piezas fabricadas mediante impresión 3D.

4.2 Materiales utilizados para la fabricación de las probetas

En este apartado se relacionan los materiales utilizados para realizar la mezcla heterogénea de materiales poliméricos. Se selecciona el ácido poli láctico por ser un material biodegradable y el poliuretano porque es de uso común en la región.

4.2.1 Ácido Poli Láctico (PLA)

El Ácido Poli Láctico (PLA) es un poliéster derivado de recursos renovables como el maíz, la yuca, la caña de azúcar, entre otros. Su origen radica desde 1845 cuando Pelouze lo condensó por medio de una destilación de agua. Por el alto costo de producción en un inicio fue utilizado para la fabricación de suturas médica. Años después, para 1948 Watson anunció los posibles usos del PLA para revestimientos y como constituyente en las resinas. Importante señalar que el costo en la producción del PLA ha experimentado una baja importante, gracias a los avances tecnológicos, en tal sentido, el uso de este polímero se ha aumentado en nuevas aplicaciones. También conviene señalar que el PLA es uno de los plásticos biodegradables con mayor posibilidad para sustituir a los plásticos sintéticos debido a sus propiedades físicas. También es un material altamente versátil que puede elaborarse con distintas formulaciones para satisfacer la mayor parte de las especificaciones de los productos. Por otro lado, al mezclarse con polímeros naturales permite desarrollar materiales con mejores propiedades de resistencia al agua (Herryman Munilla y Blanco Carracedo, 2015). Entre las ventajas más relevantes de este material se considera el grado de biocompatibilidad con los tejidos del cuerpo humano (Alberto Lopez Arraiza, 2008).

Las propiedades del PLA según el fabricante *Ultimaker* se observan en la tabla 3 a continuación.

Tabla 3. Propiedades mecánicas del PLA.

Propiedades mecánicas del PLA		
Módulo de elasticidad	3,3-3,6	GPa
Límite de elasticidad	55-72	MPa
Fuerza de tensión	47-70	MPa
Elongación	2,5-6	% tensión
Módulo de compresión	3,3-3,5	GPa
Fuerza de compresión	66-86,4	MPa
Fuerza de flexión	85	MPa
Módulo de flexión	3,1-3,6	GPa
Módulo de cortante	5,7-6,3	GPa
Hardness-vickers	17-22	HV

Fuente: www.ultimaker.com

4.2.2 Poliuretano termoplástico (TPU)

Es un elastómero descubierto hace más de 50 años con propiedades que ofrecen rendimiento y flexibilidad de procesamiento. Este material es utilizado para la elaboración de calzado y moldeados especiales por su alta resistencia al desgaste. Tiene excelente flexibilidad y resistencia a rayos ultra violeta. Su dureza puede variar debido a que contiene segmentos duros y blandos en su estructura que pueden manipularse según se requiera. En la tabla 4, se muestran las propiedades mecánicas del TPU.

Tabla 4. Propiedades mecánicas del TPU

Propiedades mecánicas del TPU		
Módulo de elasticidad	0.344-3.4	GPa
Límite de elasticidad	1.44	MPa
Elongación	10 a-11	% tensión
Fuerza de flexión	275	MPa
Módulo de flexión	9,65	GPa
Hardness-vickers	64-90	HV

Fuente: www.plastics.ulprospector.com

4.3 Fabricación de probetas normalizadas para polímeros puros

El proceso de fabricación de piezas mediante el Modelado por Deposición Fundida se lleva a cabo en dos pasos. Inicia, con el diseño en un software CAD, el cual se hace según las dimensiones estipuladas en las normas. Posteriormente, se realizan los procesos de manufactura asistida por computador (CAM por su sigla en inglés), donde se establece la posición de la pieza, y los diferentes parámetros de impresión como tipo de patrón, temperatura, velocidades, entre otros se realiza la deposición capa por capa de material fundido hasta formar las piezas utilizando una impresora 3 D. A continuación, se especifican las consideraciones tenidas en cuenta en cada paso del proceso de fabricación.

4.3.1 Diseño de las probetas

El diseño de las probetas se realiza en un software CAD teniendo en cuenta la forma y las dimensiones establecidas en las normas ASTM 638-10 para ensayos de tracción y ASTM 790 para ensayos de flexión. Tal como se mencionó en el capítulo 2 de este trabajo, la norma ASTM D638 (2014b) para ensayos de tensión se utiliza para generar los datos de propiedad de tensión, control y especificación de los materiales plásticos. Las propiedades tensoras pueden variar con la preparación de la muestra y con la velocidad y el ambiente de prueba. Por lo tanto, se deben tomar en cuenta estos factores para obtener resultados confiables. Este método permite evaluar los materiales de cualquier espesor por debajo de los 14mm (0.55 in.).

La norma ASTM 638 establece que para los ensayos de tracción o tensión la forma de la probeta es similar a una mancuerna como se observa en la Figura 36. Las probetas se dividen en dos zonas: la primera es la de agarre ubicado en cada extremo de la probeta, la segunda es la de longitud calibrada que posee un área menor, además tiene un radio de curvatura que permite minimizar los concentradores de esfuerzo generados por la reducción del área entre las dos zonas.

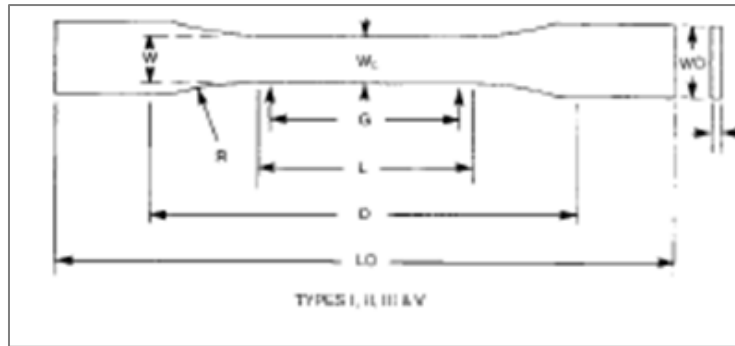


Figura 36. Probeta en forma de mancuerna para ensayos de tracción de polímeros

De igual forma, es conveniente recordar que según la norma ASTM 790 para los ensayos de flexión (ASTM, 2014a), este método cubre la determinación de las propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados, incluyendo los módulos compuestos y los materiales aislantes en forma de barras rectangulares o en cortes de hojas, laminas o con formas moldeadas. En tal sentido, la forma de las probetas es la de una barra rectangular en la que el espesor de la misma es determinado por el investigador, el ancho es de 12,7 mm y la separación entre apoyos es 16 veces el espesor. En la Figura 37 se muestra la probeta en forma de barra rectangular.

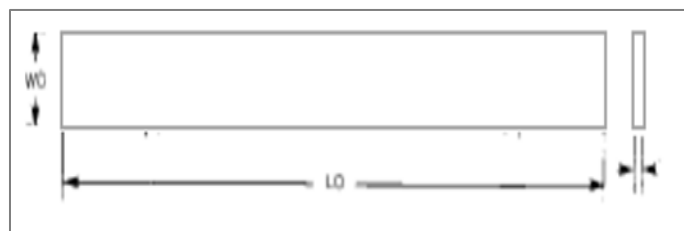


Figura 37. Probeta en forma de barra rectangular.

El diseño se realizó en un software CAD como se observan en la Figura 38. En este caso se utilizó el software Solid Word, teniendo en cuenta la geometría y las dimensiones indicadas por las normas ASTM 638-10 para ensayos de tracción figura 38a y ASTM 790 para ensayos de flexión figura 38b. Las dimensiones de las probetas para ensayos de tensión en la tabla 5 y las dimensiones para ensayos de flexión en la tabla 6 que se muestran a continuación.

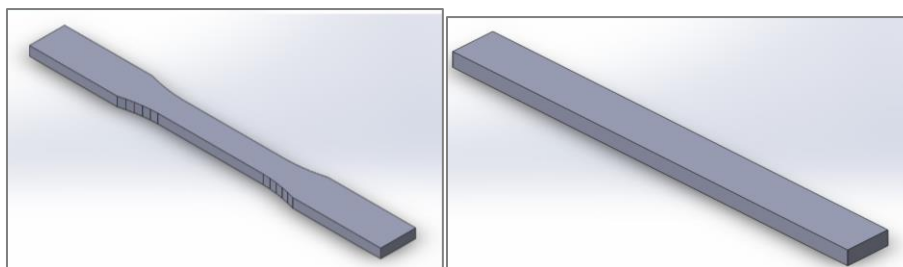


Figura 38. Diseño en Solig Word de probetas de tracción y de flexión.

Tabla 5. Dimensiones de las probetas para ensayos de tracción.

MUESTRAS PARA ENSAYOS DE TRACCION	
DIMENSION	Medida en mm
Anchura W de sección estrecha.	13
L-Longitud de la sección estrecha	57
Anchura total WO.	19
LO-longitud total.	165
G-longitud calibrada	50
D-distancia entre las empuñaduras	115
R-Radius del filete	76

Tabla 6. Dimensiones de las probetas para ensayos de flexión.

MUESTRAS PARA ENSAYOS DE FLEXIÓN	
Dimensión	Medida en mm
Anchura total WO, minG	13
LO-longitud total, minH	127
distancia entre topes	80
Espesor	5

Fuente: El Autor 2018

4.3.2 Parámetros de impresión

Estos procesos abarcan generalmente aquellos relacionados con la posición de la pieza en el software y la forma como se realiza la deposición de material fundido, además de los parámetros de impresión, para la fabricación de las probetas utilizando materiales como PLA, TPU y la fabricación de las piezas con mezclas heterogéneas de los dos materiales.

➤ **Posición de fabricación:** La posición hace referencia a la forma como se ubica la pieza en el software y también a la forma como se hará la deposición de material fundido. De esta deposición

depende la resistencia de las piezas; por lo tanto, la posición es un factor importante para el proceso de fabricación, puesto que un problema de la tecnología FDM es la anisotropía de las piezas; es decir, la orientación de las capas influye para que tengan mayor resistencia en ciertas direcciones (Dizon, Espera, Chen, Advincula, 2018). En el anexo 4 se observa un artículo producto de un estudio realizado en el desarrollo de este Trabajo de Grado, donde se analiza la influencia de los parámetros de impresión en la resistencia de un eje fabricado con la técnica de modelado por deposición fundida.

En el caso de las probetas de tracción, hay tres posibles posiciones de fabricación, como se observa en la figura 39, en la opción uno la probeta se fabrica en forma vertical depositando el material fundido sobre el área transversal de la probeta; las capas quedan perpendiculares a la carga aplicada, lo que trae como consecuencia que la probeta puede romperse con mayor facilidad. En la opción 2 la probeta se fabrica lateralmente, en consecuencia, el área de unión entre las capas es pequeña reduciendo la resistencia. La opción 3 es la más indicada, puesto que el área de unión entre las capas es mayor; por lo tanto, se obtiene mayor resistencia a la tracción según lo determinado por Croccolo, De Agostinis, y Olmi (2013).

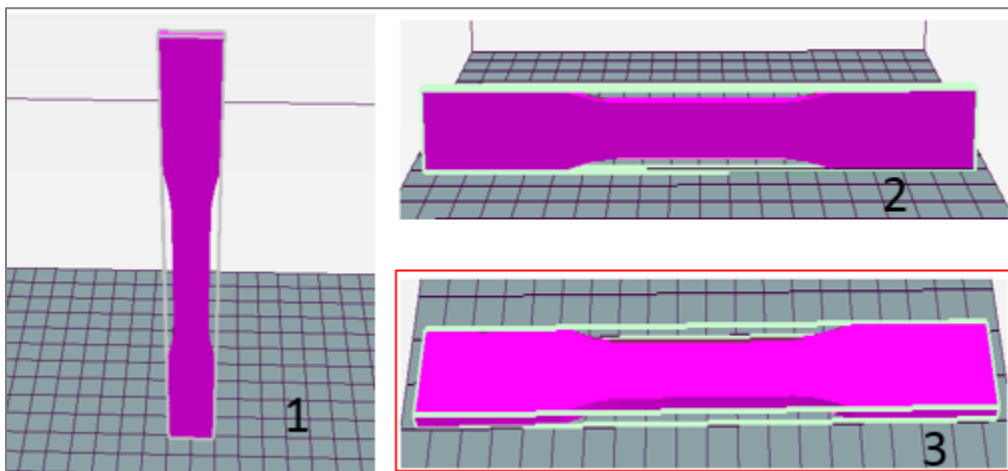


Figura 39. Ubicación de probetas de tracción en el software CAM para la fabricación.

Para la fabricación de las probetas de flexión se utilizará la misma posición como se observa en la Figura 40



Figura 40. Ubicación de probetas de flexión en el software CAM para la fabricación.

- **Altura de capa (Layer height):** La altura de capa hace referencia a la cantidad de material que se deposita en el eje Z. A mayor altura de capa menor será el tiempo de fabricación, pero la calidad de la pieza se verá afectada. Como norma general, la altura de capa no puede ser menor al 60% del diámetro de la boquilla según Ferrero (2017).

- **Densidad de Llenado (Fill density):** Este aspecto hace referencia a la densidad; es decir, a qué tan vacía o maciza quedará internamente la pieza. Es preciso mencionar que una densidad del 0,2 equivale al 20% de relleno y 80 % vacío. Se pueden manejar densidades desde el 5% hasta el 100%.

- **Patrón de llenado (Fill pattern):** Este aspecto indica el tipo de relleno interno que se quiere utilizar para fabricar la pieza. Entre algunos tipos se encuentran el relleno tipo panal de abejas, el de círculos concéntricos, el rectilinear, entre otros.

- **Velocidad de deposición (Speed infill):** Este aspecto hace referencia a la velocidad de deposición de material de relleno. Por lo general se manejan valores de 40 a 80 mm/s dependiendo del material que se esté utilizando y la complejidad de la pieza.

- **Temperatura del extrusor (Extruder temperatura):** Indica la temperatura a la cual debe estar el extrusor dependiendo del material que se esté depositando. Este es un factor muy importante porque una temperatura muy alta puede afectar las propiedades del material o incluso llegar a degradarlo. Una temperatura muy baja dificultará la extrusión y el moldeo del material ya que afecta la adherencia de las capas.

En estudios previos reportados en la literatura, se observó el interés existente por evaluar la influencia que tienen los parámetros de impresión antes mencionados, en la resistencia de las

piezas. Por ejemplo (Fernandez-Vicente, Calle, Ferrandiz, y Conejero, 2016) fabricaron probetas de tracción variando dos parámetros: el tipo de patrón y la densidad. Posteriormente realizaron los respectivos ensayos de tracción para medir las propiedades de los diferentes experimentos, obteniendo como resultado que las probetas fabricadas con el patrón rectilinear a 45° con una densidad del 100% presentaban la mayor resistencia. Teniendo en cuenta que (Croccolo, De Agostinis, & Olmi, 2013) y (Dizon et al., 2018) obtuvieron resultados similares, se fabrican las probetas utilizando el mismo tipo de patrón y la misma densidad. Otros parámetros de impresión utilizados se muestran en la tabla 7 que se presenta a continuación.

Tabla 7. Parámetros de impresión utilizados para la fabricación de las probetas

MATERIAL	PLA	TPU	
PARÁMETRO	VALOR	VALOR	UNIDAD
Temperatura de extrusión	205	235	°C
Temperatura de la cama caliente	70	70	°C
Altura de capa	0,2	0,2	Mm
Perímetros internos	7	7	UNI
Perímetros externos	15		UNI
Tipo de patrón	Rectilinear 45°	Rectilinear 45°	
Densidad	100	100	%
Velocidad de impresión	80	40	mm/s

La fabricación de las probetas se realiza utilizando la impresora construida en la investigación. Para ello, vale la pena señalar que primero se fabricaron probetas de PLA utilizando el extrusor 2 y luego las de TPU utilizando el extrusor 1. En total se fabricaron 20 probetas para realizar los ensayos de tracción y de flexión del PLA y del TPU. En la Figura 41 se muestran las probetas fabricadas.

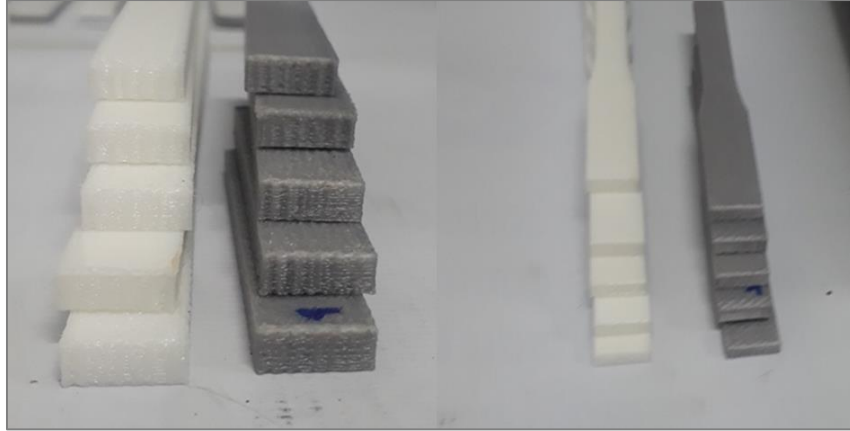


Figura 41. Probetas normalizadas fabricadas con TPU y PLA para ensayos de flexión y de tracción.

4.4 Fabricación de probetas normalizadas para mezclas de polímeros

4.4.1 Diseño de las probetas

Para este caso los diseños de las probetas son los mismos que se usaron anteriormente.

4.4.2 Parámetros de impresión.

➤ **Posición de fabricación:** Este paso resulta complejo para la fabricación de piezas utilizando mezclas heterogéneas de materiales poliméricos, puesto que por cada capa de material independiente que se desee depositar, el objeto debe dividirse. Para las probetas se tomará como referencia la disposición de los materiales compuestos tipos sándwich, los cuales están formados por 3 secciones. La primera sección corresponde al núcleo que está ubicado en el centro del objeto, y los dos restantes corresponden a las capas ubicadas en los extremos. Por lo tanto, la pieza se seccionará en tres partes como se observa en la Figura 42.

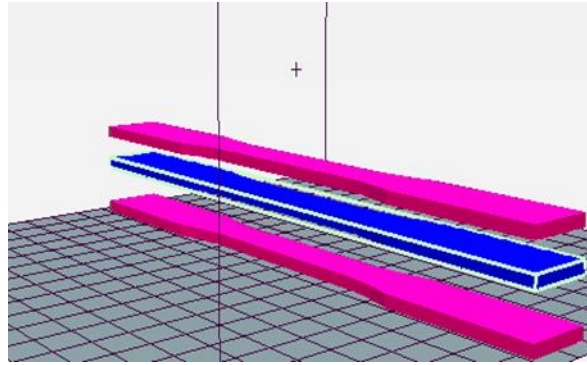


Figura 42. Posición de fabricación de las 3 secciones que conforman la mezcla heterogénea en el software CAM.

Una vez definidas las secciones en las que se dividirá el objeto, se procede a la ubicación. Cada sección se debe sobreponer una sobre otra, de tal forma que queden alineadas, hasta que se aprecien como se fueran una sola pieza, como se muestra en la Figura 43.

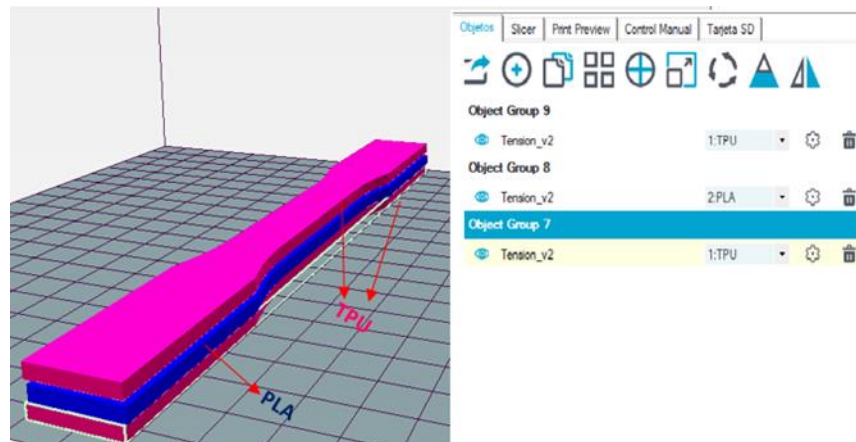


Figura 43. Unión en el software CAM de las secciones que conforman la mezcla heterogénea.

➤ **Parámetros de impresión:** Una programación previa del firmware permite asignar la temperatura del Hotend, el diámetro de la boquilla, el tipo de material, y la velocidad de extrusión, para cada material según sus requerimientos del material tal como se observa en la Figura 44.



Conexion	Impresora	Extrusor	Dimensiones Impres	Scripts	Avanzado
Numero de Extrusores:	2				
Number of Fans:	1				
Max. Extruder Temperature:	280				
Max. Bed Temperature:	120				
Max. Volume per second	12		[mm ³ /s]		
<input type="checkbox"/> Printer has a Mixing Extruder (one nozzle for all colors)					
Extrusor 1					
Nombre:	TPU				
Diameter:	0.4	[mm]	Temperature Offset:	230	[°C]
Color:					
Offset X:	0		Offset Y:	0	[mm]
Extrusor 2					
Nombre:	PLA				
Diameter:	0.4	[mm]	Temperature Offset:	205	[°C]
Color:					
Offset X:	0		Offset Y:	0	[mm]

Figura 44. Configuración de parámetros para los extrusores.

De este modo, cada vez que se termina la deposición del material de una sección de la pieza, se inicia la deposición de la siguiente sección sobre la anterior, según los parámetros que se hayan estipulado, obteniendo como resultado mezclas heterogéneas de materiales poliméricos como se muestra en la Figura 45.



Figura 45. Probetas de tracción fabricadas con mezclas heterogéneas de materiales poliméricos.

El objetivo de fabricar piezas utilizando mezclas heterogéneas de materiales poliméricos se logra gracias a la implementación de Hotend independientes, los cuales permiten adaptar los parámetros de impresión según los requerimientos de cada material, como se mencionó en sección 4.1.6. Para este caso se adaptó la temperatura de fusión del material flexible TPU, la cual supera por 30°C a la temperatura del material rígido PLA. Por otro lado, la velocidad de impresión del PLA duplica a la velocidad del TPU debido a que este material por su comportamiento flexible, no puede

someterse a altas velocidades, ya que por una fuerza de empuje producida por el motor tiende a deformarse. Los parámetros de impresión de los dos materiales pueden adaptarse gracias al uso de hotedn independientes de extrusión directa.

Se realizaron probetas para ensayos de flexión y de tracción utilizando diferentes composiciones. Iniciando por la composición 20R80F que se asigna a probetas compuestas por 20 % de PLA y 80% de TPU. Seguidas de la composición 40R60F asignada a probetas cuya composición será del 40 % de PLA y el 60% de TPU y por último se fabricaron las probetas con la composición 60R40F que corresponde a las probetas formadas por el 60% de PLA y el 40 % de TPU. Por cada composición se fabricaron cinco probetas para ensayos de tracción y cinco probetas para ensayos de flexión, en total se fabricaron 30 probetas con mezclas heterogéneas de polímeros.

4.5 Caracterización mecánica

En este apartado se describen paso a paso los ensayos de tracción y flexión realizados a los diferentes materiales utilizados en esta investigación con la finalidad de medir su resistencia y capacidad de tracción y de flexión. En lo sucesivo se detallan los procesos para ambos materiales el PLA Y TPU Y sus combinaciones.

4.5.1 Ensayo de tracción.

La caracterización mecánica se llevó a cabo mediante el ensayo de tracción basado en la norma ASTM D638-10 (2014b), para el control y especificación de los materiales plásticos, en una máquina universal *Shimatzu* con capacidad de 600kNI que se puede ver en la Figura 46. Las condiciones iniciales para los ensayos se caracterizaron por tener una temperatura ambiente de 18 °C, velocidad de deformación de 5 mm/min y una longitud calibrada de 50 mm con una separación de la mordaza de 115mm. Considerando que el PLA, el TPU y sus respectivas combinaciones, pertenecen al grupo de los materiales plásticos, fue posible realizar todos los ensayos bajo las mismas condiciones.



Figura 46. Máquina Universal Shimadzu de ensayos UH 600 kNI y mordazas para ensayos de tensión.

Es importante también tener en cuenta que la norma ASTM D638-10 (2014b) establece el número de pruebas o ensayos que se deben realizar para cada composición de las muestras, obteniendo como resultado que para cada muestra se debe realizar un mínimo de 5 ensayos.

Como se mencionó en el apartado 4.4 se fabricaron 3 sistemas diferentes con mezclas heterogéneas de materiales poliméricos, 20R80F, 40R60F, 60R40F, donde los números corresponden al porcentaje de material depositado, la letra R indica material rígido y la F material flexible. De acuerdo a lo anterior la composición 20R80F corresponde a una mezcla heterogénea formada por 20% de material rígido y 80% de material flexible. Se realizaron cinco ensayos para cada composición, cinco ensayos para el PLA y cinco ensayos para el TPU para un total de 25 ensayos de tracción las probetas fabricadas para estos ensayos se muestran en la Figura 47.



Figura 47. Probetas de mezclas heterogéneas y materiales puros fabricadas para ensayos de tracción.

4.5.2 Ensayo de flexión

La caracterización mecánica también se llevó a cabo mediante el ensayo de flexión soportado en la norma ASTM 790 (ASTM, 2014a). Este método sirve para determinar las propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados, incluyendo los módulos compuestos y los materiales aislantes en forma de barras rectangulares o en cortes de hojas, como se mencionó en el capítulo 2. En este sentido, el ensayo de flexión se realizó en una máquina universal *Shimatzu* con capacidad de 600KNI, para lo cual se utilizó un accesorio de flexión, fabricado bajo las condiciones que la misma norma establece. Este accesorio se observa en la Figura 48 a continuación.

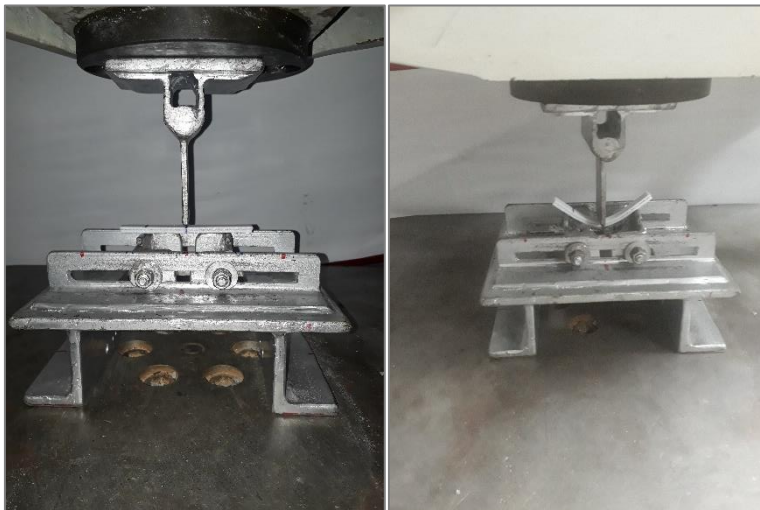


Figura 48. Accesorio para ensayos de flexión.

La velocidad para el ensayo se calculó utilizando la (Ecuación 1)

$$R = \frac{Z * L^2}{6d}$$

Ecuación 1. Velocidad de deformación

Dónde:

R = tasa de movimiento de la cruceta, mm / Min,

L = longitud de apoyo, mm.

d = profundidad de la viga, mm.

Z = tasa de esfuerzo de la fibra exterior, mm / mm / min. Para el valor Z la norma presenta dos procedimientos.

El procedimiento A donde el valor es 0,01 y aplica para materiales cuya deformación no exceda el 5%. El procedimiento B, en el que el valor de Z es 0.1 y aplica para materiales cuya deformación excede el 5%.

Teniendo en cuenta lo anterior se obtuvieron las siguientes velocidades:

$$\text{Velocidad de deformación 1: } R = \frac{0,01 \cdot 80^2}{6(5)} = 2,13 \text{ (mm/min)}$$

$$\text{Velocidad de deformación 2: } R = \frac{0,01 \cdot 80^2}{6(5)} = 21,3 \text{ (mm/min)}$$

La velocidad de deformación 1 se utiliza para realizar los ensayos de flexión del PLA puesto que tiene un comportamiento frágil y su deformación es cercana al 5%.

La velocidad de deformación 2 se utiliza para realizar los ensayos del TPU y para las diferentes combinaciones de materiales.

Al igual que en los ensayos de tracción, realizaron 5 ensayos de flexión para cada composición. En total se realizaron 25 ensayos de flexión.

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se mencionan los resultados obtenidos en los diferentes experimentos realizados para la impresión de mezclas heterogéneas de materiales poliméricos. Se inicia con el cálculo del promedio y la desviación estándar del esfuerzo, además de la deformación, el módulo de elasticidad de cada una de las composiciones y de cada material independiente; haciendo uso de estadística descriptiva. Posteriormente se muestra un análisis comparativo de las propiedades obtenidas para cada experimento.

5.1 Ensayo de tracción

Se determinó la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad y deformación máxima de cada una de las de las composiciones utilizando los lineamientos establecidos en la norma ASTM 638 - 10. Los detalles se presentan en la Figura 49. Donde se observa que primero existe una fractura del PLA debido a su rigidez y luego se presenta la falla del TPU al incrementar la carga y la deformación.



Figura 49. Ensayo de Tracción.

Según la norma ASTM 638-10 apartado 11.2 el esfuerzo de tensión se calcula dividiendo la carga por el área de la sección transversal en la zona calibrada. Por lo tanto, se utiliza la ecuación 2 para el cálculo del esfuerzo.

$$\delta = \frac{P}{bd}$$

Ecuación 2. Esfuerzo de tracción.

La deformación según el apartado 11.3 se expresa como el cambio en la longitud de la probeta dividida entre la longitud calibrada, y el resultado se multiplica por cien, tal como se muestra en la ecuación (3) a continuación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{G} * 100$$

Ecuación 3. Deformación máxima en tracción.

Donde:

Δl = diferencia entre longitud inicial y longitud final de la probeta.

G= longitud calibrada.

El módulo de elasticidad o módulo de Young se obtiene dividiendo el esfuerzo sobre la deformación en la zona elástica del material. Como se aprecia en la ecuación siguiente:

$$E = \frac{\delta}{\varepsilon}$$

Ecuación 4. Módulo de elasticidad.

Se realizaron cinco ensayos por cada composición como requiere la norma. Los resultados de los promedios del módulo de Young, esfuerzo máximo a la tensión y el porcentaje a la deformación se muestran en la tabla 8. Como se mencionó en el la sección 2.5 el esfuerzo máximo a tensión hace referencia a la carga que puede soportar la probeta antes de producirse la falla, la deformación máxima representa el cambio en la longitud inicial de la probeta y el módulo de elasticidad refiere la rigidez del material, expresado en la pendiente de la zona elástica.

Tabla 8. Resultados ensayos de tracción.

sistema	MODULO GPa	ESFUERZO MPa	DEFORMACIO %
TPU	26 ± 2	4 ± 0,7	145 ± 5
20R80F	50,8 ± 7	11,2 ± 0,54	17,34 ± 1,2
40R60F	550,9 ± 4,1	16,15 ± 3,6	18,72 ± 1,3
60R40F	990,2 ± 5,1	28,8 ± 1,18	17,3 ± 1,6
PLA	1420,9 ± 25,8	37,76 ± 1,61	13,92 ± 2

Fuente. El autor 2018

Los ensayos de tracción en las 25 probetas se realizaron en la máquina universal de ensayos SHIMATZU, que utiliza el software *trapezium* para configurar el tipo de ensayo, velocidad de

deformación, geometría de la probeta según lo establece la norma ASTM 638-10. La grafica esfuerzo Vs deformación de las composiciones se observa en la Figura 50.

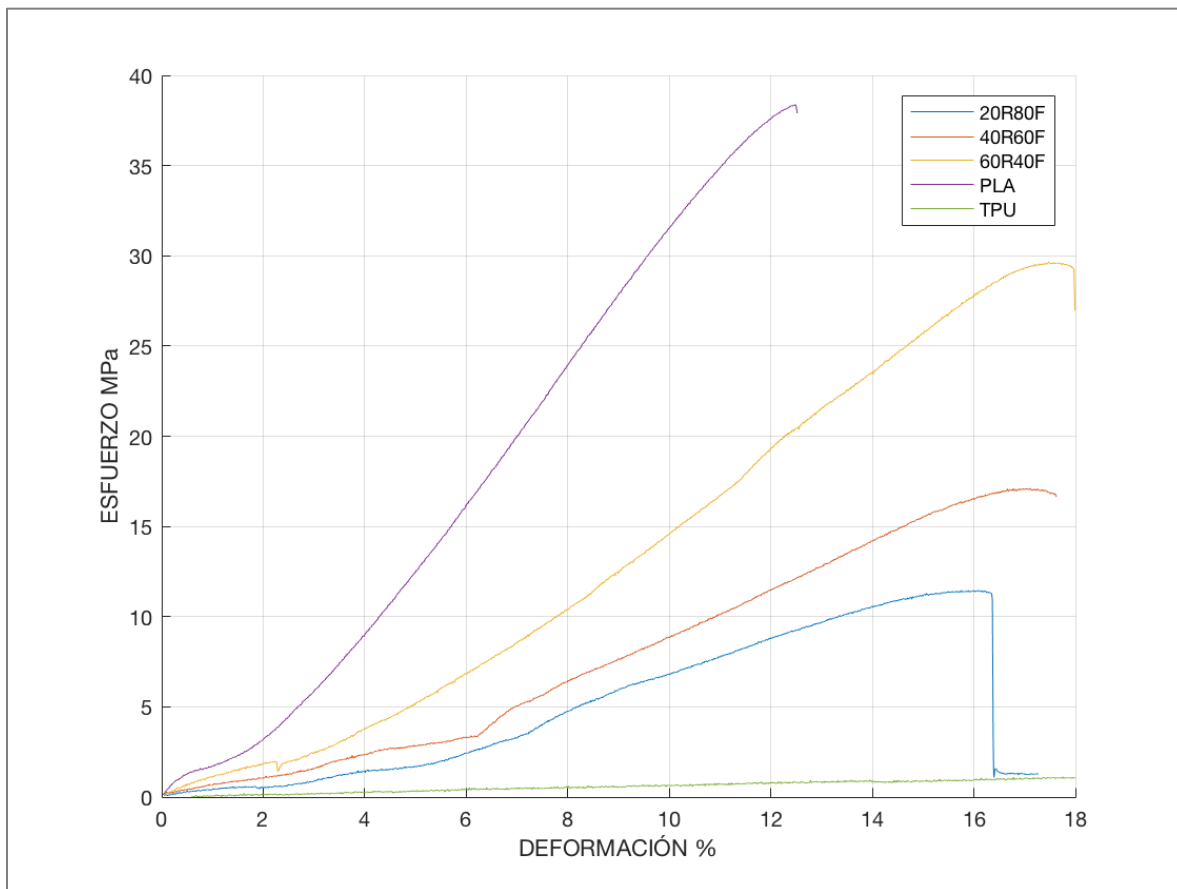


Figura 50. Grafica esfuerzo deformación a tracción de las diferentes composiciones.

De acuerdo al comportamiento de las gráficas esfuerzo-deformación para las diferentes composiciones, se observa una conducta elástico-lineal para los cuatro sistemas, puesto que hay una proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación. Por otro lado, el comportamiento del polímero TPU, se evidencia una tendencia elástica, pero a diferencia de los anteriores su deformación se manifiesta en grandes porcentajes muy superiores con propiedades elástico-plásticas. Esta conducta es consecuencia del comportamiento de los polímeros termoplásticos. Por otro lado, no hay presencia de discontinuidades en los diagramas, esto es indicativo de que hubo una buena adherencia entre los dos materiales.

Es conveniente resaltar que a medida que se aumenta el porcentaje del PLA, componente rígido de la mezcla, incrementado los valores de la resistencia y la rigidez. Como consecuencia de la variación en las cantidades de los materiales para la configuración 60R40F formada por 60% de PLA y 40% de TPU, se obtuvieron valores de la resistencia a la tracción de 28,8 MPa y una deformación máxima de 17,3%. Por otro lado, para la composición 20R80F, formada por 20% de PLA y 80% de TPU obtuvo una resistencia a la tracción de 11,2 MPa y una deformación máxima de 17,2 %. En la Figura 51 se presenta la gráfica esfuerzo deformación con otra escala, para los ensayos de tracción donde se puede observar la deformación total del TPU, el cual presenta un comportamiento elástico-plástico, puesto que se evidencia una gran deformación de 140% causada por un esfuerzo pequeño de 5 MPa.

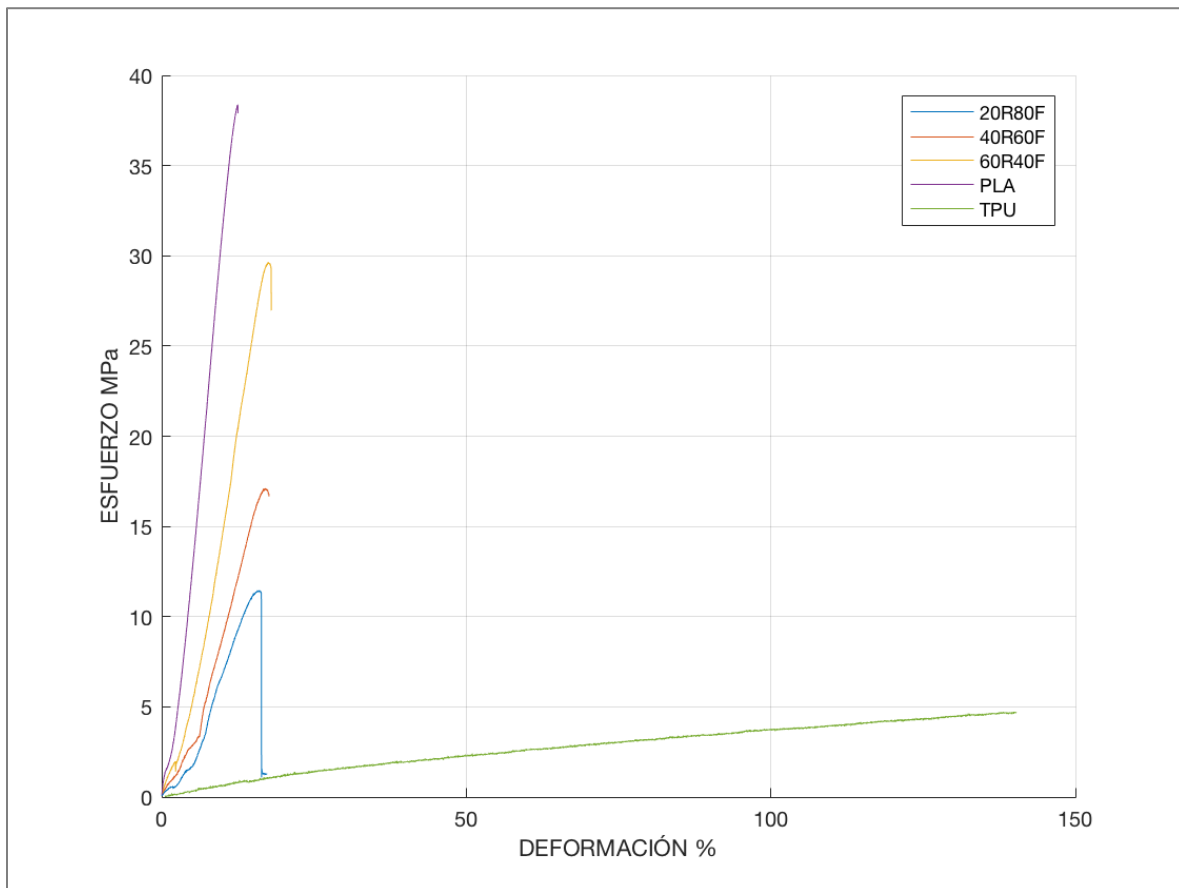


Figura 51. Gráfica esfuerzo deformación a escala del TPU.

Los resultados de las propiedades mecánicas a tracción para el PLA y el TPU corroboran el comportamiento frágil del PLA por su baja deformación y el comportamiento flexible del TPU por su bajo módulo de elasticidad. Pero resulta importante analizar el comportamiento obtenido en las diferentes mezclas heterogéneas, en las cuales el material obtiene mayor resistencia que el TPU y mayor deformación que el PLA.

5.2 Ensayos de flexión

En la Figura 52, se observa la disposición que se utiliza para realizar un ensayo de flexión a una probeta con mezclas heterogéneas. Una vez se aplica la carga se puede ver como el núcleo de la probeta fabricado con PLA se fractura por la deformación a la que es sometido, a diferencia de las capas fabricadas con TPU que se mantienen unidas evitando la separación de la probeta. Una vez realizado el ensayo se obtiene un documento que contiene el valor de la carga y el desplazamiento soportado por la probeta en cada instante del ensayo (ver anexo 5). Estos datos son importantes porque con ellos se puede calcular las propiedades mecánicas para cada composición.

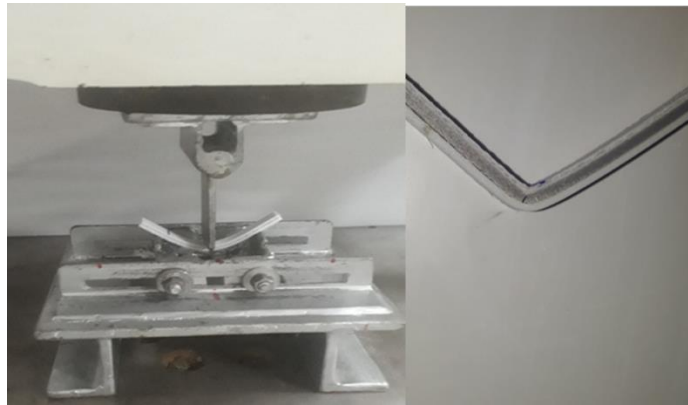


Figura 52. Ensayo de flexión.

Según la norma ASTM 790 apartad 12.2 el esfuerzo de flexión para una viga apoyada en dos puntos y cargada en el centro se puede expresar como: 3 veces la carga aplicada multiplicada por la distancia entre soportes; dividida entre 2 veces el ancho de la viga, multiplicado por el espesor elevado al cuadrado, tal como se muestra en la siguiente ecuación (2).

$$\delta = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Ecuación 5. Esfuerzo de flexión.

Donde:

P= Carga aplicada en Newton

L= separación entre apoyos.

b= Ancho de la viga

d= Espesor o profundidad de la viga.

Utilizando la ecuación se realiza el cálculo de la flexión para cada uno de ensayos realizados, estos cálculos se pueden apreciar en el anexo, y los resultados obtenidos del esfuerzo de flexión para los sistemas se muestran en la tabla 9.

La deformación se expresa como un cambio en la longitud de la probeta, dividida entre, la longitud calibrada de la probeta, el resultado se multiplica por cien ecuación (6).

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{G} * 100$$

Ecuación 6. Deformación máxima en flexión.

Donde:

Δl = diferencia entre longitud inicial y longitud final de la probeta.

G= longitud calibrada.

El módulo se obtiene dividiendo el esfuerzo sobre la deformación en la zona elástica del material.

Como se aprecia en la ecuación a continuación:

$$E = \frac{\delta}{\varepsilon}$$

Ecuación 7. Módulo de flexión.

Para cada composición se realizaron 5 ensayos como lo indica la norma. Los resultados de los promedios y la desviación estándar del módulo de Young, el esfuerzo máximo a la flexión y el porcentaje a la deformación se muestran en la tabla 9 a continuación, en el anexo 5 se observan los documentos generados por la máquina universal y en el anexo 6 los cálculos realizados para determinar las propiedades de cada probeta.

Tabla 9. Resultados Ensayos de Flexión.

sistema	MODULO MPa	ESFUERZO MPa	DEFORMACIO %
TPU	84,58 ± 6,7	10 ± 2,1	21,8 ± 4,6
20R80F	256 ± 5,4	15,8 ± 3,8	24,1 ± 0,17
40R60F	452,1 ± 28,8	28,1 ± 4,3	24,6 ± 1,3
60R40F	1100,5 ± 63,3	49,8 ± 4,4	8,6 ± 0,7
PLA	2379,3 ± 99	82,7 ± 1,2	5,4 ± 0,23

Los ensayos de flexión de las 25 probetas se realizaron en la máquina universal de ensayos SHIMATZU, que utiliza el software *trapezium* para configurar el tipo de ensayo, velocidad de deformación, geometría de la probeta, según lo establece la norma ASTM 790. La gráfica esfuerzo-deformación de las composiciones se observa en la Figura 53.

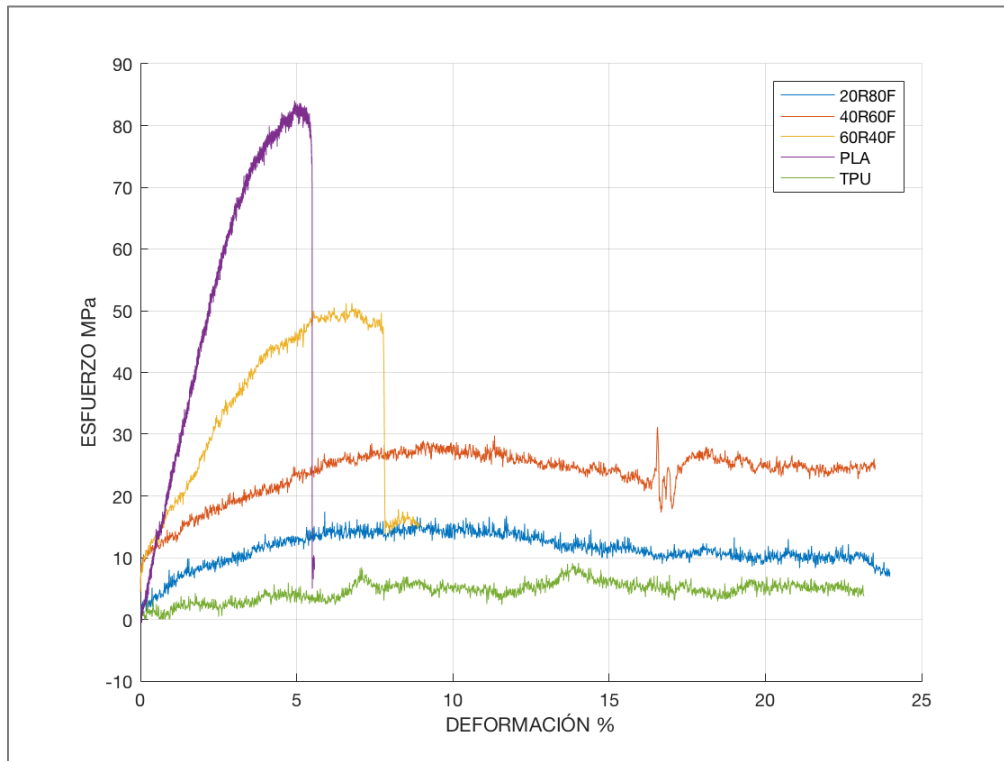


Figura 53. Gráfica esfuerzo deformación para el TPU y las diferentes combinaciones.

En la Figura 53 se observa el comportamiento elástico-plástico del TPU, el cual alcanza una deformación del 23,2 % con un esfuerzo menor a 10 MPa. Este comportamiento se mantiene en las

composiciones 20R80F, 40R60F y en esta última alcanza una deformación del 23,2 % con un esfuerzo de 28 MPa 2,8 veces mayor que el TPU. Para la composición 60R40F se observa un comportamiento más cercano al del PLA, debido al incremento significativo del esfuerzo, que alcanzó un valor del 50 MPa, es decir, 5 veces más que el esfuerzo soportado por el TPU, pero a su vez, se ve afectada la deformación en un 60 % con respecto al TPU. Aunque la deformación obtenida por la composición 60R40F supera la deformación obtenida por el PLA la cual corresponde al 5,23%.

Con los ensayos de flexión realizados se puede comprobar que la fabricación de piezas combinando materiales puede ser una opción para mejorar sus propiedades, puesto que en todas las combinaciones se obtuvieron cambios significativos con respecto a los materiales base PLA y TPU; esto debido a que en todas se logró mayor resistencia que en el TPU y mayor deformación que en el PLA.

5.3 Comparación de resultados con otras investigaciones reportadas en la literatura.

Varios investigadores (Fernández-Vicente et al, 2016; Dizon et al, 2018; (Letcher, Rankouhi y Javadpour, 2015) concuerdan y han demostrado la influencia de la orientación de la capa, la velocidad de impresión y otros parámetros de impresión en la resistencia de las piezas. Por esta razón, se tuvieron en cuenta los estudios realizados para la selección de los parámetros de impresión.

De acuerdo con lo anterior, los resultados de la resistencia a la tracción obtenidos para el TPU son similares a los del estudio realizado por (Ribeiro, Freitas, & Andrade, 2014), los cuales alcanzaron una resistencia a la tracción de 4,16 MPa. De igual forma, los resultados obtenidos para el PLA resultan similares a los obtenidos por (Mirón, Ferrándiz, Juárez, & Mengual, 2017), con valores de la resistencia a la tensión fue de 37,3 MPa y la deformación de 5,14.

Las propiedades de la composición 60R40F superan a las propiedades alcanzadas por las fabricadas con ABS bajo las mismas condiciones según los resultados del estudio de Letcher, Rankouhi y

Javadpour (2015). Para la composición 60R40F, la resistencia a la flexión obtenida fue de 49 MPa y el porcentaje de deformación fue de 8,9 %, mientras que para el copolimero de ABS obtuvo una resistencia a la flexión de 38 MPa y un porcentaje de deformación del 4,7%.

En la tabla 10, se ve una recopilación de los resultados correspondientes a las propiedades mecánicas obtenidas en investigaciones, donde la técnica de fabricación fue la impresión 3D y se comparan las propiedades obtenidas mediante las mezclas heterogéneas de PLA y TPU realizadas en esta investigación.

Tabla 10. Comparación de resultados con otras investigaciones.

MATERIAL	MÓDULO MPa	RESISTENCIA MPa	DEFORMACIÓN %	TIPO DE ENSAYO	AUTOR
PLA		49,72	0,014	Tracción ASTM638	(Alafaghani, Qattawi, Alrawi, & Guzman, 2017)
PLA	702	37,4	5,14	Tracción ASTM638	(Mirón et al., 2017)
PLA F	712	46,53	3,4	Tracción ASTM638	
ABS	834	36,4	5,3	Tracción ASTM638	(Fernandez-Vicente, Calle, Ferrandiz, & Conejero, 2016)
ABS		20	1,2	Tracción ASTM638	(Acuna, Rivas, Chancusi, & Navarrete, 2015)
VeroWhitePlus	2918	69,5	7,1	Tracción ASTM638	(Mueller, Shea, & Daraio, 2015)
PLA	3000	89,2	4,89	Flexión ASTM 790	(Bajracharya, Bajwa, & Bajwa, 2017)
PLA + C10	3300	40	2,16		
ABS-5	3700	40	1,7	Tracción ASTM638	(Weng, Wang, Senthil, & Wu, 2016)
ABS-5	1900	50	4,5	Flexión ASTM 790	
20R80F	50,8	11,2	17,3	Tracción ASTM638	Resultados obtenidos en las diferentes composiciones.
20R80F	256,5	15,8	24,1	Flexión ASTM 790	
40R60F	55,9	16,2	18,7	Tracción ASTM638	
40R60F	455,1	28,1	24,6	Flexión ASTM 790	
60R40F	99,2	28,2	17,3	Tracción ASTM638	
60R40F	1100	49,8	8,6	Flexión ASTM 790	

Estas investigaciones demuestran el interés existente por determinar y mejorar las propiedades de las piezas fabricadas mediante esta técnica. Gracias a este interés se pueden observar trabajos como el de Weng et al. (2016) quienes fabricaron un filamento nanocompuesto de ABS con el objetivo de obtener piezas con mejores propiedades. De igual forma, (Bajracharya et al., 2017) fabricaron un filamento de PLA reforzado con fibras de algodón con el mismo fin. También (Abdullah et al., 2017) se interesaron por fabricar un filamento combinando poliamida con cerámica, pero a pesar del gran aporte que estos trabajos hacen a la técnica de fabricación, son difíciles de replicar por las implicaciones de tecnología y equipos que requieren.

Una ventaja del desarrollo de este Trabajo de Grado, es que la fabricación de mezclas heterogéneas se logra con la implementación, de hotends independientes de extrusión directa, en la impresora 3D y las propiedades mecánicas obtenidas, son similares a las alcanzadas en las investigaciones mencionadas anteriormente; lo cual se puede verificar comparando la resistencia a la flexión de la composición 60R40F con la del ABS-5 correspondiente a un nanocompuesto de ABS.

En el anexo 7 se observa la participación en el II SIMPOSIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA INDUSTRIAL UNA MIRADA HACIA LA INNOVACIÓN Y EL DESARROLLO, donde se expusieron algunos avances de la investigación. Por otro lado en el anexo 8 se observa la inscripción realizada en el evento científico COMTEL2018 que se llevara a cabo en Perú, donde se espera poder participar y difundir información producto del desarrollo de esta investigación.

6 CONCLUSIONES

Este capítulo señala las conclusiones y recomendaciones a las que se ha llegado en este estudio. Dichas conclusiones parten de los objetivos de la investigación, los cuales se enmarcan en la fabricación y caracterización de mezclas heterogéneas de materiales poliméricos utilizando la técnica de modelado por deposición fundida, para esto se requiere de la implementación de una impresora 3D que permita combinar como mínimo dos materiales poliméricos con propiedades mecánicas diferentes con el apoyo de modelos RepRap existentes.

Importante mencionar, que en la presente investigación, se logró la fabricación de piezas, por medio de la técnica de manufactura aditiva FDM, combinando dos materiales con propiedades diferentes, el PLA, que se caracteriza por ser un material rígido, y el TPU, por ser un material flexible. Un verdadero reto para esta investigación fue conseguir la deposición de estos materiales en una sola impresión, debido a que los materiales seleccionados para el estudio tienen diferentes temperaturas de fusión y velocidad de deposición. Por tal motivo, se decidió construir una impresora 3D partiendo del modelo Open Source Prusa i3 Hephestos perteneciente al proyecto RepRap. A esta impresora se le realizaron una serie de modificaciones estructurales para mejorar su eficiencia y portabilidad. Con estas modificaciones se redujo el número de motores, y además se adaptó para lograr la utilización de dos materiales. Se implementaron dos Hotends independientes de extrusión directa que junto con una adecuada programación en el *firmware* permitieron configurar los canales de impresión para depositar cada material.

El análisis de las investigaciones reportadas en la literatura relacionadas con este Trabajo de grado, reveló que el patrón rectilíneo a 45° con una densidad del 100%, es la configuración que presenta mejor comportamiento, por lo tanto, se utilizó esta configuración para la fabricación de las probetas analizadas en esta investigación. Por otro lado la velocidad de deposición y la temperatura para cada material se programaron según las recomendaciones del fabricante.

De acuerdo con los resultados, es evidente que la combinación de materiales poliméricos afecta las propiedades mecánicas de la mezcla. Por tanto, en la medida, que la mezcla contenga mayor

cantidad de un material, el comportamiento se asemeja a las propiedades del componente que este en más cantidad.

Otro aspecto revelado en esta investigación, se relaciona con el estudio comparativo de los resultados obtenidos con otros autores, lo cual permitió validar la hipótesis planteada, en cuanto a la posibilidad de fabricar probetas en 3D mediante el uso de mezclas heterogéneas de polímeros.

En forma general, con los resultados antes expuestos, se demuestra la factibilidad en la fabricación y caracterización mecánica de mezclas heterogéneas poliméricas obtenidas mediante el modelado por deposición fundida (3D). Por tanto, se recomienda a futuros investigadores seguir ahondando en la temática, puesto que la impresión en 3D con materiales que presentan características mecánicas diferentes es un tema que ha sido poco explorado en este contexto. Por tanto, se asume como un tópico con muchas aristas que debería ser considerado para investigaciones futuras tanto en Colombia como en el resto de países latinoamericanos con la finalidad de brindar nuevas y mejores opciones de impresión 3D.

7 RECOMENDACIONES.

Con el fin de optimizar el proceso de fabricación, de mezclas heterogéneas de materiales poliméricos mediante impresión 3D, se recomienda realizar un diseño experimental con el cual se puedan evaluar las propiedades mecánicas utilizando diferentes parámetros de impresión.

Con el fin de reducir el tiempo de fabricación se recomienda utilizando boquillas y filamentos de diámetros mayores, para posteriormente realizar la respectiva caracterización mecánica y evaluar los efectos en las propiedades mecánicas.

Continuar trabajos de investigación donde se evalúen las propiedades mecánicas de mezclas heterogéneas fabricadas con materiales diferentes al PLA y al TPU, con el fin de ahondar más en este tema que ha sido poco explorado.

Evaluar la propiedades mecánicas de las mezclas heterogéneas, fabricadas utilizando diferentes orientaciones de deposición.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdullah, A., Noraihan, T., Tuan, A., Mohamad, D., Akil, H., y Rajion, Z. (2017). Mechanical and physical properties of highly ZrO₂/β-TCP filled polyamide 12 prepared via fused deposition modelling (FDM) 3D printer for potential craniofacial reconstruction application. *Materials Letters*, 189, 307–309. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.11.052>
- Abilgazyev, A., Kulzhan, T., Raissov, N., Ali, M. ., Match, W. ., y Mir-Nasiri, N. (2015). Design and development of multi-nozzle extrusion system for 3D printer. *2015 4th International Conference on Informatics, Electronics and Vision, ICIEV 2015*, 3–7. <https://doi.org/10.1109/ICIEV.2015.7333982>
- Acuna, F., Rivas, D., Chancusi, S., y Navarrete, P. (2015). Design and Construction of a 3D Printer Auto Controller Wirelessly Through of Free Software. *IEEE Latin America Transactions*, 13(6), 1893–1898. Recuperado de: <https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7164214>
- Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., y Guzman, A. (2017). Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791–803 .Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.079>
- Albarracín, D., Arias, E., y Adolfo Duran, G. (2017). Desarrollo de una metodología para la impresión de prótesis mediante tecnología 3D, *Actas de Ingeniería*, 3, 81–89.
- Almudena, R. (2013). Estado del arte, Impresión 3D y edificación. *CTE Arquitectura*. Recuperado de: <http://www.ctearquitectura.es/soluciones-sostenibles/materiales/estado-del-arte-impresion-3d-y-edificacion/>

American Society for Testing and Materials ASTM (2014a). *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. Designation: D790*. Estados Unidos de América: ASTM International.

American Society for Testing and Materials ASTM (2014b). *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. Designation: D638*. Estados Unidos de América: ASTM International.

Ariza, L. (2015). *Fabricación de Órganos Humanos con Impresoras 3D*. [Documento en Línea] Recuperado de: <https://www.pressreader.com/spain/muy-interesante/20150520>

Askeland, D. (1998). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Méjico: International Thompson Editores.

Bajracharya, R., Bajwa, D., y Bajwa, S. (2017). Mechanical properties of polylacticacid composites reinforced with cotton gin waste and flax fibers. *Procedia Engineering*, 200, 370–376. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.052>

Ballester, M. (2014). *Políticas para el buen manejo de información digital – Pymempresario*. [Documento en Línea] Recuperado de: <https://www.pymempresario.com/2014/10/politicas-para-el-buen-manejo-de-informacion-digital/>

Beltran, A., y Mancilla G. (2012). *Tecnología de polímeros, procesado y propiedades*. España, Universidad de Alicante: Publicaciones Universidad de Alicante.

Blandon, S., Amaya, J., y Rojas, A. (octubre de 2015). *Development of a 3D Printer and a Supervision System Towards the Improvement of Physical Properties and Surface Finish of the Printed Parts*. En *IEEE (presidencia) 2nd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC), Manizales, Colombia*. DOI: 10.1109/CCAC.2015.7345179

- Borjas, R., y Flores, W. (2016). Developing a human prosthesis using a 3D printer in Honduras. Proceedings of the 2015 IEEE. *35th Central American and Panama Convention, CONCAPAN 2015*. Recuperado de: <https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2015.7428465>
- Callister, W. (2007). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Buenos Aires, Argentina: Editorial Reverte.
- Celi, R., Sempertegui, A., Morocho, D., Loza, D., Alulema, D., y Proano, M. (2016). Study, design and construction of a 3D printer implemented through a delta robot. *CHILECON 2015 - 2015 IEEE Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, Proceedings of IEEE Chilecon 2015*, 717–722. <https://doi.org/10.1109/Chilecon.2015.7404650>
- Croccolo, M., De Agostinis, M., Olmi, G. (2013). Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30. *Computational Materials Science*. 79, 506-518.
- Dizon, J., Espera, A., Chen, Q., y Advincula, R. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*. 20, 44-67.
- Fernández-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., y Conejero, A. (2016). Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behaviour in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 3(3), 183-192. DOI: 10.1089/3dp.2015.0063
- Ferrero, R. (2017). Guía de configuración de los parámetros de Slic3r. España: *Imprimalia 3D*. [Documento en Línea] Recuperado de: <http://imprimalia3d.com/recursosimpresion3d/gu-configuraci-n-par-metros-slic3r>
- Frax, J. (2015). *Impresiones en alta definición – Cambiemos las varillas por usillos*. [Documento en Línea] Recuperado de: <https://www.frax3d.com/impresion-en-hd>

Gómez, J. (2013) *Proyecto Clone Wars*. [Documento en Línea] Recuperado de:
http://www.reprap.org/wiki/Clone_wars.

Groover, M. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, procesos y sistemas*. Méjico: Mc Graw Hill.

Gross, B., Erkal, J., Lockwood, S., Chen, C., y Spence, D. (2014). Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences. *Analytical Chemistry*, pp. 3240-3253.

Herryman, M. y Blanco, G. (2015). Ácido láctico y poliláctico: situación actual y tendencias. *ICIDCA*, 49-59.

Iguas, S. (2018). igus® drylin® - Husillos de rosca trapezoidal - Datos técnicos. [Documento en Línea] Recuperado de:
https://www.igus.es/wpck/2374/DryLin_Trapezgewindemutter_Technische_Daten

Kun, K. (2016). Reconstruction and development of a 3D printer using FDM technology. *Procedia Engineering*, 149(June), 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.657>

Lanaro, M., Forrestal, D., Scheurer, S., Slinger, D., Liao, S., Powell, S., y Woodruff, M. (2017). 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and evaluation. *Journal of Food Engineering*, 215, 13–22. Recuperado de:
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029>

Letcher, T., Rankouhi, B., y Javadpour, S. (2015). Experimental Study of Mechanical Properties of Additively Manufactured ABS Plastic as a Function of Layer Parameters. *Advanced Manufacturing*, (2), V02AT02A018. <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-52634>

Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, E., Metsä-Kortelainen, S., y Sozer, N. (2018). Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing. *Journal of*

- Food Engineering*, 220, pp. 20–27. Recuperado de:
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.034>
- López, A. (2008). Correlaciones procesado-estructura-propiedades en sistemas poliméricos complejos basados en poliésteres biodegradables. Evaluación de su posible uso en aplicaciones ecológicas y biomédicas (Tesis de Doctorado). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. Recuperado de:
http://fondosdigitales.us.es/media/thesis/722/S_TD_203.pdf
- López, J. (2016). Impresoras 3D. *Notas de Futuro*, 2,17. Recuperado de:
http://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranetmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf
- Mata, F. (2004). Utilización de composites de matriz polimérica en la fabricación de automóviles, *Técnica industrial*, 254, 43-47.
- Mirón, V., Ferrándiz, S., Juárez, D., y Mengual, A. (2017). Manufacturing and characterization of 3D printer filament using tailoring materials. *Procedia Manufacturing*, 13, 888–894. Reuperado de:
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.151>
- Mueller, J., Shea, K., y Daraio, C. (2015). Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3D printing through efficient experimental design. *Materials and Design*, 86, 902–912. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.129>
- Peña, G y Cañete, V (2014). *Diseño del prototipo de un kit de impresora 3D*. [Documento en Línea] Recuperado de: <http://www.upcommons.upc.edu.com>
- Pilch, Z., Domin, J., y Szlapa, A. (2016). The impact of vibration of the 3D printer table on the quality of print. *2015 Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics, WZEE 2015*. <https://doi.org/10.1109/WZEE.2015.7394045>

Pohl, B., Gasca, F., Christ, O., y Hofmann, U. (2013). 3D printers may reduce animal numbers to train neuroengineering procedures. *International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering*, NER, 887–890. [Documento en Línea] Recuperado de: <https://doi.org/10.1109/NER.2013.6696077>

Ponce, M. (2014). *Diseño, Construcción y Puesta en marcha de una impresora 3D modelo Rostock*. (Trabajo de Grado). Ingeniería Técnica Industrial, Especialidad Electrónica Industrial: Universidad Carlos III de Madrid.

Prsa, J., Sobreviela, J., Irlinger, F., y Lueth, T. (2015). Software tool for detection and filling of voids as a part of tool-path strategy development for droplet generating 3D printers. *IEEE CITS 2015 - 2015 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems*. [Documento en Línea] Recuperado de: <https://doi.org/10.1109/CITS.2015.7297725>

Ramírez, P. y López, J. (2011). Tecnologías Aditivas, Un concepto más amplio que el de Prototipado Rápido. En: *XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos: 6 al 8 julio 2011*. pp. 2133-2146. Huesa, Asociación de Miembros de IPMA, Recuperado de: http://www.aepro.com/files/congresos/2011huesca/CIIP11_2133.

Relaño, P. (2013). *Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida*. (Trabajo de Maestría). Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. Recuperado de: <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/18015>

RepRap. (2016) *Prusa i3 Hephastos_es - RepRapWiki*. [Documento en Línea] Recuperado abril 8, 2017, de: https://reprap.org/wiki/Prusa_i3_Hephastos/es

RepRap. (2016). *RepRap_es-RepRap*. [Documento en Línea] Recuperado de: <https://reprap.org/wiki/RepRap/es>

- Ribeiro, J., Freitas, G., y Andrade, M. (2014). Mechanical Tests in Thermoplastic Elastomers Used in 3D Printers for the Construction of Hand Prosthesis. En: *Congreso de Intercambios de cuidado médico Panamericanos PAHCE: 7 al 12 de abril de 2014. Brasil*. ISBN 978-1-4799-3555-0.
- Rodriguez, E., Cortés, E., y Peña, C. (2016). Aplicación de la metodología QFD en el desarrollo de una impresora 3D. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. Recuperado de: Resultsfor%22aplicación de la metodología qfd en el desarrollo de una impresora 3d application of the qfd methodology in the development of a 3d printer%22 in %22all Documents%22
- Romero, M. y valarezo, A. (2016). *Diseño y construcción de una impresora 3D de plástico*. Ecuador, Universidad San Francisco de Quito.
- Salgado, V. (2017). Historia impresion 3d2. [Documento en línea] Recuperado de: <http://3d2bach.blogspot.com/2017/03/contexto-historico-de-las-impresoras-3d.html>
- Suárez, A., Tafur, W., y Calderón, P. (2015). Aplicación de herramientas CAD/CAM para el diseño y fabricación de prototipos de moldes de inyección de plásticos. *Tecnura*, 19(46), 115. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a09> Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/236857411>
- Torres, E., León, J., y Torres, E. (2012). Diseño y construcción de una impresora 3D aplicando la técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida. *Tercer Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica III CAIM 2012*.
- Valverde, R. (2016). *Impresoras 3D: marco teórico, modelos de desarrollo y campos de aplicación*. (Tesis Doctoral). Universidad de Castilla-La Mancha.

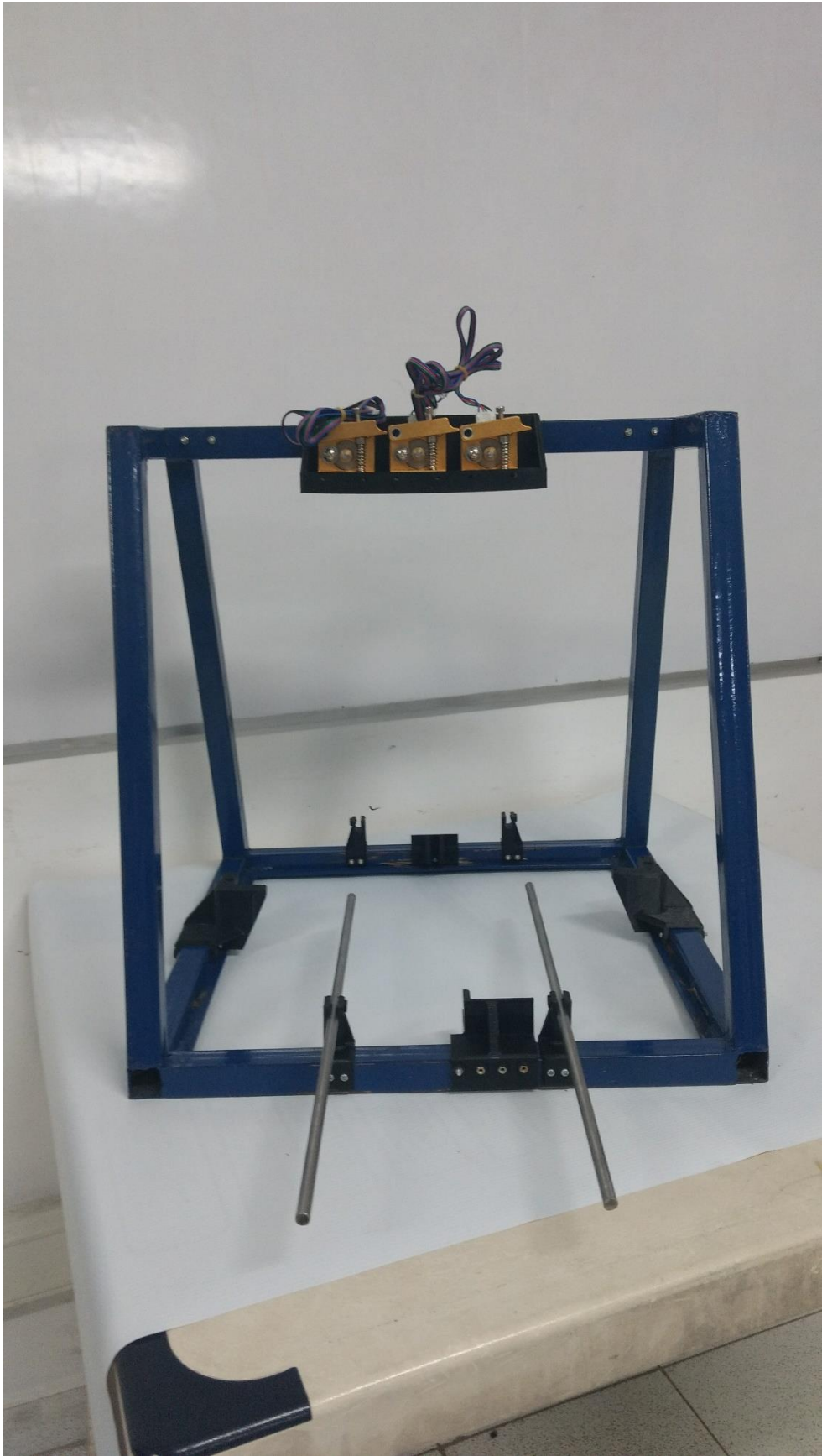
Weng, Z., Wang, J., Senthil, T., y Wu, L. (2016). Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. *Materials and Design*, 102, 276–283.

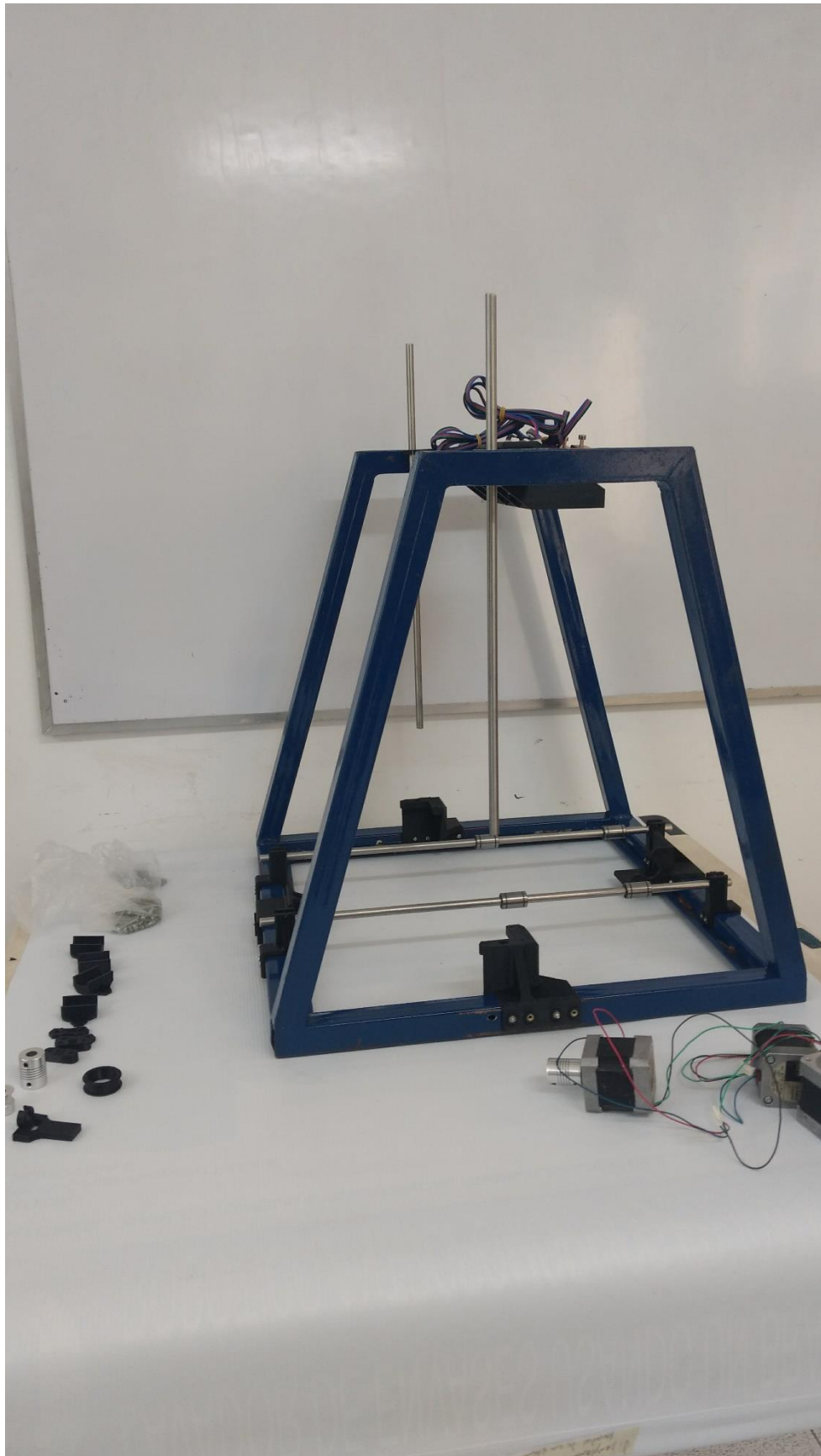
ANEXOS

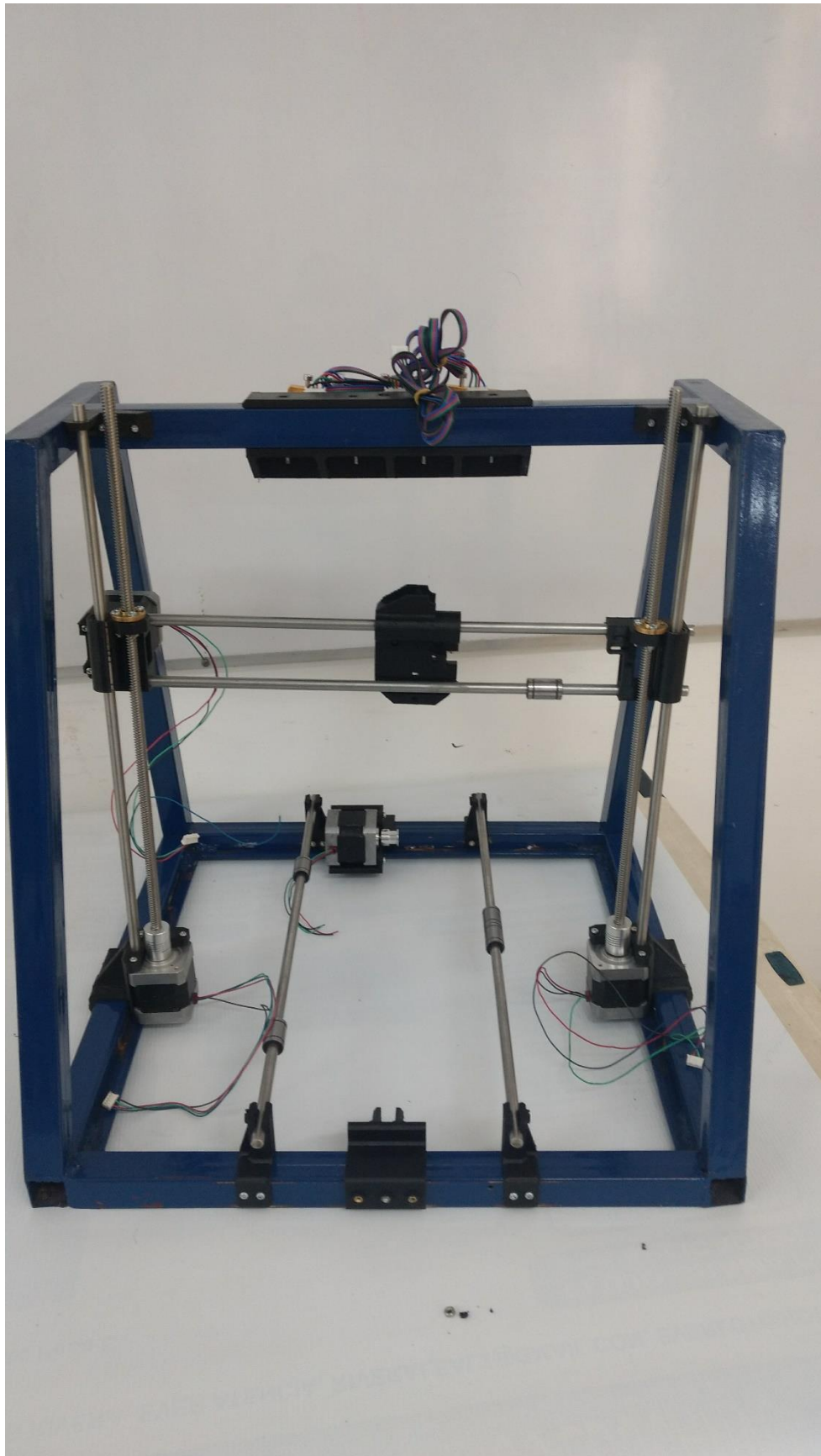
Anexo 1. Registró fotográfico construcción de la impresora.

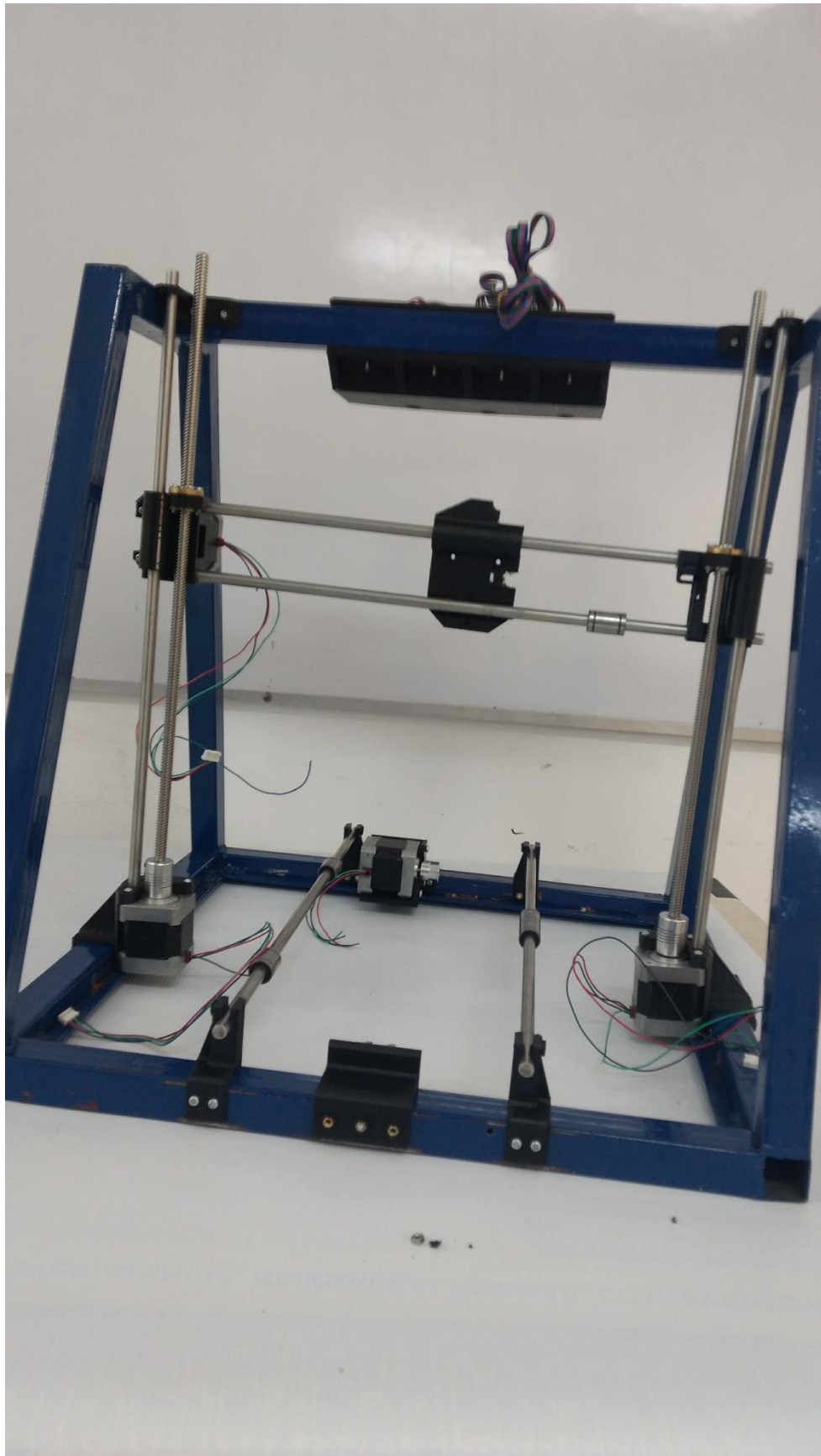


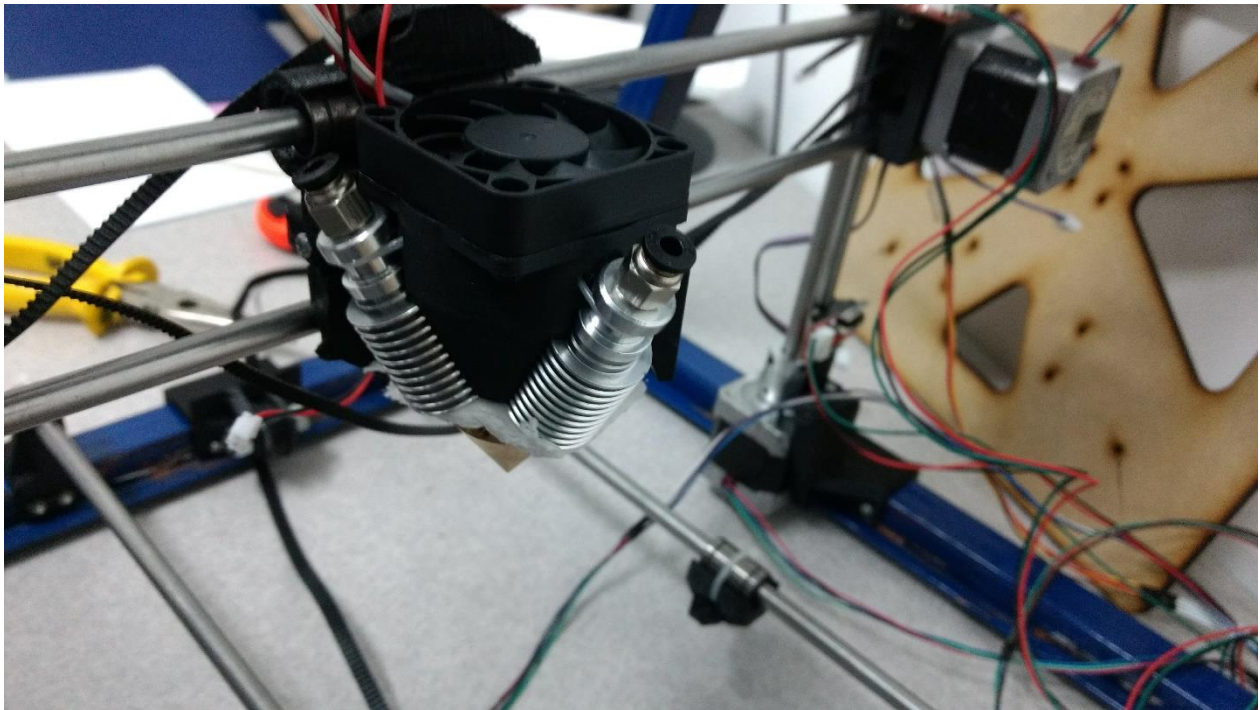
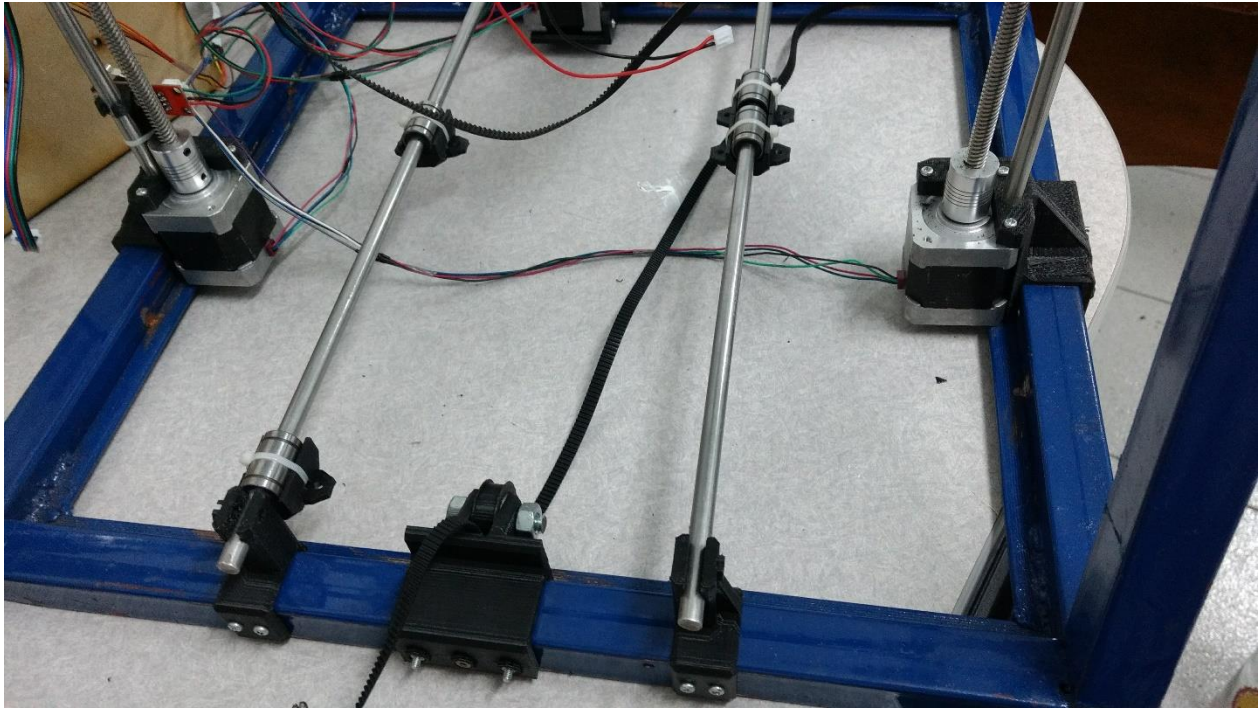


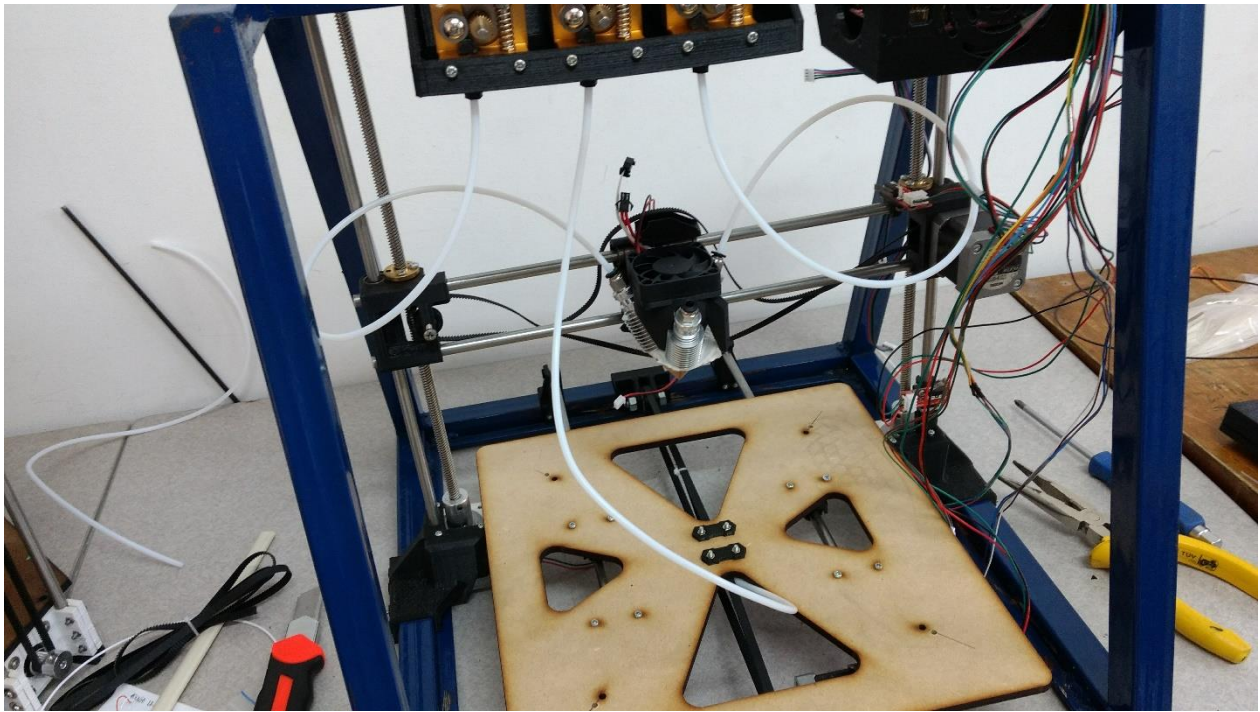
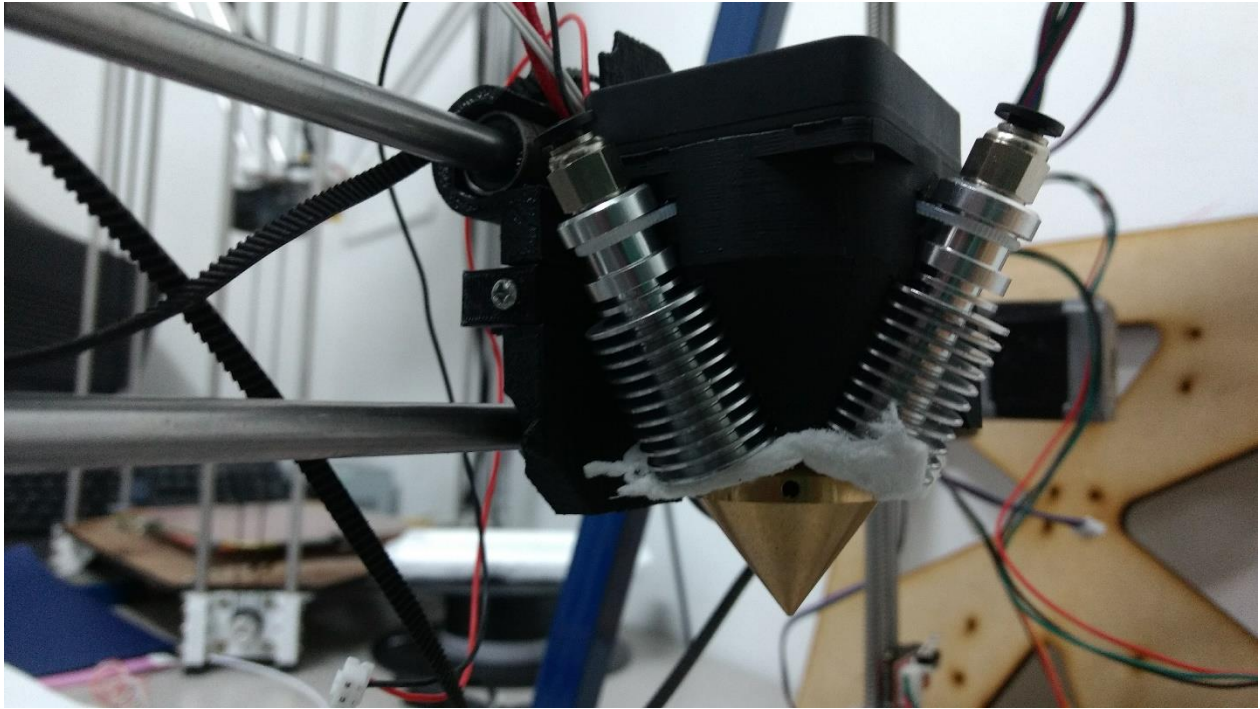


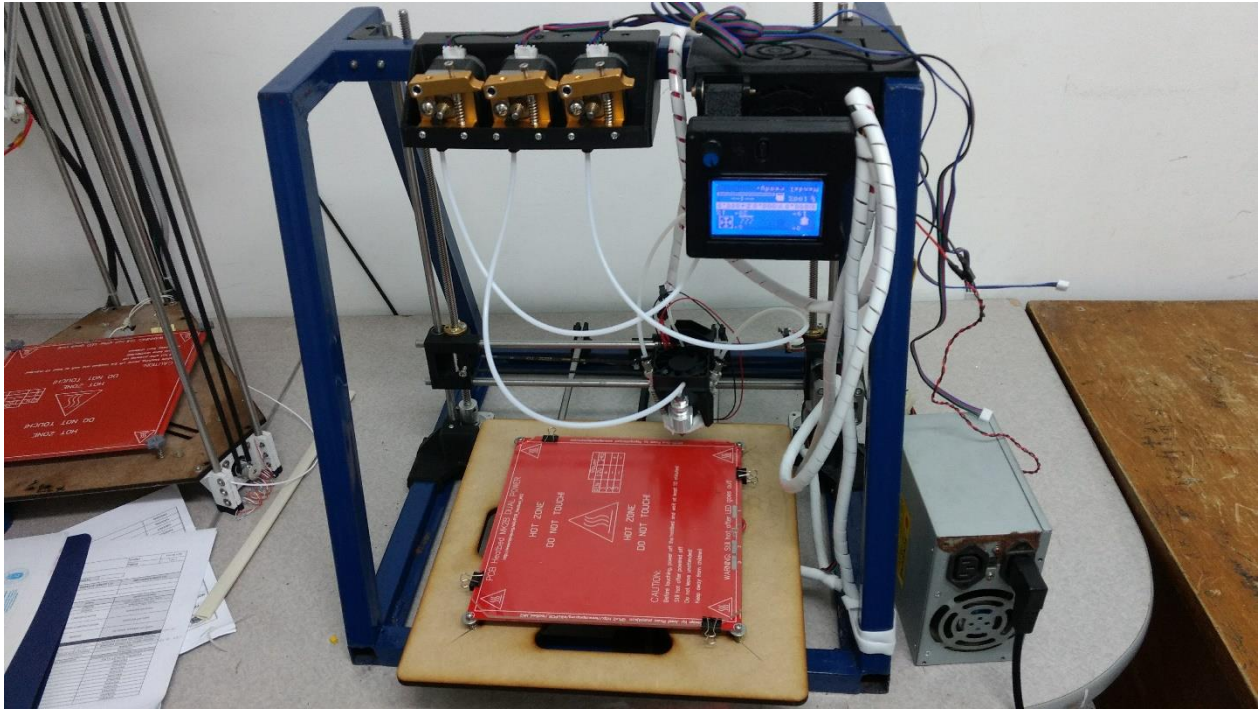
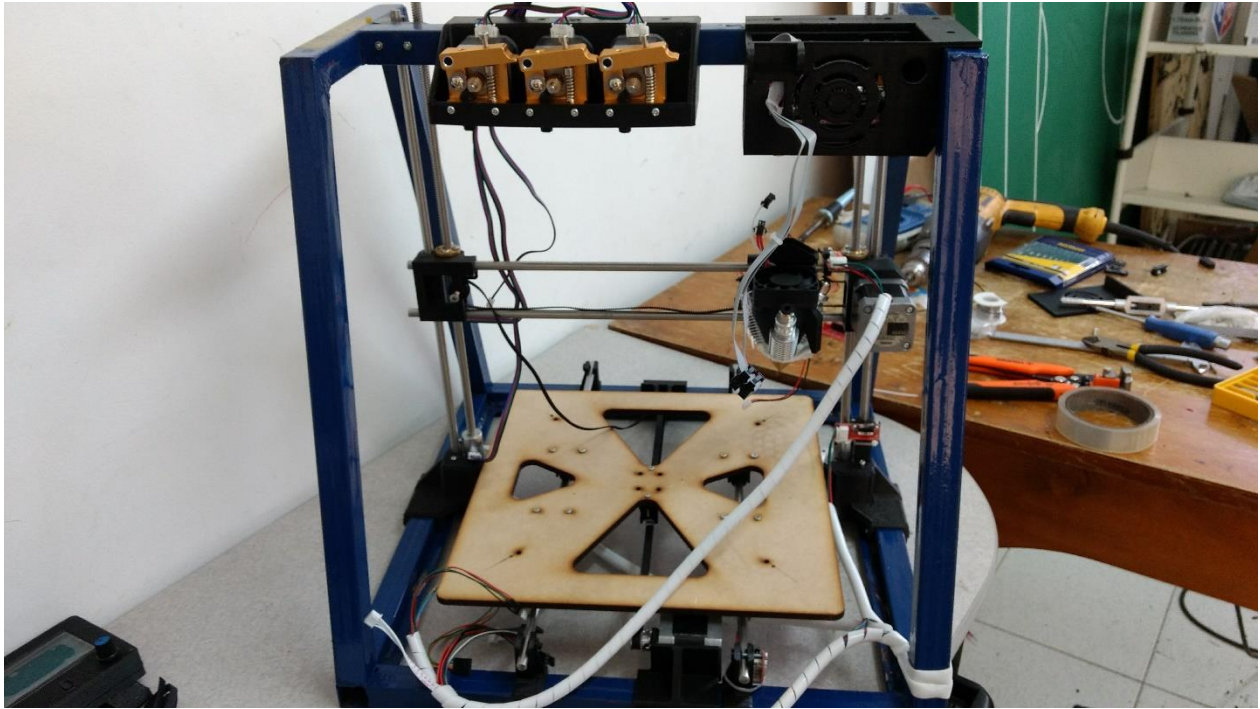




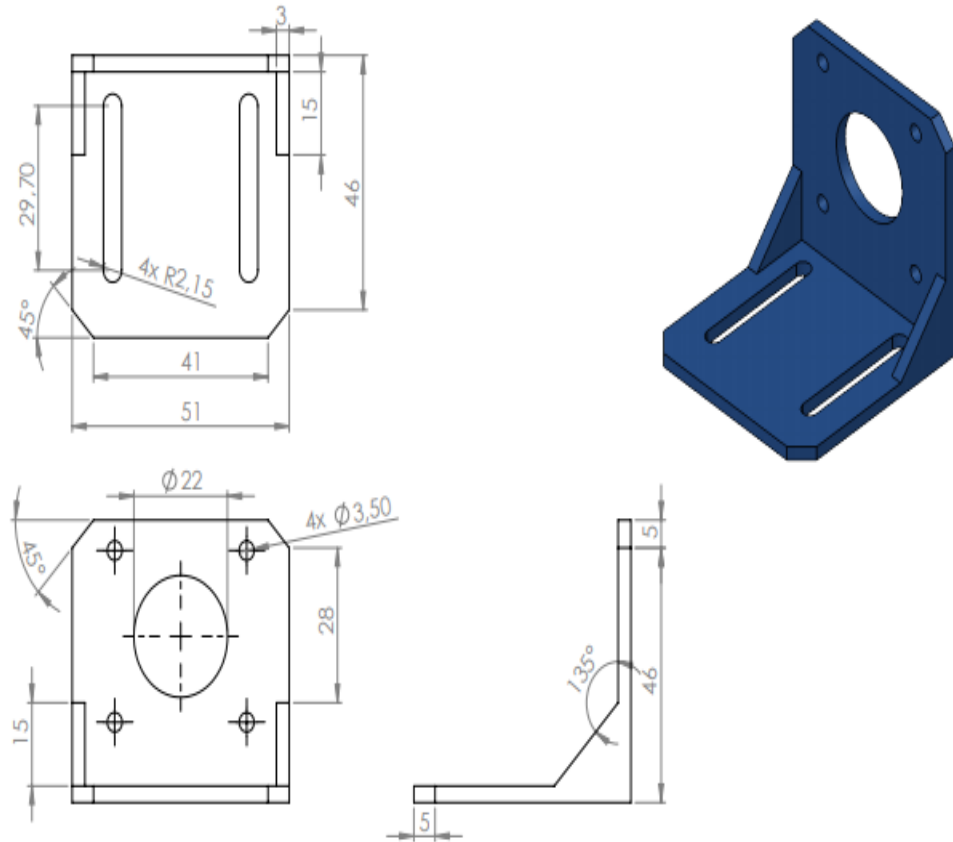




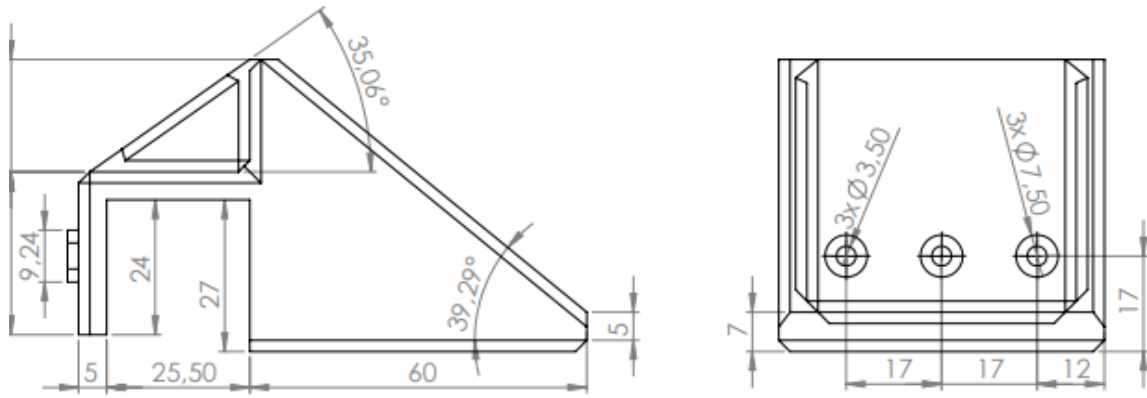
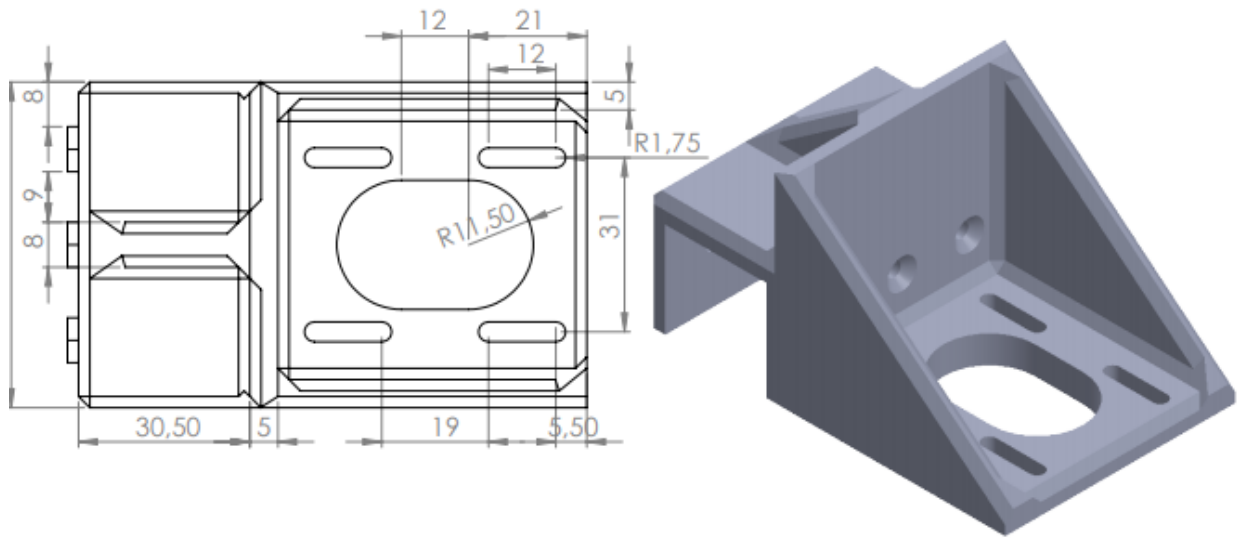




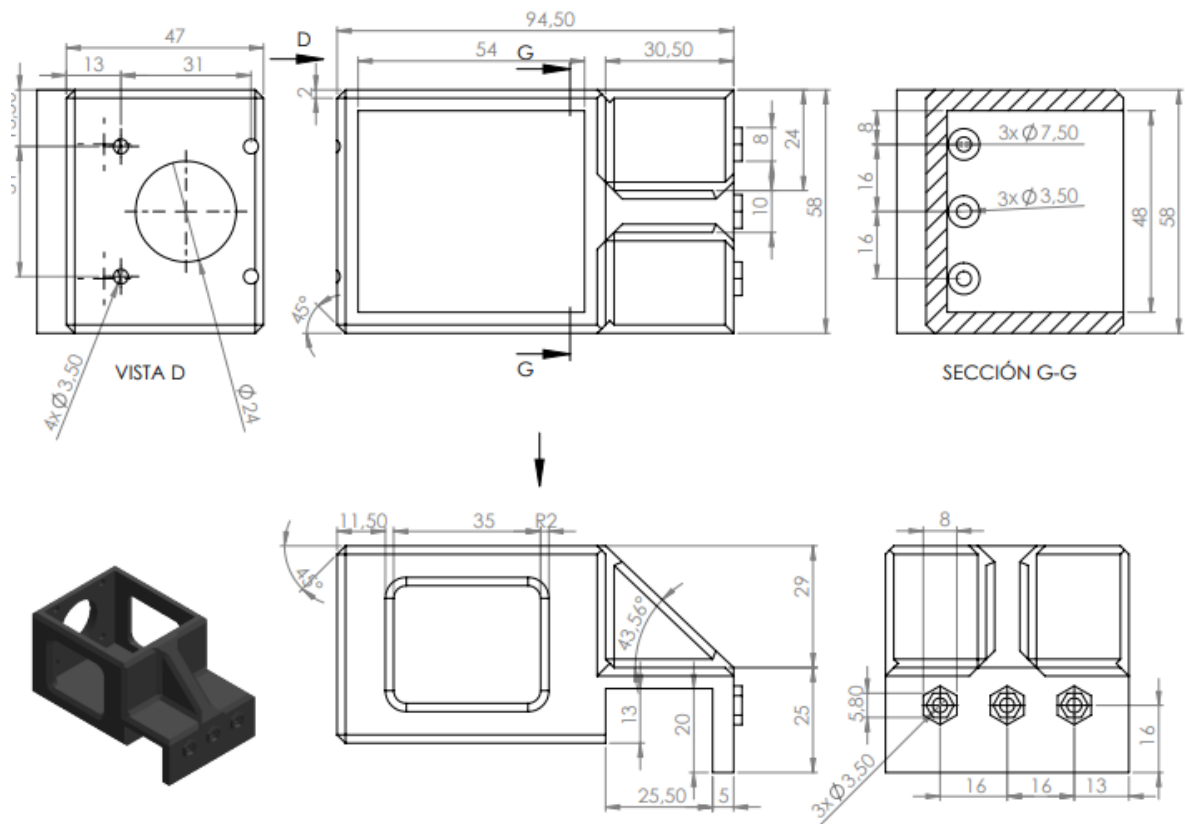
Anexo 2. Planos de algunas piezas diseñadas para la fabricación de la impresora



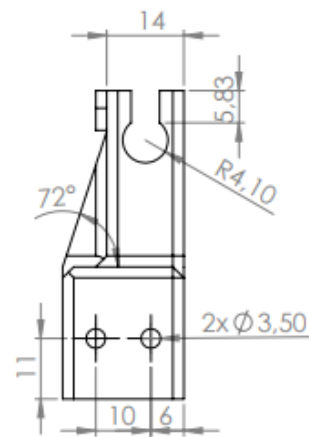
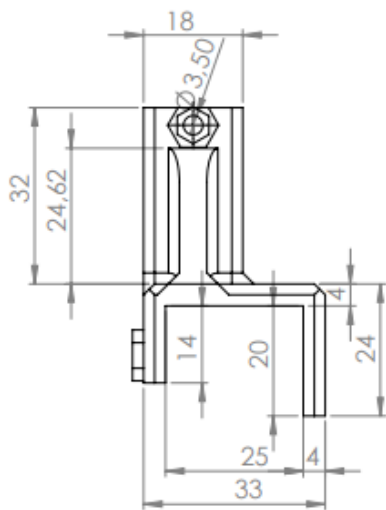
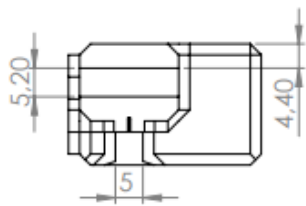
Soporte extrusor.



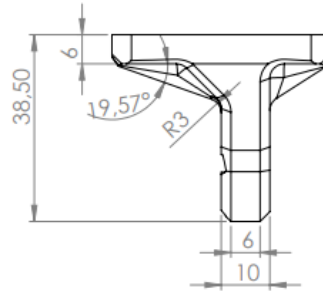
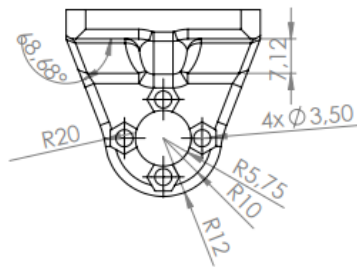
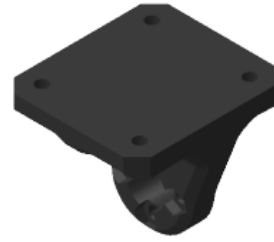
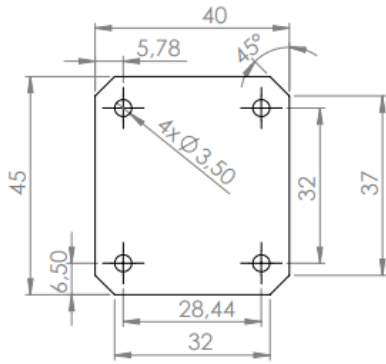
Soporte motor eje z.



Soporte motor Eje Y



Pieza Eje Y esquina



Soporte tuerca husillo trapecoidal

Anexo 3. Participación en el CIETA XII 2017



AVANCES EN LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA IMPRESORA 3D QUE FABRICA PROBETAS COMBINANDO DOS MATERIALES CON PROPIEDADES MECÁNICAS DIFERENTES

Holger Cagua, Cesar Peña, Bladimir Ramon, Anderson Sánchez, .

Universidad de Pamplona, Facultad de ingeniería, Ing. Mecatrónica. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.
E-mail: {holger.cagua, casaracp, hbladimir, anderson.sanchez,}@unipamplona.edu.co.

INTRODUCCIÓN

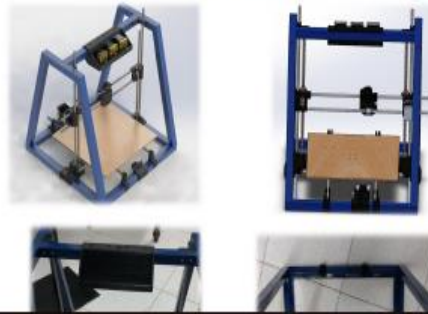
En este documento muestra avances en el diseño de una impresora antes no implementada. Un proyecto que busca desarrollar una impresora 3D que permita fabricar piezas combinando materiales polímeros rígidos con flexibles, para luego realizar ensayos de tracción, flexión y microscopía con el fin de identificar sus propiedades y las posibles ventajas mecánicas que se puedan obtener con esta combinación de materiales para abarcar nuevas aplicaciones.

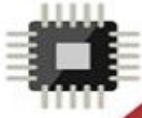
USOS EN LA ACTUALIDAD.



AVANCES

Diseño realizado en el software solidworks®





XII Congreso internacional
En Electrónica y Tecnologías de Avanzada



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

CERTIFICA QUE

CACUA RIVERA HOLGER ANTONIO

CC 88033767

PARTICIPÓ COMO

PONENTE

XII CONGRESO INTERNACIONAL EN ELECTRÓNICA Y TECNOLOGÍAS DE AVANZADA

Realizado en Pamplona los días 10,11 y 12 de mayo de 2017

- Capacitación de 24 horas -


Ph.D. Aldo Pardo García
Presidente XII CIETA


MSc. Jorge Luis Díaz Rodríguez
Decano Facultad de Ingenierías y Arquitectura

35574

Anexo 4. Difusión de la información publicación en revista indexada.

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE EJES FABRICADOS CON IMPRESIÓN 3D, PARA DIFERENTES INCLINACIONES DE LAS CAPAS FUNDIDAS.

EVALUATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF AXES MANUFACTURED WITH 3D PRINTING, FOR DIFFERENT INCLINATIONS OF THE MELTED LAYERS.

Holger A. CACUA Rivera¹

César A. PEÑA Cortés²

Bladimir RAMON Valencia³

Resumen

El modelado por deposición fundida (FDM) se ha convertido en una técnica de fabricación en menor tiempo y a bajo costo. Sin embargo, este proceso se ve influenciado por la anisotropía de las piezas, debido a que su resistencia depende de la orientación de los hilos depositados. Se probaron a flexión elementos cilíndricos de PLA en diferentes orientaciones de deposición 0° y 50°. Los resultados arrojaron variaciones de las propiedades mecánicas de los materiales en las direcciones de los hilos fundidos.

Palabras

clave

impresión 3D, inclinación, Flexión, Fractura.

Abstract

The molten deposition modeling (FDM) has become a manufacturing technique in less time and at low cost. However, this process is influenced by the anisotropy of the pieces, because their

¹ Magister en Ingeniera Industria (c). Profesor TCO del programa de Ingeniería Mecánica. Universidad de Pamplona Holger.cacua@unipamplona.edu.co

² Doctor en Automática y Robótica. Profesor titular del programa de Ingeniería Mecatrónica. Universidad de Pamplona cesarapc@unipamplona.edu.co

³ Doctor en Ingeniería de Materiales. Profesor titular del programa de Ingeniería Mecánica. Universidad de Pamplona hbladimir@unipamplona.edu.co

resistance depends on the orientation of the deposited threads. PLA cylindrical elements were tested in flexion in different orientations of deposition: 0 ° and 50 °. The results showed variations of the mechanical properties of the materials in the directions of the melted wires.

key words

3D printing, Inclination, Flex, Fracture.

1. Introducción

La tecnología moldeado por deposición fundida (FDM), fue inventada en 1988 por Scott Cump, inicialmente fue una alternativa para la fabricación de réplicas de piezas con el fin de probar los diseños antes de empezar la producción en serie mediante otros procesos. Asimismo, fue útil en la elaboración de maquetas arquitectónicas por su versatilidad y precisión, con el paso de los años la FDM evolucionó y se ha posicionado en diferentes sectores.

La manufactura aditiva (AM) o impresión 3D, es un proceso de fabricación de piezas, a partir de diferentes materiales como: metales, polímeros (Ribeiro et al., 2014) compuestos (Weng et al., 2016). EL sector alimenticio utiliza esta técnica de fabricación, para la obtener productos a base de chocolate (Lanaro et al., 2017), de igual forma, las fibras de avena y pastas hacen uso de impresión en 3D para elaborar diferentes comidas (Lille, Nurmela, Nordlund, Metsä-Kortelainen, & Sozer, 2018).

La impresión 3D de polímeros se puede realizar mediante tres técnicas, El primer método se conoce con el nombre de estereolitografía (SLA), en donde un fotopolímero en estado líquido es sometido a irradiación ultravioleta para solidificar y formar una pieza con la geometría deseada. El segundo proceso consiste en la sinterización por láser (SLS), aquí el polímero se encuentra pulverizado y es sometido al calor de un rayo láser de alta potencia permitiendo la fusión de las partículas y la fabricación de piezas 3D. Por último, el método el moldeado por deposición fundida (FDM), en el cual aplica calor al polímero hasta la temperatura de fusión y luego depositarlo sobre una plataforma (cama caliente), adicionando varias capas hasta obtener elementos sólidos.

Esta técnica de fabricación tiene numerosos campos de aplicación, en 2017 se creó una herramienta web para fabricar diseños topográficos con impresión 3D, (Hasiuk, Harding, Renner, & Winer, 2017). Por otro lado, se han reportado investigaciones para aplicaciones biomédicas, en donde la manufactura aditiva ha sido el método para la fabricación de prótesis biocompatibles con el cuerpo humano. El moldeado por deposición fundida fue empleado para realizar un procedimiento de reconstrucción craneal (Abdullah et al., 2017). Igualmente, por medio de esta técnica se fabricó un micro controlador implantable para evaluar la actividad neuronal de los peces (Rogers, Van Wert, & Mensinger, 2017) y se han desarrollado proyectos para reemplazar el uso de animales en prácticas de laboratorio (Pohl, Gasca, Christ, & Hofmann, 2013), a través de la manufactura aditiva se elaboraron prótesis de manos más económicas y con tiempos de fabricación más cortos (Borjas & Flores, 2016). En instituciones educativas como la Universidad de Pamplona la necesidad de equipos de prototipado 3D incentivo a la fabricación de una impreso 3D bajo el enfoque de la metodología del desarrollo de la función de calidad QFD (Rodriguez, Cortés, & Peña, 2016).

Un problema de la tecnología FDM es la anisotropía (la orientación de las capas le confiere mayor resistencia en ciertas direcciones) (Dizon et al. 2018) , cómo se ve reflejado en la fabricación de ejes. Estos elementos tienen mayor resistencia a esfuerzos de torsión y de tensión que a flexión, siendo este último una propiedad funcional para estas aplicaciones. Estudios indican que hay parámetros como altura de capa, velocidad de impresión, tipo de tejido, tipo de material, densidad de la pieza entre otros, que influyen en la resistencia de estos objetos (Fernandez-Vicente et al., 2016).

En la siguiente investigación se propone evaluar la resistencia mecánica de ejes cilíndricos fabricados de políácido láctico PLA, con el objetivo de correlacionar el comportamiento a flexión del material con diferentes inclinaciones de las capas y mejorar la eficiencia de las piezas fabricadas por esta técnica en funcionamiento. Para tal fin, se fabricaron cilindros con ángulos diferentes a 90° con el propósito de examinar las propiedades mecánicas a flexión y determinar el grado de afectación cuando se modifica la orientación de las capas fundidas.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales.

En la presente investigación se utilizó un polímero denominado poliácido láctico o (PLA), para la fabricación de los ejes. El PLA es un material biodegradable que se obtiene de recursos renovables como el maíz. Entre las ventajas más relevantes, se considera el grado de biocompatibilidad con los tejidos del cuerpo humano (Alberto Lopez Arraiza, 2008).

Las propiedades del PLA según el fabricante ultimaker se observan en la tabla 1.

Propiedades mecánicas del PLA		
Módulo de elasticidad	3,3-3,6	GPa
Límite de elasticidad	55-72	MPa
Fuerza de tensión	47-70	MPa
Elongación	2,5-6	% tensión
Módulo de compresión	3,3-3,5	GPa
Fuerza de compresión	66-86,4	MPa
Fuerza de flexión	85	MPa
Módulo de flexión	3,1-3,6	GPa
Módulo de cortante	5,7-6,3	GPa
Hardness-vickers	17-22	HV

Tabla 1. Propiedades mecánicas del PLA tomado www.ultimaker.com

2.2. Fabricación de los ejes.

El diseño de los ejes se realizó según las dimensiones estipuladas en la norma ASTM 790. Posteriormente, se realizaron los procesos de manufactura asistida por computador (CAM), para generar las rutas de extrusión de acuerdo a los diferentes parámetros de fabricación propuestos (tipo de patrón, temperatura, velocidades, entre otros), según se mencionan en la tabla 2. En la figura 1, se evidencia los cambios de inclinación de las capas de deposición con respecto a un eje vertical, en donde el ángulo α corresponde a 90° y el ángulo β a 50° .

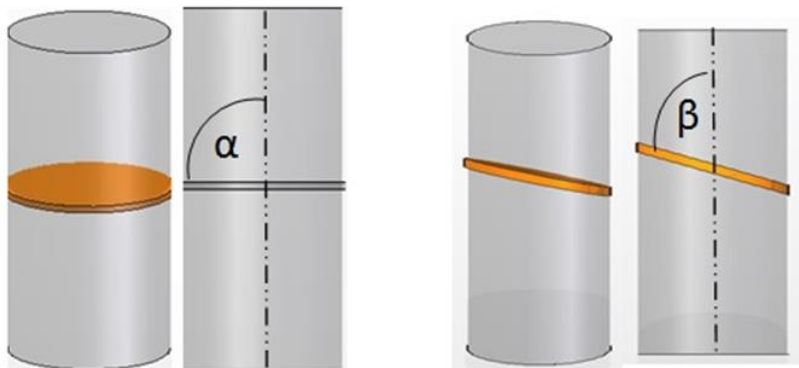
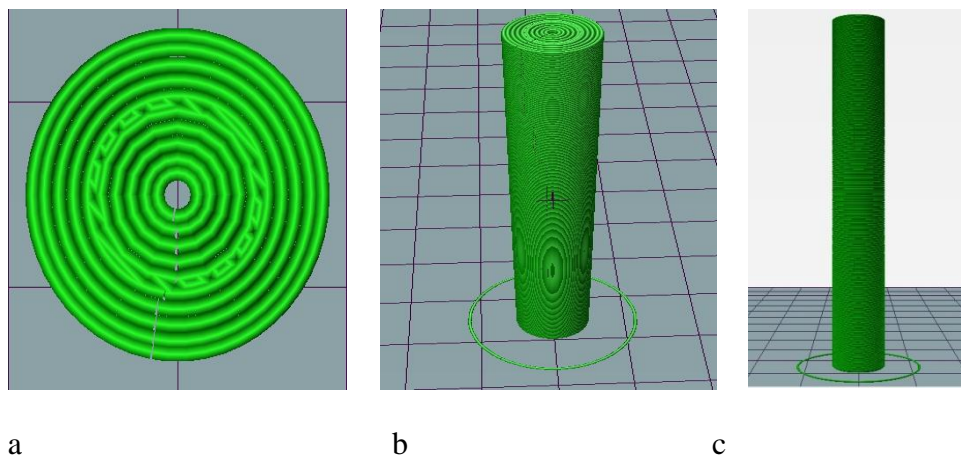


Figura 1. Ubicación de las capas con respecto al ángulo de inclinación α y β .

En la **figura 2**, se muestra una simulación del proceso de elaboración de las probetas verticales, apreciándose la construcción de capas generadas por medio de círculos concéntricos (figura 2 a). Las capas se van acumulando en sentido vertical hasta construir las probetas de forma cilíndrica (figura 2, b y c). Empleando esta técnica se puede apreciar que el ángulo entre la capa de impresión y plano horizontal es de 0° grados.



a

b

c

Figura 2. Proyecciones del eje Fabricado con ángulo α .

De acuerdo a la hipótesis planteada, se ideó una nueva generación de rutas impresión, donde las capas tienen un ángulo menor a 90° grados con respecto al plano horizontal. La figura 3a, muestra las rutas de un eje con una inclinación de 50° grados con respecto al plano en mención, por tanto, las capas se configuran formando elipses, lo cual mejorarían el área de unión entre las superficies. Cabe mencionar, que con esta nueva inclinación durante el proceso de fabricación, se hace necesario utilizar material de soporte para evitar la caída de la pieza. Ver figura 3 (b y c).

A excepción del ángulo de inclinación, todos parámetros que se utilizaron durante la fabricación permanecieron constantes para los dos tipos de ejes, con el fin de unificar los criterios de evaluación.

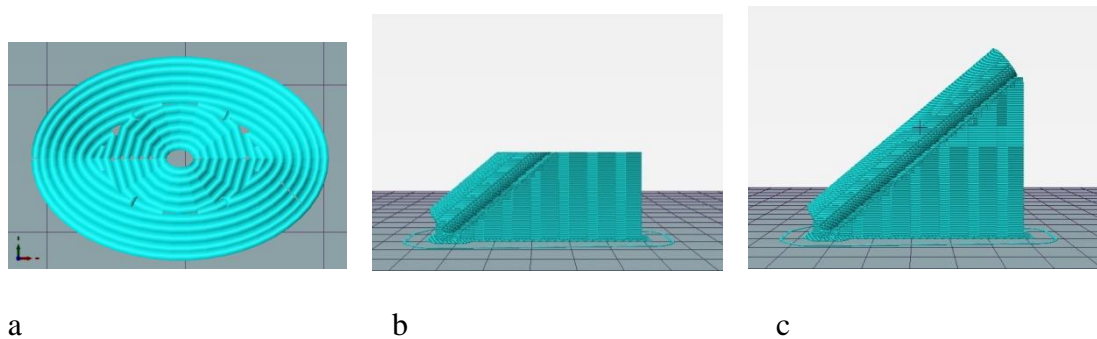


Figura 3. Proyección superior y frontal del eje fabricado con ángulo β .

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Temperatura de extrusión	205	$^\circ\text{C}$
Temperatura de la cama caliente	70	$^\circ\text{C}$
Altura de capa	0,2	Mm
Perímetros internos	7	UNI
Perímetros externos	15	UNI
Tipo de patrón	Concéntrico	

Densidad	40	%
Velocidad de impresión	80	mm/s

Tabla 2. Parámetros de impresión.

2.3. Caracterización mecánica

Se realizaron ensayos a flexión de los ejes fabricados por FDM, siguiendo la norma técnica ASTM D790. Se probaron 5 especímenes según lo demanda la norma, a una velocidad de deformación es de 1 mm/min y con una carga de 12 KN

3. Resultados y discusión

Los resultados del esfuerzo máximo, la deformación máxima y el módulo de Young obtenidos para cada tipo de probeta se observan en la tabla 3.

Las probetas fabricadas en deposición vertical se denominaron PLA 0°. Se debe destacar que por la anisotropía de las piezas con inclinación de PLA 50°, se realizaron los ensayos en dos orientaciones diferentes. La primera orientación del PLA 50° se hizo de acuerdo al ángulo de aplicación con respecto a la carga, como se observa en el diagrama de cuerpo libre de la figura 8.

En la segunda orientación denominada PLA 50° T (transversal), la probeta se gira 90 grados con respecto al eje neutro, en este caso las capas formas una geometría similar a la producida en un cordón de soldadura y están desalineadas con respecto a la carga como se muestra en la ver figura 11.

SISTEMA	MÓDULO (GPa)	ESFUERZO (MPa)	DEFORMACIÓN (%)
PLA 0°	0,6 ± 0,4	33,8 ± 5,9	3,1 ± 1
PLA 50°	1,1 ± 0,2	46,1 ± 4,2	4,6 ± 0,8
PLA 50° T	1,2 ± 0,2	54,4 ± 10,7	5,7 ± 2,3

Tabla 3. Resultados de ensayos de flexión.

Analizando los resultados de cada configuración se aprecia que el PLA 50° T es el sistema con valores más altos alcanzando una resistencia a la flexión de 54,4 MPa. Autores como (Abbott, Tandon, Bradford, Koerner, & Baur, 2018), (Croccolo et al., 2013) coinciden en que los parámetros de impresión como velocidad, altura de capa, temperatura, orientación, entre otros, influyen en la resistencia.

Para los sistemas evaluados el único parámetro que se modificó fue la inclinación de capas, por lo tanto, se puede afirmar que la fabricación con las condiciones planteadas aporta a la resistencia de las piezas, pues se obtiene un esfuerzo 61% mayor.

En la figura 4 se observa una gráfica esfuerzo deformación de las 3 configuraciones.

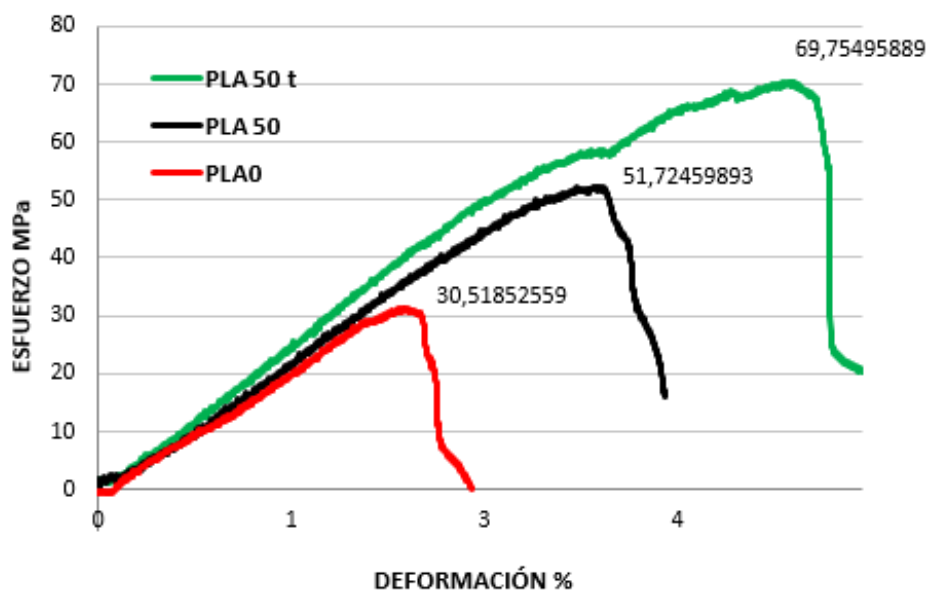


Figura 4. Gráfica esfuerzo deformación comparativa de los 3 experimentos.

Según el diagrama anterior, el comportamiento de los ejes a flexión, es de carácter elástico-lineal para los tres sistemas, causado por el comportamiento frágil del material PLA. En este sentido, se aprecia que el sistema PLA 50° transversal, tiene la mejor conducta en las propiedades mecánicas, como se observa en la pendiente de la zona elástica y que representa el módulo de Young. Por otro lado, el esfuerzo máximo se incrementa considerablemente con respecto a las otras configuraciones. Importante, resaltar que la disposición del PLA 50° transversal presenta el mayor porcentaje de deformación, con lo cual se evidencia que el material presenta un cierto grado de plasticidad en esta distribución de las capas.

De acuerdo con los resultados anteriores, se aprecia que la configuración PLA 0° genera esfuerzo de tensión pura por debajo de su la línea central (eje neutro) que afecta directamente la superficie de unión de las capas y por consecuencia estas tienden a separarse causando una ruptura limpia en el eje. En este caso la falla ocurre por la separación de las capas, más no a la ruptura del material. Ver el diagrama de la figura 5.

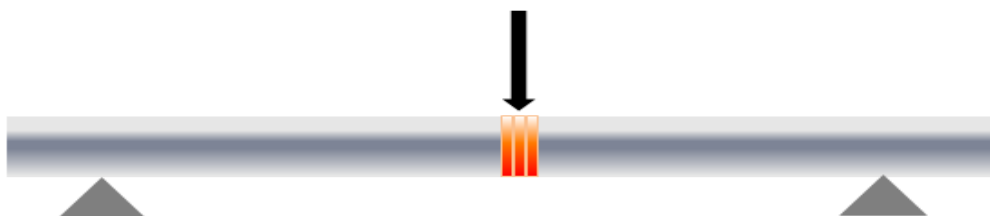
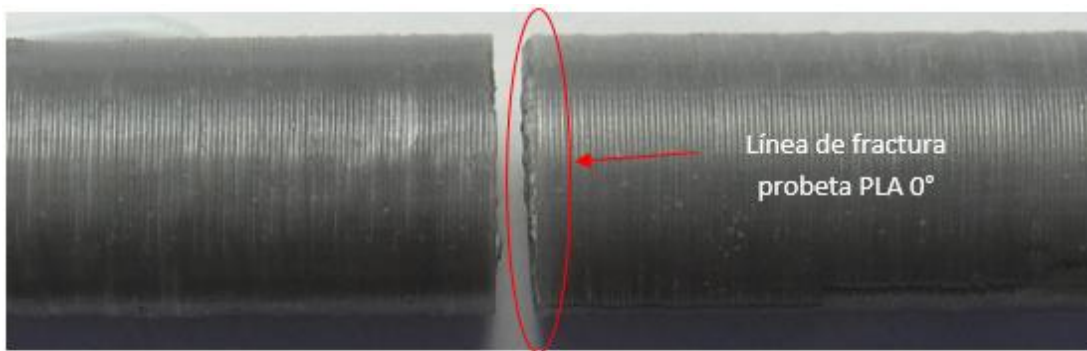
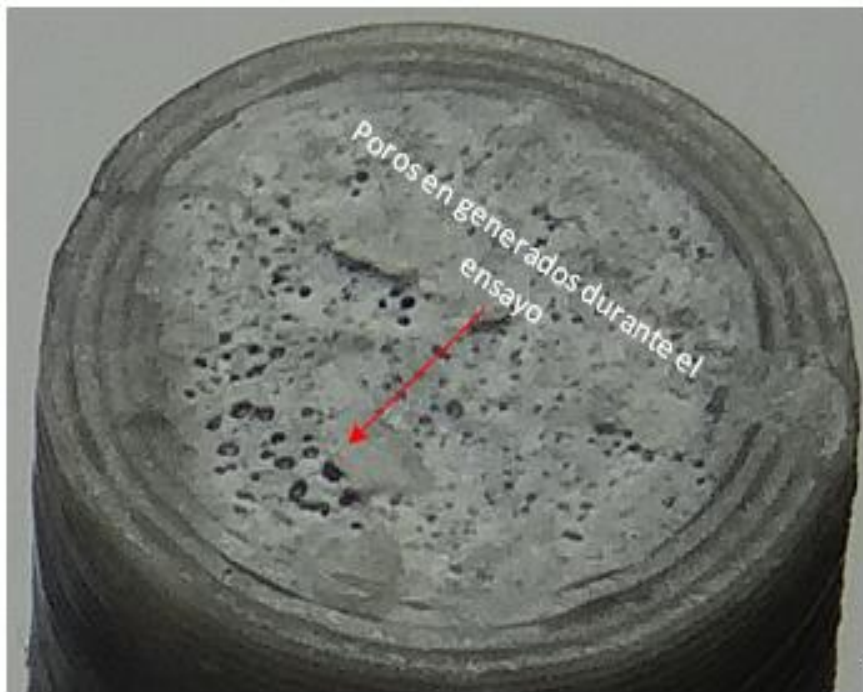


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre probeta vertical.

Según la técnica de la fractografía (Ipohorski Miguel, 1988) la fractura producida en la probeta PLA 0° es de tipo frágil. En la figura 6 a, se aprecia una fractura limpia con una línea de falla que sigue la misma dirección de la carga aplica. En la figura 6 b, se observa que los poros generados en la zona de falla son pequeños, esto ocurre en materiales que no presenta mayores deformaciones antes de la fractura. Además, analizando la gráfica de esfuerzo-deformación para el PLA 0°, se observa claramente que la elongación de la probeta antes de la fractura no supera el 2 % que de acuerdo con la norma, corresponde a materiales frágiles.



a



b

Figura 6. Falla de probeta PLA 0°.

Para el segundo caso las capas de la probeta tienen una inclinación de 50° grados con respecto al esfuerzo, como se mencionó anteriormente el origen de la fractura se desplaza con respecto al punto de aplicación de la carga, lo cual retarda el inicio de la falla. Ver figura 7.

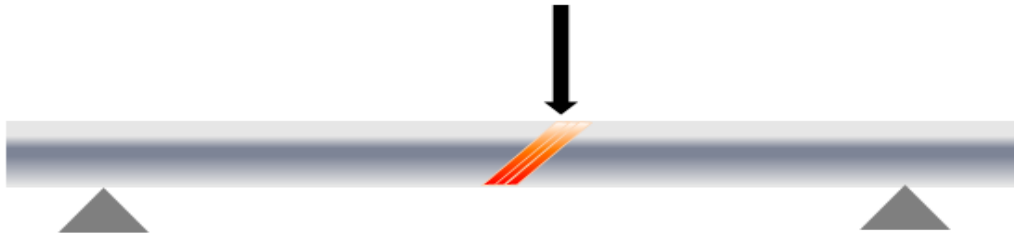
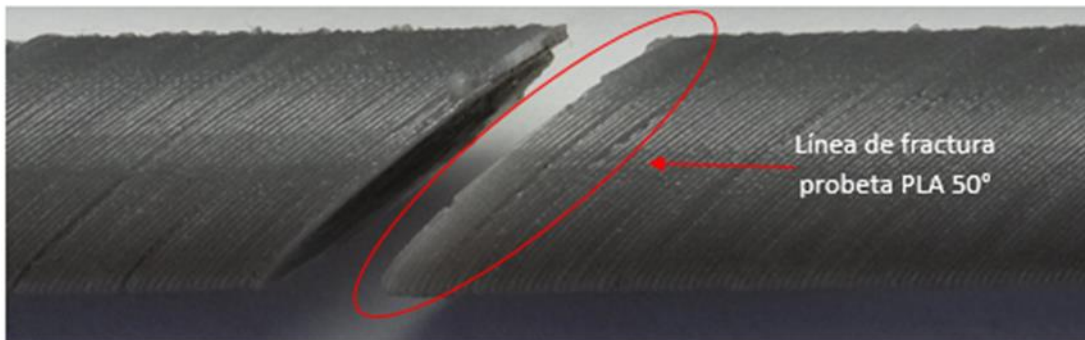
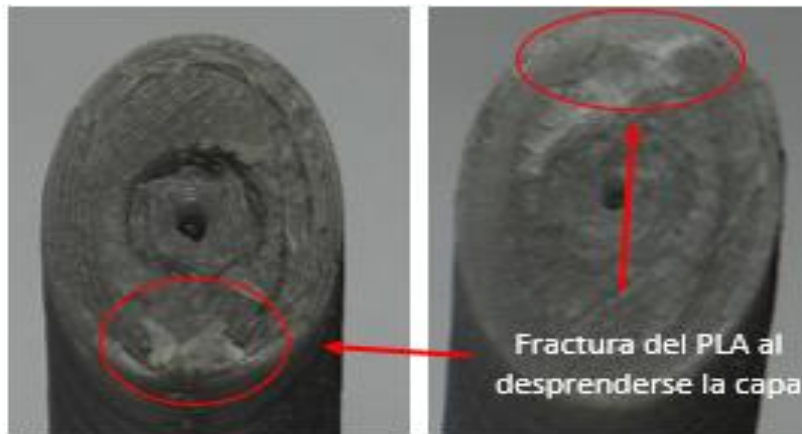


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre probeta PLA50°.

El comportamiento de la falla es similar al caso anterior, la fractura sigue la dirección de la inclinación de la capa como se observa en la figura 8 a, pero el esfuerzo requerido para romper la probeta es 1.36 veces mayor que el PLA 0°. Como una posible causa de la falla, se puede atribuir, a que el área de unión entre las capas es mayor lo cual permite que internamente forman elipses en lugar de círculos concéntricos, generando mayor adherencia entre ellas. Este fenómeno de rotura, se analiza como un factor positivo para la fabricación de elementos por impresión en 3D, como consecuencia de la inclinación de las líneas de deposición con respecto a la carga, haciendo que se retrase la falla del material y por tanto incrementando la ductilidad del material.



a



b

Figura 8. Falla de probeta PLA 50°.

En el siguiente estudio, a la probeta de PLA 50°, se le realizó una modificación con respecto a la aplicación de la carga, y para tal efecto se giró a 90° con respecto al eje neutro, en consecuencia, las capas no tienen una alineación definida con respecto al esfuerzo como se aprecia en el diagrama de cuerpo libre de la figura 9.

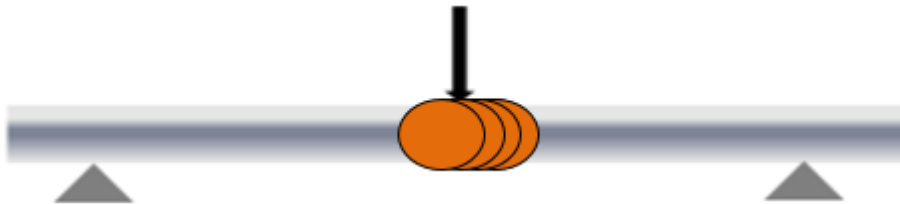
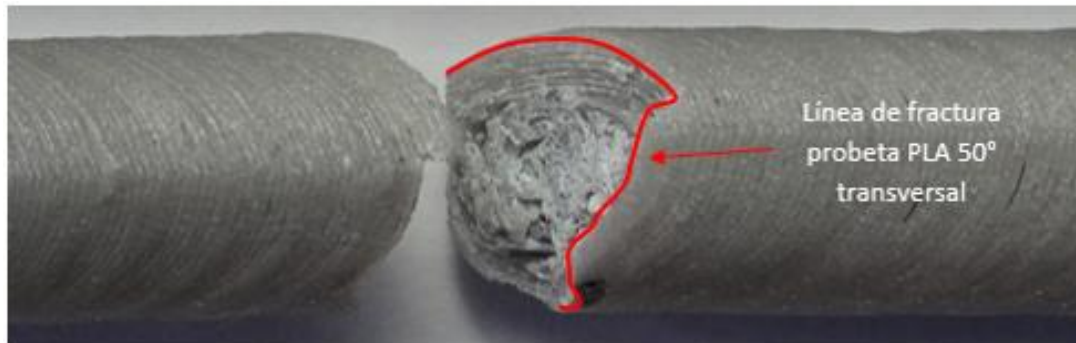


Figura 9. Diagrama de cuerpo libre probeta PLA 50° Transversal.

En esta ocasión la orientación de las capas hace que se dificulte el origen de la falla, por tal razón se requiere un esfuerzo 1,6 veces mayor para causar la ruptura, que en la probeta PLA 0°. En la figura 10a se aprecia que la línea de la falla no tiene una orientación definida, por tanto, en la figura 10 b, se evidencia en la zona de la falla cavidades con profundidades y diámetros mayores que en los casos anteriores. De acuerdo, con las imágenes de fractografía, se evidencia que antes de la fractura se produjo una deformación en la probeta, en consecuencia, se puede deducir que hay aumento en el porcentaje de elongación.



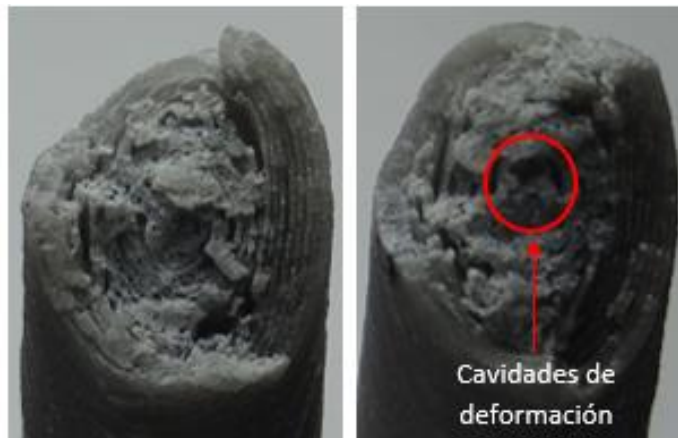
a

b

Figura 10.
Falla de probeta

PLA 50° transversal.

El incremento en la ductilidad se ve reflejado en los resultados obtenidos en los valores del



porcentaje de deformación, ver figura 11, en donde el aumento corresponde a un 123% entre el PLA 50° transversal y el PLA 0°. Estos resultados validan la teoría de la influencia de la inclinación de las líneas de deposición con respecto a la carga aplicada, muy importante para el diseño y fabricación de piezas fabricadas por FDM

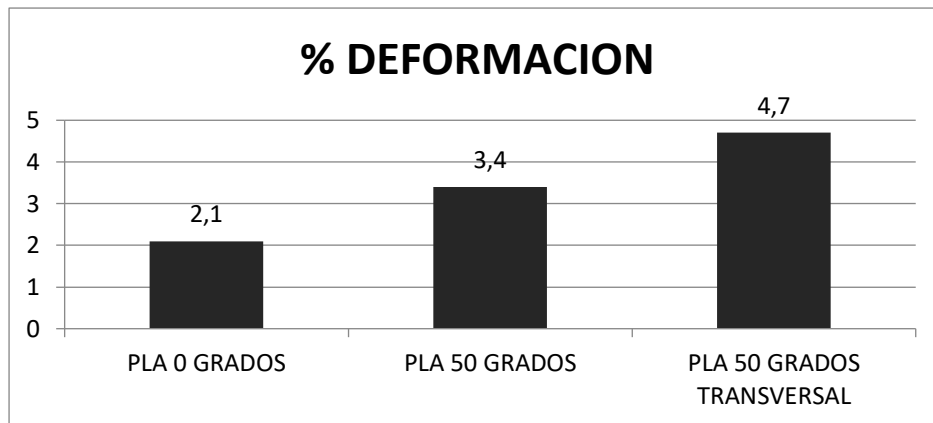


Figura 11. Comparación de los valores del % de deformación para las diferentes configuraciones.

4. Conclusiones

En esta investigación se evaluó el comportamiento de las propiedades mecánicas a flexión con modificaciones de los parámetros de impresión, principalmente la orientación de las líneas de deposición y la posición de aplicación de la carga.

De acuerdo con los resultados de las propiedades mecánicas a flexión se evidencia variaciones en los parámetros calculados de los ensayos como consecuencia del carácter anisotrópico que genera la orientación de los hilos de deposición en la dirección de la fuerza de aplicación.

El análisis de falla de los ejes cilíndricos por medio de fractografía, arrojó aspectos importantes en correspondencia a la carga aplicada, debido al incremento de la ductilidad en el sistema PLA 50°, como consecuencia de la absorción de energía por el material para el inicio y propagación de la grieta.

Referencias bibliográficas

Abbott, A. C., Tandon, G. P., Bradford, R. L., Koerner, H., & Baur, J. W. (2018). Process-structure-property effects on ABS bond strength in fused filament fabrication. *ELSEVIER*, 19, 29–38.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.11.002>

- Abdullah, A. M., Noraihan, T., Tuan Rahim, A., Mohamad, D., Akil, H. M., & Rajion, Z. A. (2017). Mechanical and physical properties of highly ZrO₂ / β -TCP filled polyamide 12 prepared via fused deposition modelling (FDM) 3D printer for potential craniofacial reconstruction application. *Materials Letters*, *189*, 307–309. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2016.11.052>
- Abilgazyev, a., Kulzhan, T., Raissov, N., Ali, M. H., Match, W. L. K. O., & Mir-Nasiri, N. (2015). Design and development of multi-nozzle extrusion system for 3D printer. *2015 4th International Conference on Informatics, Electronics and Vision, ICIEV 2015*, 3–7. <https://doi.org/10.1109/ICIEV.2015.7333982>
- Acuna, F., Rivas, D., Chancusi, S., & Navarrete, P. (2015). Design and Construction of a 3D Printer Auto Controller Wirelessly Through of Free Software. *IEEE Latin America Transactions*, *13*(6), 1893–1898. <https://doi.org/10.1109/TLA.2015.7164214>
- Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017). Experimental Optimization of Fused Deposition Modelling Processing Parameters: A Design-for-Manufacturing Approach. *Procedia Manufacturing*, *10*, 791–803. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.079>
- Albarracin, D. H., Arias, E. Y., & Adolfoduran, G. (2017). Development of a methodology for the printing of prostheses using 3D technology Desarrollo de una metodología para la impresión de prótesis mediante tecnología 3D, 81–89.
- Alberto Lopez Arraiza. (2008). Correlaciones procesado-estructura-propiedades en sistemas poliméricos complejos basados en poliésteres biodegradables. evaluación de su posible uso en aplicaciones ecológicas y biomedicas (tesis de doctorado). *Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao*. Retrieved from http://fondosdigitales.us.es/media/thesis/722/S_TD_203.pdf
- Almudena Lopez De Rego. (2013). Estado del arte_ Impresión 3D y edificación _ CTE Arquitectura. Retrieved from <http://www.ctearquitectura.es/soluciones-sostenibles/materiales/estado-del-arte-impresion-3d-y-edificacion/>
- Ariza, L. M. (2015). fabricación de órganos humanos con impresoras 3D. Retrieved from <https://www.pressreader.com/spain/muy-interesante/20150520>
- Bajracharya, R. M., Bajwa, D. S., & Bajwa, S. G. (2017). Mechanical properties of polylactic acid

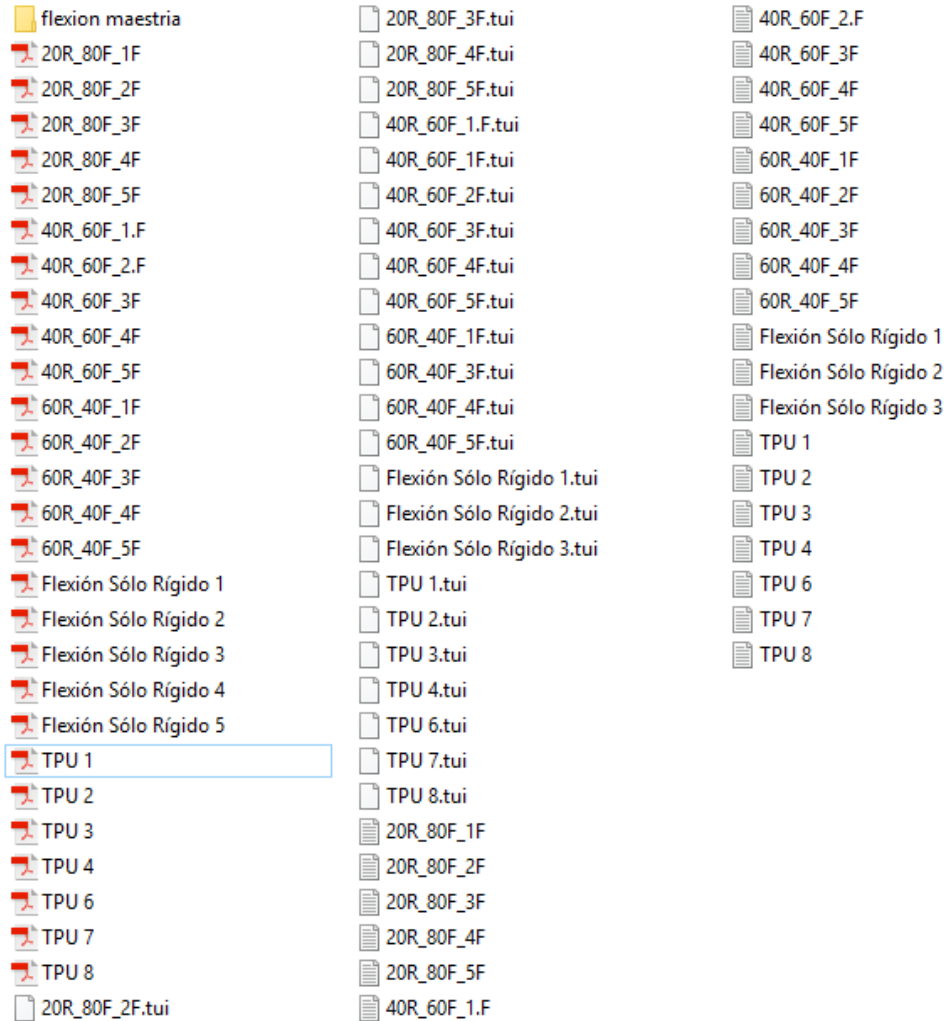
- composites reinforced with cotton gin waste and flax fibers. *Procedia Engineering*, 200, 370–376. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.052>
- Ballester, M. (2014). Políticas para el buen manejo de información digital – Pymempresario. Retrieved from <https://www.pymempresario.com/2014/10/politicas-para-el-buen-manejo-de-informacion-digital/>
- Borjas, R., & Flores, W. (2016). Developing a human prosthesis using a 3D printer in Honduras. *Proceedings of the 2015 IEEE 35th Central American and Panama Convention, CONCAPAN 2015*, (Concapan Xxxv). <https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2015.7428465>
- Croccolo, D., De Agostinis, M., & Olmi, G. (2013). Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30. *Computational Materials Science*, 79, 506–518. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.06.041>
- Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
- Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 3(3), 183–192. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0036>
- Frax, J. (2015). Impresiones en alta definición – Cambiemos las varillas por usillos. Retrieved from <https://www.frax3d.com/impresion-en-hd>
- Hasiuk, F. J., Harding, C., Renner, A. R., & Winer, E. (2017). TouchTerrain: A simple web-tool for creating 3D-printable topographic models. *Computers and Geosciences*, 109(April), 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.005>
- Iguas, S. (2018). igus® drylin® - Husillos de rosca trapezoidal - Datos técnicos. Retrieved from https://www.igus.es/wpck/2374/DryLin_Trapezgewindemutter_Technische_Daten
- Iphorski Miguel, R. J. A. (1988). Fractografía aplicación análisis de falla, 180.
- Lanaro, M., Forrestal, D. P., Scheurer, S., Slinger, D. J., Liao, S., Powell, S. K., & Woodruff, M. A. (2017). 3D printing complex chocolate objects: Platform design, optimization and

- evaluation. *Journal of Food Engineering*, 215, 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.029>
- Lille, M., Nurmela, A., Nordlund, E., Metsä-Kortelainen, S., & Sozer, N. (2018). Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing. *Journal of Food Engineering*, 220, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.034>
- Mirón, V., Ferrándiz, S., Juárez, D., & Mengual, A. (2017). Manufacturing and characterization of 3D printer filament using tailoring materials. *Procedia Manufacturing*, 13, 888–894. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.151>
- Mueller, J., Shea, K., & Daraio, C. (2015). Mechanical properties of parts fabricated with inkjet 3D printing through efficient experimental design. *Materials and Design*, 86, 902–912. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.129>
- Pilch, Z., Domin, J., & Szlapa, A. (2016). The impact of vibration of the 3D printer table on the quality of print. *2015 Selected Problems of Electrical Engineering and Electronics, WZEE 2015*. <https://doi.org/10.1109/WZEE.2015.7394045>
- Pohl, B. M., Gasca, F., Christ, O., & Hofmann, U. G. (2013). 3D printers may reduce animal numbers to train neuroengineering procedures. *International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering, NER*, 887–890. <https://doi.org/10.1109/NER.2013.6696077>
- Prsa, J., Sobreviela, J., Irlinger, F., & Lueth, T. C. (2015). Software tool for detection and filling of voids as a part of tool-path strategy development for droplet generating 3D printers. *IEEE CITS 2015 - 2015 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems*. <https://doi.org/10.1109/CITS.2015.7297725>
- Reprap. (2016). RepRap_es - RepRap. Retrieved from <https://reprap.org/wiki/RepRap/es>
- Ribeiro, J., Freitas, G., & Andrade, M. M. De. (2014). Mechanical Tests in Thermoplastic Elastomers Used in 3D Printers for the Construction of Hand Prosthesis Ensaios Mecânicos Em Elastômeros Termoplásticos Utilizados Em Impressoras 3D Para a Construção De Próteses De Mão.
- Rodriguez, E., Cortés, E., & Peña, C. (2016). Application of the Qfd Methodology in the Development of. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*. Retrieved from Results for %22APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA QFD EN EL DESARROLLO DE UNA

IMPRESORA 3D APPLICATION OF THE QFD METHODOLOGY IN THE DEVELOPMENT OF A 3D PRINTER%22 in %22All Documents%22

- Rogers, L. S., Van Wert, J. C., & Mensinger, A. F. (2017). An implantable two axis micromanipulator made with a 3D printer for recording neural activity in free-swimming fish. *Journal of Neuroscience Methods*, 288, 29–33. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2017.06.012>
- Santiago Blandon, Juan Camilo Amaya, Alvaro Jose Rojas. (2015). Development of a 3D Printer and a Supervision System Towards the Improvement of Physical Properties and Surface Finish of the Printed Parts.
- Weng, Z., Wang, J., Senthil, T., & Wu, L. (2016). Mechanical and thermal properties of ABS/montmorillonite nanocomposites for fused deposition modeling 3D printing. *Materials and Design*, 102, 276–283. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.04.045>

Anexo 5. Documentos de generados por la maquina universal para cada ensayo.



Documentos generados para los ensayos de flexión

De los documentos tx, generados por la maquina universal se extraen los datos necesarios para calcular el esfuerzo y la deformación, con los cuales se realizaran las gráficas comparativas de las propiedades en las distintas composiciones.

```

Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Nombre de ensayo      Modo de Ensayo  Tipo de ensayo  Control Velocidad de ensayo 1  Velocidad de ensayo 2  Velocidad de ensayo 3  Punto de Cambio 1  Punto de
Sencillo             3 puntos        Alargamiento    21,3  1  1  Off  Off  Off  Stop  50  5
Titulo Subtitulo     Comment
20R_80F_1 F

Forma: Nºde partidas: Nºde muestras:
Plana 1 1
Nombre: Espesor Anchura Soporte inferior
Unidad de longitud mm mm mm
1 - 1 5,0000 13,0000 80,0000

Nombre Max._Carga Max._Despl Max._Esfuerzo Max._Deformacion M.Elastico PSF_Carga PSF_Despl PSF_Esfuerzo PSF_Deformacion Rotura_C
Parametro .001- 1 % 0,1 %/FS 0,1 %/FS 0,1 %/FS 0,1 %/FS 0,1 %/FS 0,1 %/FS 0,2 %
Unidades kN mm MPa % MPa kN mm MPa % kN mm MPa % kN mm MPa % kN mm
1 - 1 ,05175 31,3740 19,1077 14,7066 183,113 -.- -.- -.- -.- -.- -.- -.- ,01125 2,15600 4,15385 1,01063 -.- -.- -.-
Media ,05175 31,3740 19,1077 14,7066 183,113 -.- -.- -.- -.- -.- -.- -.- ,01125 2,15600 4,15385 1,01063 -.- -.- -.-
Desviación Estandar ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 -.- -.- -.- -.- -.- -.- -.- ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 -.- -.- -.-
Maximo ,05175 31,3740 19,1077 14,7066 183,113 -.- -.- -.- -.- -.- -.- -.- ,01125 2,15600 4,15385 1,01063 -.- -.- -.-
Mínimo ,05175 31,3740 19,1077 14,7066 183,113 -.- -.- -.- -.- -.- -.- -.- ,01125 2,15600 4,15385 1,01063 -.- -.- -.-
Rango ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 -.- -.- -.- -.- -.- -.- -.- ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 -.- -.- -.-
Mediana ,05175 31,3740 19,1077 14,7066 183,113 -.- -.- -.- -.- -.- -.- -.- ,01125 2,15600 4,15385 1,01063 -.- -.- -.-
Media JIS ,05175 31,3740 19,1077 14,7066 183,113 -.- -.- -.- -.- -.- -.- -.- ,01125 2,15600 4,15385 1,01063 -.- -.- -.-
Coef.Variacion ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 -.- -.- -.- -.- -.- -.- -.- ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 -.- -.- -.-
3 Sigma ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 -.- -.- -.- -.- -.- -.- -.- ,00000 ,00000 ,00000 ,00000 -.- -.- -.-

1- 1
Tiempo Carga Alargamiento
seg kN mm
0,00 -0,000375 0
0,05 -0,001125 0
0,10 -0,001875 0
0,15 -0,00225 0
0,20 0 0
0,25 0 0
0,30 0 0,004
0,35 0,001125 0,008

```

Documentos tx generado en el ensayo

Los documentos tx. Generalmente contienen entre 3000 y 8000 datos. Por lo tanto, se utiliza estadística descriptiva y herramientas ofimáticas para realizar los cálculos.

Es importante resaltar que para no extender el documento se los resultados obtenidos para cada ensayo se anexaran por separados.

Anexo 6. Calculo de esfuerzos y deformación

	A	B	C	D	E	F
1						
2						
3	Tiempo	Carga	Alargamient	esfuerzo	deformacion	
4	0,3	0	0,004	0	0,00189573	
5	0,35	0,0015	0,008	0,55384615	0,00379147	
6	0,4	0,002625	0,016	0,96923077	0,00758294	
7	0,45	0,004125	0,026	1,52307692	0,01232227	
8	0,5	0,005625	0,038	2,07692308	0,01800948	
9	0,55	0,005625	0,05	2,07692308	0,02369668	
10	0,6	0,00825	0,064	3,04615385	0,03033175	
11	0,65	0,008625	0,08	3,18461538	0,03791469	
12	0,7	0,010125	0,096	3,73846154	0,04549763	
13	0,75	0,00825	0,114	3,04615385	0,05402844	
14	0,8	0,008625	0,132	3,18461538	0,06255924	
15	0,85	0,009375	0,148	3,46153846	0,07014218	
16	0,9	0,010125	0,166	3,73846154	0,07867299	
17	0,95	0,0105	0,184	3,87692308	0,08720379	
18	1	0,00975	0,202	3,6	0,0957346	
19	1,05	0,0105	0,22	3,87692308	0,1042654	
20	1,1	0,01125	0,238	4,15384615	0,11279621	
21	1,15	0,010875	0,256	4,01538462	0,12132701	
22	1,2	0,01125	0,274	4,15384615	0,12985782	
23	1,25	0,009375	0,294	3,46153846	0,13933649	

2848	142,5	0,022875	50,478	8,44615385	23,9232227
2849	142,55	0,02175	50,496	8,03076923	23,9317536
2850	142,6	0,019125	50,512	7,06153846	23,9393365
2851	142,65	0,02175	50,53	8,03076923	23,9478673
2852	142,7	0,021375	50,546	7,89230769	23,9554502
2853	142,75	0,024	50,564	8,86153846	23,963981
2854	142,8	0,024	50,582	8,86153846	23,9725118
2855	142,85	0,02475	50,6	9,13846154	23,9810427
2856	142,9	0,02325	50,618	8,58461538	23,9895735
2857	142,95	0,021	50,636	7,75384615	23,9981043
2858	143	0,023625	50,654	8,72307692	24,0066351
2859	143,05	0,02475	50,672	9,13846154	24,0151659
2860	143,1	0,02625	50,69	9,69230769	24,0236967
2861	143,15	0,025125	50,708	9,27692308	24,0322275
2862	143,2	0,0225	50,726	8,30769231	24,0407583
2863	143,25	0,023625	50,744	8,72307692	24,0492891
2864	143,3	0,020625	50,762	7,61538462	24,0578199
2865	143,35	0,022125	50,78	8,16923077	24,0663507
2866	143,4	0,022875	50,798	8,44615385	24,0748815
2867	143,45	0,022875	50,816	8,44615385	24,0834123
2868	143,5	0,021375	50,834	7,89230769	24,0919431
2869	143,55	0,027	50,852	9,96923077	24,1004739
2870					

Calculo de esfuerzo y deformación para 1 probeta

Como se aprecia en la figura el equipo genero 2869 datos. Utilizando las ecuaciones mencionadas en el capítulo 5 se calculan los esfuerzos y la deformación para cada instante.

De esta forma se obtienen los valores del máximo esfuerzo y la máxima deformación para cada una de las probetas. Se realizan 5 ensayos por composición.

20R80F	PROBETA 5	PROBETA 4	PROBETA 3	PROBETA 2	PROBETA 1	PROMEDIO	DESVIACION
ESFUERZO	11,4923077	11,90769231	19,38461538	17,4461538	19,10769231	15,8676923	3,87890059
DEFORMACION	24,1004739	23,94948008	24,38578199	23,9838863	24,1943128	24,122787	0,17614545

De esta forma se generan la tabla 8 correspondiente a los resultados ensayos de tracción y la tabla 9 correspondiente a los resultados de los ensayos de flexión.

20R80F	PROBETA 5	PROBETA 4	PROBETA 3	PROBETA 2	PROBETA 1	PROMEDIO	DESVIACION
ESFUERZO	11,492308	11,907692	19,384615	17,446154	19,107692	15,86769231	3,878900595
DEFORMACION	24,100474	23,94948	24,385782	23,983886	24,194313	24,12278701	0,176145453
MODULO	252,7	265,1	251,8	257,23	253,9	256,146	5,411938654
40R 60F	PROBETA 5	PROBETA 4	PROBETA 3	PROBETA 2	PROBETA 1	PROMEDIO	DESVIACION
ESFUERZO	31,153846	26,723077	23,261538	25,338462	33,923077	28,08	4,363625874
DEFORMACION	23,512796	24,1109	23,757346	26,621718	25,380561	24,67666435	1,303699361
MODULO	478,9	419,1	462,8	476,3	423,5	452,12	28,83282851
60R40F	PROBETA 5	PROBETA 4	PROBETA 3	PROBETA 2	PROBETA 1	PROMEDIO	DESVIACION
ESFUERZO	48,323077	56,769231	51,230769	45,415385	47,076923	49,76307692	4,456224953
DEFORMACION	9,3327014	9,3327014	8,9459716	7,7469194	8,0123223	8,674123223	0,748170999
MODULO	1027,4	1111,8	1048,7	1130,54	1184,1	1100,508	63,3362086
PLA	PROBETA 5	PROBETA 4	PROBETA 3	PROBETA 2	PROBETA 1	PROMEDIO	DESVIACION
ESFUERZO	81,761538	83,861538	81,692308	84,046154	82,246154	82,72153846	1,146855748
DEFORMACION	5,3853081	5,5853081	5,2236967	5,5687204	5,6635071	5,485308057	0,178292617
MODULO	2378,2	2379,4	2313,8	2330,6	2493,5	2379,1	70,18653717
SISTEMA TPU	probeta 5	probeta 4	probeta 3	probeta 2	probeta 1	PROMEDIO	DESVIACION
esfuerzo	12,876923	9,1384615	9,1384615	8,7230769	12,876923	10,55076923	2,130238757
deformacion	17,100833	27,698578	23,151659	17,100833	23,943128	21,79900632	4,619998199
MODULO	89,8	82,6	75,4	92,53	82,6	84,586	6,755810832

	K	L	M	N	O
sistema	MODULO Gpa	ESFUERZO Mpa	DEFORMACIO %		
20R80F	256 ± 5,4	15,8 ± 3,8	24,1 ± 0,17		
40R60F	452,1 ± 28,8	28,1 ± 4,3	24,6 ± 1,3		
60R40F	1100,5 ± 63,3	49,8 ± 4,4	8,6 ± 0,7		
PLA	2379,3 ± 99	82,7 ± 1,2	5,4 ± 0,23		
TPU	84,58 ± 6,7	10 ± 2,1	21,8 ± 4,6		

Resultados ensayos de flexión

	B	C	D	E	F	G	H	I
20R80F	PROBETA 5	PROBETA 4	PROBETA 3	PROBETA 2	PROBETA 1	PROMEDIO	DESVIACION	
ESFUERZO	11,4576923	10,9673077	10,3788462	11,5153846	11,7519231	11,2142308	0,54724735	
DEFORMACION	17,268	16,52	15,716	18,904	18,296	17,3408	1,29179998	
Modulo	46,6	59,31	52,05	41,53	54,83	50,864	6,96017097	
40R60F	PROBETA 5	PROBETA 4	PROBETA 3	PROBETA 2	PROBETA 1	PROMEDIO	DESVIACION	
ESFUERZO	9,98076923	16,2865385	17,1173077	19,5923077	17,7865385	16,1526923	3,6586008	
DEFORMACION	19,9615385	17,188	17,632	18,656	20,196	18,7267077	1,34672128	
modulo	52,4	52	55	59,9	60,6	55,98	4,0721002	
60R40F	PROBETA 5	PROBETA 4	PROBETA 3	PROBETA 2	PROBETA 1	PROMEDIO	DESVIACION	
ESFUERZO	28,8807692	29,8615385	26,8730769	29,6653846	28,8807692	28,8323077	1,18285834	
DEFORMACION	17,248	19,116	14,708	17,992	17,248	17,2624	1,6196854	
Modulo	99,8	99,4	90,8	104,4	101,9	99,26	5,13010721	
PLA	PROBETA 5	PROBETA 4	PROBETA 3	PROBETA 2	PROBETA 1	PROMEDIO	DESVIACION	
ESFUERZO	38,3769231	40,3211538	36,6115385	36,5365385	36,9692308	37,7630769	1,610993	
DEFORMACION	12,52	17,38	13,24	13,028	13,444	13,9224	1,96317416	
modulo	151,5	106,72	149,8	130,6	175,8	142,884	25,8082405	

	K	L	M	N
sistema	MODULO GPa	ESFUERZO MPa	DEFORMACIO %	
20R80F	50,8 ± 7	11,2 ± 0,54	17,34 ± 1,2	
40R60F	550,9 ± 4,1	16,15 ± 3,6	18,72 ± 1,3	
60R40F	990,2 ± 5,1	28,8 ± 1,18	17,3 ± 1,6	
PLA	1420,9 ± 25,8	37,76 ± 1,61	13,92 ± 2	
TPU	26 ± 2	4 ± 0,7	145 ± 5	

Resultados ensayos de tracción.