

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA:

INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

**ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES A TRACCIÓN DE
PRODUCTOS FABRICADOS DE MATERIAL FUNDIDO ABS UTILIZANDO
UNA IMPRESORA 3D**

AUTOR:

JUAN CARLOS SOSA DÍAZ

TUTOR:

RENÉ PATRICIO QUITIAQUEZ SARSOZA

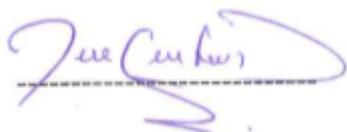
Quito, junio de 2018

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Juan Carlos Sosa Díaz, con documento de identificación N° 1711684264, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Trabajo de Titulación: “ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES A TRACCIÓN DE PRODUCTOS FABRICADOS DE MATERIAL FUNDIDO ABS UTILIZANDO UNA IMPRESORA 3D”, el mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, junio de 2018



Juan Carlos Sosa Díaz

C.I. 171168426-4

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo de Titulación: “ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES A TRACCIÓN DE PRODUCTOS FABRICADOS DE MATERIAL FUNDIDO ABS UTILIZANDO UNA IMPRESORA 3D” realizado por Juan Carlos Sosa Díaz, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, junio del 2018



René Patricio Quitiaquez Sarsoza

C.I 171059726-9

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado de manera especial a la persona que hizo posible con su amor y dedicación que pudiera culminar con éxito mi etapa universitaria, mi madre LAURA DÍAZ ENRÍQUEZ.

Dedico también a mi padre Patricio Sosa y a mis hermanos Javier y Gabriel que siempre están con su apoyo y en el momento que necesito.

Dedico además este esfuerzo a la Familia Díaz Enríquez, que con su apoyo incondicional me ayudó siempre, en especial a mi tía Martha que con sus consejos guío mi investigación.

Juan Carlos Sosa Díaz

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme fortaleza, sabiduría e inteligencia al igual que agradezco a mis padres, hermanos y familia materna.

Agradezco al Ingeniero Patricio Quitiaquez, por su guía, asesoramiento y predisposición para desarrollar este proyecto de titulación.

Juan Carlos Sosa Díaz

ÍNDICE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	ii
DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR.....	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
GLOSARIO	xiv
NOMENCLATURA	xv
INTRODUCCIÓN	1
ALCANCE.....	2
OBJETIVO GENERAL.....	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
CAPÍTULO I.....	4
GENERALIDADES.....	4
1.1 Descripción del problema.....	4
1.2 Marco Teórico	5
1.2.1 Definición del ABS.....	5
1.2.2 Características del ABS	5
1.2.3 Estructura del ABS.....	5
1.2.4 Propiedades mecánicas del ABS.....	6
1.2.5 Diagrama esfuerzo deformación del ABS.....	7
1.2.6 Aplicaciones del material.....	7
1.2.7 Normas de aplicación.....	8
1.2.8 Formulación	10
1.3 Impresión 3D.....	11
1.4 Tipos de impresoras 3D.....	11

1.5	Formas de impresión 3D	11
CAPÍTULO II		13
DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN		13
2.1	Máquina de ensayo a tracción.....	13
2.2	Normas de ensayo.....	14
2.3	Elaboración y diseño de probetas	15
2.4	Metodología para protocolo de pruebas de impresión.....	18
2.5	Pruebas a tracción	21
2.5.1	Metodología para protocolo de pruebas para ensayo a tracción	21
2.5.2	Ingreso y toma de datos.....	24
2.6	Análisis de resultados del ensayo a tracción	24
2.7	Cálculos de los ensayos a tracción.....	31
2.8	Simulación.....	43
CAPÍTULO III.....		50
VALIDACIÓN DE DATOS OBTENIDOS		50
3.1	Comparación datos	50
3.1.1	Análisis de resultados.....	51
3.1.2	Cálculo de error entre ensayo y simulación	52
3.1.3	Cálculo de pérdida de propiedades filamento de origen	53
3.2	Costos de ejecución del Proyecto	54
3.3	Costos directos.....	54
3.3.1	Costos de materia prima.....	54
3.3.2	Costos de mano de obra	54
3.4	Costos indirectos	55
3.5	Costo total del proyecto.....	55
CONCLUSIONES		56
RECOMENDACIONES		58

BIBLIOGRAFÍA	59
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades mecánicas del ABS	6
Tabla 2. Dimensiones de probeta norma ASTM D638	9
Tabla 3. Capacidad del sistema	13
Tabla 4. Datos de probeta tipo I	16
Tabla 5. Número de probetas de acuerdo con la norma	16
Tabla 6. Resultados de los ensayos a tracción	40
Tabla 7. Resultado de la simulación	47
Tabla 8. Valores para gráfica esfuerzo-deformación unitaria.	48
Tabla 9. Valores de variación datos experimentales vs datos de simulación.....	49
Tabla 10. Valores de variación datos experimentales vs datos de origen.....	49
Tabla 11. Valores de variación datos de simulación vs datos de origen.....	49
Tabla 12. Datos filamento de origen	50
Tabla 13. Datos obtenidos del ensayo a tracción	50
Tabla 14. Datos obtenidos del ensayo de simulación	50
Tabla 15. Análisis de resultados.....	51
Tabla 16. Valores de deformación de origen, experimental y simulación.....	52
Tabla 17. Costo materia prima	54
Tabla 18. Costo mano de obra.....	54
Tabla 19. Resumen costos directos	55
Tabla 20. Costos indirectos	55
Tabla 21. Costo total del proyecto	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del ABS	6
Figura 2. Diagrama esfuerzo - deformación del ABS	7
Figura 3. Diagrama de probeta norma ASTM D638	9
Figura 4. Máquina de tracción TESTRESOURCES modelo 316-1096	14
Figura 5. Diagrama de probeta norma ASTM D638	15
Figura 6. Dibujo de probeta tipo I, norma ASTM D638.....	17
Figura 7. Impresión de probeta, aplicación Simplify 3D.....	18
Figura 8. Importe de archivo de impresión de probeta	19
Figura 9. Ingreso de datos de impresión de probeta	20
Figura 10. Inicio de impresión de probeta	20
Figura 11. Proceso de impresión de probeta.....	21
Figura 12. Ubicación de probeta para ensayo a tracción	22
Figura 13. Medición de longitud calibrada de probeta	23
Figura 14. Rotura de probeta	23
Figura 15. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 1.....	25
Figura 16. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 2.....	26
Figura 17. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 3.....	27
Figura 18. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 4.....	28
Figura 19. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 5.....	29
Figura 20. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 6.....	30
Figura 21. Gráfica deformación transversal vs deformación longitudinal.....	41
Figura 22. Creación material ABS	43
Figura 23. Apoyo fijo de probeta.....	44

Figura 24. Fuerza máxima de aplicación	45
Figura 25. Número de nodos y elementos de la probeta.....	45
Figura 26. Simulación esfuerzo máximo	46
Figura 27. Deformación unitaria.....	46
Figura 28. Rotura de probeta	47
Figura 29. Gráfica esfuerzo - deformación obtenida de la simulación	48

RESUMEN

El presente proyecto de investigación está orientado a determinar las propiedades mecánicas de productos fabricados de material fundido ABS, realizando impresión 3D y mediante el desarrollo experimental de un ensayo a tracción; aplicando la norma que corresponde de acuerdo al material de utilización; en este caso la norma ASTM D638 la cual se aplica para el producto que se va a fabricar estableciendo la metodología de desarrollo de la experimentación y el proceso FDM (material fundido por deposición) de realización para la impresión; y, luego realizar un estudio comparativo de esfuerzo, deformación y módulo de elasticidad al realizar una simulación y un análisis utilizando el software de aplicación ANSYS para estos experimentos, donde se obtendrá información sobre pruebas experimentales de ensayos a tracción con su gráfico característico esfuerzo - deformación de productos que se someten a tensión; y, de esta manera establecer valores que permitan verificar el comportamiento presentado por las diferentes variables en la obtención de resultados luego de realizar la experimentación.

Palabras clave: ensayo de tracción, propiedades mecánicas, esfuerzo máximo, tensión axial

ABSTRACT

The present research project is aimed at determining the mechanical properties of products made of ABS cast material, performing 3D printing and through the experimental development of a tensile test; applying the corresponding norm according to the material of use; in this case the ASTM D638 standard which is applied to the product to be manufactured, establishing the methodology for the development of the experimentation and the FDM process (material cast by deposition) of realization for printing; and then carry out a comparative study of stress, deformation and modulus of elasticity when performing a simulation and analysis using the ANSYS application software for these experiments, where you will obtain information on experimental tests of tensile tests with its characteristic effort - deformation graph of products that are subjected to tension; and, in this way, establish values that allow verifying the behavior presented by the different variables in obtaining results after conducting the experimentation.

Keyword: traction test, mechanical properties, maximum strain, axial strain

GLOSARIO

ABS: Acrilonitrilo butadieno estireno, material plástico de gran resistencia al impacto, empleado en experimentos y otras aplicaciones de la industria [1].

TENACIDAD: Es la energía que deforma en su totalidad a un material antes de alcanzar la rotura en condición de impacto [2].

TRACCIÓN: Es la tensión interna a la que se somete un cuerpo por la aplicación de fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo [3].

ELONGACIÓN: Aumento de longitud que tiene un material cuando se encuentra sometido a un esfuerzo de tensión previo a producirse su rotura [4].

ASTM: Siglas en inglés para la American Society of Testing Materials, que quiere decir, Asociación Americana de Ensayo de Materiales. Asociación con sede en Estados Unidos, se encarga de tratar la resistencia de los materiales [5].

ESFUERZO: Resistencia que brinda cierta superficie unitaria de material sometida a la aplicación de una fuerza externa [6].

DEFORMACIÓN: Es el cambio de longitud lineal que experimenta un cuerpo cuando se somete a esfuerzos internos por fuerzas aplicadas sobre él [7].

ROTURA: Fenómeno físico por el cual una pieza mecánica se rompe o fracciona en varias partes debido a una fuerza de tracción [8].

FILAMENTO: Entidad que tiene forma de hilo muy fino [9].

ESTEREOLITOGRAFÍA: Conocida también como fabricación óptica, es una tecnología de manufactura o tecnología en impresiones 3D, que se utiliza para la producción de prototipos y modelos a escala [10].

SINTERIZACIÓN: Sistema térmico de polvo a temperatura más baja a la de fusión, y sirve para el incremento de fuerza y resistencia de una pieza [11].

FDM: Material fundido por deposición, es un proceso de fabricación que se emplea para el modelado de prototipos de mínima escala [12].

EXTENSÓMETRO: Sensor que mide deformaciones, cargas y posiciones, de materiales que son sometidos a la aplicación de esfuerzos [13].

TERMOPLÁSTICO: Material que se expande por la acción del calor y se vigoriza al enfriarse de forma reversible [14].

INTERFAZ: Círculo de comunicación o acción de un sistema hacia otro [15].

SIMULACIÓN: Mostrar objeto o cosa por medio de palabras, gestos o acciones [16].

NOMENCLATURA

W: Anchura de la sección estrecha de la probeta

L: Longitud de la sección estrecha de la probeta

W₀: Ancho general de la probeta

L₀: Longitud total de la probeta

G: Longitud calibrada de la probeta

D: Distancia entre mordazas

R: Radio del filete

σ : Esfuerzo

δ : Alargamiento total

P: Fuerza externa aplicada

A: Sección ó área transversal

E: Módulo de Young ó elasticidad

ϵ : Deformación unitaria

e: Error

v: Coeficiente de Poisson

INTRODUCCIÓN

La finalidad del presente trabajo de investigación es determinar las variaciones de propiedades mecánicas de productos fabricados de material fundido ABS, mediante la realización de ensayos a tracción y definir las variables que se aplican en la experimentación y poder verificar los distintos valores que se obtendrán en el ensayo para una posterior comparación y validación.

Para desarrollar el ensayo a tracción se establecerá la metodología para la creación de los productos mediante la aplicación de un sistema de impresión 3D conocido como material fundido por deposición (FDM) con la respectiva norma para un ensayo de este tipo y verificar mediante una simulación con software de aplicación de ingeniería las variaciones que se desarrollan con experimentación.

La investigación se realizará en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, donde se encuentra la Máquina Universal para ensayos de tracción; donde se efectuará la experimentación y se obtendrá los valores que servirá para desarrollar los respectivos estudios de comparación para establecer las variaciones de propiedades mecánicas de productos fabricados de material ABS, con relación al material original cuando son sometidos a esfuerzos de tensión.

ALCANCE

En el trabajo de investigación que se realizará sobre ensayos a tracción de material fundido ABS, se fabricará probetas para la experimentación de acuerdo con la norma ASTM D 638, donde se determinará valores de las propiedades mecánicas tales como: deformación, módulo de elasticidad y esfuerzo. Posteriormente se harán estudios de comparación entre la simulación y los datos que se obtendrán del ensayo a tracción, con los cuales se determinará y analizará con software de aplicación para ingeniería las propiedades mecánicas de probetas fabricadas de material fundido ABS que serán sometidas a esfuerzos de tensión.

OBJETIVO GENERAL

Analizar y determinar propiedades a tracción de productos fabricados de material fundido ABS utilizando una impresora 3D.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el proceso del ensayo a tracción, fabricando probetas de material ABS con normas ASTM, para su diseño y posterior impresión mediante la utilización de una impresora 3D.
- Establecer valores de elasticidad, esfuerzo y deformación mecánicas del ensayo de dicho producto fabricado por deposición.
- Obtener gráficas características esfuerzo vs deformación para las probetas fabricadas de material fundido ABS mediante mediciones de software computacional respectivo en el momento de la ejecución del ensayo a tracción.
- Analizar los datos obtenidos, con los respectivos estudios comparativos y establecer valores específicos de tracción de dicho material, mediante la simulación del ensayo con software de computadora ANSYS en el módulo explicit dynamics.
- Demostrar la viabilidad de costos, así como la rentabilidad del proyecto en el diseño e impresión de productos fabricados de material ABS.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

El presente proyecto de investigación está orientado a determinar las variaciones de las propiedades mecánicas del ensayo a tracción de productos fabricados de material fundido ABS. En el proceso práctico se realizará el estudio comparativo sobre alargamiento de rotura, módulo de elasticidad y esfuerzo, al realizar una simulación y un análisis mediante software de aplicación de ingeniería que es utilizado en la actualidad para estos experimentos, para obtener la información precisa sobre los ensayos a tracción con sus gráficas características esfuerzo vs deformación y de esa forma establecer valores del ensayo a realizarse; y, verificar el comportamiento que presentan las distintas variables en la obtención de resultados.

1.1 Descripción del problema

En ensayos a tracción no existe información específica en cuanto a la variación de las propiedades mecánicas, en lo que se refiere a productos o elementos mecánicos fabricados de material fundido de ABS, de un ensayo a tracción de las distintas variables como: elongación, fricción, módulo de tracción, resistencia e impacto; por lo que se plantea profundizar en el comportamiento que presentan dichos productos fabricados y proponer un esquema que especifique los resultados obtenidos para realizar los respectivos estudios de comparación de forma más exacta, así como la descripción de dichas variables que serán el motivo y el objetivo del presente trabajo de investigación.

1.2 Marco Teórico

1.2.1 Definición del ABS

Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) denominado así en ingeniería, por ser un polímero que en su fabricación y procesamiento posee un método más complejo de creación que los polímeros comunes como lo son el polietileno y propileno. Además, la resistencia de éste termoplástico aumenta en gran medida debido al gran porcentaje de butadieno que posee al mismo tiempo que reduce su resistencia a la tensión y temperatura de deformación por la presencia de calor [1].

Este material es uno de los más resistentes en comparación a otros ya existentes en la actualidad, principalmente al hacer referencia al policloruro de vinilo (PVC) y ácido poliláctico (PLA).

1.2.2 Características del ABS

El aspecto de mayor relevancia del ABS está en su gran tenacidad, incluso a bajas temperaturas continúa conservando sus propiedades, es decir sigue siendo rígido y duro. Además, presenta bajo nivel de absorción de agua, lo que le permite tener buena estabilidad dimensional, una alta resistencia de abrasión y recubrirse con facilidad de una capa metálica [1].

Este material, tiene varias aplicaciones, con los que principalmente se puede realizar elementos y diseños mecánicos que se utilizan hoy en día en manufactura con normas de calidad.

1.2.3 Estructura del ABS

Su estructura está dada por la mezcla de un tipo de copolímero denominado (estireno – acrilonitrilo) vítreo de un componente elástico de butadieno.

El ABS al ser un plástico más resistente se incrementa su porcentaje de butadieno, pero disminuye las propiedades de resistencia a la tensión al disminuir su temperatura de deformación por calor [2].

Las grandes propiedades que muestra el ABS se deben en gran medida por las propiedades que presentan cada uno de sus componentes, como se muestra en la ilustración de la Figura 1.

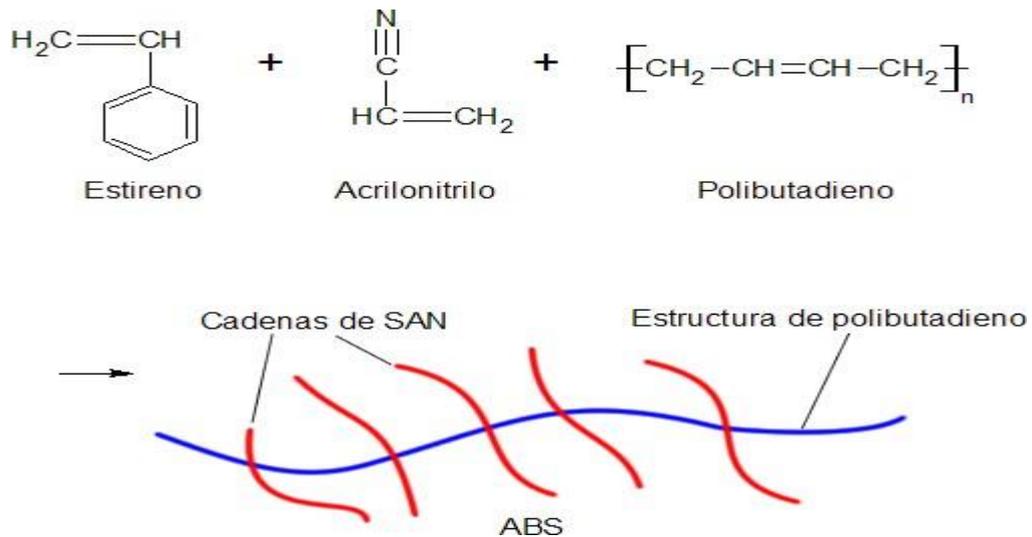


Figura 1. Estructura del ABS [2]

1.2.4 Propiedades mecánicas del ABS

La fabricación de materiales ABS poseen importantes propiedades desarrolladas en ingeniería como la alta resistencia mecánica y buen impacto combinado, se destaca porque esto es dentro de un mismo material que se caracteriza por ser liviano y tener gran tenacidad, como se observa en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del ABS [3].

PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS DEL ABS	
Alargamiento en la rotura (%)	45
Coeficiente de fricción	0,5
Módulo de tracción (GPa)	2,1 - 2,4
Resistencia a la tracción (MPa)	41 - 45

Para realizar el presente estudio sobre ensayos a tracción se utilizará ABS original, por sus propiedades que presenta sobre rigidez, tenacidad e impacto el cual facilita la

determinación de valores físico - mecánicos más adecuados en el análisis y estudio que se desarrollará y así determinar sus características en un diagrama esfuerzo – deformación, como se observa en la Figura 2.

1.2.5 Diagrama esfuerzo deformación del ABS

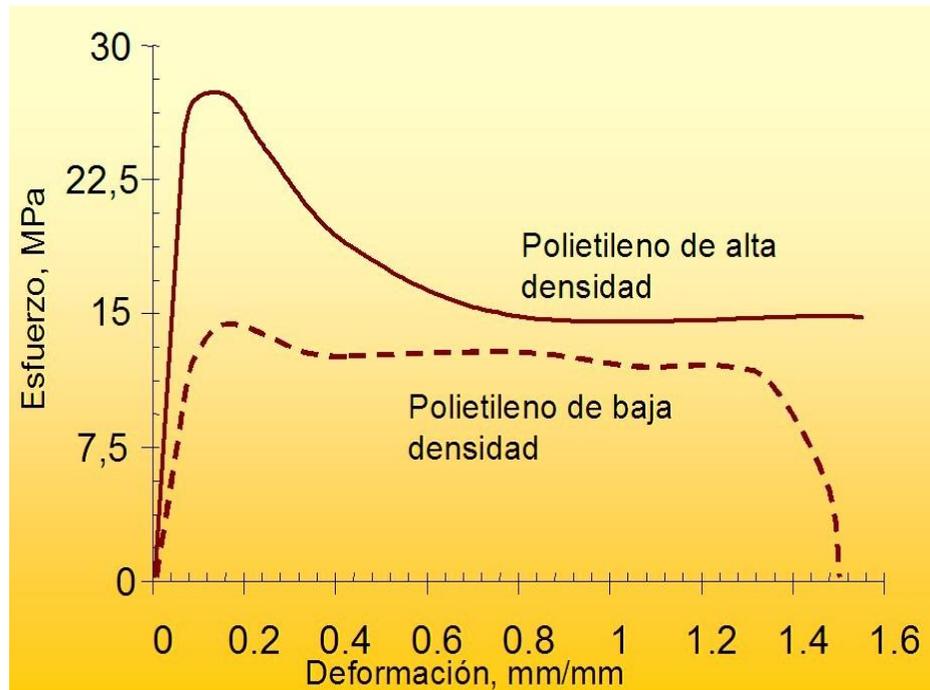


Figura 2. Diagrama esfuerzo - deformación del ABS [4]

1.2.6 Aplicaciones del material

Las aplicaciones más comunes son las que se detallan a continuación [5]:

- Impresión 3D: Se usa como material para imprimir, por el método de extrusión con delgadas capas de material donde se va creando elementos sólidos en tres dimensiones.
- Oficinas: Se usa principalmente en hacer grapadoras y otras herramientas similares.
- Instrumentos musicales: Se usa para hacer flautas dulces y otros instrumentos similares.
- Electrónica: Se usa para hacer carcasas de televisión, celulares, radios, video consolas, ordenadores, ratones e impresoras.
- Juguetes: Se usa para hacer todo tipo de figuras de muñecos de colección.

- Automotriz: Se usa para partes cromadas, internas, así como para partes externas de la carrocería, y cascos de motocicleta.

Además, se puede emplear en aleaciones con otros plásticos de alta dureza, resistencia a la llama y a la temperatura, por ejemplo, en la combinación con PVC permite realizar la construcción de televisores.

En otras combinaciones se puede incluir al teflón (politetrafluoroetileno) PTFE para disminuir el coeficiente de fricción y aumentar su resistencia al fuego. Puede ser esto además aplicado en diferentes métodos para variar sus características [6].

1.2.7 Normas de aplicación

El proceso de pruebas para determinar las propiedades de tracción de plásticos que se utiliza en ingeniería, en muestras de prueba estándar son de una forma similar a una mancuerna, con las que se ensayan en condiciones definidas de temperatura, humedad y de velocidad de prueba de máquina [7].

Este método de pruebas puede ser usado para materiales de distinto espesor, pero para el método de prueba a desarrollar, se aplicará la norma ASTM D638, cuyos materiales poseen un diámetro de hasta 1,75 mm en este tipo de experimentación [7].

Las propiedades de tracción pueden cambiar con la preparación de la muestra consecuentemente cuando se desea realizar estudios comparativos con mayor precisión es necesario que estos factores estén controlados cuidadosamente. Por lo tanto, al hacer las pruebas respectivas se recomienda tener los cuidados necesarios, para asegurar que las muestras estén preparadas en base a las medidas preestablecidas de acuerdo con el tipo y norma, como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones de probeta norma ASTM D638 [8]

Dimensions (see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.) ^A		
	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl
	Type I	Type II	Type III
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)
WO —Width overall, min ^G
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)
G —Gage length ^I
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)
RO —Outer radius (Type IV)

El tipo de norma que se emplea para el ensayo es de tipo I, debido a que cumple con las especificaciones técnicas más cercanas, para obtener valores apropiados de todas las variables que se determina en la experimentación y desarrollar los estudios respectivos de análisis y comparación, como se observa en la Figura 3.

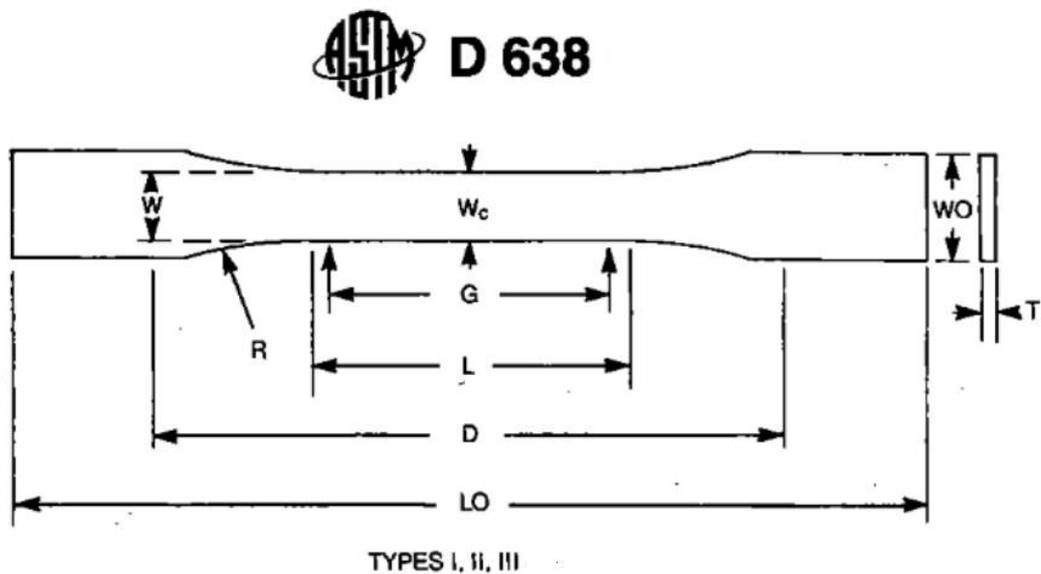


Figura 3. Diagrama de probeta norma ASTM D638 [8]

1.2.8 Formulación

Para el ensayo a tracción se emplea, las fórmulas detalladas a continuación [9]:

1. **Alargamiento:** Para alargamientos totales debido a la aplicación de una fuerza externa, sobre un elemento sin considerar su peso se aplica el modelo matemático que se detalla a continuación. Alargamiento que será medido en mm.

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (1)$$

2. **Esfuerzo:** Se denomina esfuerzo o tensión mecánica al valor de la distribución de fuerzas por unidad de área. Esfuerzo que será medido en MPa.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2)$$

3. **Deformación unitaria:** Definida como la relación que existe entre la longitud inicial y la deformación total de la probeta. Deformación unitaria que se medirá en mm/mm.

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (3)$$

4. **Módulo de Young o elasticidad:** Parámetro por el cual se caracteriza el comportamiento de un material elástico, el cual depende de la dirección de la fuerza que se aplique. Elasticidad que será medida en MPa.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

5. **Ley de Hooke:** Toda deformación a producirse en un elemento resistente es proporcional a la fuerza que lo produce. Ley que se medirá en MPa.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

1.3 Impresión 3D

Actualmente, la tecnología sobre impresiones 3D se ha incrementado a pasos acelerados y se ha dado vía a que diseños que se realizan, para ser impresos ofrezcan mayor precisión [10].

Para las impresiones en 3D existen ya procesos en los cuales se establece la metodología de acuerdo con las necesidades y requerimientos de lo que se busca y de lo que se puede aplicar. A partir de la creación de esta nueva tecnología de manufactura, se manejan procesos en los que se facilita la elaboración de productos referentes a la construcción y montaje en todas las ramas técnicas que existen y se desarrollan a gran escala [11].

Además, las impresiones 3D en la actualidad representan gran oportunidad para implementar pequeñas y medianas empresas las cuales podrán dar soluciones a distintas dificultades que se presentan hoy en día.

1.4 Tipos de impresoras 3D

Para las impresoras 3D se encuentra una clasificación determinada de la siguiente manera [11]:

- Impresora 3D por Estereolitografía (SLA)
- Impresora 3D de Sinterización Selectiva por Laser (SLS)
- Impresora 3D por Inyección
- Impresora 3D por Material Fundido por Deposición (FDM)

1.5 Formas de impresión 3D

Hoy en día la impresión 3D ya es considerada como la nueva revolución industrial, y existen varios métodos entre los que se encuentran [12]:

Método de estereolitografía, en el cual se utiliza laser ultravioleta sobre resina, que es material sensible que se va solidificando en capas, dando la forma del objeto que es diseñado, dentro de un cubo que contiene el material.

Método de sinterización, que refiere a la compactación o unión del material capa por capa mediante la aplicación de un láser, debido a que este material se encuentra

pulverizado y cuando entra en contacto con este laser se aproxima de manera muy rápida a temperaturas cercanas a la de una fundición, esto porque en este punto es donde el material endurece; así sucesivamente será en cada capa.

Método por inyección, tecnológicamente muy similar a la sinterización se diferencia porque el material se compactará por medio de una tinta, además que es un método que permite realizar impresiones en varios colores al mismo tiempo.

Método por deposición de material fundido, que es la expulsión de material por medio de una boquilla que extruye el material fundido sobre una superficie plana, material expulsado en hilo más fino que el filamento de origen por sus altas temperaturas, a la vez que se solidifica con gran rapidez, además, dicho material es muy utilizado en ingeniería, estos termoplásticos vienen en carretes de filamento.

Actualmente se considera el proceso más utilizado y eficaz para realizar impresiones de modelaje y prototipado debido a su gran precisión.

Para desarrollar el presente ensayo a tracción, se aplicará el método de impresión FDM, con la utilización de una impresora de tecnología para la fundición de material ABS, en el cual se preparará el filamento de origen dispuesto desde un carrete, que estará conectado a un boquilla, elemento prioritario de la impresora que se utilizará, para la fundición del material; misma que se configura con el respectivo software que nos ayudará a calibrar y ubicar los datos que serán manejados acorde con la norma que se empleará para el ensayo a tracción, al trabajar con termoplásticos de características determinadas, para la obtención de los respectivos datos que se necesitan para la comparación de resultados de la presente investigación

CAPÍTULO II

DISEÑO Y EXPERIMENTACIÓN

2.1 Máquina de ensayo a tracción

En el ensayo a tracción se utilizará la máquina de tracción TEST RESOURCES, que se encuentra dentro de los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, modelo 316 – 1096, de características y propiedades que se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Capacidad del sistema

F estática (KN)	Vel. mín (mm/min)	Vel. máx (mm/min)	Long. de carrera (mm)
150	0,25	300	1220

Elaborado por: Juan Sosa

Para el ensayo a desarrollarse se empleará una velocidad de 2mm/min, que es la adecuada para esta experimentación cuando se utiliza polímeros debido a que con esa velocidad se observa la deformación de material ABS cuando se somete a esfuerzos de tensión.

Se utilizará adicionalmente un sensor conocido como extensómetro biaxial, el cual ayuda a obtener medidas de presión, carga, deformación y elongación; valores que se pueden determinar en el momento de la experimentación debido a que las probetas fabricadas serán sometidas a una fuerza de aplicación externa que ayudará a su estiramiento y deformación. Sin esos valores a obtener será de mayor dificultad el proceso de análisis y comparación de los respectivos estudios que se desarrollará en el proyecto de investigación.

La máquina que se utiliza para realizar ensayos a tracción de productos fabricados de material fundido ABS se observa en la Figura 4.



Figura 4. Máquina de tracción TESTRESOURCES modelo 316-1096. Elaborado por: Juan Sosa

2.2 Normas de ensayo

Para la realización del proyecto sobre ensayos a tracción se utilizará la norma establecida para productos de material fundido de ABS, con sus respectivas dimensiones.

La experimentación se hace en base al diseño preestablecido por la respectiva norma la ASTM D638, donde se especifica las medidas con las cuales se realizará las impresiones 3D de cada probeta, para posterior verificación de las variaciones en sus propiedades mecánicas del material luego del ensayo a tracción para cada una.

2.3 Elaboración y diseño de probetas

Para diseñar las probetas se tomarán las medidas de acuerdo con la norma actual vigente para realizar ensayos a tracción y de acuerdo con el tipo, utilizando para su ejecución un software de diseño que se emplea en ingeniería y dibujar dichas probetas como se ilustra en la Figura 5.

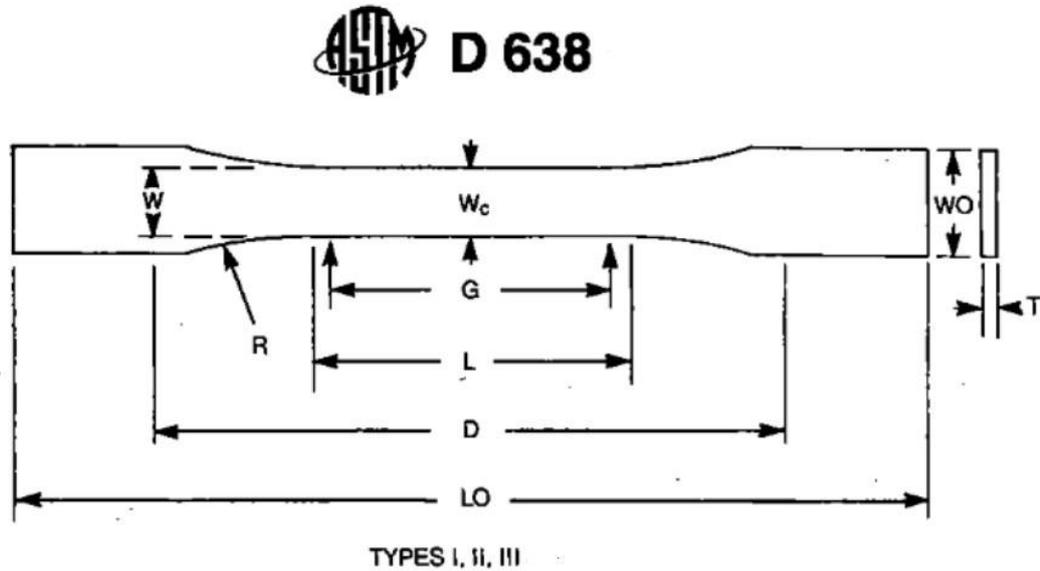


Figura 5. Diagrama de probeta norma ASTM D638 [8]

Los valores que se emplean para diseñar la probeta tipo I, para el ensayo a tracción que se va a realizar son los que se indican en la Tabla 4, donde consta las dimensiones para dibujar este tipo de probetas y ejecutar la experimentación.

Tabla 4. Datos de probeta tipo I [8]

Dimensiones de probeta para ensayo a tracción de material fundido ABS TIPO I, norma ASTM D638	
Wo: Ancho total de la probeta	19 mm
Lo: Longitud total de la probeta	165 mm
D: Distancia entre mordazas	115 mm
L: Longitud total de la sección estrecha	57 mm
G: Longitud calibrada de la probeta	50 mm
R: Radio de filete de la probeta	76 mm
W, Wc: Ancho de la sección estrecha de la probeta	13 mm
T: Dimensión para espesor de la probeta	4 mm

En la Tabla 5, se indica la cantidad de probetas a fabricar de acuerdo con la norma ASTM D638, para realizar un ensayo a tracción de material fundido de ABS.

Tabla 5. Número de probetas de acuerdo con la norma

Material	Número de probetas	Número de ensayos
ABS	6	6

Elaborado por: Juan Sosa

A continuación, la Figura 6. indica el dibujo y dimensiones que se utiliza para realizar el diseño y posterior fabricación de las probetas de acuerdo con la norma de aplicación.

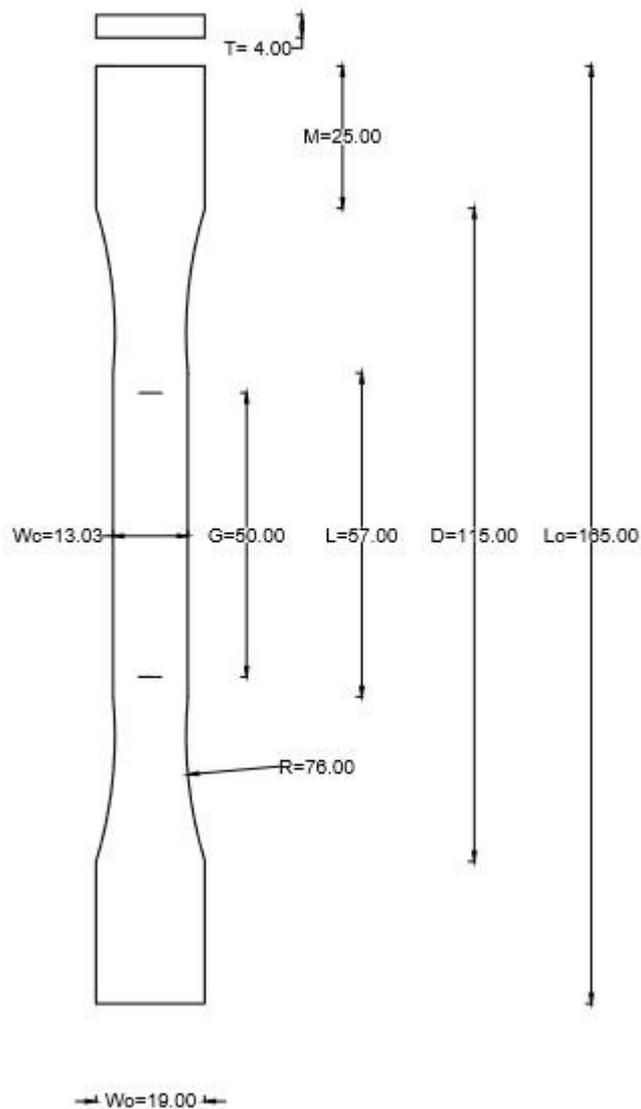


Figura 6. Dibujo de probeta tipo I, norma ASTM D638. Elaborado por: Juan Sosa

2.4 Impresión de probetas

Para imprimir las probetas se ocupa uno de los programas de computación más completo, en este caso se utilizará el Simplify 3D. Además, para la impresión de las probetas, se establece la respectiva metodología para seguir los pasos necesarios para la elaboración de probetas. Así mismo, en el proceso de la impresión de cada probeta, el número de capas y densidad de relleno será el predeterminado o el que viene por defecto del software, el cual presenta un relleno en diagonal de cada una de las capas

de 45 grados, que es el necesario para realizar el análisis de variación de propiedades mecánicas del material luego de la impresión y respectivo ensayo a tracción, como se ilustra en la Figura 7.

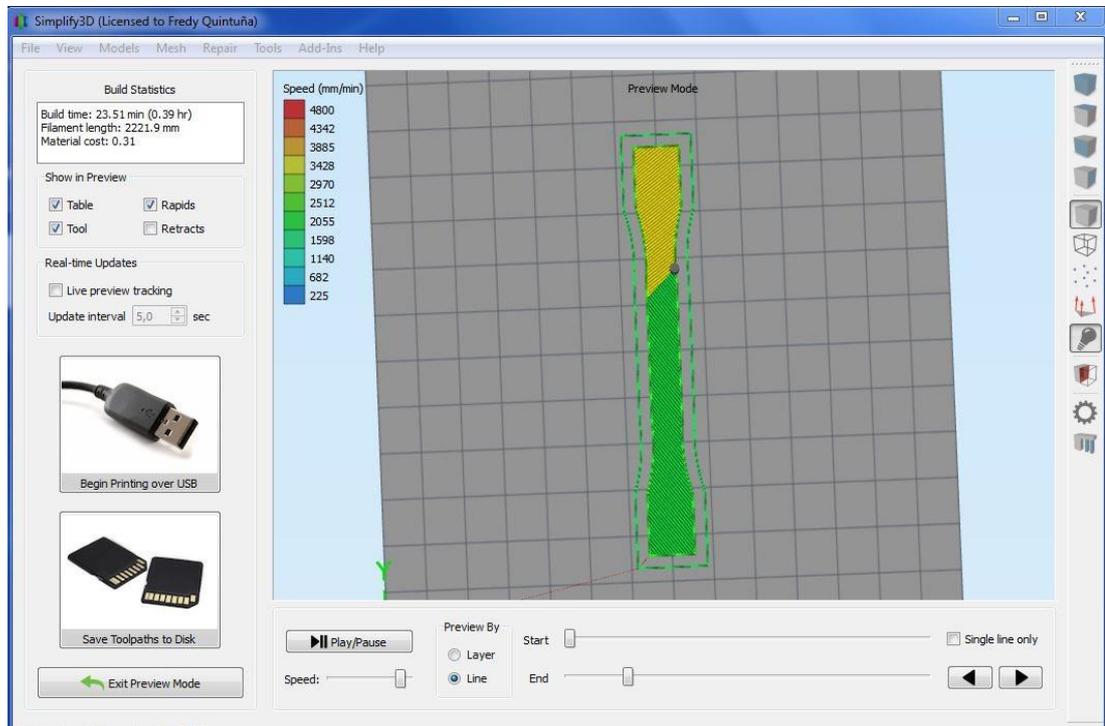


Figura 7. Impresión de probeta, aplicación Simplify 3D. Elaborado por: Juan Sosa

2.4.1 Metodología para protocolo de pruebas de impresión

1. Dibujar la probeta para el desarrollo experimental de acuerdo con la norma ASTM D638 establecida para estos ensayos, utilizando software de diseño para ingeniería.
2. Guardar el archivo de la probeta previamente diseñada, en extensión STL compatible con el programa simplify 3D que se utilizará para la impresión.
3. Prender la máquina de impresión de probetas con material ABS anteriormente colocado en la misma.
4. Importar el modelo de probeta diseñada en software de ingeniería, al programa que se utilizará para la impresión.
5. Escoger el material a utilizar en la interfaz correspondiente del programa.

6. Fijar la temperatura de fundición del filamento de origen en 240°C de acuerdo con especificación técnica del material; así como de la temperatura de la mesa de impresión en 60°C de acuerdo con especificación técnica de temperatura en su respectiva interfaz.
7. Especificar la escala 1:1 para la impresión de la probeta, en su interfaz respectiva.
8. En interfaz vista previa visualizar tiempo y el filamento necesario que utilizará la impresora para la creación de la probeta.
9. Simular con la correspondiente interfaz cómo será el proceso de impresión de la probeta.

Pasos que se ilustran a continuación, en las Figuras 8, 9, 10 y 11; detallados en la metodología anterior.

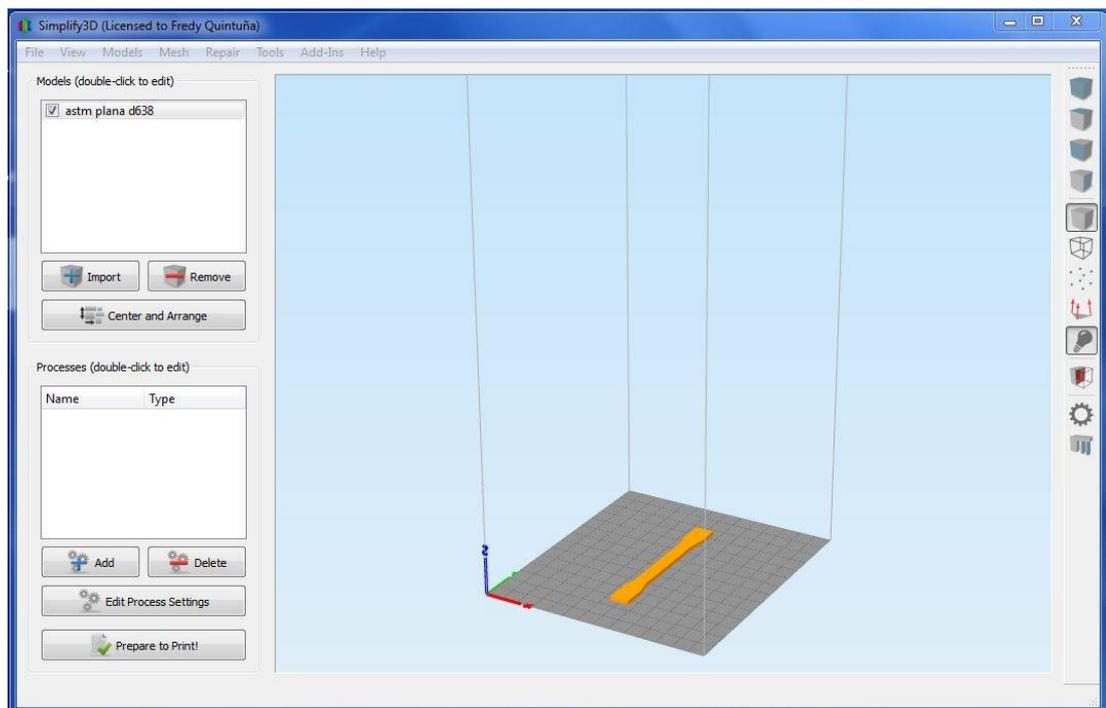


Figura 8. Importe de archivo de impresión de probeta. Elaborado por: Juan Sosa

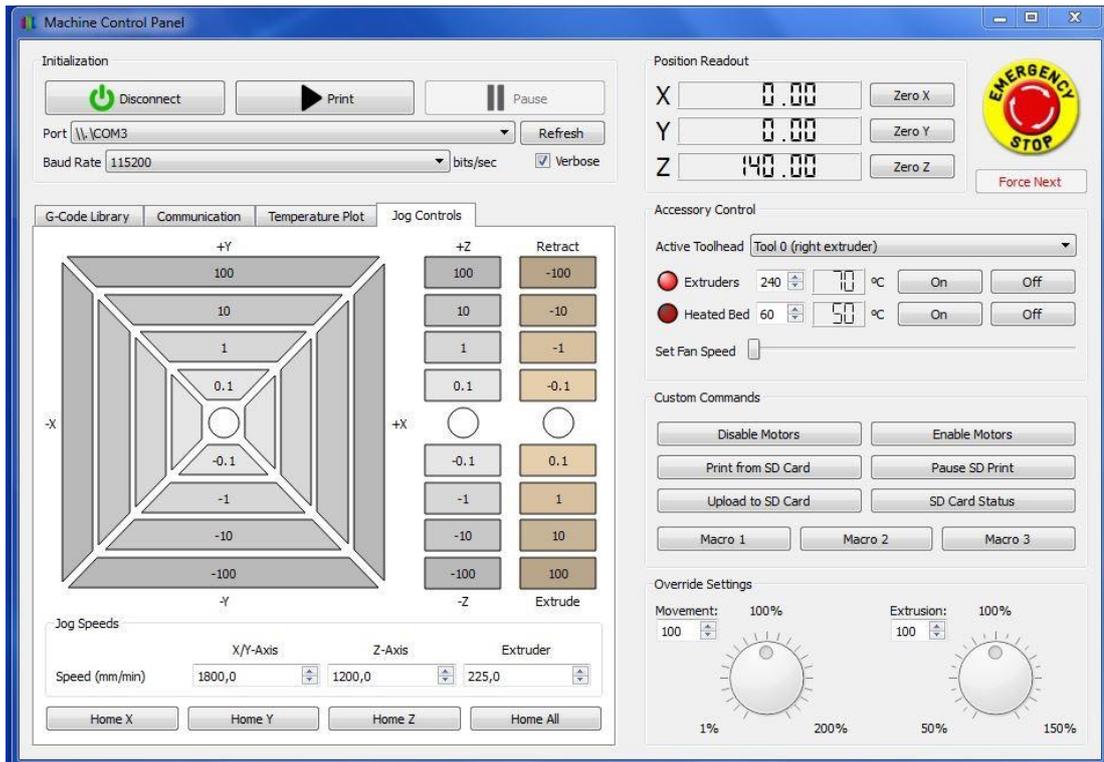


Figura 9. Ingreso de datos de impresión de probeta. Elaborado por: Juan Sosa

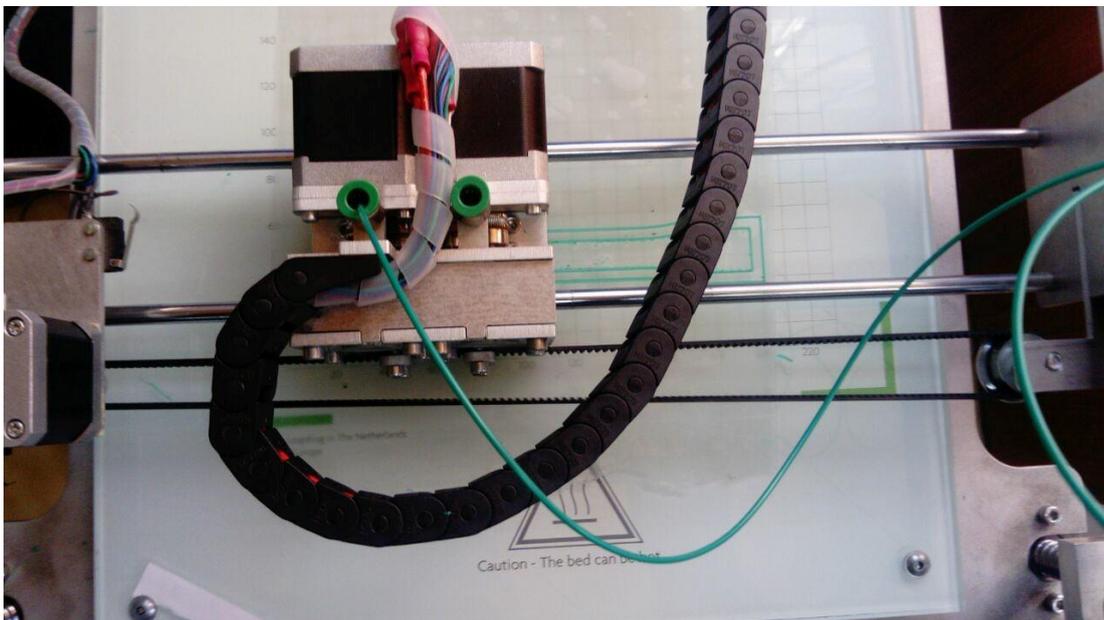


Figura 10. Inicio de impresión de probeta. Elaborado por: Juan Sosa

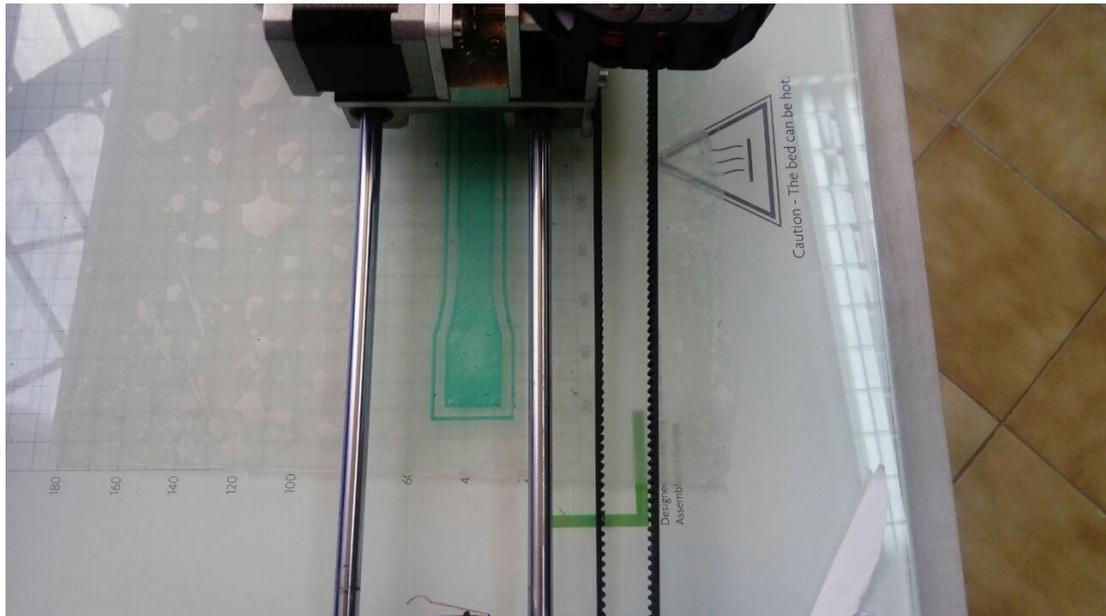


Figura 11. Proceso de impresión de probeta. Elaborado por: Juan Sosa

2.5 Pruebas a tracción

Para la realización de las pruebas a tracción de productos fabricados de material fundido por deposición, se establece de la misma forma la metodología del proceso a seguir para la ejecución del ensayo y poder tomar los datos correspondientes de fuerza, esfuerzo y módulo de elasticidad.

Valores que darán a conocer el comportamiento del material por medio de la respectiva gráfica que se obtiene durante la realización de la experimentación.

2.5.1 Metodología para protocolo de pruebas para ensayo a tracción

1. Encender el computador, y en el software respectivo configurar ingreso de dato de velocidad en 2mm/min, valor con el cual se desarrollará durante todo el ensayo a tracción.
2. Ubicar probeta impresa en la máquina de ensayos de tracción de acuerdo con longitud calibrada de 50 mm para inicio de la experimentación.
3. Ingresar los respectivos datos de la probeta ubicada, tales como longitud inicial de 165 mm, ancho de 13 mm y espesor de 4 mm.

4. Posicionar extensómetro biaxial sobre la probeta; previamente ubicada, para medir fuerza máxima, esfuerzo máximo y módulo de elasticidad durante la ejecución de la experimentación.
5. Iniciar el ensayo, aplicando en su correspondiente interfaz del programa R-SERIES CONTROLLER el arranque de las pruebas a realizar.
6. Seguir y verificar tendencia de gráficas esfuerzo deformación al momento de inicio de la experimentación en el software de aplicación, hasta donde se produce la rotura de la probeta.
7. Grabar datos obtenidos de software utilizado en el ensayo, para la realización de los respectivos cálculos mediante la correspondiente formulación.
8. Repetir procedimiento para las seis probetas fabricadas, de acuerdo con norma establecida para dicha experimentación.

Pasos que se ilustran a continuación, en las Figuras 12, 13 y 14; detallados en la metodología anterior.

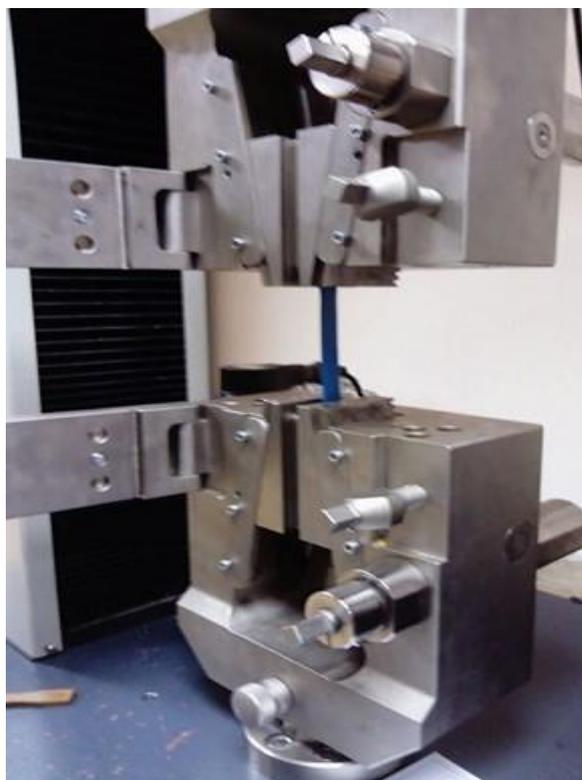


Figura 12. Ubicación de probeta para ensayo a tracción. Elaborado por: Juan Sosa

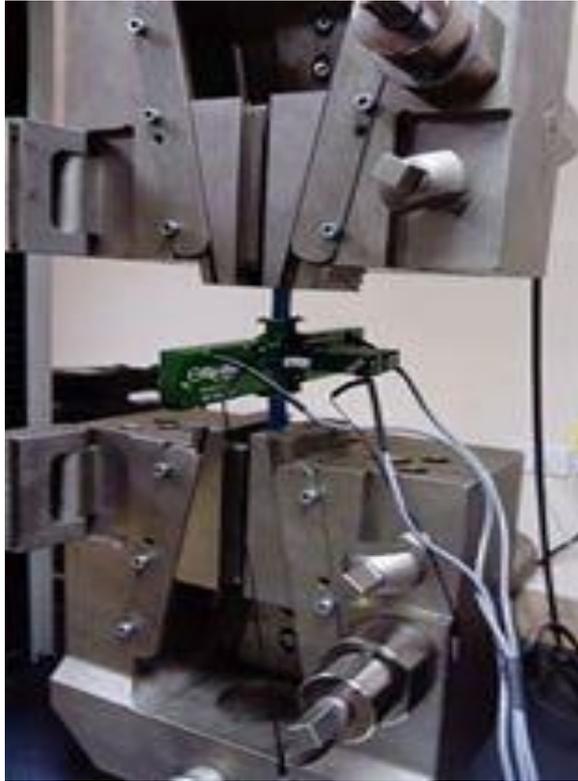


Figura 13. Medición de longitud calibrada de probeta. Elaborado por: Juan Sosa



Figura 14. Rotura de probeta. Elaborado por: Juan Sosa

2.5.2 Ingreso y toma de datos

En el desarrollo experimental se ingresará los siguientes datos, que se detalla a continuación:

- Ancho de la longitud calibrada de la probeta en (mm).
- Espesor de la probeta en (mm).
- Longitud calibrada de la probeta en (mm).
- Área transversal de la probeta en (mm²).

Así mismo en el desarrollo del ensayo a tracción, se obtendrá la siguiente información:

- La fuerza máxima en (N).
- El esfuerzo máximo en (MPa).
- Módulo de Young en (MPa).

2.6 Análisis de resultados del ensayo a tracción

De los datos obtenidos al realizar los seis ensayos a tracción, se puede analizar los siguientes aspectos:

Del ensayo de la probeta uno y de la probeta seis, se observa que son los datos que más se aproximan, a los valores de propiedades y características mecánicas del material de origen.

Los valores obtenidos en estos dos ensayos especificados a continuación:

Ensayo Nro.	Fmáxima (N)	σ máximo (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
1	773,88	15,44	2423,5
6	1271,74	21,90	2045,9

Elaborado por: Juan Sosa

Son los que más se aproximan al valor de la propiedad mecánica del material de origen que presenta un módulo de elasticidad de 2400 (MPa).

Los valores obtenidos para los otros ensayos especificados a continuación:

Ensayo Nro.	Fmáxima (N)	σ máximo (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)
2	1109,22	21,95	1755,10
3	332,77	6,25	933,63
4	201,21	3,78	646,76
5	810,00	15,22	1520,18

Elaborado por: Juan Sosa

Son los que se alejan al valor de la propiedad mecánica del material de origen que presenta un módulo de elasticidad de 2400 (MPa), pero estos valores no se descartan porque son datos que servirán para obtener el valor promedio del módulo de elasticidad el cual será utilizado para realizar la simulación.

Se observa de manera determinada, la zona elástica, la zona plástica y el punto de fluencia del material previo a la rotura.

El gráfico esfuerzo – deformación, ayuda a determinar las deformaciones y tensiones que soporta el material previo a su rotura.

El área bajo la curva característica de este ensayo a tracción representa la tenacidad del material cuando es sometido a un esfuerzo de tensión.

Ensayo 1: Diagrama esfuerzo – deformación unitaria

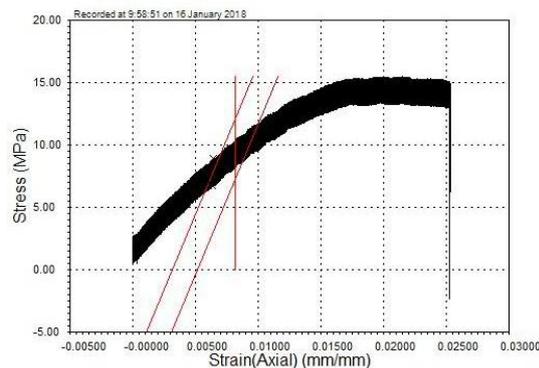


Figura 15. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 1. Elaborado por: Juan Sosa

Del primer ensayo a tracción, se obtiene los siguientes resultados:

Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
773,88	15,44	0,0064	2423,50

Elaborado por: Juan Sosa

Ensayo que se aproxima en la obtención de sus resultados, a las propiedades mecánicas del material de origen, el cual presenta un módulo de elasticidad de 2400 MPa.

Valor de 2423,50 MPa que servirá para el cálculo del valor promedio del módulo de elasticidad necesario para realizar la simulación.

Ensayo 2: Diagrama esfuerzo – deformación unitaria

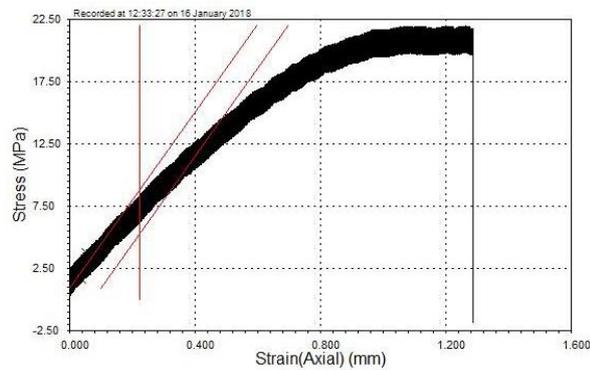


Figura 16. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 2. Elaborado por: Juan Sosa

Del segundo ensayo a tracción, se obtiene los siguientes resultados:

Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
1109,22	21,95	0,0125	1755,10

Elaborado por: Juan Sosa

Ensayo que se aleja en la obtención de sus resultados a las propiedades mecánicas del material de origen el cuál presenta un módulo de elasticidad de 2400 MPa.

Valor de 1755,10 MPa, que no se descarta porque servirá para el cálculo del valor promedio del módulo de elasticidad necesario para realizar la simulación.

Ensayo 3: Diagrama esfuerzo – deformación unitaria

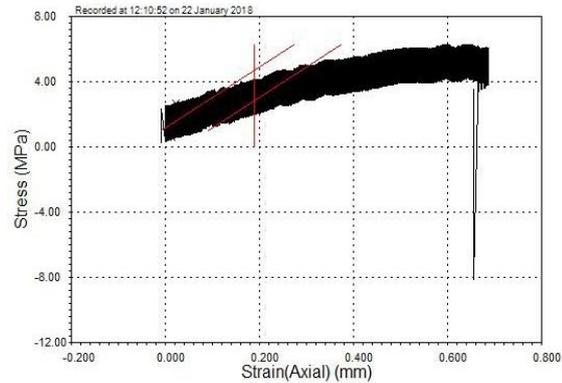


Figura 17. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 3. Elaborado por: Juan Sosa

Del tercer ensayo a tracción, se obtiene los siguientes resultados:

Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
332,77	6,25	0,017	933,63

Elaborado por: Juan Sosa

Ensayo que se aleja con mayor diferencia que los otros ensayos en la obtención de sus resultados a las propiedades mecánicas del material de origen el cuál presenta un módulo de elasticidad de 2400 MPa.

Valor de 933,63 MPa, que no se descarta porque que servirá para el cálculo del valor promedio del módulo de elasticidad necesario para realizar la simulación.

Ensayo 4: Diagrama esfuerzo – deformación unitaria

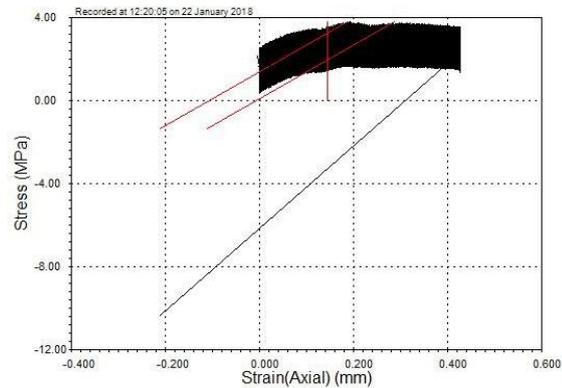


Figura 18. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 4. Elaborado por: Juan Sosa

Del cuarto ensayo a tracción, se obtiene los siguientes resultados:

Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
201,21	3,78	0,021	646,76

Elaborado por: Juan Sosa

Ensayo que se aleja con mayor diferencia al de los otros ensayos en la obtención de sus resultados a las propiedades mecánicas del material de origen el cuál presenta un módulo de elasticidad de 2400 MPa.

Valor de 646,76 MPa que no se descarta porque servirá para el cálculo del valor promedio del módulo de elasticidad necesario para la simulación.

Ensayo 5: Diagrama esfuerzo – deformación unitaria

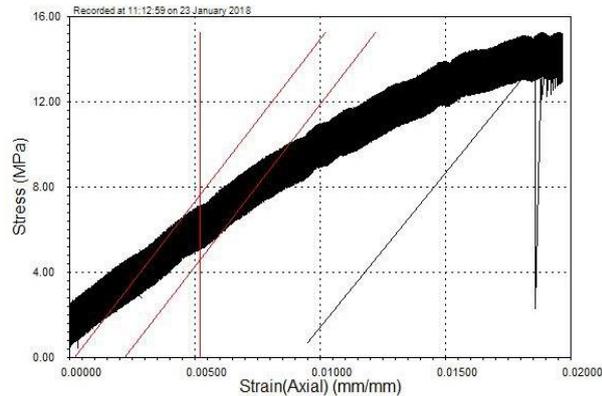


Figura 19. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 5. Elaborado por: Juan Sosa

Del quinto ensayo a tracción, se obtiene los siguientes resultados:

Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
810	15,22	0,011	1520,18

Elaborado por: Juan Sosa

Ensayo que se aleja con menor diferencia en relación con los otros ensayos en la obtención de sus resultados a las propiedades mecánicas del material de origen el cuál presenta un módulo de elasticidad de 2400 MPa.

Valor de 1520,18 MPa que no se descarta porque servirá para el cálculo del valor promedio del módulo de elasticidad necesario para la simulación.

Ensayo 6: Diagrama esfuerzo – deformación unitaria

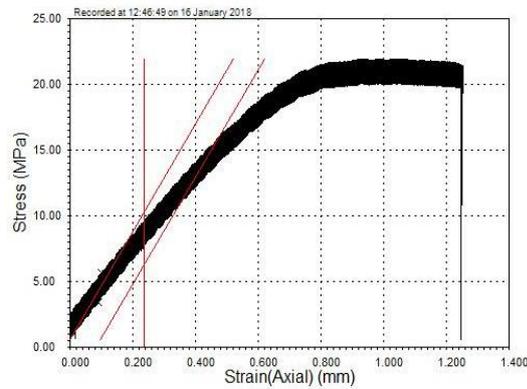


Figura 20. Gráfico esfuerzo-deformación, ensayo 6. Elaborado por: Juan Sosa

Del sexto ensayo a tracción, se obtiene los siguientes resultados:

Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de elasticidad (MPa)
1271,74	21,90	0,010	2045,90

Elaborado por: Juan Sosa

Ensayo que se aproxima en la obtención de sus resultados, a las propiedades mecánicas del material de origen, el cual presenta un módulo de elasticidad de 2400 MPa.

Valor de 2045,90 MPa que se utiliza para el cálculo del promedio del módulo de elasticidad necesario para la simulación.

2.7 Cálculos de los ensayos a tracción

Probeta 1

Área de la sección transversal (A)

$$a = 12,9 \text{ mm}$$

$$b = 3,9 \text{ mm}$$

$$A = a \cdot b$$

$$A = 50,31 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo máximo ($\sigma_{\text{máx}}$)

$$F_{\text{máx}} = 773,88 \text{ N}$$

$$A = 50,31 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{A}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 15,38 \text{ MPa}$$

Alargamiento de la probeta (δ)

$$F_{\text{máx}} = 773,88 \text{ N}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$A = 50,31 \text{ mm}^2$$

$$E = 2423,50 \text{ MPa}$$

$$\delta = \frac{F_{\text{máx}} \cdot L_0}{A \cdot E}$$

$$\delta = 1,05 \text{ mm}$$

Longitud final (L)

$$\delta = 1,05 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$L = L_0 + \delta$$

$$L = 166,05 \text{ mm}$$

Deformación unitaria (ε)

$$L = 166,05 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

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

$$\varepsilon = 0,0064$$

Ley de Hooke (σ)

$$E = 2423,50 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 0,0064$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma = 15,51 \text{ MPa}$$

Probeta 2

Área de la sección transversal (A)

$$a = 13,3 \text{ mm}$$

$$b = 3,8 \text{ mm}$$

$$A = a \cdot b$$

$$A = 50,54 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo máximo ($\sigma_{\text{máx}}$)

$$F_{\text{máx}} = 1109,22 \text{ N}$$

$$A = 50,54 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{A}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 21,95 \text{ MPa}$$

Alargamiento de la probeta (δ)

$$F_{\text{máx}} = 1109,22 \text{ N}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$A = 50,54 \text{ mm}^2$$

$$E = 1755,10 \text{ MPa}$$

$$\delta = \frac{F_{\text{máx}} \cdot L_0}{A \cdot E}$$

$$\delta = 2,06 \text{ mm}$$

Longitud final (L)

$$\delta = 2,06 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$L = L_0 + \delta$$

$$L = 167,06 \text{ mm}$$

Deformación unitaria (ϵ)

$$L = 167,06 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$\epsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$\epsilon = 0,0125$$

Ley de Hooke (σ)

$$E = 1755,10 \text{ MPa}$$

$$\epsilon = 0,0125$$

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\sigma = 21,94 \text{ MPa}$$

Probeta 3

Área de la sección transversal (A)

$$a = 13,3 \text{ mm}$$

$$b = 4,00 \text{ mm}$$

$$A = a \cdot b$$

$$A = 53,20 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo máximo ($\sigma_{\text{máx}}$)

$$F_{\text{máx}} = 332,77 \text{ N}$$

$$A = 53,20 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{A}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 6,25 \text{ MPa}$$

Alargamiento de la probeta (δ)

$$F_{\text{máx}} = 332,77 \text{ N}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$A = 53,20 \text{ mm}^2$$

$$E = 933,63 \text{ MPa}$$

$$\delta = \frac{F_{\text{máx}} \cdot L_0}{A \cdot E}$$

$$\delta = 1,11 \text{ mm}$$

Longitud final de la probeta (L)

$$\delta = 1,11 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$L = L_0 + \delta$$

$$L = 166,11 \text{ mm}$$

Deformación unitaria de la probeta (ε)

$$L = 166,11 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

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

$$\varepsilon = 0,0067$$

Ley de Hooke (σ)

$$E = 933,63 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 0,0067$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma = 6,25 \text{ MPa}$$

Probeta 4

Área de la sección transversal (A)

$$a = 13,30 \text{ mm}$$

$$b = 4,00 \text{ mm}$$

$$A = a \cdot b$$

$$A = 53,20 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo máximo ($\sigma_{\text{máx}}$)

$$F_{\text{máx}} = 201,21 \text{ N}$$

$$A = 53,20 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{A}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 3,78 \text{ MPa}$$

Alargamiento de la probeta (δ)

$$F_{\text{máx}} = 201,21 \text{ N}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$A = 53,20 \text{ mm}^2$$

$$E = 646,76 \text{ MPa}$$

$$\delta = \frac{F_{\text{máx}} \cdot L_0}{A \cdot E}$$

$$\delta = 0,96 \text{ mm}$$

Longitud final (L)

$$\delta = 0,96 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$L = L_0 + \delta$$

$$L = 165,96 \text{ mm}$$

Deformación unitaria (ε)

$$L = 165,96 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

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

$$\varepsilon = 0,0058$$

Ley de Hooke (σ)

$$E = 646,76 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 0,0058$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma = 3,75 \text{ MPa}$$

Probeta 5

Área de la sección transversal (A)

$$a = 13,30 \text{ mm}$$

$$b = 4,40 \text{ mm}$$

$$A = a \cdot b$$

$$A = 53,20 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo máximo ($\sigma_{\text{máx}}$)

$$F_{\text{máx}} = 810 \text{ N}$$

$$A = 53,20 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{A}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 15,23 \text{ MPa}$$

Alargamiento de la probeta (δ)

$$F_{\text{máx}} = 810 \text{ N}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$A = 53,20 \text{ mm}^2$$

$$E = 1520,18 \text{ MPa}$$

$$\delta = \frac{F_{\text{máx}} \cdot L_0}{A \cdot E}$$

$$\delta = 1,65 \text{ mm}$$

Longitud final

$$\delta = 1,65 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$L = L_0 + \delta$$

$$L = 166,65 \text{ mm}$$

Deformación unitaria (ε)

$$L = 166,65 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$
$$\varepsilon = 0,010$$

Ley de Hooke (σ)

$$E = 1520,18 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 0,010$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma = 15,20 \text{ MPa}$$

Probeta 6

Área de la sección transversal (A)

$$a = 13,20 \text{ mm}$$

$$b = 4,4 \text{ mm}$$

$$A = a \cdot b$$

$$A = 58,10 \text{ mm}^2$$

Esfuerzo máximo ($\sigma_{\text{máx}}$)

$$F_{\text{máx}} = 1271,74 \text{ N}$$

$$A = 58,10 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{F_{\text{máx}}}{A}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 21,90 \text{ MPa}$$

Alargamiento de la probeta (δ)

$$F_{\text{máx}} = 1271,74 \text{ N}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$A = 58,10 \text{ mm}^2$$

$$E = 2045,90 \text{ MPa}$$

$$\delta = \frac{F_{\text{máx}} \cdot L_0}{A \cdot E}$$

$$\delta = 1,77 \text{ mm}$$

Longitud final (L)

$$\delta = 1,77 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

$$L = L_0 + \delta$$

$$L = 166,77 \text{ mm}$$

Deformación unitaria (ε)

$$L = 166,77 \text{ mm}$$

$$L_0 = 165 \text{ mm}$$

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

$$\varepsilon = 0,011$$

Ley de Hooke (σ)

$$E = 2045,90 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 0,011$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\sigma = 22,50 \text{ MPa}$$

De los ensayos que se realizaron; y, que se detallan en la Tabla 6, los valores que más se aproximan a las propiedades mecánicas del material que se utilizó, son los correspondientes a los ensayos de la probeta 1 y de la probeta 6.

Tabla 6. Resultados de los ensayos a tracción

Ensayo	Material	Área transversal (mm ²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de Young ó elasticidad (Mpa)
Probeta 1	ABS	50,31	773,88	15,38	0,0064	2423,50
Probeta 2	ABS	50,54	1109,22	21,95	0,0125	1755,10
Probeta 3	ABS	53,20	332,77	6,25	0,0170	933,63
Probeta 4	ABS	53,20	201,21	3,78	0,0210	646,76
Probeta 5	ABS	53,20	810,00	15,23	0,0110	1520,18
Probeta 6	ABS	58,10	1271,74	21,90	0,0100	2045,90

Elaborado por: Juan Sosa

De la Tabla 6, se determina los promedios de los datos obtenidos en el ensayo a tracción, para realizar la simulación y comparación de valores; y, establecer el error que se comete entre el experimento y la simulación, cálculos que se indican a continuación:

Fuerza máxima promedio ($\bar{F}_{\text{máx}}$)

$$\bar{F} = \frac{F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + F6}{6}$$

$$\bar{F} = 749,80 \text{ (N)}$$

Esfuerzo máximo promedio ($\bar{\sigma}_{\text{máx}}$)

$$\bar{\sigma}_{\text{máx}} = \frac{\sigma1 + \sigma2 + \sigma3 + \sigma4 + \sigma5 + \sigma6}{6}$$

$$\bar{\sigma}_{\text{máx}} = 14,08 \text{ (MPa)}$$

Deformación unitaria promedio ($\bar{\epsilon}$)

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4 + \epsilon_5 + \epsilon_6}{6}$$

$$\bar{\epsilon} = 0,011 \text{ (mm/mm)}$$

Módulo de Young promedio ($\bar{\sigma}$)

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6}{6}$$

$$\bar{\sigma} = 1554,2 \text{ (MPa)}$$

El valor promedio de 1552,4 (MPa) correspondiente al módulo de elasticidad, se utiliza para la creación del material ABS, que no existe en el software de simulación.

Material que se crea de acuerdo con las propiedades que adquiere, luego de la experimentación.

Además, se realiza el cálculo del coeficiente de Poisson, característico de materiales elásticos; valor que se emplea para desarrollar la simulación, mismo que se determina a partir de la gráfica deformación transversal versus deformación longitudinal, que se obtiene del ensayo.

De la Figura 21, se obtiene los valores para la determinación del coeficiente de Poisson, que se emplea para la simulación.

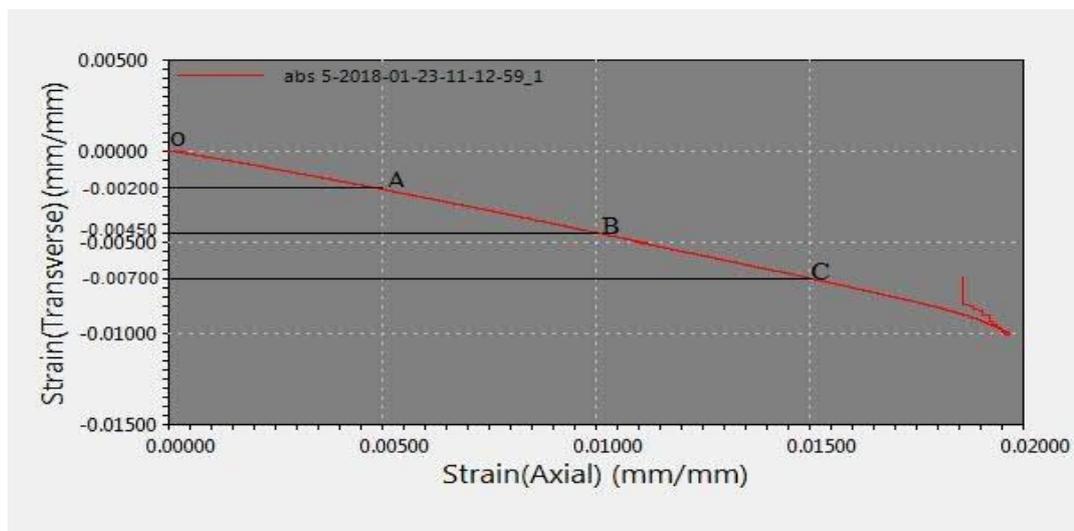


Figura 21. Gráfica deformación transversal vs deformación longitudinal. Elaborado por: Juan Sosa

Para el cálculo del coeficiente de Poisson (ν), se obtiene por medio de la relación,

$$\nu = \frac{\varepsilon_{\text{trans}}}{\varepsilon_{\text{long}}}$$

que se determina con la definición de pendiente (m) de una recta, para el caso de la gráfica lineal de la Figura 21., donde se calcula el valor de la pendiente para el tramo OA, el tramo AB y el tramo BC, para obtener los valores que sirven para realizar un promedio y establecer el dato del coeficiente de Poisson.

$$m_{OA} = \frac{0.000 + 0.002}{0.005 - 0.000} = 0.4$$

$$m_{AB} = \frac{-0.002 + 0.004}{0.01 - 0.005} = 0.4$$

$$m_{BC} = \frac{-0.0045 + 0.007}{0.015 - 0.010} = 0.5$$

$$\bar{\nu} = \frac{m_{OA} + m_{AB} + m_{BC}}{3}$$

$$\bar{\nu} = 0.43$$

La creación del material ABS, se basa principalmente en la obtención de valores del módulo de Young y de coeficiente de Poisson luego que se realiza la experimentación.

De los cuales se determina un promedio para cada caso ya que se obtienen varios resultados para el módulo de Young y coeficiente de Poisson; y, luego ejecutar la programación de creación del material, para hacer la comparación entre el experimento y la simulación. Desarrollo que se ilustra en la Figura 22.

The image shows two screenshots from the ANSYS software interface. The top screenshot, titled 'Outline of Schematic A2: Engineering Data', displays a table with columns A, B, C, D, and E. Row 1 is 'Contents of Engineering Data' with 'Source' in column B and 'Description' in column E. Row 2 is 'Material'. Row 3 is 'ABS' with 'ACIDO BUTADIENO ESTIRENO' in column E. Row 4 is 'Structural Steel' with a note in column E: 'Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1'. Row 5 is a link to add a new material. The bottom screenshot, titled 'Properties of Outline Row 3: ABS', shows a table with columns A, B, C, D, and E. Row 1 is 'Property' with 'Value' in B and 'Unit' in C. Row 2 is 'Material Field Variables' with 'Table' in B. Row 3 is 'Density' with '1,07' in B and 'g cm^-3' in C. Row 4 is 'Isotropic Elasticity'. Row 5 is 'Derive from' with 'Young's Modu...' in B. Row 6 is 'Young's Modulus' with '1554,2' in B and 'MPa' in C. Row 7 is 'Poisson's Ratio' with '0,43' in B.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data	Source			Description
2	Material				
3	ABS				ACIDO BUTADIENO ESTIRENO
4	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	1,07	g cm^-3		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modu...			
6	Young's Modulus	1554,2	MPa		
7	Poisson's Ratio	0,43			

Figura 22. Creación material ABS. Elaborado por: Juan Sosa

Para el desarrollo de la simulación se emplea el material previamente creado con los datos obtenidos por experimentación correspondiente al Módulo de Young y Coeficiente de Poisson y que será detallado en los pasos de la simulación.

2.8 Simulación

En la simulación desarrollada del ensayo a tracción del producto fabricado de material fundido ABS, se plantea los siguientes pasos:

1. Abrir el programa ANSYS y escoger interfaz módulo Explicit Dynamics para la realización de la simulación.
2. En interfaz de programa datos de ingeniería crear el material ABS, empleado en el ensayo insertando datos para densidad de 1,07 (gr/cm^3), módulo de elasticidad de 1554,2 (MPa) y coeficiente de Poisson de 0,43 necesarios para su creación, valores que son obtenidos de la experimentación.
3. En interfaz de programa geometría, importar probeta diseñada en software de ingeniería.

4. En interfaz de programa modelo, abrir archivo para generar proyecto de simulación.
5. Ingresar datos de dimensiones de probeta de 165 (mm) de largo, 19 (mm) de ancho y 4 (mm) de espesor y fuerza de aplicación de 749,80 (N) necesarios para la simulación.
6. Activar interfaz de programa solución, para determinar los valores de esfuerzo, deformación unitaria necesarios para la comparación y validación de resultados.
7. Simular el ensayo con la respectiva interfaz.

Proceso que se ilustra a continuación, en las Figuras 23, 24, 25, 26 y 27; detallados en los pasos de la simulación y que corresponde a las imágenes de la probeta que se diseñó de acuerdo con la norma ASTM D638 para realizar la experimentación.

La Figura 23, indica las condiciones de frontera, es decir el punto fijo de apoyo de la probeta sujeta por medio de una mordaza en su parte inferior y de acuerdo con la longitud de calibración según la norma de aplicación, en este caso la norma ASTM D638, la cual se aplica para la utilización de probetas fabricadas de material ABS.

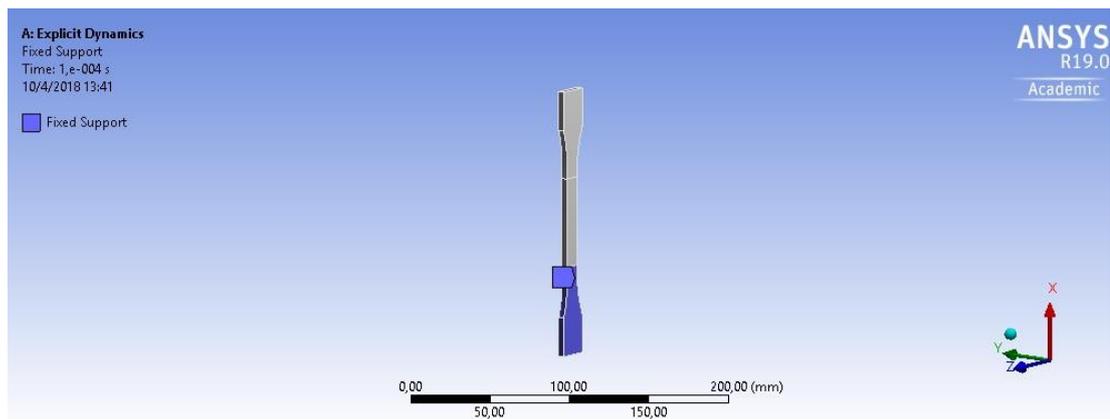


Figura 23. Apoyo fijo de probeta. Elaborado por: Juan Sosa

La Figura 24, indica la fuerza máxima promedio aplicada a la probeta; promedio que se obtiene de la ejecución de los seis ensayos, donde cada uno tiene su respectiva fuerza de aplicación. Fuerza máxima promedio de 749,80 N que se aplica para realizar la simulación.

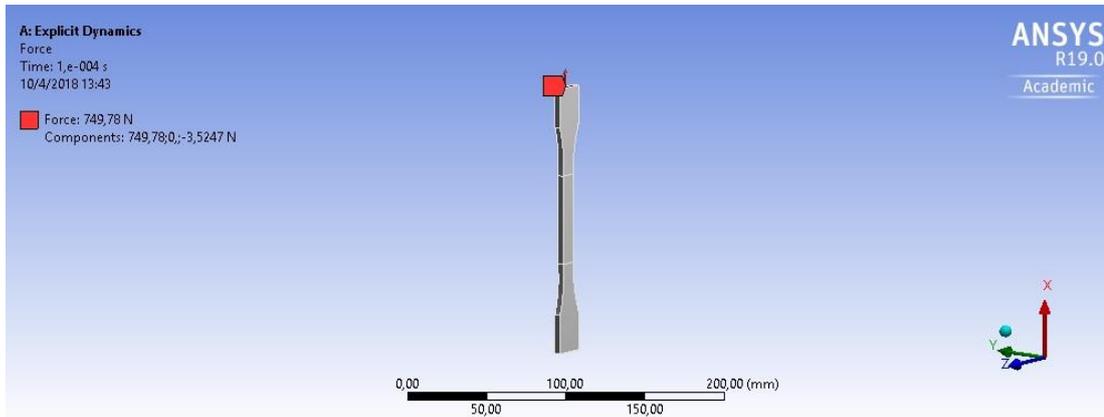


Figura 24. Fuerza máxima de aplicación. Elaborado por: Juan Sosa

La Figura 25, indica el número de nodos que será de 1443 y número de elementos que será de 5745 de la probeta en esta simulación. El mallado será determinado por defecto del programa de simulación, ya que en el ensayo a tracción no se habla de caracterización de mallado de las probetas como tal, sino por el contrario el ensayo se orienta a determinar las variaciones de propiedades mecánicas de esfuerzo, deformación y módulo de elasticidad con respecto a los valores que se obtiene de la experimentación.

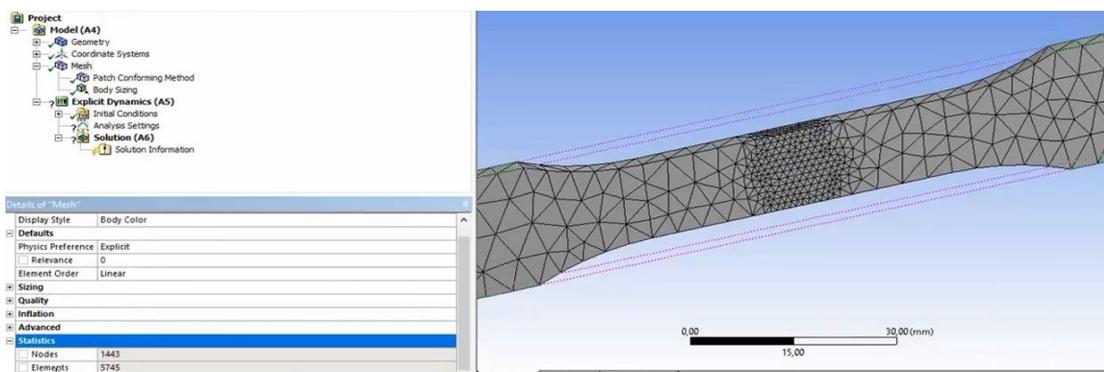


Figura 25. Número de nodos y elementos de la probeta. Elaborado por: Juan Sosa

La Figura 26, indica el esfuerzo a la cual está sometida la probeta cuando se aplica una fuerza de tensión y de donde se obtiene el valor de esfuerzo máximo del ensayo de simulación. Valor de 11,81 MPa que servirá para realizar los estudios de comparación.

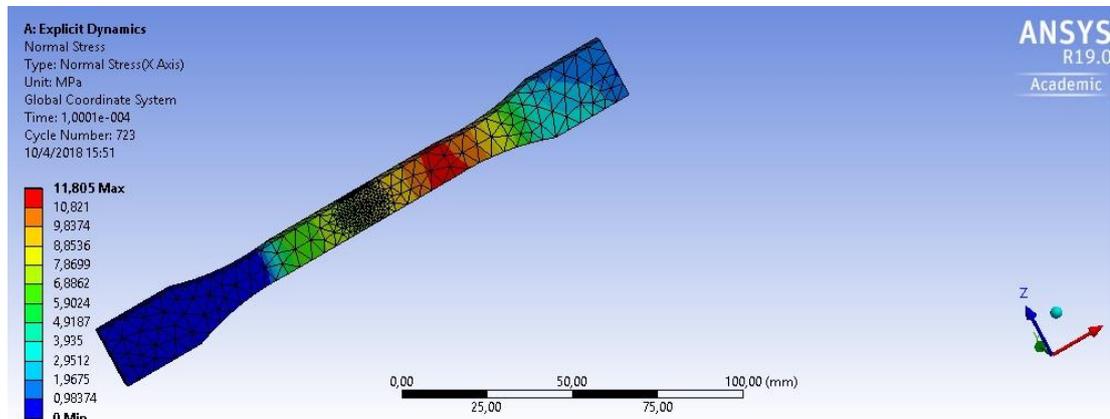


Figura 26. Simulación esfuerzo máximo. Elaborado por: Juan Sosa

La Figura 27, indica la deformación máxima unitaria a la que se somete la probeta cuando está sometida a un esfuerzo de tensión. Valor máximo de 0,0775 mm/mm que servirá para los estudios de comparación.

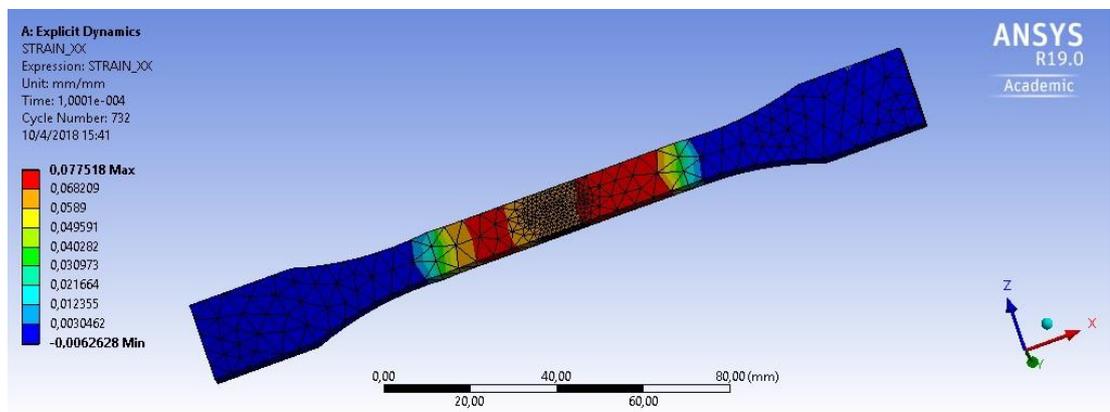


Figura 27. Deformación unitaria. Elaborado por: Juan Sosa

La Figura 28, indica la rotura de probeta en dirección axial cuando se aplica una fuerza máxima de tensión donde alcanza su máximo esfuerzo antes de su rotura.

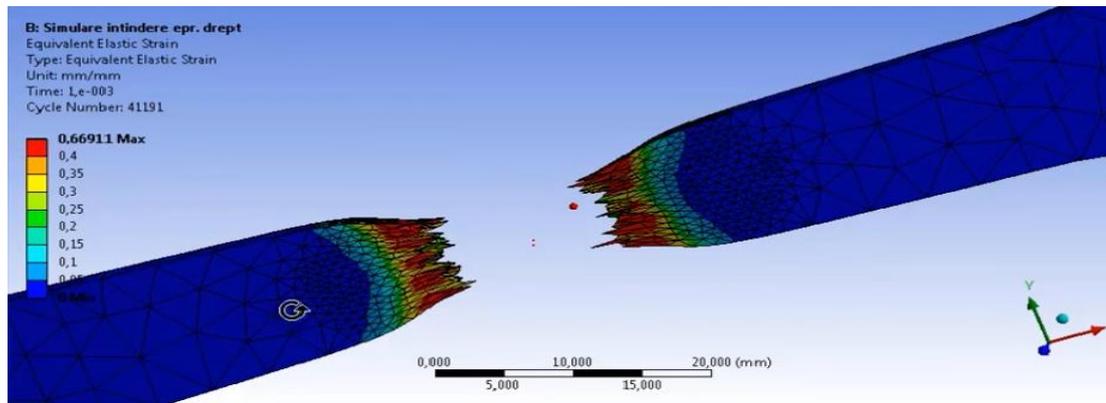


Figura 28. Rotura de probeta. Elaborado por: Juan Sosa

Tabla 7. Resultado de la simulación

Material	Área transversal (mm ²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación unitaria máx (mm/mm)	Módulo de Young ó elasticidad (Mpa)
ABS	52,12	749,80	11,81	0,08	1554,2

Elaborado por: Juan Sosa

De la Tabla 7, que es el resultado de la simulación, se obtiene el valor que corresponde al esfuerzo máximo, para realizar la comparación con el esfuerzo máximo promedio que se obtiene de la experimentación y determinar la variación de las propiedades mecánicas del material que se utilizó para la experimentación.

Así mismo del resultado de la simulación, se obtiene el valor de la deformación unitaria máxima, que servirá para comparar con el valor de la deformación promedio que se obtiene de la experimentación.

De la simulación realizada se construye la Tabla 8. de valores para obtener el gráfico esfuerzo – deformación unitaria.

Tabla 8. Valores para gráfica esfuerzo-deformación unitaria.

deformación (mm/mm)	esfuerzo (MPa)
0	0
0,0030462	3,935
0,012355	4,9187
0,021664	5,9024
0,030973	6,8862
0,040282	7,8699
0,049591	8,8536
0,058900	9,8374
0,068209	10,821
0,077518	11,805

Elaborado por: Juan Sosa

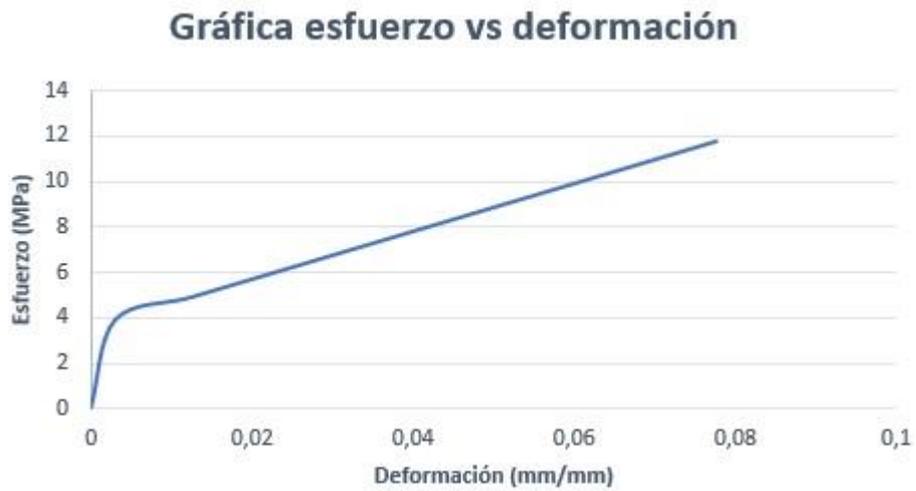


Figura 29. Gráfica esfuerzo - deformación obtenida de la simulación. Elaborado por: Juan Sosa

De los valores que se obtienen de experimentación y simulación se puede establecer las variaciones que existe entre los esfuerzos experimental y de simulación; así como la variación de las deformaciones unitarias del experimento y simulación del material de utilización. Valores que servirán para realizar más adelante los estudios de comparación respectivos y que se detallan en la Tabla 9 a continuación.

Tabla 9. Valores de variación datos experimentales vs datos de simulación

Valores de variación esfuerzo vs deformación unitaria	
Esfuerzo Promedio de experimentación (MPa)	14,08
Esfuerzo de simulación (MPa)	11,81
Deformación unitaria de experimentación (mm/mm)	0,013
Deformación unitaria de simulación (mm/mm)	0,08

Elaborado por: Juan Sosa

De forma similar se establece los valores de variación que existe entre valores del experimento y valores de origen del material que se utilizó; así como también se establece los valores de variación que existe entre la simulación y los valores de origen del material que se empleó. Valores que serán utilizados más adelante para el estudio de comparación respectivo y que es objeto del presente trabajo de investigación, como se detalla en la Tabla 10 y Tabla 11 a continuación.

Tabla 10. Valores de variación datos experimentales vs datos de origen

Valores de variación esfuerzo vs deformación	
Esfuerzo promedio de experimentación (MPa)	14,08
Esfuerzo filamento de origen (MPa)	15,60
Deformación unitaria de experimentación (mm/mm)	0,013
Deformación unitaria filamento de origen (mm/mm)	0,053

Elaborado por: Juan Sosa

Tabla 11. Valores de variación datos de simulación vs datos de origen

Valores de variación esfuerzo vs deformación	
Esfuerzo máximo de simulación (MPa)	11,81
Esfuerzo filamento de origen (MPa)	15,60
Deformación unitaria de simulación (mm/mm)	0,08
Deformación unitaria filamento de origen (mm/mm)	0,053

Elaborado por: Juan Sosa

CAPÍTULO III

VALIDACIÓN DE DATOS OBTENIDOS

Para realizar la validación de datos, se contrastará los datos originales de las propiedades mecánicas del filamento de origen con los valores promedio obtenidos del ensayo y los valores obtenidos de la simulación, para verificar las variaciones que presenta el material utilizado luego de la experimentación; y, establecer el valor del error que existe entre el ensayo y la simulación, como a continuación se indica en la Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14 de donde se realiza la validación.

3.1 Comparación datos

Tabla 12. Datos filamento de origen [3].

Esfuerzo (Mpa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de Young (Mpa)
15,60	0,053	2400

Tabla 13. Datos obtenidos del ensayo a tracción

	Material	Área transversal (mm²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de Young ó elasticidad (Mpa)
Probeta 1	ABS	50,31	773,87	15,44	0,0064	2423,50
Probeta 2	ABS	50,54	1109,22	21,95	0,0125	1755,10
Probeta 3	ABS	53,20	332,77	6,25	0,0170	933,63
Probeta 4	ABS	53,20	201,21	3,78	0,0210	646,76
Probeta 5	ABS	53,20	810,00	15,22	0,0110	1520,18
Probeta 6	ABS	58,10	1271,74	21,90	0,0100	2045,90

Elaborado por: Juan Sosa

Tabla 14. Datos obtenidos del ensayo de simulación

Material	Área transversal (mm²)	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (Mpa)	Deformación unitaria (mm/mm)	Módulo de Young ó elasticidad (Mpa)
ABS	52,12	749,80	11,81	0,08	1554,2

Elaborado por: Juan Sosa

3.1.1 Análisis de resultados

Para realizar el análisis de resultados, se compara entre los valores del esfuerzo del filamento de origen, el valor promedio del esfuerzo obtenido de la experimentación y el valor del esfuerzo obtenido de la simulación como se detalla en la Tabla 15 a continuación.

Tabla 15. Análisis de resultados

Esfuerzo filamento de origen (MPa)	Esfuerzo máximo promedio experimental (MPa)	Esfuerzo máximo de simulación (MPa)
15,60	14,08	11,81

Elaborado por: Juan Sosa

Al contrastar la información sobre datos de esfuerzo de origen, esfuerzo promedio máximo experimental y esfuerzo máximo de simulación se puede determinar lo siguiente:

- El valor obtenido del promedio de esfuerzos de 14,08 MPa de la experimentación es menor al valor de 15,60 MPa del filamento de origen, debido a que el producto fabricado con este material es mediante el proceso de material fundido por deposición, el cual varía sus propiedades mecánicas de origen al realizar el ensayo a tracción.
- El valor obtenido de esfuerzo de 11,81 MPa de la simulación es menor al valor de 15,60 MPa del filamento de origen, debido a que los datos para realizar la simulación son establecidos de acuerdo con las características que adquiere el material de utilización luego de la experimentación.

De la misma forma para realizar el análisis de resultados de deformaciones unitarias, se compara entre los valores de deformación unitaria del filamento de origen, el valor promedio de deformación unitaria obtenido de la experimentación y el valor de deformación unitaria obtenido de la simulación.

Tabla 16. Valores de deformación de origen, experimental y simulación [4].

Deformación filamento de origen (mm/mm)	Deformación máxima promedio experimental (MPa)	Deformación máxima de simulación (mm/mm)
0,053	0,013	0,08

Elaborado por: Juan Sosa

Al evaluar la información sobre datos de deformación unitaria de origen, deformación unitaria máxima promedio experimental y deformación unitaria máxima de simulación se establece lo siguiente:

- El valor obtenido de deformación unitaria promedio de 0,013 (mm/mm) de la experimentación es menor al valor de 0,053 (mm/mm) correspondiente a la deformación unitaria de origen debido a que en el desarrollo experimental varía las propiedades mecánicas del material de origen al ser sometido a un alargamiento por medio de una fuerza externa de aplicación.

3.1.2 Cálculo de error entre ensayo y simulación

Para determinar el error del ensayo a tracción, se calcula entre el promedio de los esfuerzos obtenidos de la experimentación y el esfuerzo máximo obtenido de la simulación, que son medidos en Megapascuales.

Error del ensayo a tracción: (e)

$$e = \frac{\text{Valor experimental} - \text{Valor simulado}}{\text{Valor experimental}} \cdot 100$$

$$e = \frac{14,08 - 11,81}{14,08} \cdot 100$$

$$e = 16,12 \%$$

De la determinación del error entre el promedio de valores experimentales obtenidos para el esfuerzo y el valor de simulación obtenido para el esfuerzo, se puede establecer que el valor de 16,12% está dentro de los rangos aceptables para el esfuerzo que se encuentra en un valor establecido de 15,60 MPa para esta experimentación de acuerdo

con lo que establece la norma ASTM D638, que indica para este tipo de experimentos valores entre el 10% y 22% de error, cuando se desarrolla un ensayo a tracción empleando material ABS.

La determinación del error entre los valores que se obtienen en una experimentación y los valores que se obtienen en una simulación esta en función del material de utilización y de la norma de aplicación cuando se desarrolla un ensayo de tracción.

3.1.3 Cálculo de pérdida de propiedades filamento de origen

Para establecer el cálculo de la pérdida (p) de las propiedades mecánicas entre los valores que se obtienen de la experimentación para el esfuerzo y los valores del esfuerzo del filamento de origen se establece mediante la siguiente relación:

$$p = \frac{\text{Valor teórico} - \text{Valor experimental}}{\text{Valor teórico}} \cdot 100$$

$$p = \frac{15,60 - 14,08}{15,60} \cdot 100$$

$$p = 9,74 \%$$

De la determinación de pérdidas de propiedades mecánicas del filamento de origen al realizar la experimentación, se concluye que el valor de 9,74% que se calculó está dentro del rango permitido porque la norma de utilización ASTM D638 establece que una pérdida no debe exceder el valor del 15 % de las propiedades del filamento de origen para ensayos de tracción cuando se utiliza material ABS.

Las pérdidas que se producen en un ensayo a tracción dependen del material de utilización y de la norma de aplicación por lo que estos valores varían dependiendo de las características del material que se utilice para este tipo de experimentación.

3.2 Costos de ejecución del Proyecto

Para el desarrollo del presente proyecto de titulación se establece aranceles de costos directos y costos indirectos donde se determina insumos, herramientas, equipos y mano de obra utilizados para su ejecución.

3.3 Costos directos

Son los costos que se relacionan a la fabricación de la materia prima y mano de obra.

3.3.1 Costos de materia prima

Se refiere al material empleado para la fabricación de las probetas, como se detalla en la Tabla 17.

Tabla 17. Costo materia prima

Cantidad	Descripción	Costo Unitario	Costo Total
		USD	USD
1	Rollo de material ABS	60	60
TOTAL			60

Elaborado por: Juan Sosa

3.3.2 Costos de mano de obra

Se refiere a la utilización de la fuerza física y mental durante la fabricación y transformación de la materia prima, como se detalla en la tabla 18.

Tabla 18. Costo mano de obra

Cantidad	Detalle	Proceso	Horas	Costo hora máquina USD	Costo total USD
1	Máquina de impresión 3D	6 impresiones de probetas	6	20	120
1	Máquina de ensayos de tracción	Tracción de probetas	6	30	180
1	Probeta	Diseño de probeta CAD	1	20	20
1	Simulación	Simulación más programación	6	30	180
TOTAL USD				500	

Elaborado por: Juan Sosa

En la tabla 19 se indica un resumen de los costos directos.

Tabla 19. Resumen costos directos

Detalle	Valor Total USD
Materia prima	60
Mano de obra	500
TOTAL	560

Elaborado por: Juan Sosa

3.4 Costos indirectos

Son los costos que no refiere a mano de obra, material y equipos utilizados, como se indica en la tabla 20.

Tabla 20. Costos indirectos

Cantidad	Detalle	Costo Unitario USD	Costo total USD
4	Movilizaciones diarias a la Universidad (4 meses)	0,25	120
100	Copias de investigación bibliográfica	0,02	2
300	Impresiones de avance proyecto técnico	0,05	15
1	Imprevistos y otros	50	50
	TOTAL		187

Elaborado por: Juan Sosa

3.5 Costo total del proyecto

Resulta de la suma de costos directos e indirectos, como se detalla en la Tabla 21.

Tabla 21. Costo total del proyecto

Detalle	Valor USD
Costos directos	560
Costos indirectos	187
COSTO TOTAL	747

Elaborado por: Juan Sosa

CONCLUSIONES

- La realización del ensayo a tracción se establece de acuerdo con la norma de aplicación, en este caso se utilizó la norma ASTM D638 en concordancia al material de utilización, para el diseño y posterior fabricación de los productos que son sometidos a tensión mediante una metodología de aplicación para verificar las variaciones de propiedades mecánicas en el momento que se desarrolla la experimentación.
- En el desarrollo y ejecución del ensayo a tracción, se obtiene un valor máximo promedio de experimentación para el esfuerzo de 14,08 MPa; y, un valor máximo de simulación para el esfuerzo de 11,81 MPa, con los cuales se determina el error entre el ensayo y la simulación, donde se establece que el valor de 16,12 % que se calculó como error, está dentro del rango de valores aceptables y que cumple el requisito para la validación de los datos obtenidos en la experimentación y en la simulación. Además, el valor de deformación unitaria de 0,011 mm/mm y el valor de Módulo de Young de 1554,2 MPa son los datos que se obtienen del promedio de los seis ensayos que se realizan tanto para la deformación unitaria, así como para el módulo de elasticidad.
- Las gráficas obtenidas esfuerzo vs deformación mediante la aplicación de software de computación en el instante de realizar la experimentación, se observa de forma clara en cada una de las seis gráficas del ensayo a tracción la zona elástica y la zona plástica bien definidas del material ABS utilizado previo a su rotura.
- Los datos obtenidos para determinar la variación de propiedades que existe entre los valores del material de esfuerzo de origen de 15,60 MPa con los valores que se obtiene de esfuerzo promedio de 14,08 MPa de experimentación y valor de esfuerzo de simulación de 11,81 MPa, representan la pérdida de las características del material empleado en el ensayo a tracción cuando se somete a esfuerzos de tensión. Datos que entran en el rango de valores aceptables porque no sobrepasa el valor establecido de 22% de error permitido. De la misma manera el valor de pérdida de

9,74% obtenido no sobrepasa el 15% como establece la norma ASTM D638 cuando se utiliza material ABS en un ensayo a tracción.

- La realización de este tipo de experimentación en estos materiales es viable ya que involucra una inversión de costos directos de 560 USD y costos indirectos de 187 USD con lo que se establece de esa forma un costo total de 747 USD, que es un costo asequible para realizar la experimentación cuando se emplea material ABS.

RECOMENDACIONES

- Investigar la aplicación de un ensayo a tracción mediante la utilización de otros materiales termoplásticos diferentes del ABS, que existe en ingeniería y verificar la aplicación de esfuerzos de tensión, en otros de similares características del material que se utilizó y determinar la variación de propiedades mecánicas luego de una experimentación.
- Realizar estudios de laboratorio estableciendo parámetros de esfuerzo, deformación y elasticidad en condiciones ambientales diferentes de lo que ya se desarrolló y establecer nuevas directrices del proceso para realizar un ensayo a tracción de material ABS para una nueva experimentación.
- Determinar las condiciones mediante las cuales se obtendrán las gráficas características esfuerzo vs deformación de un ensayo a tracción en el momento que se desarrolle la experimentación con el empleo de material ABS.
- Conocer equipos, dispositivos y programas para experimentar ensayos a tracción en material ABS y obtener de manera más aproximada valores de las variables que se determinan en un ensayo a tracción, donde se somete a productos fabricados a esfuerzos de tensión y realizar su comparación mediante una simulación.
- Motivar y desarrollar investigaciones experimentales en el campo de los materiales polímeros especialmente en ABS, PLA y PVC con el fin de determinar la resistencia mecánica de cada uno de los materiales antes citados y establecer mejoras en el proceso de impresión 3D.
- Experimentar un nuevo ensayo de tracción con un número mayor al establecido por la norma ASTM D638, la cual determina seis muestras. Pero para realizar una experimentación con mayor aproximación a las propiedades mecánicas se recomienda realizar el ensayo con diez muestras del producto fabricado y poder realizar un mejor análisis de propiedades del material ABS empleado.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Siim y Co, «Propiedades físicas y mecánicas de los materiales,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrilo_butadieno_estireno.
- [2] «Textos científicos,» [En línea]. Available: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/abs>.
- [3] «Tecnología de los plásticos,» [En línea]. Available: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html>.
- [4] «Curso de fundamentos de ciencia de materiales,» [En línea]. Available: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_3.html.
- [5] «Acrilonitrilo butadieno estireno,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Acrilonitrilo_butadieno_estireno.
- [6] «Politetrafluoroetileno (PTFE),» [En línea]. Available: <http://www.general-aislante.com.ar/teflon.htm#aplicaciones:>.
- [7] «Standard Test Method for tensile properties of plastics,» [En línea]. Available: <file:///F:/ASTM/ASTM%20D638-02a.pdf>.
- [8] «Practice for Conditioning Plastics for Testing,» [En línea]. Available: <file:///F:/ASTM/ASTM%20D638-02a.pdf>.
- [9] «Resistencia de materiales,» [En línea]. Available: <https://ibiguridp3.wordpress.com/res/tracc/>.
- [10] M. Stopka y R. Kóhar, «Dynamical Analysis of 3D Printer's Powertrain,» *Procedia Engineering*, vol. 192, pp. 845-850, 2017.
- [11] [En línea]. Available: <file:///E:/TESIS/Tesis%20Poli.pdf>.
- [12] Frenchy y Jazzy, Dirección, Tipos de impresión 3D. [Película]. Ecuador: Nahme Pineda, 2016.
- [13] «Resistencia de materiales,» [En línea]. Available: <https://ibiguridp3.wordpress.com/res/tracc/>.

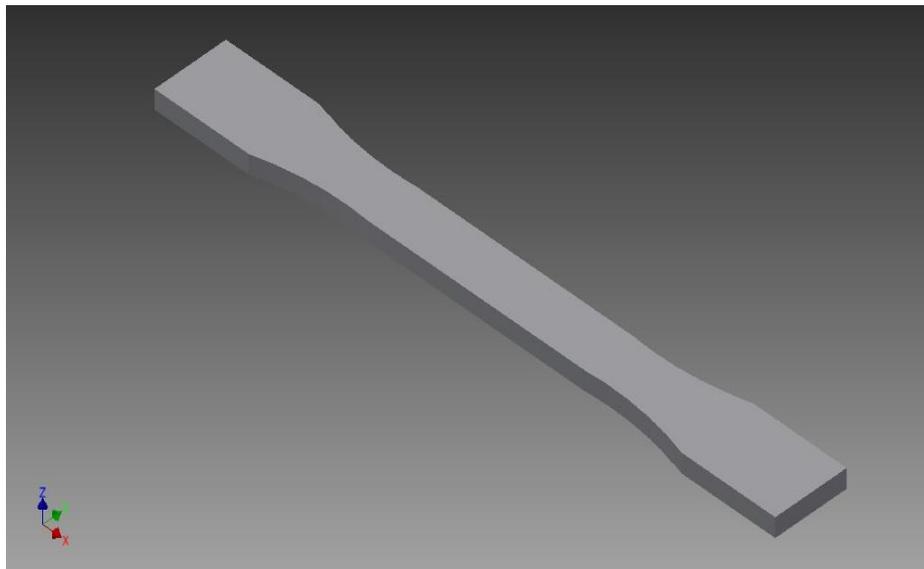
ANEXOS

ANEXO 1

MÁQUINAS Y SOFTWARE UTILIZADOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

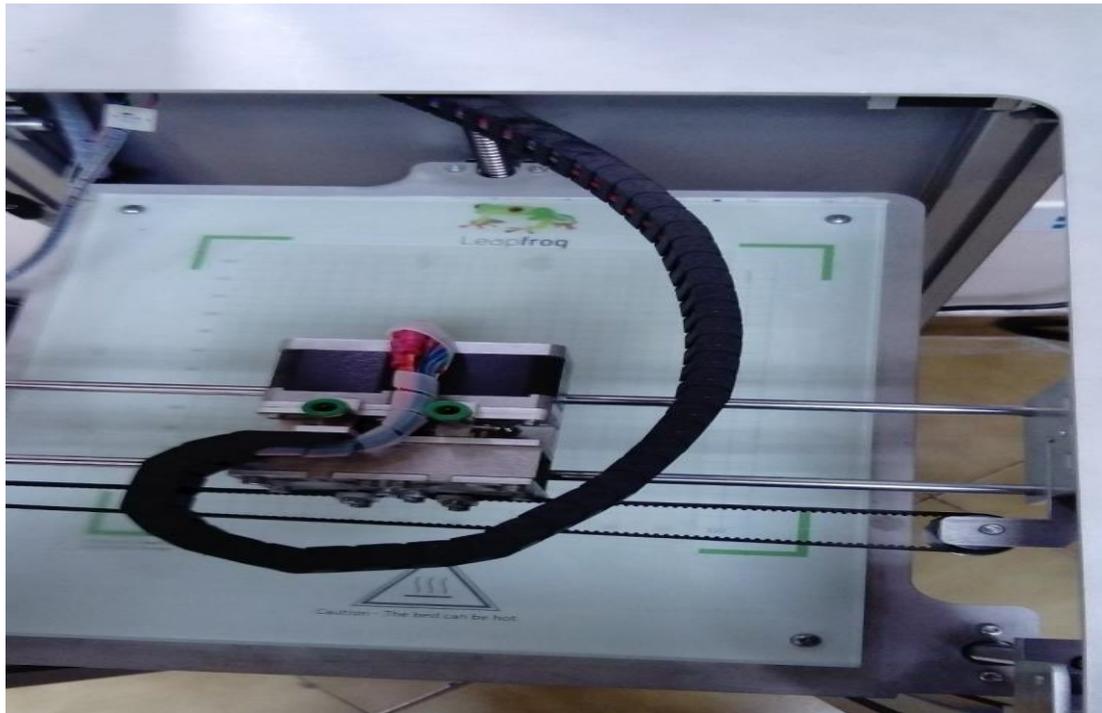


Máquina universal y computador para ensayos de tracción. Elaborado por: Juan Sosa

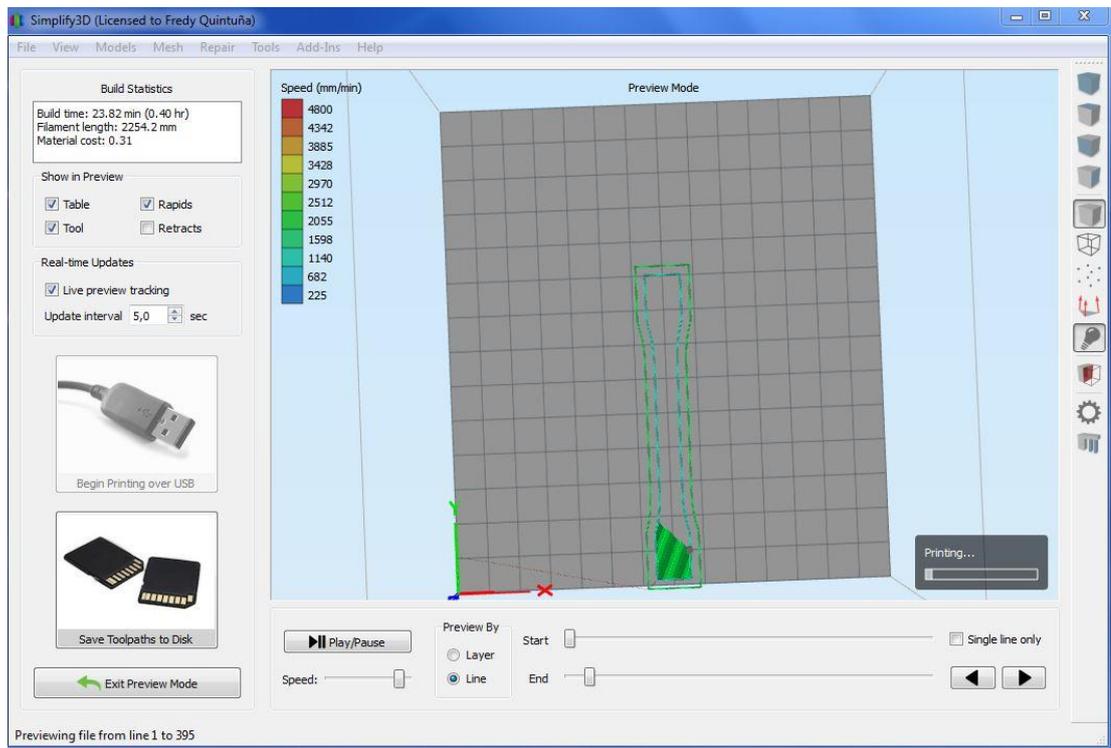


Diseño de probeta en software inventor y según norma ASTM D638, tipo I.

Elaborado por: Juan Sosa



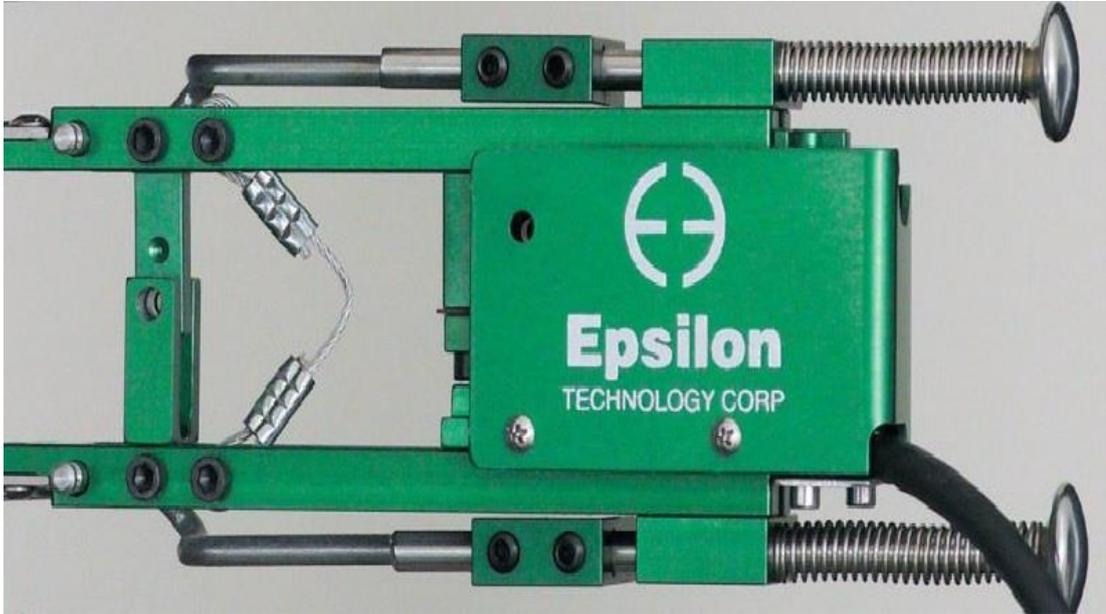
Impresora 3D Leapfrog. Elaborado por: Juan Sosa



Programa de aplicación para impresión, Simplify 3D. Elaborado por: Juan Sosa

ANEXO 2

DISPOSITIVO EMPLEADO Y PROBETAS FABRICADAS



Extensómetro biaxial de la longitud calibrada de probeta. Elaborado por: Juan Sosa



Probetas fabricadas de material ABS. Elaborado por: Juan Sosa