



Pasantía de investigación en diseño y prototipado de probetas de tracción según la norma ASTM D638 mediante fabricación aditiva

Rafael Jose Campo Campo

Universidad Magdalena

Facultad de ingeniería
Programa de Ingeniería Industria
Santa Marta, Colombia
2021



Pasantía de investigación en diseño y prototipado de probetas de tracción según la norma ASTM D638 mediante fabricación aditiva

Rafael Jose Campo Campo

Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Industrial

Director (a):

PhD Crispulo Enrique Deluque Toro

Línea de Investigación:

Nuevos materiales aplicables a las industrias

Grupo de Investigación:

Grupos de nuevos materiales - GNM

Universidad del Magdalena

Facultad de Ingeniería

programa ingeniería industrial

Santa Marta, Colombia

2021

Nota de aceptación:

Aprobado por el Consejo de Programa en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad del Magdalena para optar al título de Ingeniero industrial

Jurado

Jurado

Santa Marta, ____ de ____ del _____

AGRADECIMIENTOS

En este instante quiero agradecer a todas las personas que hicieron parte de este logro, en especial a mis padres Jose Campo y Elkys Campo que siempre estuvieron presente en mi proceso de formación profesional y como un ser íntegro y con buenos principios y valores.

A mis demás familiares y amigos que apoyaron la realización de este trabajo, y de manera especial agradezco al director de este proyecto el PhD Crispulo Deluque, que me acompañó durante mi formación y me brindo todos sus conocimientos para la realización de este proyecto.

Resumen

El presente proyecto plantea analizar las propiedades mecánicas de diferentes materiales usados en la impresión 3D, para ello se comienza con el boceto bidimensional de una probeta bajo los parámetros de la norma ASTM D-638, posteriormente este modelo es convertido a un objeto tridimensional por software de diseño CAD, dando la posibilidad de convertir un modelo 3D digitalizado a uno en físico totalmente sólido, esto es gracias a software capaces de transformar estos modelos en comandos útiles para una impresora 3D. Asimismo se realizó el ensayo de tracción a un total de 80 probetas distribuidas en 16 probetas de PLA, 16 probetas de PLA con fibra de carbono, 16 Probetas de PLA con partículas de aluminio, 16 probetas de PLA+ y 16 probetas de PETG con los mismos parámetros de impresión, exceptuando el tipo de relleno, gracias a este ensayo de tracción se obtuvieron datos que permitían el análisis de la correlación entre en los diferentes tipos de material y los diferentes tipos de rellenos.

Palabras claves: Impresión 3D, propiedades mecánicas, ensayo de tracción, diseño.

Abstract

This project proposes to analyze the mechanical properties of the different materials used in 3D printing, for this we start from the two-dimensional sketch of a specimen under the parameters of the ASTM D-638 standard, then this model is converted into a three-dimensional object using CAD design software, giving the possibility of converting a digitized 3D model into a fully solid physical one, this thanks to software capable of transforming these models into useful commands for a 3D printer. Also, tensile tests were performed on a total of 80 specimens distributed in 16 PLA specimens, 16 PLA specimens with carbon fiber, 16 PLA specimens with aluminum particles, 16 PLA + specimens and 16 PETG specimens with the same printing parameters, except the type of filler, thanks to this, tensile test data were obtained that allowed analyzing the correlation between the different types of material and the different types of filler.

Keywords: 3D printing, mechanical properties, tensile test, design.

CONTENIDO

	Pág.
Agradecimientos	IV
Resumen	V
Abstract.....	V
Lista de figuras.....	7
Lista de tablas	8
Lista de símbolos	9
Introducción	10
1. Planteamiento del problema.....	12
1.1 Antecedentes.....	12
1.1.1 Fundamentación	14
1.2 Delimitación	15
2. Diseño y prototipado de probeta de tracción.....	16
2.1 Descripción general	16
2.2 Diseño de probeta	16
2.3 Proceso de segmentación y parámetros de impresión.....	18
3. Implementación de ensayo de tracción	19
3.1 Diagrama esfuerzo vs deformación.....	20
3.1.1 Análisis y resultados	20
4. Conclusiones.....	27
Bibliografía	28

Lista de figuras

	Pág.
FIGURA 1: PROBETA EN 2D (FUSIÓN 360).....	17
FIGURA 2: PROBETA EN 3D (FUSIÓN 360).....	17
FIGURA 3: TIPOS DE RELLENOS	19
FIGURA 4: MÁQUINA DE ENSAYO DE MATERIALES	20
FIGURA 5: MODULO DE YOUNG (MPa)	24
FIGURA 6: ESFUERZO MÁXIMO (MPa)	25
FIGURA 7: ELONGACIÓN MÁXIMA (MM)	26

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Parámetros de impresión	18
Tabla 2: Modulo de Young	23

Lista de símbolos

Símbolo	Significado
σ	Esfuerzo
ϵ	Deformación
$^{\circ}\text{C}$	Grados Celsius
mm	Milímetro
MPa	Megapascal

Introducción

Este informe final agrupa el proceso de desarrollo, aplicación y presenta los resultados académicos de la correspondiente *“Pasantía de investigación en diseño y prototipado de probetas de tracción según la norma ASTM D638 mediante fabricación aditiva”* realizada en el programa de Ingeniería Industrial en la Universidad del Magdalena.

En [1] se explica que la fabricación aditiva (AM: Additive Manufacturing) es el proceso de unión de materiales para crear objetos a partir de un modelo tridimensional o 3D que se realiza generalmente capa a capa frente a otros procesos de modelado que utilizan otras metodologías como la sustractiva fundamental en el mecanizado convencional y todo esto enmarcado por la ASTM (American Society for Testing and Materials). Conforme a esto, existen normas que permiten la caracterización de las propiedades físicas mecánicas de las piezas creadas por fabricación aditiva. Así, para el grupo de investigación de nuevos materiales – GNM es fundamental la caracterización de materiales comúnmente usados en la fabricación aditiva para lograr entender el comportamiento mecánico de dichos materiales.

El objetivo principal planteado en la pasantía fue diseñar y fabricar mediante impresión 3D probetas normalizada por la ASTM que permitiesen una caracterización de las propiedades mecánicas de los materiales, logrando medir parámetros como, módulos de elasticidad, fluencia, curva de tensión y módulo de Young.

Para el desarrollo de esta pasantía se propuso el siguiente objetivo general:

- Diseñar y fabricar mediante la impresión aditiva probeta normalizada por la norma ASTM D638

Cumpliendo los siguientes objetivos específicos:

- Diseñar una probeta que cumpla con los estándares preestablecidos en la norma ASTM D638 para plásticos semirrígidos
- Determinar parámetros adecuados de impresión para obtener una pieza que se adecue a la norma.

- Conocer las características de los diferentes materiales tratados, para identificar cual sería el óptimo para la obtención de las piezas.
- Realización de ensayos de materiales de piezas previamente fabricadas y caracterizadas conforme a normas y test de ensayos de materiales.
- Determinar acciones para la mejora de la calidad de las piezas fabricadas mediante esta tecnología.

Teniendo como alcance el desarrollo de una probeta en óptimas condiciones que nos permita realizarle un esfuerzo de tracción para calcular diferentes propiedades mecánicas de cada polímero trabajado y así poder presentar las propiedades y compararlas con la teoría.

El trabajo está conformado por 4 capítulos donde de manera explicativa se abordan los temas del proyecto, dando inicio con el capítulo I donde se presenta el planteamiento del problema, antecedentes, fundamentación y delimitación del trabajo, enfocado a la fabricación aditiva y a los procedimientos para la caracterización de las propiedades mecánicas. En el capítulo II, se describe el proceso realizado para la obtención de una probeta normalizada por la ASTM, medidas y parámetros usados para la impresión. En el capítulo III se describe el proceso implementado para la obtención de los datos y las pruebas de las probetas con los correspondientes análisis y resultados obtenidos, Por último, se brindan conclusiones de acuerdo con los resultados obtenidos durante la investigación, el diseño y el prototipado de la probeta.

1. Planteamiento del problema

La línea de investigación de nuevos materiales aplicables a las industrias, del grupo de investigación de nuevos materiales-GNM de la universidad del Magdalena, en busca de la aplicación de la termografía infrarroja para la mejora de la calidad de piezas de material polimérico impresas mediante fabricación aditiva, encontraron imprescindible el diseño y el prototipado de una probeta que sea sometida a un ensayo de tracción donde se obtengan las propiedades del material. En el proceso de modelado por deposición fundida (FDM) existen diversos parámetros que afectarían el resultado del ensayo de tracción, que podrían ser el tipo de material, la temperatura de impresión, los diversos patrones de relleno, la densidad de relleno, la velocidad de impresión, entre otros, en este caso se estudiara la relación entre los diferentes patrones de rellenos y el tipo de material con el módulo de Young.

1.1 Antecedentes

Conforme a la ASTM (American Society for Testing and Materials), la fabricación aditiva (AM: Additive Manufacturing) es el proceso de unión de materiales para crear objetos a partir de un modelo tridimensional o 3D que se realiza generalmente capa a capa frente a otros procesos de modelado que utilizan otras metodologías como la sustractiva fundamental en el mecanizado convencional [1]. La fabricación aditiva es capaz de producir modelos completamente funcionales dentro de un amplio rango de materiales: metálicos, cerámicos, polímeros, composites, híbridos [2], materiales funcionalmente graduados (FGM, Functionally Graded Materials [3] e incluso tejidos biológicos como en el caso de la bio-impresión. De entre todos estos materiales, los polímeros han sido hasta el momento los más utilizados debido principalmente a las propiedades que se les confieren a las piezas fabricadas, la rapidez para obtener geometrías complejas y a un coste de fabricación bastante atractivo [4]. El gran auge que ha tenido esta tecnología se debe básicamente a sus beneficios potenciales: a) traslación directa del diseño al componente a fabricar; b) reducción de tiempos de diseño y fabricación; c) elevada flexibilidad en la fabricación que evita procesamientos y costes adicionales; d) obtención de diseños de características internas complejas mediante la creación de huecos y

estructuras de enrejado; e) pérdidas de material prácticamente inexistentes; f) fabricación bajo pedido alejándose de soluciones basadas en la estimación de la demanda; g) excelente escalabilidad [6]. Todo ello ha dado lugar a un gran desarrollo de aplicaciones en varios campos de la técnica como la industria aeroespacial (geometrías complejas basadas en materiales avanzados como las aleaciones de titanio, súper-aleaciones de níquel, aceros especiales y cerámicas resistentes a ultra-elevada temperatura), automoción (elementos estructurales y funcionales como escapes de motores, ejes, componentes de cajas reductoras y sistemas de frenado, así como, aleaciones ultraligeras para motocicletas y componentes especiales en vehículos de competición), biomédica (odontología, implantes ortopédicos, estructuras de fijación de tejidos, órganos artificiales, dispositivos médicos, redes micro-vasculares y chips biológicos), construcción, electrónica, textil, robótica, energía (fundamentalmente elementos y partes de sistemas de energía no contaminante y renovable como fuentes de alimentación portátiles, sistemas automáticos y sistemas de distribución de energía) e industria militar [4,7,8].

De cara al futuro, los principales retos a los que se enfrenta esta tecnología son la fabricación de modelos de mayores dimensiones, el aumento de la velocidad de fabricación, incremento de la calidad del producto (a partir de la mejora del proceso, utilización de nuevos materiales y control e inspección automatizados), simplificación del proceso de configuración y ajuste de la máquina de impresión, construcción de máquinas más complejas que puedan operar con múltiples materiales a la vez y el abaratamiento de estos sistemas [5].

El Ensayo de Tensión es la prueba más común para determinar las propiedades de los materiales, requiere de la preparación de un espécimen según las especificaciones de las organizaciones correspondientes. [9] Además de ofrecer una riqueza de información acerca del material a utilizar, aunque una variedad de normas que son específicas de la ASTM muestra los procedimientos a seguir con diferentes tipos de materiales. Pero la metodología básica del ensayo es la misma para todos los materiales, utilizando principios básicos del ensayo. [10]

Consiste en la aplicación de una fuerza unidireccional al espécimen mediante un cabezal móvil. [11] Las propiedades obtenidas por este ensayo son resistencia, ductilidad, tenacidad, módulo elástico, endurecimiento por deformación entre otras. Donde los esfuerzos de la probeta en cuestión parten de la fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

También está la deformación unilateral tomando en cuenta que este ensayo solo se prolonga en una dirección, de deformación uniáxica:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Existen muchos factores que determinan las propiedades físicas de una pieza generada en un sistema de impresión 3D, como pueden ser el tipo de material depositado, la cantidad colocada, la homogenización de las capas del material y la configuración realizada de la temperatura, velocidad y flujo. Las variables anteriores permiten diferentes propiedades físicas para satisfacer las necesidades de aplicaciones específicas como la construcción de maquetas, prototipos, visualización de conceptos entre otros [12]. Cuando se trata de un sólido impreso en 3D mediante tecnología FDM se habla de un sólido con un material no necesariamente homogéneo, dado que puede contener orificios o imperfecciones, cuya anisotropía está fuertemente influenciada por el proceso de fabricación, por ende, las propiedades mecánicas del sólido impreso dependerán directamente de los parámetros utilizados para su fabricación [13].

1.1.1 Fundamentación

Un sistema de fabricación aditiva consta esencialmente de los siguientes cuatro elementos: un modelo digital del objeto o parte a ser fabricado, el material o materiales que van a ser conformados y su formato de partida (polvo, hilo, etc.), la herramienta o sistema que deposita el material y el controlador digital de la herramienta para depositar el material capa a capa para construir la forma del modelo digital [6]. Generalmente, los pasos a abordar para la fabricación de un componente son los siguientes: 1) Desarrollo de un modelo sólido 3D por computador; 2) Conversión del modelo a un formato de fichero compatible con los sistemas de fabricación aditiva; 3) Envío del fichero a un sistema o máquina de fabricación aditiva; 4) Fabricación del objeto o parte capa a capa en el sistema; 5) Limpieza y acabado del modelo [8]. La norma ISO/ASTM 52900:2015 (ISO: International Organization for Standardization, Organización Internacional para la Estandarización) denominada Additive Manufacturing. General Principles. Terminology clasifica los procesos de fabricación aditiva en siete categorías: 1) Chorro de aglomerante o Binder

Jetting (BJ); 2) Deposición de energía dirigida o Directed Energy Deposition (DED); 3) Extrusión de material o Material Extrusión (ME); 4) Chorro de material o Material Jetting (MJ); 5) Fusión de lecho de polvo o Powder Bed Fusion (PBF); 6) Laminación de hojas Sheet Lamination (SL; también suele denominarse LOM: Laminated Object Manufacturing); 7) Foto polimerización de cubeta o Vat Photopolymerization (VP) [14]. En [12], se muestra una clasificación completa de los distintos materiales que se pueden aplicar en la fabricación aditiva en función de los procesos indicados por la ISO/ASTM para su adecuada selección.

1.2 Delimitación

Los materiales que se usaran para analizar son el PLA en su estado natural, PLA+, PLA con partículas de aluminio, PLA con fibra de carbono y PETG. Se implementará la norma ASTM D-638 para el diseño de probetas y posteriormente para el proceso de impresión 3D, esta se llevará a cabo con el uso de una impresora de la marca Creality, Ender 3 Pro, finalmente el ensayo será realizado en el equipo Materials Testing Machine • ME-8236 del área de física de la Universidad del Magdalena

2. Diseño y prototipado de probeta de tracción

2.1 Descripción general

El diseño y prototipado de esta probeta se realizó siguiendo los parámetros especificados en la norma ASTM D-638 particularmente en la probeta tipo V para posteriormente adquirir el comportamiento mecánico y las propiedades físicas de los materiales usados.

Este tipo de pruebas permite medir la fuerza, la extensión de la probeta, el esfuerzo, la deformación, entre otros valores característicos.

2.2 Diseño de probeta

CAD, o diseño y dibujo asistido por computadora (CAD), es una tecnología para el diseño y la documentación técnica, que sustituye el dibujo manual por un proceso automatizado. Para el diseño de nuestra probeta era indispensable un programa que se adecuara a nuestras necesidades, por lo que se usó Fusión 360.

Fusión 360 es un software CAD, CAM y de circuitos impresos de modelado 3D basado en la nube para el diseño y la manufactura de productos. Inicialmente se tomo en cuenta los parametros sugeridos por la norma ASTM D-638, realizando asi boceto de la probeta para luego su conversion en formato 3D.

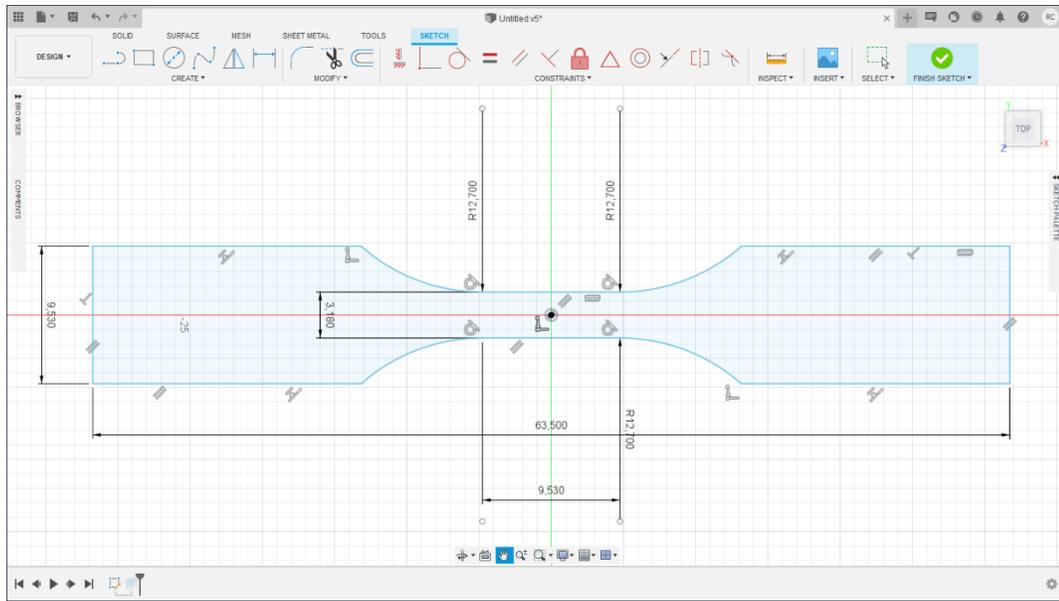


Figura 1: Probeta en 2D (Fusión 360)

Al usar la función extruir se busca convertir el boceto (2D) a un formato tridimensional, creando así una pieza solida lista para exportar en un formato compatible con los programas de segmentación.

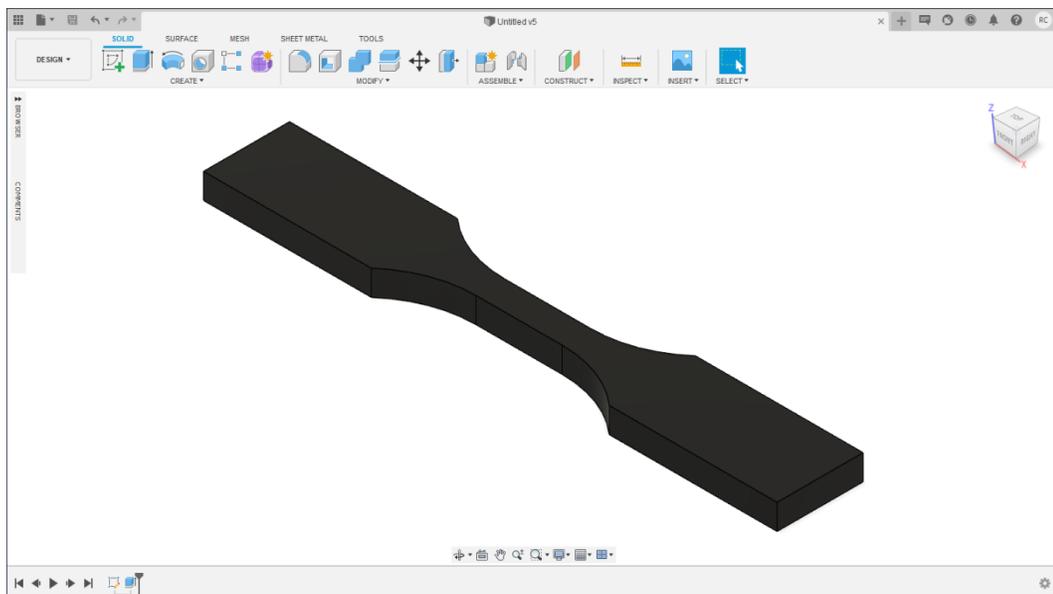


Figura 2: Probeta en 3D (Fusión 360)

2.3 Proceso de segmentación y parámetros de impresión

Una vez obtenido el diseño en formato .STL, se importa en un programa capaz de convertir el modelo 3D en lenguaje compatible con la máquina, esto es normalmente conocido como programas de segmentación

	PLA	PLA+	PLA aluminio	PLA Carbono F.	PETG
Altura de capa	0.1mm	0.1mm	0.1mm	0.1mm	0.1mm
Números de perímetros	3	3	3	3	3
Densidad de relleno	25%	25%	25%	25%	25%
Temperatura de impresión	215°C	215°C	215°C	215°C	215°C
Velocidad de impresión	30mm/s	30mm/s	30mm/s	30mm/s	30mm/s

Tabla 1: Parámetros de impresión

En esta investigación se tomó la decisión de analizar el comportamiento de las propiedades mecánicas de los diferentes tipos de materiales, y este es influido por el tipo de relleno que se le asigna a cada probeta, se usó 16 tipos de rellenos los cuales son:

- A. Rectilíneo
- B. Triángulos
- C. Rectilíneo alineado
- D. Rejilla
- E. Estrellas
- F. Lineal
- G. Cubico
- H. Concéntrico

- I. Panal de abeja
- J. Panal de abeja 3D
- K. Giroide
- L. Curva de Hilbert
- M. Acordes de Arquímedes
- N. Octagram Spiral
- O. Cubico Adaptativo
- P. Soporte Cubico

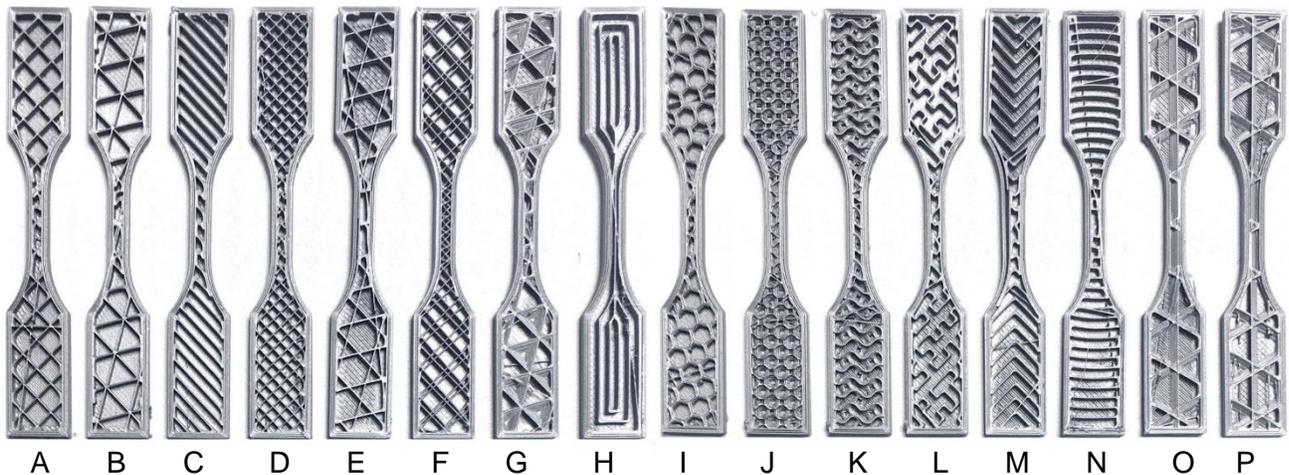


Figura 3: Tipos de rellenos

3. Implementación de ensayo de tracción

El ensayo de tracción consiste en someter una probeta a un esfuerzo axial progresivo hasta llegar a producir una rotura en la probeta, de tal manera que se pueda medir la resistencia de un material a una fuerza aplicada lentamente [15]. La máquina de ensayo (figura 4), deforma la probeta previamente obtenida desplazando el cabezal móvil a una velocidad determinada. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas están conectadas a un computador que registra el desplazamiento y la carga aplicada [16].



Figura 4: Máquina de ensayo de materiales

3.1 Diagrama esfuerzo vs deformación

El resultado del ensayo de tracción es una gráfica en la que se representa en las abscisas el incremento de longitud de la probeta en cada instante, dividido entre su longitud inicial, y en ordenadas la fuerza aplicada en cada instante, dividida entre el área de la sección de la probeta [17].

3.1.1 Análisis y resultados

PASCO Capstone fue el software usado para la representación gráfica de los datos obtenidos de la prueba de tracción, aplicada a cada una de las probetas.

Se obtuvo como resultado 80 datos de los 16 tipos de probeta de cada material usado, los datos están agrupados en la **Tabla 2: Modulo de Young**

Material	Probeta N°	Módulo de Young (MPa)
PLA	1	568
	2	536
	3	591

	4	559	
	5	593	
	6	582	
	7	531	
	8	572	
	9	513	
	10	598	
	11	547	
	12	541	
	13	515	
	14	518	
	15	578	
	16	579	
	PLA Aluminio	1	323
		2	339
		3	309
4		319	
5		379	
6		380	
7		355	
8		391	
9		320	
10		358	
11		332	
12		345	
13		345	
14		312	
15		329	
16		328	
PLA Fibra De Carbono	1	352	
	2	376	

	3	337	
	4	340	
	5	338	
	6	360	
	7	355	
	8	338	
	9	358	
	10	362	
	11	345	
	12	342	
	13	367	
	14	352	
	15	376	
	16	367	
	PLA +	1	310
		2	316
3		352	
4		305	
5		336	
6		323	
7		345	
8		338	
9		356	
10		338	
11		325	
12		239	
13		358	
14		325	
15		356	
16		339	
PETG	1	357	

	2	316
	3	352
	4	340
	5	325
	6	359
	7	338
	8	347
	9	356
	10	338
	11	325
	12	325
	13	348
	14	346
	15	359
	16	340

Tabla 2: Modulo de Young

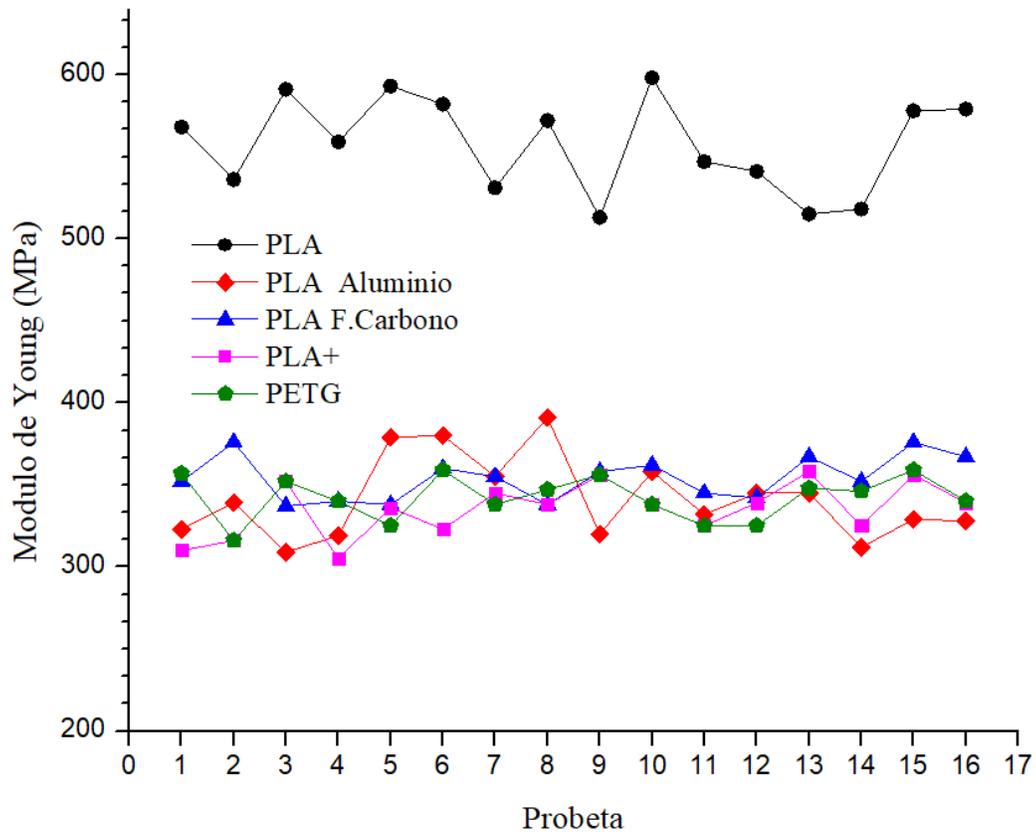


Figura 5: Módulo de Young (MPa)

Comparando los resultados del módulo de Young en un gráfico, se demostró que el material PLA de marca 4DLAB presentó una mayor elasticidad longitudinal con módulos de elasticidad por encima de los 500 MPa, mientras que el resto de materiales que se probaron, tuvieron un comportamiento más asentado entre los 300 MPa y 350 MPa, a excepción de la probeta número 8 de PLA con partículas de aluminio y con patrón de relleno concéntrico, que obtuvo un módulo de Young cerca de los 400MPa. Gracias a esto quedó evidenciado que a pesar de que los filamentos tengan aditivos, como las partículas de aluminio o la fibra de carbono, no significa que estos tengan propiedades mecánicas mayores, por el contrario, estas probablemente ocasionen que el hilo de filamento depositado sea menos homogéneo y que la unión entre la deposición sea menor, obteniendo como resultado una menor resistencia de elasticidad longitudinal. Por otra parte el filamento PLA se puede decir que presenta mayor homogeneidad y menor

cantidad de aditivos y esta sería una explicación del por qué el material presenta una mayor resistencia elástica longitudinal.

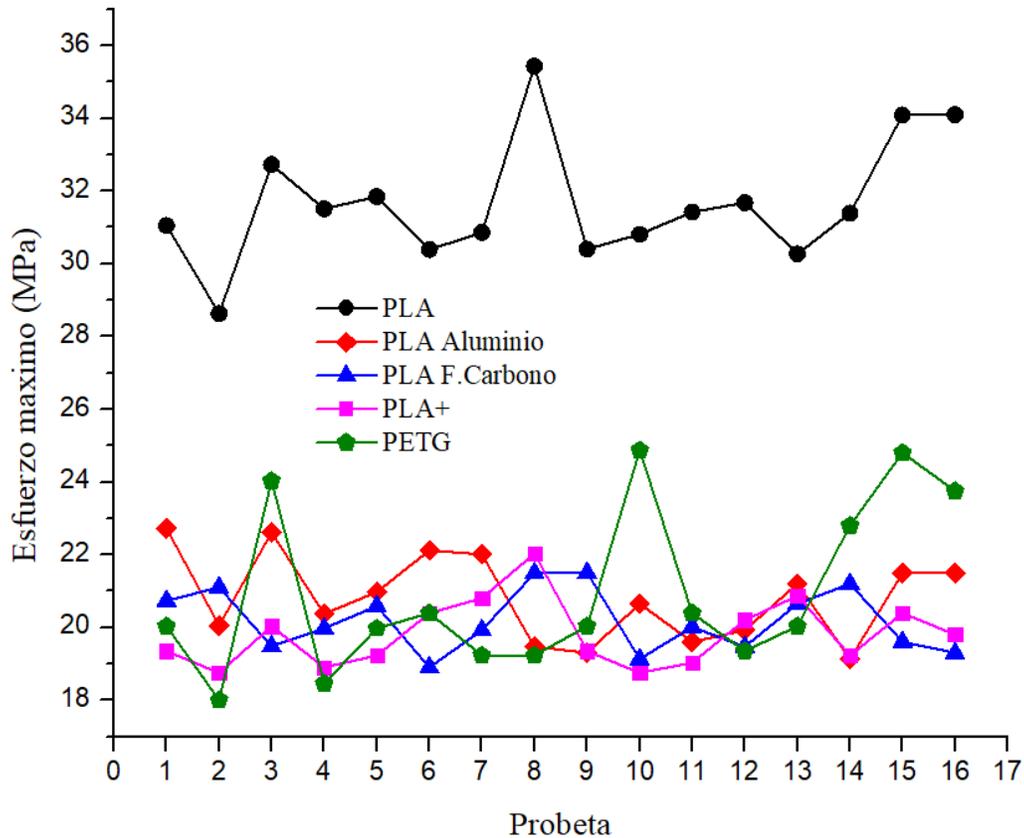


Figura 6: Esfuerzo máximo (MPa)

De igual forma ocurre con el esfuerzo máximo, donde el PLA con partículas de aluminio, con fibra de carbono, PLA +, se comportan de manera asentada por debajo de los 23 MPa mientras que el PETG se comporta de manera variable con datos por arriba de 23 MPa y sin superar los 25 MPa, pero con el dato más bajo, de 18 MPa, que corresponde a la probeta 2 con patrón de relleno triángulos. Mientras que el PLA sin aditivos, resultó ser el resistente con esfuerzos máximos por encima de los 28 MPa, siendo este el menor esfuerzo en toda la serie, que corresponde a la probeta 2 con patrón de relleno triángulos, y un dato superior de 35 MPa. Por lo que se puede afirmar que el PLA con menor aditamentos es más resistente al aplicarle un esfuerzo de forma axial.

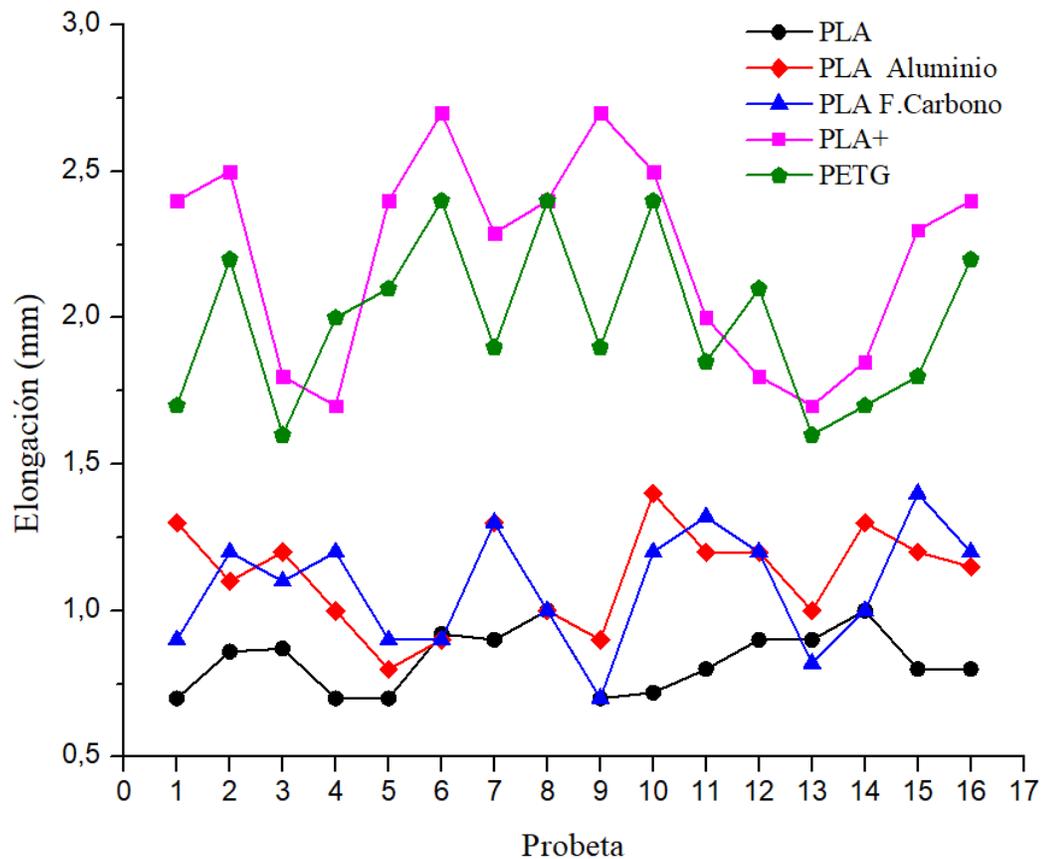


Figura 7: Elongación máxima (mm)

En cuanto a la elongación del material, se obtuvo una diferencia significativa, puesto que el PLA que es el más resistente no tuvo una elongación alta, por lo que se difiere que el comportamiento del PLA se dio con una rotula frágil, lo mismo sucede con el PLA con partículas de aluminio y con el PLA con fibra de carbono, se plantea que estas partículas le impiden que el material sea totalmente homogéneo e incluso existan sectores que no tengan una correcta cohesión entre los hilos de la deposición, por otra parte, las probetas impresas con PLA+ y PETG se comportaron de manera más dúctil en comparación con las demás, por datos por encima de los 1,5 mm de elongación.

4. Conclusiones

Se diseñó la probeta siguiendo los estándares propuestos en la normal ASTM D638, específicamente la probeta tipo V, lo que facilitara realizar futuramente y con una debida investigación pruebas a otros tipos de materiales para así poder conocer y comparar las propiedades mecánicas de diferentes tipos de polímeros o plásticos semirrígidos.

Los materiales aquí trabajados, PLA, PLA+, PLA con partículas de aluminio, PLA con fibra de carbono y PETG, se lograron fabricar con parámetros en la temperatura recomendados por los mismos fabricantes, siendo este el rango de 200°C – 225°C para todos los PLA y un rango de 210°C – 250°C para el PETG, encontrando que la temperatura ideal para la fabricación de dichas probetas fue de 215°C en nuestro caso.

En el caso comparativo entre los diferentes tipos de relleno no se observó una diferencia significativa, teniendo una densidad estándar para todos los tipos de relleno del 25%, puesto que todas las series de cada material tratado estaban en el mismo rango.

Por otro lado, la comparación de los diferentes tipos de materiales si presentan significadas entre sí, puesto que los materiales PLA, PLA con partículas de aluminio y PLA con fibra de carbono, tuvieron un comportamiento muy similar, evidenciándose un comportamiento frágil sin zona de fluencia, mientras que, el PLA+ y el PETG, tuvieron un comportamiento dúctil con una zona de fluencia muy marcada. Así mismo, el PLA presento una resistencia mayor en comparación con el resto.

Este trabajo impulsa las investigaciones de este tipo de pruebas que permitió diferenciar las propiedades mecánicas de los 5 diferentes materiales trabajados, y lograr demostrar la poca significancia que existe entre los diferentes tipos de relleno, pero que a su vez puede ser diferente de acuerdo con cada material. Se determinó que una mejora de calidad en la fabricación de las piezas trabajadas es implementar una prueba de temperatura para determinar una óptima, y además de esto disminuir el diámetro de la boquilla trabajada.

Bibliografía

- [1] Yadollahi A, Shamsaei N. Additive manufacturing of fatigue resistant materials: Challenges and opportunities. *Int J Fatigue* [Internet]. 2017; 98:14–31. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.01.001>
- [2] Lee KE, Morad N, Teng TT, Poh BT. Development, characterization and the application of hybrid materials in coagulation/flocculation of wastewater: A review. *Chem Eng J* [Internet]. 2012;203:370–86. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.109>
- [3] Naebe M, Shirvanimoghaddam K. Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. *Appl Mater Today* [Internet]. 2016;5:223–45. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apmt.2016.10.001>
- [4] Dizon JRC, Espera AH, Chen Q, Advincula RC. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Addit Manuf* [Internet]. 2018;20:44–67. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
- [5] Authors V. Additive Manufacturing: Materials, Processes, Quantifications and Applications. Zhang J, Jung Y-G, editors. Vol. 83. The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, United Kingdom: Elsevier Inc. Butterworth-Heinemann; 2018. 1-24 p.
- [6] Tofail SAM, Koumoulos EP, Bandyopadhyay A, Bose S, O'Donoghue L, Charitidis C. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Mater Today* [Internet]. 2018;21(1):22–37. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2017.07.001>
- [7] Arcos-Novillo DA, Güemes-Castorena D. Development of an additive manufacturing technology scenario for opportunity identification—The case of Mexico. *Futures* [Internet]. 2017;90(May):1–15. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2017.05.001>
- [8] Prakash KS, Nancharaih T, Rao VVS. Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. *Mater Today Proc* [Internet]. 2018;5(2):3873–82. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642>

- [9] Rao RV, Rai DP. Optimization of fused deposition modeling process using teaching-learning-based optimization algorithm. Eng Sci Technol an Int J [Internet]. 2016;19(1):587–603. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2015.09.008>
- [10] Wang Y, Yeh Y. Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering. 2017; Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978981-10-1771-1>
- [11] Gaussorges G. Infrared Thermography [Internet]. Carpentier M-H, Smith B-L, editors. Microwave Technology Series. Media, Springer Sciences Business; 1994. 552 p. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1002/9781118476406.emoe582>
- [12] Bourell D, Kruth JP, Leu M, Levy G, Rosen D, Beese AM, et al. Materials for additive manufacturing. CIRP Ann Manuf Technol [Internet]. 2017;66(2):659–81. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.009>
- [13] Lunsford TR, Contoyannis B. 2 - Materials Science [Internet]. Fifth Edit. Atlas of Orthoses and Assistive Devices. Elsevier Inc.; 2019. 7-41 p. Available from: https://ac.els-cdn.com/B9780323483230000020/3-s2.0-B9780323483230000020-main.pdf?_tid=91044664-7465-4418-98dd-310d8280234a&acdnat=1540247008_07033cfecbdae36351ebcc11cb6e660e
- [14] ISO / ASTM 52900. Additive manufacturing — General principles — Terminology. CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland: ISO / ASTM; 2015.
- [15] Dakshinamurthy D, Gupta S. A Study on the Influence of Process Parameters on the Viscoelastic Properties of ABS Components Manufactured by FDM Process. J Inst Eng Ser C [Internet]. 2018 Apr 22 [cited 2018 Dec 3];99(2):133–8. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/s40032-016-0324-z>
- [16] Fischer M, Schöppner V. Fatigue Behavior of FDM Parts Manufactured with Ultem 9085. J Miner Met Mater Soc. 2017;69(3):563–8.
- [17] Tiwari K, Kumar S. Analysis of the factors affecting the dimensional accuracy of 3D printed products. Mater Today Proc [Internet]. 2018;5(9):18674–80. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.213>